

万水  
ANSYS 技术丛书

# ANSYS

结构有限元  
高级分析方法与范例应用



尚晓江 邱峰 等编著  
赵海峰 李文颖



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

4

责任编辑：杨元泓 加工编辑：王昱皓 封面设计：新悦翔

## 万水 ANSYS 技术丛书

《ANSYS 7.0 基础教程与实例详解》

《APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例》

《ANSYS 土木工程应用实例》

ANSYS 9.0 经典产品基础教程与实例详解

ANSYS 9.0 经典产品高级分析技术与实例详解

ANSYS 9.0 WorkBench 产品技术与实例详解

ANSYS 9.0 工程结构、热及耦合分析技术与实例详解

ANSYS 9.0 工程流体及耦合分析技术与实例详解

ANSYS 9.0 工程电磁及耦合分析及实例详解

ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用

ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例

ANSYS/LS-DYNA 9.0 显式动力分析实例详解

ANSYS 在机械及化工装备中的应用



北京万水电子信息有限公司

Beijing Multi-Channel Electronic Information Co., Ltd.

地址：北京市海淀区长春桥路5号新起点嘉园  
4号楼1706室

电话：(010) 8256.2819 (总机)

传真：(010) 8256.4371

邮编：100089

E-mail: mchannel@263.net

ISBN 7-5084-3338-6



9 787508 433387 >

ISBN 7-5084-3338-6

定价：45.00 元

万水 ANSYS 技术丛书

# ANSYS 结构有限元高级分析方法 与范例应用

尚晓江 邱峰 赵海峰 李文颖 等编著

中国水利水电出版社

## 内 容 提 要

本书将结构有限元分析的基本力学概念与 ANSYS 实践紧密结合,通过大量生动的原创性分析实例,向读者系统全面地介绍利用 ANSYS 进行各类结构分析的方法。本书内容选择上照顾到科研以及工程计算两方面读者的需要,涉及到各类常见工程结构及构件的各种分析问题以及一些力学过程或现象的分析专题。通过本书的学习,可使读者迅速地提高自身的 ANSYS 操作水平以及利用有限元技术进行结构分析的功底,从而具备在相关专业领域中进行高级结构分析的能力。

本书适合于作为土木、机械、航空、力学等相关专业研究生或高年级本科生学习结构数值分析及 ANSYS 软件应用课程的主要学习参考书。对从事结构分析的工程技术人员也具有一定的参考价值。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用 / 尚晓江等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2005

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 7-5084-3338-6

I. A… II. 尚… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS IV.0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 119320 号

书 名	ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用
作 者	尚晓江 邱峰 赵海峰 李文颖 等编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 25.25 印张 617 千字
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

目前,很多高校的相关理工科专业(土木、机械、航空、力学等)都将有限单元法作为必修的专业课。但在学了有限元课程之后,还必须熟练地掌握相关的有限元分析软件,才能将有限元基本理论有效应用到工程问题的分析中。

作为著名的通用有限元分析软件,ANSYS 因其强大的功能而受到越来越多的结构分析及其他相关专业科研与工程计算人员的青睐,可以说,ANSYS 是架设于有限元理论和实际工程结构计算问题之间的桥梁。

本书的写作特色是将结构有限元分析的基本力学概念与 ANSYS 实践紧密结合,通过大量生动的原创性分析实例,向读者系统全面地介绍 ANSYS 结构分析的方法。尽量照顾到科研以及工程计算两方面读者的需要。本书在内容组织上分为三篇:

## 第一篇: ANSYS 有限元分析基础

内容包括桁架结构、梁系结构、弹性平面问题、轴对称问题、空间问题、板壳结构等各种弹性结构的有限元静力分析问题,本篇列举了 7 个典型的工程实例。

## 第二篇: ANSYS 高级结构分析

内容包括结构非线性分析、结构的动力分析、结构的稳定性分析、结构最优化设计以及子结构技术的应用等 5 个结构分析高级专题,本篇列举了 11 个典型的工程实例。

## 第三篇: 工程范例精选

内容包括三个精选的很有代表性的工程结构综合分析范例,即:海洋钢导管架石油平台结构、框架剪力墙高层建筑结构以及施威德勒型球面网壳结构的 ANSYS 分析。每个问题均进行了一系列相关的分析,帮助读者将 ANSYS 结构分析方法融会贯通。

建议读者不妨在学习有限元课程时,把 ANSYS 作为一个数值仿真的实验室,通过大量的同步上机实践(用本书的例题即可),亲身体会结构有限元分析的计算机实现过程。我们认为只要基本概念清楚,基本操作熟练,就不难结合自身的专业背景和本书介绍的基本操作方法,由浅入深地进行一些有特色的专业问题的分析。相信通过本书的学习,读者定能迅速地提高自身的 ANSYS 操作水平以及利用有限元技术进行结构分析的功底,从而具备在相关专业领域中从事高级结构分析的能力。

本书适合于作为土木、机械、航空、力学等相关专业研究生或高年级本科生学习结构数值分析及 ANSYS 软件应用课程的主要学习参考书。对从事结构分析的工程技术人员,也是很有价值的参考资料。

本书由中科院力学所尚晓江、邱峰、赵海峰、李文颖等负责编写。参加编写和录入工作的还有魏久安、苏建宇、张骥、潘冠群、谢季佳、左树春、冯丽萍、刘金兴、卢靖、蒋迪、李德聪、袁志达、张自兵、王艺、王化锋、陈小亮、杨海波、宋谦、杨伟、石伟兴、聂慧萍、史雪松、张永芳、王惠平等。同济大学结构工程专业研究生宋谦向作者提供了关

于空间结构分析的资料，中科院力学所的邓守春博士、ANSYS-China 北京办事处龙丽平博士等在本书编写过程中帮助作者解决了一些具体的技术问题，一并在在此表示感谢。此外，还要感谢中国水利水电出版社编辑人员为本书出版而付出的辛勤劳动。

由于时间仓促和编写者认识水平的局限，书中不当和错误之处在所难免，欢迎读者朋友批评指正。作者联系方式：

shj\_cas@sina.com, zhf@lnm.imech.ac.cn

编 者

2005 年 7 月

# 中国水利水电出版社隆重推出

## 项目开发风暴系列

经典项目 完整案例 提供典型行业解决方案

### 拥有此套书

犹如身边有位资深的技术和管理专家辅助左右，  
让你管理和开发中大型软件时得心应手



每个案例都是精挑细选

尽可能使用到所讨论语言的主要技术特征

提供技术要点和难点分析辅助分析资料和翔实的注释信息

# 中国水利水电出版社隆重推出

## 万水计算机实用技术大全系列



- 精选500个Visual C++编程技巧。
- 全方位直击Visual C++编程技术精要，涵盖MFC和NET精髓。
- 以问答形式进行讲解。
- 以编程实例形式讲解加以明证。

罗斌 等编著

ISBN 7-5084-2585-5

定价：48.00元



- 网站建设一线的精英，最新的实践经验与知识积累
- 共同领略网站建设的玄机奥妙，轻松漫步互联网
- 精心收集的实用资料，网站实现过程分门别类的说明
- 初学者的借鉴技术手册，网站开发者的高级指南

申朝阳 宋颜浩 主编

ISBN 7-5084-2618-5

定价：95.00元



- 精选250个经典实例，内容精彩
- 图形图像、网络通信、数据库系统开发等一网打尽
- 汇聚高手智慧，提升编程境界

罗斌 等编著

ISBN 7-5084-2812-9

定价：48.00元



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

地址：北京市三里河路6号 邮编：100044

电话：(010)63202266(总机) (010)68331835(营销中心)

网址：www.waterpub.com.cn

E-mail: sales@waterpub.com.cn



# 目 录

前言

## 第 1 篇 ANSYS 结构有限元分析基础

<b>第 1 章 ANSYS 结构有限元分析概述</b> .....	2
1.1 有限元基本思想及其 ANSYS 实现过程 .....	2
1.1.1 结构有限元分析的基本思想 .....	2
1.1.2 ANSYS 结构有限元分析流程 .....	6
1.2 ANSYS 基本操作精要 .....	9
1.2.1 ANSYS 的两种操作方式与基本程序架构 .....	9
1.2.2 ANSYS 的 GUI 操作方法精要 .....	10
1.2.3 ANSYS 批处理操作与 APDL 语言 .....	23
1.3 ANSYS 工程结构分析的演示性例题 .....	29
1.3.1 GUI 中的分析过程 .....	29
1.3.2 批处理分析过程 .....	33
<b>第 2 章 桁架杆系有限元分析及 ANSYS 实例</b> .....	35
2.1 桁架杆系的有限元分析概要 .....	35
2.2 ANSYS 中提供的二力杆单元 .....	38
2.2.1 Link1 单元特性简介 .....	38
2.2.2 Link8 单元特性简介 .....	39
2.2.3 Link10 单元特性简介 .....	40
2.3 应用实例：平板网架结构的静力分析 .....	42
<b>第 3 章 梁系结构分析方法及 ANSYS 实例</b> .....	51
3.1 梁系结构有限元分析提要 .....	51
3.2 ANSYS 中的梁单元 .....	52
3.2.1 BEAM3 单元特性介绍 .....	52
3.2.2 BEAM4 单元特性介绍 .....	54
3.2.3 BEAM188 和 BEAM189 梁单元特性简介 .....	56
3.3 分析实例：建筑井式斜梁格的分析 .....	58
<b>第 4 章 弹性平面问题的有限元分析及 ANSYS 算例</b> .....	68
4.1 弹性平面问题有限元分析的基本方法 .....	68
4.2 ANSYS 提供的平面问题单元 .....	70
4.3 分析实例：岩体中的公路隧洞工程 .....	73

<b>第 5 章 轴对称问题的有限元分析及 ANSYS 算例</b> .....	<b>82</b>
5.1 ANSYS 轴对称问题有限元分析提要 .....	82
5.2 分析实例：厚壁空心球的轴对称分析 .....	83
<b>第 6 章 三维实体结构的 ANSYS 分析及算例</b> .....	<b>95</b>
6.1 三维实体结构 ANSYS 有限元分析提要 .....	95
6.2 分析实例：工业厂房牛腿柱的受力分析 .....	96
<b>第 7 章 板壳结构的 ANSYS 分析及算例</b> .....	<b>108</b>
7.1 板壳结构 ANSYS 有限元分析提要 .....	108
7.2 应用实例：圆柱壳屋面结构的静力分析 .....	110

## 第 2 篇 ANSYS 结构分析高级专题

<b>第 8 章 ANSYS 动力有限元分析</b> .....	<b>119</b>
8.1 动力分析综述 .....	119
8.1.1 结构固有振动特性的分析 .....	120
8.1.2 谐响应分析 .....	121
8.1.3 瞬态动力学分析 .....	122
8.1.4 谱分析 .....	122
8.2 结构振动模态分析的过程和实例 .....	122
8.2.1 模态分析操作过程 .....	122
8.2.2 预应力模态分析 .....	126
8.2.3 模态分析实例：预应力简支梁的模态分析 .....	126
8.3 谐响应分析的过程和实例 .....	133
8.3.1 完全法谐响应分析操作过程 .....	133
8.3.2 缩减法谐响应分析过程 .....	136
8.3.3 模态叠加法谐响应分析 .....	138
8.3.4 谐响应分析实例：悬索拱桥的谐响应分析 .....	139
8.4 瞬态分析的过程和实例 .....	147
8.4.1 完全法瞬态动力学分析 .....	147
8.4.2 缩减法瞬态动力学分析 .....	151
8.4.3 模态叠加法瞬态动力学分析 .....	151
8.4.4 瞬态分析实例：吊车梁在移动载荷作用下的响应分析 .....	153
8.5 谱分析的过程和实例 .....	158
8.5.1 单点响应谱分析 .....	159
8.5.2 随机振动分析 .....	162
8.5.3 单点响应谱分析实例：悬索拱桥地震载荷响应 .....	164
<b>第 9 章 利用 ANSYS 进行结构非线性分析</b> .....	<b>169</b>
9.1 ANSYS 结构非线性分析概述 .....	169

9.1.1	结构非线性问题的三种类型 .....	169
9.1.2	非线性有限元问题的一般求解方法 .....	171
9.2	ANSYS 结构非线性分析的过程与选项 .....	174
9.3	接触问题的分析方法 .....	180
9.3.1	接触问题概述 .....	180
9.3.2	ANSYS 的接触分析功能 .....	180
9.3.3	ANSYS 接触分析的一般过程 .....	181
9.4	工程实例 1: 油罐底效应的简化分析 .....	182
9.5	工程实例 2: 钢筋混凝土梁的弹塑性分析 .....	191
9.5.1	SOLID65 单元简介及问题分析规划 .....	191
9.5.2	建立分析模型 .....	192
9.5.3	分析及后处理 .....	202
9.6	工程实例 3: 插销拨拉过程的接触分析 .....	211
<b>第 10 章</b>	<b>结构的稳定性分析方法及 ANSYS 范例 .....</b>	<b>225</b>
10.1	ANSYS 结构稳定性分析的基本概念 .....	225
10.2	圆柱面屋盖的特征值屈曲分析 .....	226
10.3	工字梁的弯扭屈曲分析 .....	229
10.3.1	建立分析模型 .....	229
10.3.2	特征值屈曲分析与结果显示 .....	235
10.3.3	非线性屈曲分析与结果评价 .....	237
<b>第 11 章</b>	<b>ANSYS 结构最优化设计 .....</b>	<b>243</b>
11.1	ANSYS 优化设计问题的数学表述与一般流程 .....	243
11.2	分析实例: 平板网架结构的优化设计 .....	245
<b>第 12 章</b>	<b>子结构技术简介 .....</b>	<b>261</b>
12.1	子结构的概念 .....	261
12.2	子结构分析的步骤 .....	262
12.2.1	生成部分 .....	263
12.2.2	使用部分 .....	265
12.2.3	扩展部分 .....	266
12.3	子结构分析实例 .....	267
12.3.1	问题描述 .....	267
12.3.2	分析过程 .....	267
<b>第 3 篇 工程范例精选</b>		
<b>第 13 章</b>	<b>框架—剪力墙结构的分析 .....</b>	<b>281</b>
13.1	框架—剪力墙结构简介 .....	281
13.1.1	框架—剪力墙基础知识 .....	281

13.1.2	分析对象介绍 .....	282
13.2	框架—剪力墙结构的模型建立 .....	283
13.2.1	结构建模的总体规划 .....	283
13.2.2	几何模型的建立 .....	284
13.2.3	划分网格 .....	287
13.3	重力载荷作用下的结构响应 .....	289
13.3.1	计算重力载荷作用下的结构响应 .....	289
13.3.2	观察变形位移和应力分布 .....	290
13.4	风载荷作用下的结构响应 .....	292
13.4.1	风载荷简介 .....	292
13.4.2	计算风载荷作用下的结构响应 .....	293
13.4.3	观察变形位移和应力分布 .....	294
13.5	结构模态分析 .....	298
13.5.1	计算模态解 .....	298
13.5.2	结果观察与分析 .....	298
13.6	地震作用下的结构响应 .....	300
13.6.1	地震载荷简介 .....	300
13.6.2	计算地震作用瞬态解 .....	300
13.6.3	观察地震作用结构响应 .....	301
13.7	单元实常数表 .....	305
13.8	模型建立命令流文件 .....	305
13.9	地震加速度数组 .....	310
<b>第 14 章</b>	<b>海洋石油平台结构的动力分析 .....</b>	<b>315</b>
14.1	海洋平台结构简介 .....	315
14.1.1	海洋平台的发展历史及应用背景 .....	315
14.1.2	海洋石油平台的结构特点 .....	316
14.2	平台结构的模型建立 .....	316
14.2.1	结构建模的总体规划 .....	317
14.2.2	几何模型的建立 .....	317
14.2.3	划分网格 .....	320
14.3	海洋平台模态分析 .....	322
14.3.1	计算模态解 .....	322
14.3.2	结果观察与分析 .....	323
14.4	海洋平台谐响应分析 .....	325
14.4.1	计算谐响应解 .....	325
14.4.2	结果观察与分析 .....	327
14.5	冰载荷作用下海洋平台结构响应 .....	329

14.5.1	获得瞬态分析解 .....	329
14.5.2	观察结果 .....	331
14.6	波浪载荷作用下海洋平台随机分析 .....	333
14.6.1	波浪载荷简介 .....	334
14.6.2	获得谱解 .....	334
14.6.3	合并模态 .....	337
14.6.4	计算响应的功率谱密度 .....	337
14.7	单元实常数表 .....	340
14.8	模型建立命令流文件 .....	340
<b>第 15 章</b>	<b>大跨空间结构的建模与分析 .....</b>	<b>353</b>
15.1	大跨空间结构的 ANSYS 建模与分析概述 .....	353
15.2	一个施威德勒型球面网壳的建模过程详解 .....	355
15.3	网壳结构的固有振动特型分析 .....	360
15.4	网壳的特征值屈曲分析 .....	362
15.5	考虑初始缺陷的非线性屈曲分析 .....	366
<b>附录 A</b>	<b>部分结构单元的形函数 .....</b>	<b>370</b>
A.1	一维单元 .....	370
A.2	二维单元 .....	370
A.3	三维单元 .....	371
<b>附录 B</b>	<b>ANSYS 结构分析常用命令参考 .....</b>	<b>373</b>

# 第 1 篇 ANSYS 结构有限元分析基础

---

## 本篇学习导引

由于有限元仿真分析在工程技术中应用的广泛性，目前很多高校的理工科相关专业（土木、机械、航空、力学等）都将有限单元法作为必修的专业课程。但是出现了一个问题，即理论学习和解决工程问题之间的脱节。如果学了有限元之后，要达到利用它来解决工程实际问题的目的，还必须熟练地掌握至少一种有限元分析软件，否则无法将有限元技术的基本理论有效地应用于工程问题的分析中去。

作为著名的通用有限元分析软件，ANSYS 因其强大的仿真分析功能而受到越来越多的结构分析以及其他相关专业科研与工程计算人员的青睐。可以说学好了 ANSYS，就是搭起了有限元技术和解决各种工程结构计算问题之间的桥梁。读者不妨在学习有限元课程时，把 ANSYS 作为一个数值仿真的实验室，通过大量的同步上机实践（用本书的例题即可），亲身体会结构有限元分析的实现过程。相信通过本篇的学习，读者定能极大地提高自身的 ANSYS 操作能力以及利用有限元技术进行结构分析的实践水平，为高级有限元结构分析以及具体专业领域的工程问题的解决练就扎实的基本功。

本篇结合有限元技术处理工程问题的基本思路及其在 ANSYS 中的具体实践，对各种不同的结构有限元分析问题的 ANSYS 实现方案进行了详细的讲解，同时配置了相当数量的分析实例，旨在帮助读者结合自身的有限元知识，由浅入深地掌握各种工程结构类型在 ANSYS 中进行分析的过程。本篇涉及到了桁架结构、梁系结构、平面问题、轴对称问题、三维问题、板壳结构等各种弹性结构的有限元静力分析问题。本篇中还列举了相当数量的典型工程实例。

# 第 1 章 ANSYS 结构有限元分析概述

## 📖 本章导读

有限元分析软件的作用在于，它架起了有限元方法与工程结构计算机辅助分析之间的桥梁。有限元分析软件不同于一般的应用软件，它要求使用者不仅具有操作经验，而且对相关理论背景要有必要的了解，否则难以正确有效地利用软件解决各种实际工程问题。

本章围绕结构有限元分析的基本思想及其在 ANSYS 中实现的基本流程、基本操作进行讲解，旨在帮助读者建立 ANSYS 工程结构有限元分析的正确概念，对有限元方法的基本框架以及 ANSYS 程序的基本架构有一个清楚的认识。

本章包括如下的一些主题：

- 有限元基本思想及其 ANSYS 实现过程
- ANSYS 基本操作精要
- ANSYS 工程结构分析的演示性例题

## 1.1 有限元基本思想及其 ANSYS 实现过程

有限元法，又称有限单元法，是结构工程师和应用数学研究人员共同智慧的结晶。1956 年，Turner, Clough 等人首次将刚架分析的位移法推广到弹性力学平面问题，并应用于飞机结构的分析中。他们首次给出了三角形单元求解弹性平面应力问题的正确解答。1960 年，Clough 第一次提出“有限单元法”的名称。经过数十年的发展，有限单元法已经成为解决各类工程实际问题的有效途径。可供选用的单元类型、算法类型以及相关的计算机软件开发都发展到了前所未有的成熟水平。

有限单元法正在成为计算机辅助设计以及计算机辅助制造的重要组成部分，有限元理论及相关软件的应用也正在成为越来越多理工科专业的必修或选修课程。

### 1.1.1 结构有限元分析的基本思想

本节旨在帮助读者系统条理地了解结构有限单元法的基本思想，为此，首先来介绍一些相关的基本概念。

#### ➤ 弹簧 (SPRING):

弹簧作为力学分析中的最基本元件之一，其特性是在一定外力作用下将产生变形。如果作用力不超过弹簧的弹性极限，则撤除作用力之后弹簧的变形可以完全消失，这种特性在力学中被称为弹性；相反，如果作用力超过其弹性限度，即使作用力完全撤除也将形成一定的永久变形。大量实验证实，在弹性限度内，弹簧的弹力  $F$  与其长度的变化量  $\Delta l$  成正比，这一特性被称为 Hooke 定律，是线性弹性力学学科体系（包括弹性结构分析）的理论基础：

$$F = k\Delta l$$

其中，比例系数  $k$  称为弹簧的刚度（或劲度）系数，表示单位伸长（或缩短）引起的弹簧内力

的绝对值。

对于多个弹簧并联组成的弹簧，其刚度系数等于各弹簧刚度系数之和，这一点可以从图 1-1 所示的简单弹簧并联模型中清楚地得出。

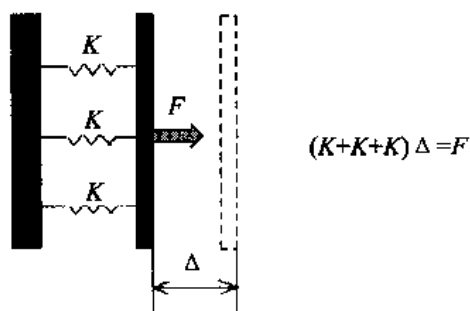


图 1-1 简单弹簧并联模型示意图

并联弹簧的模型，实际上已经包含了结构有限元计算的核心思想，即：各个弹性元件的刚度系数都作为系统刚度系数的一部分，各个元件共同抵抗外力的作用且变形保持协调（即几何条件），各个弹簧元件的内力之和等于作用外力（即平衡条件）。

#### ➤ 刚度 (STIFFNESS):

刚度是弹性结构分析中最为重要的概念之一，其实质就是弹簧的刚度系数。它可以是弹性结构中任意一点沿任意一个方向（平移或者转动）发生单位微小位移所需施加的力（力矩）。它表征结构或构件的力与变形之间的比例关系。

图 1-2 为一些结构的刚度其物理意义的图示。

在图 1-2 (a) 中，拉压杆的右端发生单位微小轴向位移时所需施加的力为  $F=EA/l$ ，因此该拉压杆的轴向抗拉（压）刚度为  $EA/l$ 。

在图 1-2 (b) 中，悬臂梁的自由端发生单位微小竖向挠度时，需要施加的端部集中力为  $F=3EI/l^3$ ，因此悬臂梁的抗侧向变形刚度为  $3EI/l^3$ 。

在图 1-2 (c) 中，一次超静定梁的固定端发生单位微小的转角时，需要施加的力矩为  $M=3EI/l$ ，因此该超静定梁固定端的平面内转动刚度为  $3EI/l$ 。

由上面这些例子可以看出，弹性结构中的元件（杆件、板件、壳体等）与弹簧的实质是相同的，其共同特征在于力与变形（作广义的理解）之间满足某种线弹性比例关系。

#### ➤ 单元 (ELEMENT):

单元是组成有限元分析模型的基本元件，一定数量的大小、形状和力学特性等各异的单元连接在一起就组成了结构有限元分析模型。通常意义下的结构单元由节点连接而成，具有各种几何外形（如点、直线段、三角形、六面体等）。

#### ➤ 节点 (NODE):

节点是构成单元的要素，不同类型的单元其节点具有不同意义和数量的运动学自由度。相邻的单元之间通过公共节点连接在一起（可以是只耦合线位移的铰接，也可为耦合线位移和转动的刚性连接），位移边界上的单元通过边界节点与地基相连。

#### ➤ 自由度 (DEGREE OF FREEDOM):

自由度指的是节点所具有的各种运动学自由度，例如：空间梁单元的一个节点具有 6 个



自由度，即 3 个平动自由度（一个轴向、两个横向线位移）和 3 个转动自由度（一个扭转角、两个弯曲转角），而平面三角形单元一个节点具有 2 个自由度（线位移）。

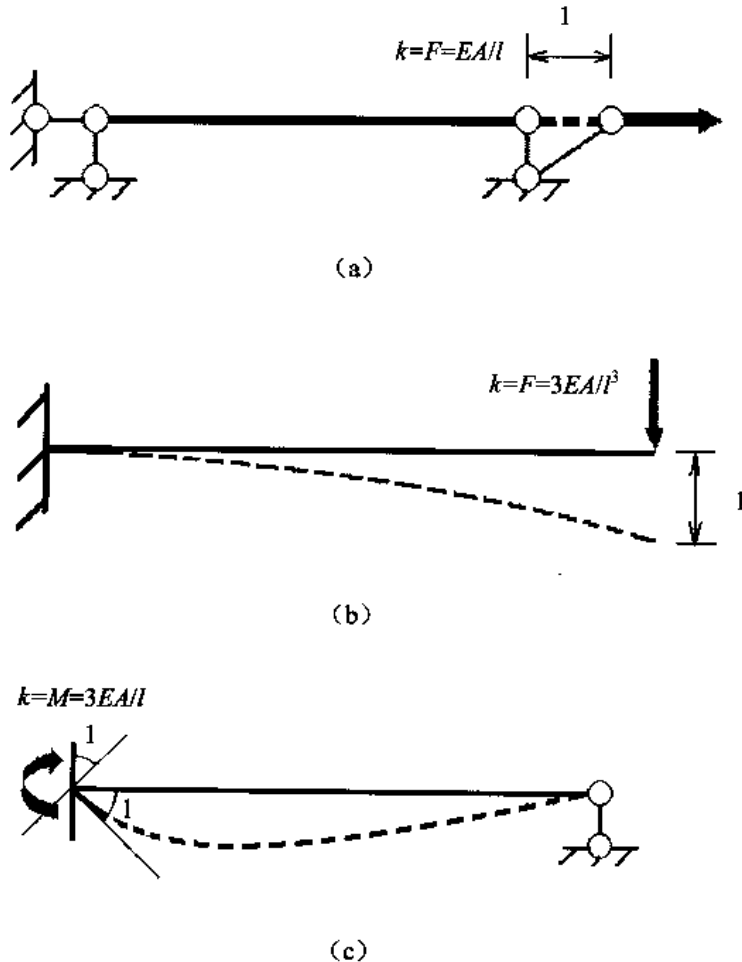


图 1-2 刚度概念的图示

在上述概念的基础上，下面介绍结构有限元法的基本思想。

有限元法实质上是一种数值计算方法，其首先将实际的结构划分为一系列的离散单元（这些单元之间通过公共节点连接到一起），然后对这些单元的组合体进行分析。通常的结构有限元分析过程包括如下的具体步骤。

### 1. 结构离散化

通过这一步骤将实际结构划分为一系列单元的组合体，这也是一切数值方法求解过程的共同之处，即将连续问题离散化。

对于杆件结构系统，由于结构本身存在着自然的节点连接关系，因此杆件结构系统是自然离散系统，如图 1-3 所示。

但是对于各种实体结构来说，必须经过一个离散的过程，将连续体划分为一系列离散单元的组合体，才能形成有限元分析的模型。图 1-4 所示为是一些实际结构离散化的例子，其中左图为弹丸冲击墙体的模型，右图为机械部件的有限元模型。



图 1-3 自然离散的杆件结构系统



图 1-4 实体结构离散化的例子

## 2. 单元特性分析

这一步骤是有限单元分析的基础，其目的在于通过分析得到单元节点力与节点位移之间的力学关系，即计算单元刚度矩阵（简称单刚）。

对于力学特性和几何形状都相似的单元，通过单元分析得到其力学特性上的共性，于是这种单元成为一类可构成有限元模型的标准元件。

杆件单元的刚度矩阵可通过直观的力学概念得到，而各种实体单元的单元刚度矩阵需要先假设单元内部的位移插值模式，再通过变分原理（最小势能原理）得到。需强调的一点是，单元刚度矩阵是奇异矩阵。

通过单元特性分析，得到各种类型单元刚度矩阵的一般形式，便于计算机编程过程中的标准化和规范化处理。

## 3. 结构分析

有限单元计算中的基本原则之一，就是满足相邻单元在公共节点上的位移协调条件。于是，相邻单元在公共节点对应位移自由度上的刚度系数（即单位变形所需施加的力）被叠加到一起，共同抵抗公共节点的变位。

这一步骤的具体数学处理形式为：在一个结构总体刚度矩阵中单元刚度矩阵元素之间的分块叠加，如果与一个节点对应的刚度矩阵元素被作为一个子块，则结构刚度矩阵一共包含节点总数个子块。与之相对应的，所有节点载荷也按照结构中的节点编号次序组成结构的节点载荷列向量。这样做的结果，是建立起整个结构的所有节点载荷与节点位移之间的关系，实际上

就是结构的总体刚度方程，其系数矩阵被称为结构的总体刚度矩阵，简称总刚。

通过结构分析，实际上得到了离散化之后的平衡方程（结构的总体刚度方程）。但其中的总体刚度矩阵是奇异的，这是因为单元刚度矩阵的奇异性造成的，外在表现为结构整体发生刚体位移的任意性。

#### 4. 引入边界条件

在总体刚度方程中引入边界条件，是在求解之前必须进行的步骤。通过边界约束条件的施加，排除了结构发生整体刚性位移的可能性，使得在一定载荷作用下的结构位移可惟一地确定。

#### 5. 求解线性方程组

引入边界条件之后的方程组具有惟一的解，通过各种线性代数方程组的数值求解方法均可得到其解，即得到结构各节点的位移。单元内部任意点的位移通过节点位移插值得到，而应变、应力等量可通过位移导出。

#### 6. 后处理与计算结果的评价

得到节点位移之后，可进一步得到应变、应力等量并进行结果的可视化后处理。目前，成熟的商用程序一般都提供了功能强大的后处理程序，如 ANSYS 程序中包含了专门的后处理器，可进行各种物理量的图形以及动画显示等实用的操作。

以上就是结构有限元分析的基本过程，这一分析过程的基本思路可以概括为：通过各种标准元件（单元）的组合构造出任意复杂的离散结构分析模型，然后由相邻单元公共节点处的平衡条件，集成总体刚度方程，引入边界条件建立结构平衡方程并求得位移解。

上面介绍的仅仅是结构线性静力有限元分析的基本过程，但其中的一些基本概念和原理在非线性分析或动力分析中同样适用，可以说静力分析是动力分析的基础，线性分析是非线性分析的基础。

### 1.1.2 ANSYS 结构有限元分析流程

上节介绍了结构有限元分析的基本思想，那么这一思想如何在通用有限元分析软件 ANSYS 中实现呢？下面就介绍在 ANSYS 中进行结构有限元分析的一般流程。

一般地，一个完整的 ANSYS 结构分析过程包括下面一些基本操作步骤和环节。

#### 1. 前处理

前处理是整个分析过程的开始阶段，其目的在于建立一个符合实际情况的结构有限单元分析模型，一般分为如下的几个操作环节：

##### （1）分析环境设置。

进入 ANSYS 分析环境界面后，指定分析的工作名称以及图形显示的标题，开始一个新的结构分析。

##### （2）定义单元以及材料类型。

定义在分析过程中需要用到的单元类型（杆件单元、板单元、实体单元等）及其相关的参数（如：梁单元的横截面积、惯性矩，板壳单元的厚度等），指定分析中所用的材料模型以及相应的材料参数（如线性弹性材料的弹性模量、泊松比、密度等）。

##### （3）建立几何模型。

建立几何模型就是建立一个与实际结构外形大致相同（相同程度视计算精度，按照结构的简化原则而定）的几何图形元素的组合体。

在 ANSYS 中，所有问题的几何模型都是由关键点、线、面、体等各种图形元素（简称图元）所构成，图元层次由高到低依次为体、面、线及关键点。

可以通过自底向上（Bottom-Up Method）或者自顶向下（Top-Down Method）两种途径来建立几何模型。自底向上的建模方式首先定义关键点，再由这些点连成线，由线组成面，由面围合形成体积，即由低级图元向高级图元的建模顺序。自顶向下的建模方式直接建立较高层次的图元对象，其对应的较低层的图元对象随之自动产生，这种方式建模将用到布尔运算，即各种类型对象的相互加、减、组合等操作。

#### （4）进行网格的划分。

在几何模型上进行单元剖分，形成有限单元网格（Mesh）。一般情况下，在 ANSYS 中划分有限元网格分为定义要划分形成的单元属性（属于何种单元类型、实参数类型以及材料类型）、指定网格划分的密度、执行网格划分等三个步骤。

#### （5）定义边界及约束条件。

在上述有限单元模型上，引入实际结构的边界条件，自由度之间的耦合关系以及其他的一些条件。

**注意：**在 ANSYS 建模过程中，也可采用逐个定义节点和单元的直接建模方法。这种方法适用于建立单元数较少的有限元分析模型。比如建立简单的平面刚架模型时，可先定义节点，然后连接节点形成梁和柱单元。

### 2. 施加载荷、设置求解参数并求解

这一步骤的目的在于为分析定义载荷，指定分析类型以及各种求解控制参数，一般分为以下的几个实际操作环节：

#### （1）定义载荷信息。

ANSYS 结构分析的载荷包括位移约束、集中力、表面载荷、体积载荷、惯性力以及耦合场载荷（如热应力）等。可以将结构分析的载荷施加到几何模型上（关键点、线、面）或者有限元模型上（节点、单元）。

施加在几何模型上的载荷独立于有限单元网格，也就是说可以改变结构的网格划分而不影响已施加的载荷。施加于有限元模型上的载荷网格修改时将会失效，需要删除以前的载荷并在新的网格上重新定义载荷。

程序在开始求解之前，将会自动地将施加于几何实体模型上的载荷转换到有限元模型上，但转换过程中可能出现几何模型与有限元模型之间坐标系方向不一致而引起的加载方向偏差的问题。

#### （2）指定分析类型和分析选项。

ANSYS 提供了很多的结构分析类型，实际分析中可以根据问题的性质选择不同的分析类型。表 1-1 给出了 ANSYS 中常见的分析类型（按照 ANSYS 的分析类型编号）。

对于各种分析，需要设置相应的参数，比如分析所用的求解器类型、非线性分析选项和迭代次数设置、模态分析的模态提取方法和模态提取数等各种分析选项。这些选项的具体设置方法，将在后续相关章节中陆续地加以介绍。

（3）执行求解计算。在施加了载荷并设置了相关的分析选项之后，即可调用求解程序开始求解。在求解过程中，可通过屏幕输出窗口获取计算过程的一些实时信息。

表 1-1 ANSYS 结构分析类型表

数字代号	分析类型	中文名称
0	STATIC	静力学分析
1	BUCKLE	屈曲分析
2	MODAL	模态分析
3	HARMIC	谐载荷响应分析
4	TRANS	瞬态动力分析
7	SUBSTR	子结构分析
8	SPECTR	谱分析

### 3. 后处理

这一步骤对计算的结果数据进行可视化处理和相关的分析,可以利用 ANSYS 的通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 完成。一般的后处理包括如下的操作环节:

(1) 进入后处理器并读入计算结果。

进行结果的后处理之前,需要先进入相应的后处理器。进入通用前处理器之后,第一步就是把计算结果文件读入数据库。而当进入时间历程后处理器时,结果文件会自动载入。

(2) 进行后处理操作。

利用通用后处理器程序可以显示结构变形情况、各种物理量的等值线分布图形等,对各种数据信息进行列表操作,并可动画显示各种量的变化过程。利用时间历程后处理器可以绘制各种变量的时间历程变化曲线,或者一个变量相对于另一个变量的变化曲线。

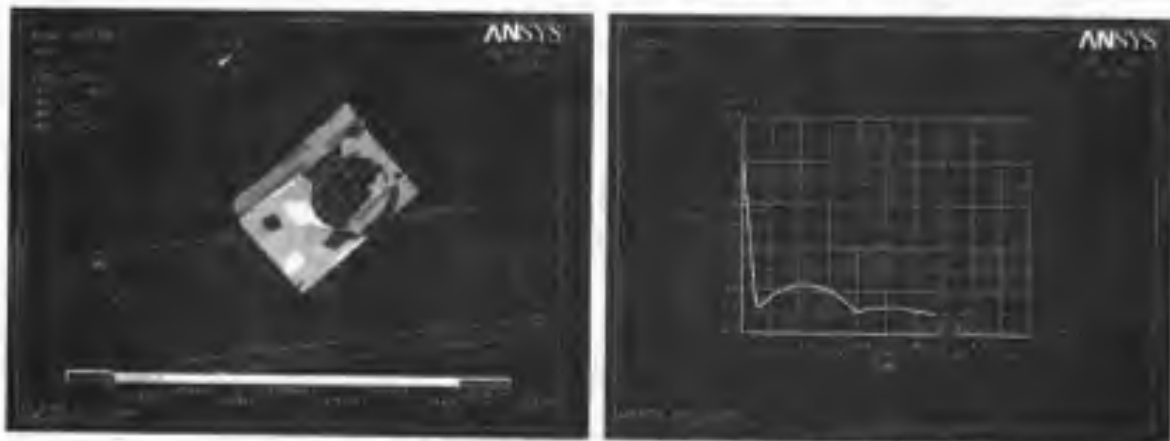


图 1-5 后处理程序得到的应力等值线云图 and 变化曲线

具体的后处理操作方法,读者可参照后续各章的例题。

(3) 输出后处理操作的结果。

后处理操作得到的一些图形或动画结果可以输出到文件,也可被组织成多媒体形式的分析报告。

综上所述,对 ANSYS 结构分析的基本实现过程进行了简单的介绍,希望本节所讲的内容能使读者对于 ANSYS 分析的基本过程有一个初步的认识。

## 1.2 ANSYS 基本操作精要

ANSYS 的开发者在编制程序的过程中已经注意到了方便用户使用以及界面操作人性化等问题。但是 ANSYS 毕竟是高度复杂化的专业软件平台，因此使用起来并不容易，经常会遇到各种问题，但归结起来还是软件操作基本功不扎实，对一些功能不了解所致。

尽管本书并不侧重于介绍软件的基本操作，但是考虑到读者（尤其是初学者）的实际情况，本节将采用尽量少的篇幅来系统地介绍一下 ANSYS 的常用操作。对于已经熟练掌握 ANSYS 基本操作的读者，可以跳过本节。

### 1.2.1 ANSYS 的两种操作方式与基本程序架构

通过 Windows 程序组，选择 ANSYS X.0 (X 表示版本号) 下的 Configure ANSYS Products 即可进入 ANSYS 启动器界面，选择其中已授权的产品（如 ANSYS-Multiphysics），单击启动器界面下方左边的 RUN 按钮，即可进入 ANSYS 仿真分析环境的图形界面（GUI）。GUI 的布局很简单，由应用程序菜单（Utility Menu）、主菜单（Main Menu）、工具栏（Toolbar）、操作命令输入栏（Input Window）、图形显示窗口（Graphic Window）和输出信息窗口（Output Window）等六部分所组成。

进入 ANSYS 分析环境之后，用户可通过如下两种方式进行分析操作：

(1) GUI 菜单操作方式。图形用户界面 GUI 提供了功能强大的菜单选项，用鼠标点选相应的按钮或者菜单项目即可调用各种相关的操作指令，完成大部分的结构建模和分析操作。

(2) 命令或批处理操作方式。所有的菜单项都对应着特定的操作命令，那么当然也可以在命令输入栏中直接键入命令以实现各种程序功能。

用户可以将一个分析的操作命令按照先后顺序编辑成为一个批处理命令流文件（文本格式即可），启动程序后通过菜单项 Utility Menu>File>Read Input From，导入命令流文件，程序将会自动地逐条执行该文件中的所有命令。

上述两种不同操作方式之间具有对应关系，一般地，每一个 GUI 中特定的菜单选项总是对应着一条分析命令。在分析过程中，用户可以根据喜好选择采用 GUI 菜单操作方式，或者采用直接输入命令和编辑批处理命令流文件的操作方式。

下面简单介绍一下 ANSYS 的程序架构。

ANSYS 的程序架构分为两层，即起始层（Begin Level）和处理器层（Processor Level），ANSYS 系统的程序架构则可以由图 1-6 来加以形象地表示。

起始层是用户进入和离开 ANSYS 分析环境时所处的层，用户在起始层中可进行如下的操作：

- ◇ 由此进入到处理层的相关处理器，以及用于各处理器的中间切换；
- ◇ 清除当前工作的全部数据以开始一个新的工作；
- ◇ 改变当前工作的名称。

在 GUI 环境中，上述功能已不仅限制于在 Begin Level 中才可进行，但在批处理命令流操作中仍有限制，如由一个处理器向另一处理器切换，必须要经由 Begin Level 才能完成。当然，在起始层中并没有进行任何实质性的操作。

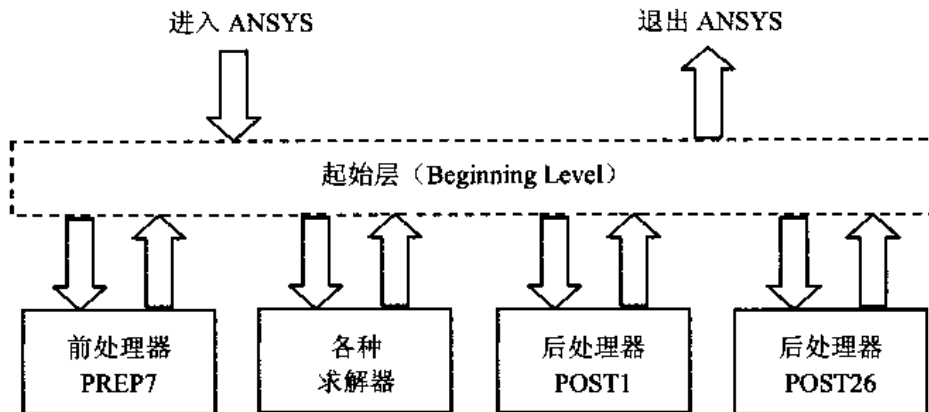


图 1-6 ANSYS 的程序架构

处理层则由一系列处理器程序和各種求解器程序组成。

在分析的不同阶段，需要用户进入不同的处理器或求解器进行相应的操作，以完成整个分析过程。

**注意：**程序在相应的处理器中只能执行属于该处理器的命令，如在前处理器中不可以执行求解命令和后处理命令。用户要执行相应的操作，必须先进入相应的处理器中。

进入和退出处理器或者由一个处理器向另一个处理器切换，在 GUI 中可直接点击菜单项进行快速切换，在批处理模式中则需要相应的命令来完成。表 1-2 列出了各处理器切换的菜单项和操作命令。

表 1-2 切换各处理器的菜单项和操作命令

菜单项	操作命令	实现的功能
Main Menu>Preprocessor	/PREP7	进入的前处理器 PREP7 程序
Main Menu>Solution	/SOLU	进入求解器程序
Main Menu>General Postproc	/POST1	进入通用后处理器 POST1
Main Menu>TimeHist Postpro	/POST26	进入时间历程后处理器 POST26
Main Menu>Finish	FINISH (或 FINI)	由任何一个处理器退回到起始层，然后再经由起始层切换到另一个处理器

无论是通过 GUI 进行菜单式的交互操作，还是直接键入命令行或编写命令流文件的批处理操作，问题的分析流程基本上是等价的，前后处理和求解的整个过程通过程序架构图中所示的各程序模块有机地组织起来。

### 1.2.2 ANSYS 的 GUI 操作方法精要

ANSYS 的 GUI 界面提供了强大的人机交互操作功能，比较适合于初学者使用，本节按照实际分析中的操作次序，对 GUI 界面的常用操作以及使用过程中需注意的问题进行集中讲解。

#### 1. 分析环境设置

在进入 ANSYS 的图形用户界面后，首先根据问题需要以及个人偏好对操作环境进行设置，这包括如下的一些操作。

## (1) 设置工作名称。

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname, 可改变当前的工作名称, 图 1-7 所示。

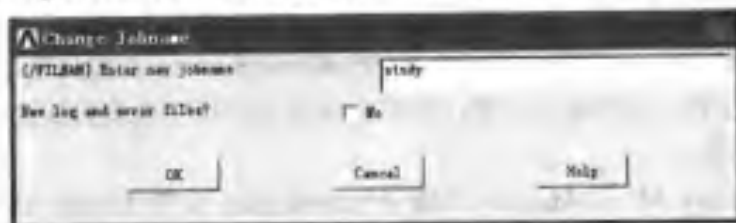


图 1-7 改变工作名称

## (2) 设置图形标题。

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title, 可以改变图形显示窗口的标题, 图 1-8 所示。

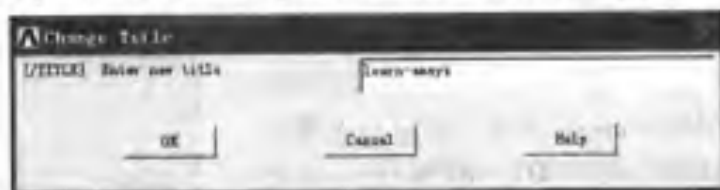


图 1-8 改变图形显示标题

## (3) 窗口视图及布局。

通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Pan Zoom Rotate..., 将弹出 Pan Zoom Rotate... 视图控制面板, 利用该面板可以对绘图区域的视图方向、大小等进行各种控制, 在操作过程中使用频率很高。其操作很简单, 这里不展开叙述, 读者可参考后续各章的例题。

通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Window Controls>Window Layout, 可以定义图形显示窗口及其布局, 图 1-9 所示就是一个新定义的窗口布局 (各窗口分别被放置于左上、右上、左下、右下位置)。



图 1-9 一个新的窗口布局



利用上面提到的 Pan Zoom Rotate... 视图控制面板可以对每个小窗口的视图进行控制，以实现在不同的窗口中绘制不同的视图。其具体操作方法为：在 Pan Zoom Rotate... 面板的最上部 Window 下拉列表中选择窗口号，然后对其视图进行控制。

此外，可以根据喜好，通过 Utility Menu>PlotCtrls>Style 下的相关菜单项进行显示字体、图形颜色、背景颜色等一系列显示设置，也可以完全采用程序系统的默认设置。

#### (4) 定制工具条。

通过菜单项 Utility Menu>Macro> Edit Abbreviations 或者 Utility Menu>MenuCtrls>Edit Toolbar，可以将分析中常用的 ANSYS 菜单项（对应的指令）定制成按钮，添加到工具条中，这样可以提高工作效率。

例如：在建模过程中要频繁用到重新绘图的命令 /REPLOT（对应菜单项为 Utility Menu>Plot>Replot），为了在使用过程中快速调用这一功能，只需选择 Utility Menu>Macro> Edit Abbreviations 菜单，在图 1-10 所示的对话框中输入 \*ABBR, REPLOT, /REPLOT，单击 Accept 按钮，这一功能的快速调用按钮就出现在 ANSYS 的工具条中。其中，REPLOT 为新建的工具条按钮名称，/REPLOT 为这一按钮所调用的 ANSYS 命令。读者可以根据需要，添加各种常用命令的快速调用按钮到工具条中。



图 1-10 定制工具条按钮

(5) 常用功能按钮。在 ANSYS 界面中，命令输入窗口左右侧提供了一系列标准工具按钮，表 1-3 对其进行了简单的介绍。

表 1-3 常用功能按钮

按钮	功能
	开始新的分析，可选择旧的分析结果是否保存
	打开数据库文件
	保存数据库文件
	打开 ANSYS 报告生成器
	打开 Pan Zoom Rotate... 视图控制面板
	打开帮助文档
	显示一些被自动隐藏的对话框或窗口
	打开接触分析管理器

## 2. 定义单元类型、实参数及材料模型

对工作环境进行必要的设置后即可开始分析的前处理环节。

在前处理阶段，首先根据分析问题的需要，选择所需的单元类型并指定单元实参数，定义分析所需的材料模型。

### (1) 选择单元类型。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete, 出现 Element Types 对话框, 单击 Add 按钮, 在弹出的图 1-11 所示的对话框中选择所需的单元类型, 并指定一个单元类型参考编号:

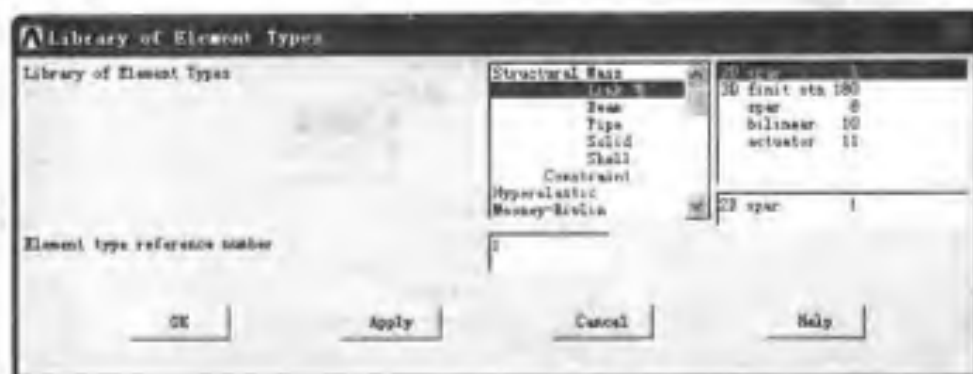


图 1-11 定义单元类型

定义了单元类型后, 需要对单元类型的算法选项进行设置 (如两维单元 PLANE2, 程序提供了平面应力、平面应变以及空间轴对称三种算法), 一般可通过 Element Types 对话框的 Option 按钮进行相关设置。

### (2) 定义单元实参数。

对于杆件单元和板壳单元, 需要定义实参数, 这些实参数包括杆单元的截面积, 梁单元的截面面积、惯性矩以及板壳单元的厚度等几何参数。一些特殊单元, 如用来模拟钢筋混凝土结构的 SOLID65 单元, 也需定义实参数来反映混凝土中的配筋状况。

定义实参数的菜单项为: Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete, 在弹出的对话框中单击 Add 按钮, 即可为相关单元类型定义实参数。

ANSYS 中提供了种类丰富的单元类型 (150 多种), 一些常用结构分析单元的特性以及具体算法选项设置和实参数的定义请参考本篇后面相关各章中的分析实例。

注意: 对于一些种类的三维梁单元 (Beam44、Beam188、Beam189), 也可以为其定义实际的横截面形状, 其菜单操作选项为: Main Menu>Preprocessor>Sections, 具体的横截面定义方法, 请参阅有关梁分析的章节, 定义了截面的梁单元不再需要实参数定义。

### (3) 定义材料模型及参数。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models, 可在图 1-12 所示对话框中定义分析中所用的材料模型。比如, 要选择线性弹性各向同性材料模型作为材料模型 1, 则依次在右侧双击 Structural>Linear>Elastic>Isotropic, 然后在弹出的对话框中设定材料的杨氏模量以及泊松比的数值即可。

## 3. 建立几何模型

建立几何模型是整个前处理过程中时间花费较多的一个环节。ANSYS 的前处理器 PREP7 提供了功能强大的几何实体建模功能, 这些功能被系统地放置在 Main Menu>Preprocessor>Modeling 下面的多级菜单中, 这些菜单包括 Create (建立图形对象), Operate (对各种对象进行拉伸、缩放以及布尔操作等), Move/Modify (平移/修改), Copy (各种对象复

制)、Reflect (镜像复制对象,可关于 XY, YZ, ZX 平面对称复制)等。



图 1-12 定义材料模型

在建模过程中,最为常用的是 Create 和 Operate 菜单,如图 1-13 所示,下面对这两组菜单进行有选择的介绍。

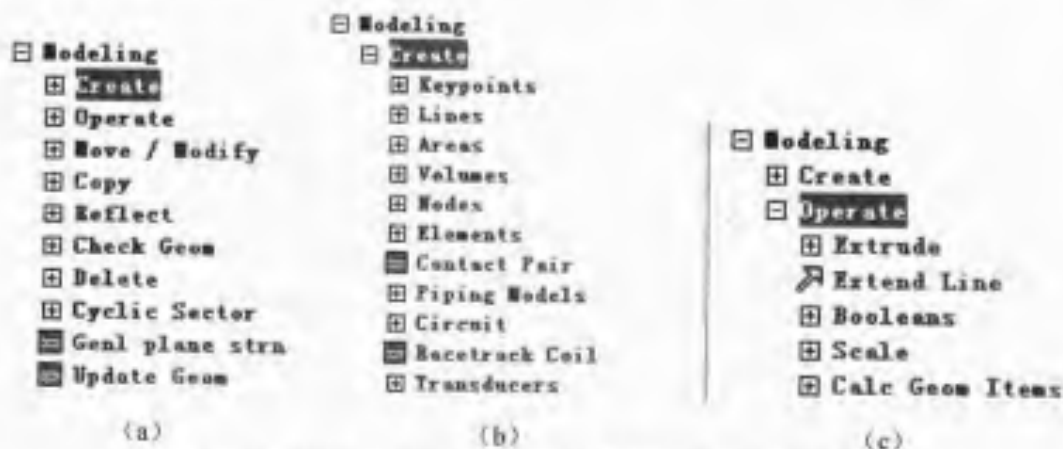


图 1-13 Modeling 菜单及其下面的 Create 和 Operate 列表

Create 菜单提供了建立各种几何实体对象的功能,包括关键点 (Key points)、线 (Line)、面 (Area)、体 (Volume) 等各种图形元素。建议读者直接建立较高级图元,因为高级图元产生时程序将自动创建低级图元,这样可以显著提高建模效率。

Operate 菜单提供了对各种对象进行拉伸、缩放以及布尔操作等的功能。利用拉伸或旋转功能,可以实现线、面绕一根转轴旋转成为三维旋转曲面或体,或者将面积沿某条线拉伸形成体积。利用布尔操作功能,可以实现对二维、三维实体形状的雕琢,得到各种复杂的几何模型,ANSYS 提供的布尔操作包括表 1-4 列举的一些。

例:练习 Create 和 Operate 菜单建立几何图元和布尔操作。

(a) 首先选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Sphere>By Dimensions, 在弹出的 Create Sphere by Dimensions 对话框中输入球体的外径 5.1, 内径 5.0,

终止角 180 度，单击 OK 按钮，形成半个空心球；

表 1-4 布尔运算及其适用的围元类型

布尔运算种类	作用	适用的围元类型
ADD (加)	将两个或多个实体对象合并为一个对象	线、面、体
SUBTRACT (减)	将一个实体与其他一个或多个实体重合的部分去掉	线、面、体
INTERSECT (交)	保留两个实体的公共部分	线、面、体
DIVIDE (分割)	用工作平面、线或面等将实体切为两个或者多个部分，各部分仍由公共边界联接，可将复杂实体切分为简单实体以分块划分网格	线、面、体
GLUE (粘接)	将两个或多个实体联系起来，在它们之间形成一个公共的边界。粘结之后可以保持原来实体的区别（例如不同的材料）	线、面、体
OVERLAP (搭接)	除输入实体有相互重叠外与粘接相同	线、面、体

(b) 再选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions，在弹出的 Create Block by Dimensions 对话框中输入长方体的三维坐标变化范围，X 方向和 Z 方向均为 -4.15 到 4.15，Y 方向为 0.0 到 4.15，单击 OK 按钮形成一个长方体；

(c) 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Intersect>Common>Volumes，弹出 Intersect Volumes 对象拾取框，单击 Pick All 按钮，完成体积求交运算。图 1-14 为布尔交运算前后的图形对比。

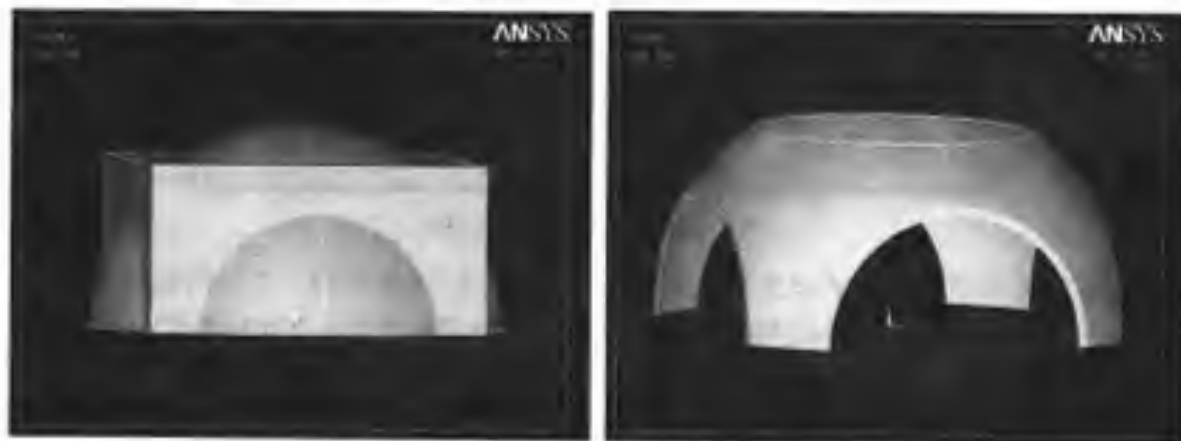


图 1-14 体积的布尔交运算前后对比

在建模过程中，还经常用到坐标系的切换、工作平面设置以及对象选择等操作，下面简单加以介绍。

#### (1) 坐标系的切换。

由于几何模型的建立是在特定的坐标系中进行，因此坐标系是一个及其重要的概念。在 ANSYS 中，坐标系分为总体坐标系和局部坐标系，其中总体坐标系又包括总体直角坐标系 (Cartesian Coordinate System)、总体柱坐标系 (Cylindrical Coordinate System)、总体球坐标系 (Spherical Coordinate System)。

不管采用以上何种坐标系，都需要三个参数来表示某个空间点的正确位置。总体直角坐

标系通过三个坐标 (X, Y, Z)，总体柱坐标系通过三个坐标 (R,  $\theta$ , Z)，总体球坐标系通过三个坐标 (R,  $\theta$ ,  $\Phi$ ) 来表示一个点的空间位置。总体直角坐标系、总体柱坐标系和总体球坐标系的在 ANSYS 中的编号依次为 0, 1, 2。

此外，程序还提供了以 Y 轴为纵轴的主坐标系，其编号为 5。

注意：在定义点时，直角坐标系的坐标 X, Y, Z 对应于圆柱坐标系下 R,  $\theta$ , Z，球面坐标下则对应着 R,  $\theta$ ,  $\Phi$ 。

在 ANSYS 程序中，每一坐标系都有确定的代号，默认的坐标系是总体直角坐标系。在某些情况下可根据需要来定义局部坐标系，定义局部坐标系的 GUI 菜单操作选项为：

Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Creat Local CS>At Specified Loc

比如，要以总体直角坐标系中的点 (0.5, 0.5, 0.0) 为原点，建立一个球坐标系，则选择该菜单项，弹出 Create CS at Location 对象拾取框，在文本框中输入要建立的局部坐标系原点的坐标，单击 OK 按钮，弹出如图 1-15 所示的对话框。

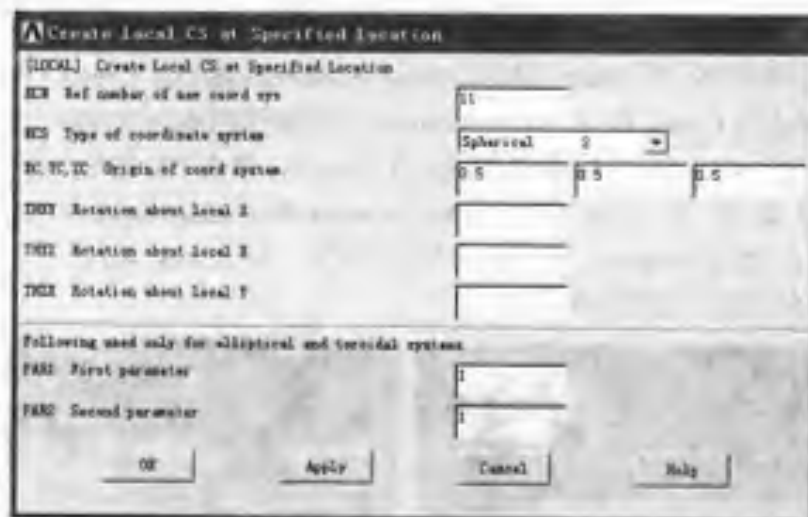


图 1-15 建立局部球坐标系统

在 KCN 文本框中输入要定义的坐标系统代号，大于 10 的任何一个号码都可以，但注意不要与已有的局部坐标系统编号相重复。在 KCS 下拉选项中选择局部坐标系统的类型号为 2，(KCS=0 直角坐标；KCS=1 圆柱坐标；KCS=2 球坐标)；XC, YC, ZC 表示局域坐标系的原点在总体直角坐标系统中的位置；THXY, THYZ, THZX 表示局部坐标轴与整体坐标轴的角度关系。单击 OK 按钮，即可定义一个局部球坐标系统。

程序的默认坐标系为总体直角坐标系统 (即 KSN=0)，KSN 为坐标系统代号，1 为柱面坐标系统，2 为球面坐标系统，也可为用户定义的其他局部坐标系统 (ID 号大于 10)。在操作过程中，有时需要将已有的某个坐标系设置为当前工作的坐标系，例如，要选择以某个点为中心在一定距离范围内的所有空间点，显然选择定义在该点的球坐标系作为当前坐标系统比较合适。这类操作可通过菜单项 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>(CSYS Type)来实现。

在缺省情况下，即使是在其他坐标系中定义的点 (关键点或节点)，在通过菜单项 Utility Menu>List>列表显示的节点或关键点坐标还是总体直角坐标中的数值。可以通过菜单项 Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>来改变显示坐标系。

此外，还有节点坐标系、单元坐标系、计算结果坐标系等一系列相关的坐标系概念，由于不是特别常用，在此处不再一一列举，读者可以通过相关的帮助手册加以了解。

### (2) 工作平面设置。

ANSYS 程序提供了建模工作平面的功能。建模工作平面是一个参考平面，其功能类似于绘图板，可依用户要求移动显示。欲显示工作平面、设置平面辅助栅格开关或平移和旋转工作平面可用如下 GUI 操作：

Utility Menu>work Plane>Display Working Plane

Utility Menu>Work Plane>WP Settings

Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increment

需要注意的是，工作平面实际上是一个无限大的平面，工作平面也不一定平行于计算机屏幕，在启动程序后，默认的工作平面就是总体直角坐标系的 X-Y 平面。在建模过程中，用户可以以一定角度和距离旋转或平移工作平面，对于建立一系列在同一个倾斜的平面内且相对位置确定的几何图形元素，这一操作是很有意义的。

通过菜单项 Utility Menu>work Plane>Display Working Plane，选择显示 ANSYS 工作平面（使 Display Working Plane 前面出现对钩！），然后选择菜单项 Utility Menu>Work Plane>WP Settings，在弹出的 WP Settings 面板中对工作平面的显示进行如下设置：

- ◇ 工作平面显示范围 Minimum 和 Maximum 设置为 -10.0 到 10.0，
- ◇ 坐标网格间距 Spacing 为 1.0；

经过上述设置后显示的建模工作平面如图 1-16 (a) 所示：

在 WP Settings 面板中，如果选择最上面的 Polar 选项，单击 Apply 按钮，则极坐标形式的工作平面将显示于屏幕上，如图 1-16 (b) 所示。

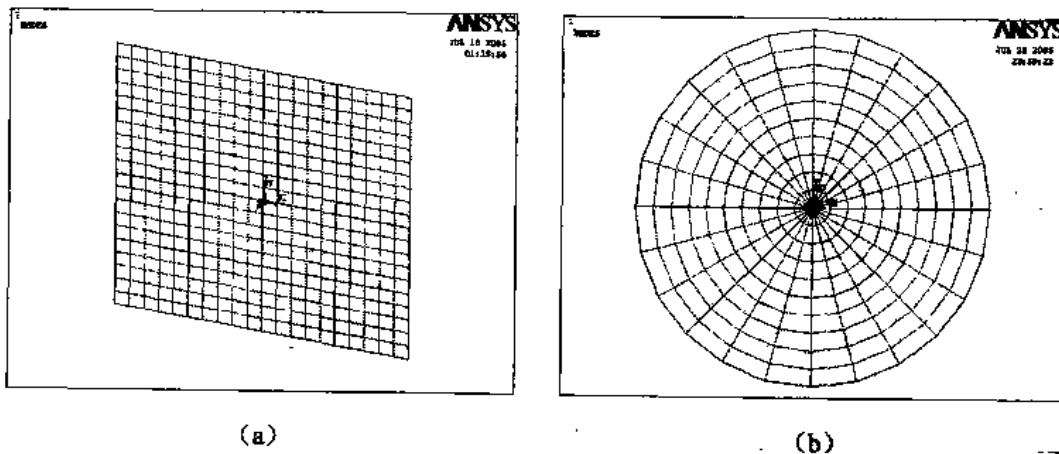


图 1-16 ANSYS 的工作平面

### (3) 对象选择。

对象选择是非常重要的操作，在建模、单元划分以及后处理的很多操作中，都需要选择各种对象进行相关的操作，比如选择一些图形对象进行布尔操作或者划分网格等。

在 ANSYS 图形界面中，通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities，在弹出的如图 1-17 所示的 Select Entities 对话框中进行对象选择操作，最上面的两个下拉列表选项分别列出了可供选择对象的类型和对象选择方式，如图 1-18 所示。

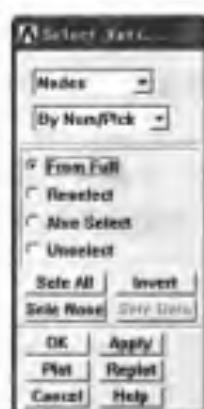


图 1-17 对象选择面板

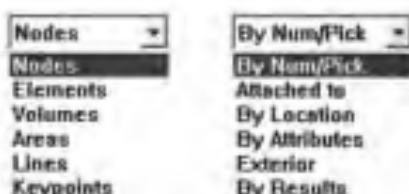


图 1-18 对象选择的类型和选择方式

可以通过该选择面板实现节点、单元等有限元模型对象以及体、面、线和关键点等几何图形元素的选取。选择的方式可以通过鼠标在屏幕上点选 (By Num/Pick)、通过所属关系 (Attached to, 比如要选择包含有当前选择节点的单元, 就是选择 Elements Attached to Nodes 等)、通过坐标位置 (By Location)、通过对象属性 (By Attributes, 比如选择材料类型为 1 的所有单元) 等。

在 ANSYS 中, 可以将当前选定的某种类型的对象定义为一个组元 (Component), 定义组元之前就需要用到对象选择的操作。有些操作是针对预先定义的组元进行的, 比如向模型的一部分节点施加载荷时, 首先选择所有需加载的节点, 将其定义为一个节点组元, 然后将载荷施加到这一组元上, 这样就避免了对各节点逐个加载。定义组元的菜单项为: Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component。必需牢记一点, 定义的组元中仅包含当前选择的对象。

对象选择的类型可以是表 1-5 列举的一些。

表 1-5 对象选择类型

维恩图编号	选择的类型	选择的功能	命令中简写
a	Select	从对象的全集中选择子集	S
a	Reselect	从选择的对象子集中再选择子集	R
b	Also Select	增加一个对象子集到选择的子集中	A
c	Unselect	去掉已选择子集的一部分	U
d	Select All	恢复选择全集	ALL
e	Select None	选择一个空集	NONE
f	Invert	选择当前子集的补集	INVE

#### 4. 网格的划分

在几何模型建立完成后, 一般要经过网格划分的过程以形成有限元模型 (对简单的杆件系统可以采用直接定义节点单元的直接有限元建模方式)。

在 GUI 界面操作中, 网格划分很简单, 只需选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool, 调用 MeshTool 划分网格工具面板, 即可完成网格划分。在该面板上, 集

成了强大的网格划分命令功能。

网格划分可按如下的三个步骤进行：

(1) 指定单元属性（单元类型、实常数、材料属性）。

可以通过如下菜单选项来指定要网格划分形成或者要直接建立的单元类型：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attribs

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes

前面一条路径表示设定通过对实体对象进行网格剖分形成的单元的属性，后面一条路径则表示直接创建有限元模型的单元的属性。不过两条菜单路径都将对应图 1-19 所示的对话框。

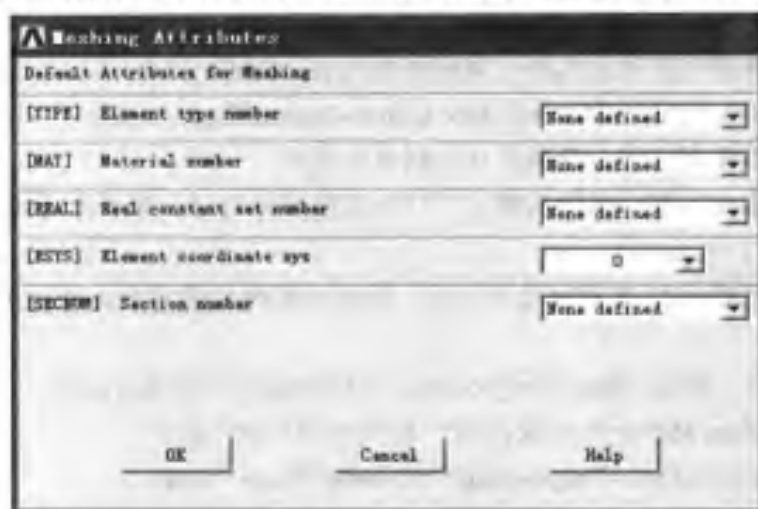


图 1-19 设定单元属性对话框

这个对话框操作用于设置缺省情况下的单元属性。从对话框的左边，可以看到与此对话框操作等价的 5 条命令，即：

TYPE：设置单元的类型；

MAT：选择材料模型类型；

REAL：选择实参数组合类型；

ESYS：设置单元坐标系统的属性；

SECNUM：设置单元横截面的类型。

如果已经定义了相关的单元类型、材料类型、以及实参数或横截面类型，则上述对话框打开后只需选择各项目列表中所需的类型号，单击 OK 即可，这一操作之后划分的单元将被赋予这一属性。

此外，程序还提供了设定针对点、线、面、体等各种实体对象的网格划分属性的命令，在 GUI 环境中，这些命令都可通过 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes 下面的菜单选项来调用。这些操作对应的命令包括：

KATT：为划分单元的关键点指定材料号，实参数号、单元类型号和坐标系号；

LATT：为划分单元的线设置上述网格划分属性；

AATT：为准备划分单元的面设置上述网格划分属性。

VATT：为准备划分单元的体设置上述网格划分属性。

(2) 设定网格尺寸控制。



在网格划分之前，还需要设置 MESH 的粗细程度，即单元的尺寸设置。可以通过 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>SmartSize>菜单项或相应的 SMRTSIZE 命令进行智能网格控制，或者通过如下一些菜单操作来实现网格密度的人工控制：

设置总体单元尺寸（单元的边长或线段分段数，对应命令为 ESIZE）：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Global>Size

设置离关键点最近的单元的边长（对应命令为 KESIZE）：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Keypoints

设置要划分网格的线段的单元大小（对应命令为 LESIZE）：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Lines

设置要划分网格的面的单元大小（对应命令为 AESIZE）：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Areas>

注意：上述网格控制的优先级顺序从高到低依次为：

对线划分的指定→关键点附近的单元尺寸→总体单元尺寸→缺省单元尺寸

### （3）划分网格。

在设定了单元属性和单元划分尺寸之后，即可实施网格的划分。进行网格划分一般通过调用如下的菜单项：

划分关键点单元：Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Keypoints

划分线单元：Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines

划分面单元：Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas

划分体单元：Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes

ANSYS 前处理程序提供了自由网格（FREE MESH）以及映射网格（MAPPED MESH），可根据需要选择不同的网格划分形式。在对面和体划分网格时，注意选择是自由网格还是映射网格，然后采用不同的菜单项，同时还需根据程序提示指定以下相关的选项：

**MSHKEY, KEY**

这一命令的选项用于选择网格划分的类型，KEY 取 0 表示进行自由网格划分，1 表示采用映射网格划分，2 表示如果可能就采用映射划分，否则采用自由网格。

**MSHAPE, KEY, Dimension**

这条命令的选项用于指定划分单元的形状，其参数意义为：

KEY=0 时，Dimension=2D，划分四边形单元；Dimension=3D，划分六面体单元。

KEY=1 时，Dimension=2D，划分三角形单元；Dimension=3D，划分四面体单元。

图 1-20 所示是对同一几何模型进行不同类型网格划分的比较。

由图 1-20 可以看出，映射网格一般要比自由网格规整一些，不过要划分映射网格需要满足一些特定的条件：

给面划分映射网格时，须满足的条件为：

- ✓ 此面必须由 3 或 4 条线围成；
- ✓ 在对边上必须有相等的单元划分数；
- ✓ 如果此面由 3 条线围成，则三条边上的单元划分数必须相等则必须是偶数。

给体划分映射网格，须满足的条件为：

- ✓ 它必须是砖形（六面体），楔形体（五面体）或四面体形；



图 1-20 自由网格和映射网格对比

- ✓ 在对面和侧边上所定义的单元划分数必须相等；
- ✓ 如果体是棱柱形或四面体形，在三角形面上的单元划分数必须是偶数，相对棱边上划分的单元数必须相等。

上述条件不能满足时，如一个面的边界（或体的边界）多于 4 条线（或 6 个面），须将多余的线或面连接起来以实现映射网格划分。相关的 GUI 菜单操作路径为：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>Concatenate>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Mapped>Concatenate>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Mapped>Concatenate>Areas

与这些操作对应的命令为 LCCAT 和 ACCAT。

注意：执行上述连接操作后，以前的线、面依然存在。创建的新线（面）仅仅是为了划分映射网格的需要，连接后形成的线（面）对任何实体建模操作都是无效的。

下面给出一个需要连接线段才能进行映射划分的简单例子。

图 1-21 所示为两个面粘接操作的实例，其操作命令为 AGLUE。

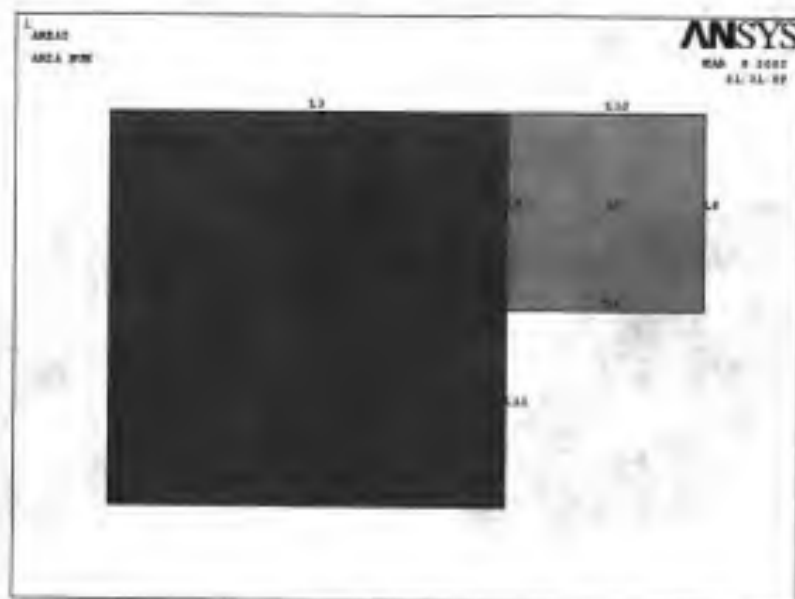


图 1-21 粘接后的图形

读者从图中可以看出执行粘接操作前后，两块面积的公共边线段的编号情况：

在操作执行前，对左边的矩形而言，其右边界为线段 L2，对右边的矩形而言，其左边界为线段 L8；在操作执行后，对左边的矩形而言，其右边界则是由线段 L9 和 L11 共同组成，对右边的矩形而言，其左边界为线段 L9。

显然，左边的矩形在粘接操作后成为具有 5 个关键点和 5 条线段组成的面积，此时如果要对这个面积进行映射网格划分，应如何进行呢？解决的办法有两种：

用 LCCAT 将其右边的两条线段连接成一条线段，然后通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided 对这个面进行映射网格的划分：

或者不进行连接操作，用拾取这个面的 4 个角点来进行面映射网格划分，这种简化的映射网格划分方法将两个关键点之间的多条线内部连接起来，其菜单项为 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>By Corners。

除了上面的一般操作之外，还有一些形成有限元网格的操作方法，比如前面的实体建模中已经提到过的拖拉、旋转操作，由面拖拉形成体时，如果面已经进行了网格划分，则拖拉成体的同时将面网格拖拉形成体网格。

此外，程序提供了一种针对体单元划分的扫略操作，其原理是对那些在特定方向上具有一致拓扑性质的体进行由源面向目标面（源面和目标面都是单个的面）的扫略式网格剖分，相关命令为：

VSEEP, VNUM, SRCA, TRGA, LSMO

各参数的意义如下：

VNUM 为要进行扫略式网格划分的体编号；

SRCA 和 TRGA 分别为扫略操作中源面和目标面的编号；

LSMO 为扫略过程中是否沿扫略方向进行光滑化处理的选项。LSMO=0，表示不进行光滑化处理；LSMO=1，进行光滑化处理。

该命令可以通过菜单 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep 来调用，调用时只需选择符合扫略网格划分条件的体，单击对象拾取框的 OK 按钮即可形成体网格。图 1-22 所示为通过扫略操作形成网格的例子。

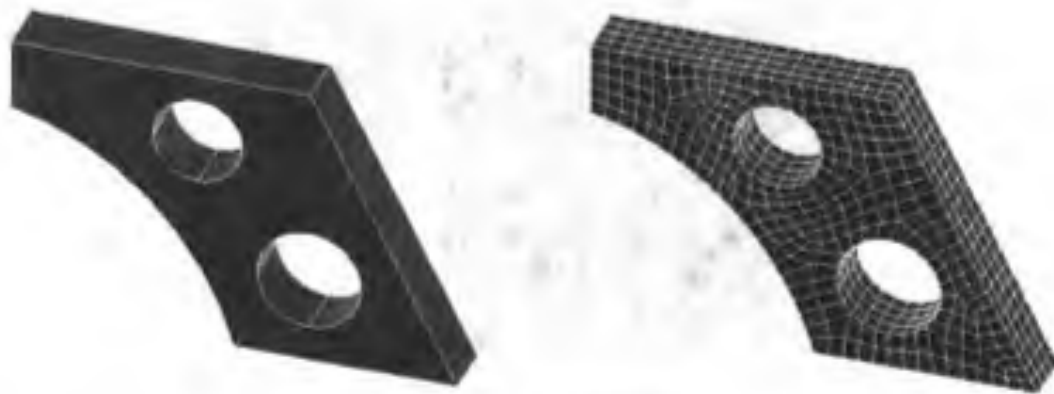


图 1-22 扫略形成的网格

在 GUI 界面中，也可以通过 Mesh Tool 对话框实现所有的剖分操作，Mesh tool 几乎集成

了全部的单元属性、单元尺度设置以及划分网格的操作。调用 Mesh tool 对话框的菜单项为：  
Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool。

### 5. 定义约束条件和负载

有限元模型建立完成之后，需要定义约束条件和载荷，这些操作即可在前处理器 PREP7 中进行，也可以在求解器中进行。注意施加到结构上的约束条件和载荷要符合结构的实际特征。具体的操作请参照后面各章的例题，相关的菜单项都在如下的菜单目录下：

Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply> Structural>

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>

上面的菜单项可供施加各种平移以及转动约束，强制性位移（与支座的固定约束条件一样施加，只是竖直不为 0），集中力、集中力矩、压力等。注意对面施加压力是沿着面的负法线方向。

载荷可以施加到有限元模型的单元或节点上，也可施加到几何模型的面或体等图形元素上。施加到几何模型上的载载荷计算之前将自动转化到有限元模型上。

### 6. 设置求解选项并求解

求解类型及其相关的求解选项将在后续相关章节中进行介绍，请读者阅读后续相关的章节，此处不再展开叙述。

### 7. 计算结果的后处理

可以在通用后处理器 POST1 或时间历程后处理器 POST26 中进行计算结果的各种等值线、动画的显示，或者绘制相关量之间的函数变化关系曲线等。具体的操作都不难掌握，请读者参照后续各章的后处理操作，此处不再展开叙述。

## 1.2.3 ANSYS 批处理操作与 APDL 语言

ANSYS 提供了用于自动完成有限元分析操作的参数化设计语言 APDL，即 ANSYS Parameter Design Language，这种语言由 1000 多条与 ANSYS 菜单操作对应的命令以及一些 APDL 编程命令所组成。APDL 语言包括如下的一些功能：

- (1) 标量参数和数组参数的定义与赋值。
- (2) 变量表达式和取值函数（包含了丰富的内部函数库）。
- (3) 程序流程控制，循环、分支。
- (4) 重复执行命令以及缩写。
- (5) 宏（可以看作命令的组合）以及用户程序。

在 GUI 界面下，ANSYS 程序运行由菜单项对应的命令来驱动。对于批处理方式，用户可以利用 APDL 程序设计语言将 ANSYS 命令组织起来，编写出参数化的批处理程序（命令流文件），这些命令的参数可以赋予一个确定的值，也可通过变量表达式的结果或参数进行赋值。这样，就实现了有限元分析全过程的参数化，即建立参数化的分析模型、参数化的网格划分及控制、参数化的边界及载荷定义、参数化的分析控制和求解以及参数化的后处理等。批处理操作和编写 APDL 命令流文件的一个重要的好处在于，对于一些参数有变化的情况，只需简单修改输入文件即可快速得到新的模型，这就避免了完全重新建立模型。

本节目的是向读者简单介绍批处理文件的格式以及 APDL 编程命令的使用，下面对相关的内容进行讲解。

### 1. 命令流文件的编辑和导入

ANSYS 的批处理文件由变量参数赋值、变量表达式、APDL 编程命令以及 ANSYS 操作命令等组成。一般情况下，一个语句或一条命令占一行。以“!”开头的行为注释行，程序在执行过程中将自动跳过。多个命令可以放到同一行写，其间以“\$”隔开。

在 GUI 中，通过菜单项 Utility Menu>File>Read Input from 或者 /INPUT 命令将编写好的批处理文件读入程序。比如将一个文件名为 FILE.TXT 的批处理文本文件读入程序的命令为：

```
/INPUT,FILE,TEXT
```

由于所有的 GUI 界面操作都将以命令的形式记录到一个日志文件 (Jobname.log) 中，因此对于初学者，可以通过查看 GUI 操作的日志文件 (Utility Menu>File>List>log File)，了解菜单项目与 ANSYS 操作命令之间的对应关系。

ANSYS 操作命令虽然种类繁多，但是常用的并不很多，这里提供一种分类熟记命令的方法，即按群组命令的形式，同一群组的命令一般都具有相同或类似的功能，只是作用的实体对象不同。

表 1-6 和表 1-7 给出了 ANSYS 中命令作用对象 X 的种类和名称，以及一些 X 对象的群组命令系列。

表 1-6 ANSYS 中对象的类型名称

对象种类 (X)	节点	元素	点	线	面积	体积
对象名称	X=N	X=E	X=K	X=L	X=A	X=V

表 1-7 ANSYS 中 X 对象的群组命令

群组命令	意义	例子
XDELETE	删除 X 对象	LDELETE 删除线
XLIST	在窗口中列示 X 对象	VLIST 在窗口中列出体积资料
XGEN	复制 X 对象	VGEN 复制体积
XSEL	选择 X 对象	NSEL 选择节点
XSUM	计算 X 对象几何资料	ASUM 计算面积的几何资料，如面积大小、边长、重心等
XMESH	网格化 X 对象	AMESH 面的网格化 LMESH 线的网格化
XCLEAR	清除 X 对象网格	ACLEAR 清除面网格 VCLEAR 清除体网格
XPLOT	在窗口中显示 X 对象	KPLOT 在窗口中显示关键点 APLOT 在窗口中显示面

例如：对象的选择命令可以统一表示为 XSEL 的形式，X 可以为 N (节点)、E (单元)、K (关键点)、L (线段)、A (面)、V (体)、ALL (全部对象) 等，下面是一些选择命令的例子：

```
NSEL,S,NODE,1,5
```

! 选择节点号 1-5 之间所有节点

```
NSEL,S,LOC,X,0.0,0.5
```

! 选择 X 坐标介于 0.0 和 0.5 之间的所有节点

```
ALLSEL,ALL
```

! 选择所有的对象和实体

又如，划分网格的 XMESH 命令群组，以下是一些对面进行网格划分的命令的举例：

AMESH, 1, 3, 1                                   ! 对编号为 1-3 的面进行网格剖分  
 AMESH, SURFACE                               ! 对一个名为 SURFACE 的面组元进行网格剖分  
 AMESH, ALL                                   ! 对所有的面进行网格剖分

相信通过一段时间的熟悉之后, 读者将能很容易地编写 ANSYS 的建模批处理命令流输入文件。

## 2. APDL 语言的参数化功能

APDL 语言提供了强大的参数化设计功能, 定义的一些参数可以被 ANSYS 的操作命令引用, 以实现参数化建模的过程。APDL 语言的参数化功能概括为如下几方面:

### (1) 变量参数的定义。

在批处理文件中, 通过 \*SET 命令定义参数变量, 其一般格式为 \*SET, Par, Value, 其意义为定义一个取值为 Value 的变量参数 Par, 例如:

```
*SET, pi, 3.14159
```

即定义一个取值为 3.14159 的参数 pi。也可以采用赋值号 “=” 来调用 \*SET 命令, 其一般格式为 Par=Value, 其意义完全等同于 \*SET, Par, Value 命令, 即也可用下面的形式定义上面的参数 pi:

```
pi=3.14159
```

此外, ANSYS 程序还提供了用于从系统中提取参数值的 \*GET 命令, 其一般格式为:

```
*GET, Par, Entity, ENTNUM, Item1, IT1NUM, Item2, IT2NUM
```

其中各参数的意义为:

*Par*: 提取的参数被赋给的变量名称;

*Entity*: 提取参数信息的实体项目类型, 可为 NODE、ELEM、KP、LINE、VOLU 等;

*ENTNUM*: 实体的编号;

*Item1, IT1NUM*: 要提取的信息类型及其编号;

*Item2, IT2NUM*: 要提取的信息类型及其编号 (第 2 组);

例如, 下面的 \*GET 命令表示变量 A 等于 100 号单元的材料类型号:

```
*GET, A, ELEM, 100, ATTR, MAT
```

又如, 下面的 \*GET 命令将节点 10 的 Y 坐标赋给变量 B:

```
*GET, B, NODE, 10, LOC, Y
```

下面的一条 \*GET 命令则表示 NMAX 为当前选择节点的最大 ID 号:

```
*GET, NMAX, NODE, NUM, , NMAX
```

### (2) 参数表达式和函数。

参数表达式由参数、数字以及加、减、乘、除和乘方等运算符组成, 下面列举了一些常见的参数表达式:

```
c=a+b
```

```
r0=(r1+r2)/2
```

```
m=SQRT((x2-x1)**2+(y2-y1)**2)
```

第 3 个表达式中的 SQRT 为引用的参数函数, SQRT (X) 表示变量 X 的开平方值。

ANSYS 程序提供了大量的参数函数形式, 下面列举一些参数函数的具体应用:

```
Pi=ACOS(-1)                               ! 计算圆周率的值
```

```
Y=RAND(-1,1)           ! Y 是-1~1 之间的随机变量
Z=LOG10(A)              ! 计算 A 的常用对数 (10 为底)
```

### (3) 参数化数组的定义。

除了上述标量参数之外, ANSYS 系统还允许定义数组参数, 定义参数化数组命令的基本格式如下:

```
*DIM, Par, Type, IMAX, JMAX, KMAX, Var1, Var2, Var3
```

其中各参数的意义为:

*Par*: 要定义的数组参数名;

*Type*: 要定义的数组类型, 可以是 ARRAY, TABLE, CHAR, STRING 等;

*IMAX, JMAX, KMAX*: 三维数组各维的维数;

*Var1, Var2, Var3*: 对 TABLE 类型, 与行、列、页对应的变量名的缺省值。

定义了参数化数组之后, 可以通过 \*SET 命令为数组的各元素进行赋值, 也可采用直接赋值语句。

例如, \*DIM 定义一个 4×3 的数组 C 并赋值:

```
*DIM, C, 4, 3
```

```
C (1, 1) =1, 2, 3, 4
```

```
C (1, 2) =5, 6, 7, 8
```

```
C (1, 3) =9, 10, 11, 12
```

于是得到数组 C 为:

$$C = \begin{bmatrix} 1.0 & 5.0 & 9.0 \\ 2.0 & 6.0 & 10.0 \\ 3.0 & 7.0 & 11.0 \\ 4.0 & 8.0 & 12.0 \end{bmatrix}$$

以上各种方式定义参数可以被各种 ANSYS 操作命令所引用, 即命令的选项可以为变化的参数, 这就实现了参数化的建模过程。

### 3. APDL 语言的循环和分支控制

APDL 提供了强大的编程功能, 主要体现在循环和分支控制功能上:

#### (1) 循环。

ANSYS 的 APDL 允许在参数化建模文件中采用如下形式的循环体:

```
*DO, Par, IVAL, FVAL, INC
```

```
..... (循环操作的指令)
```

```
*ENDDO
```

*Par* 为循环指针的变量, *IVAL*、*FVAL*、*INC* 为决定循环次数的参量, 分别表示循环指针变量的初值、终值以及增量, 增量 *INC* 可正可负也可为小数 (分数)。如果 *IVAL* 比 *FVAL* 的值大, 且 *INC* 为正, 则程序会终止循环语句的执行。

循环体中可以嵌入循环形成多重循环, 这在一些空间杆件结构的建模中是很有用处的。

#### (2) 分支控制。

APDL 允许在参数化建模文件中采用如下形式的分支控制块:

```

*IF, VAL1, Oper, VAL2, THEN
..... (需要执行的命令)
*ELSEIF, VAL1, Oper, VAL2,
..... (需要执行的命令)
*ELSEIF, VAL1, Oper, VAL2,
..... (需要执行的命令)
*ELSE
..... (需要执行的命令)
*ENDIF

```

其中, Oper 为操作符, 可以为表 1-8 所示列举的一些。

表 1-8 \*IF 条件语句的操作符意义

操作符	意义
EQ	等于
NE	不等于
LT	小于
GT	大于
LE	小于等于
GE	大于等于
ABLT	绝对值小于
ABGT	绝对值大于

一般形式的\*IF 语句可以由两组操作符判断连接在一起的形式, 即:

```
*IF, VAL1, Oper1, VAL2, Base1, VAL3, Oper2, VAL4, Base2
```

Base1 可以用来连接操作符 Oper1 和 Oper2, 可以用下面的选项:

AND: 表示两个操作符 Oper1 和 Oper2 同时为真;

OR: 表示两个操作符 Oper1 和 Oper2 中间任何一个为真;

XOR: 表示两个操作符 Oper1 和 Oper2 中间有一个为真。

在本节的最后, 给出一个简单的 APDL 命令流文件, 用以建立一个带有加劲肋的圆柱筒:

```

! *****
!
!           一个简单的 APDL 建模命令流
! *****
L=2.0           ! 筒体的长度
t=0.005        ! 筒体的厚度
B=0.05         ! 加劲肋梁的宽度
H=0.1          ! 加劲肋梁的高度
A=B*H          ! 加劲肋梁的截面积
IZ=H*H*H*B/12 ! 加劲肋梁的截面惯性矩
IY=B*B*B*H/12
r=0.75         ! 圆柱筒的半径
NY=5           ! 筒轴线方向的等分数
NR=8           ! 筒圆周方向的等分数

/PREP7         ! 进入前处理器
ET,1,SHELL63  ! 定义圆柱筒表面壳单元

```



```

ET,2,BEAM4          ! 定义加劲肋梁单元
R,1,1,,,,,         ! 定义筒的厚度
R,2,A,IZ,IY,B,H    ! 定义加劲肋梁的截面参数

MP,EX,1,2.07e11    ! 定义线弹性材料模型（钢）
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,7800

*do,i,1,NY+1       ! 通过循环建立筒壁剖面关键点
k,i,r,(i-1)*L/NY,0
*enddo
*do,i,1,NY         ! 通过循环建立筒壁剖面中心线
LSTR,i,i+1
*enddo
k,NY+2,0,0,0,0,0  ! 定义辅助关键点
k,NY+3,0,0,1,0,0  ! 定义辅助关键点

```

! 剖面中心线绕两辅助关键点定义的轴旋转形成筒表面:

```

AROTAT,ALL,,,,,NY+2,NY+3,360,NR,
AATT,1,1,1,0,      ! 指定面单元属性
LESIZE,ALL,,5.0,,1,,1, ! 指定面单元的尺寸
AMESH,ALL          ! 划分面单元
LATT,1,2,2         ! 指定梁单元的属性
LMESH,ALL          ! 划分梁单元
/ESHAPE,1.0       ! 梁、壳单元显示实际截面
/REPLOT           ! 重新绘图

```

在 ANSYS 的命令窗口输入以上的批处理命令流，将得到如图 1-23 所示的结构模型，各切分窗口中依次为前视图、侧视图、俯视图以及轴测图。

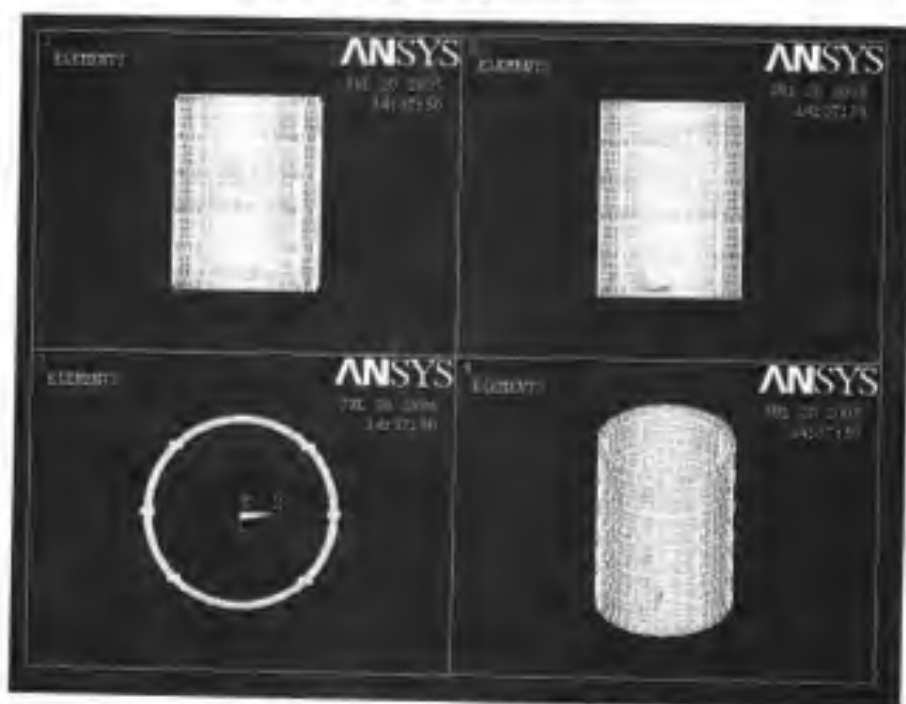


图 1-23 简单批处理文件的建模结果

### 1.3 ANSYS 工程结构分析的演示性例题

无论是什么工程结构问题的分析，都要对问题的基本特征有一个清楚的了解，从而为分析过程做好必要的规划。下面先来简单描述一下本节所要分析的问题：

由三组相同截面的梁系组成的六边形梁格水平放置，如图 1-24 示。其所有的内节点均承受竖向载荷  $F=100\text{kN}$ ，所有外节点均简支。各梁格均为等边三角形，其边长为  $a=1.0\text{m}$ ，梁的横截面为  $0.2\text{m}\times 0.3\text{m}$  的矩形。试分析这一梁格结构的内力以及变形情况。

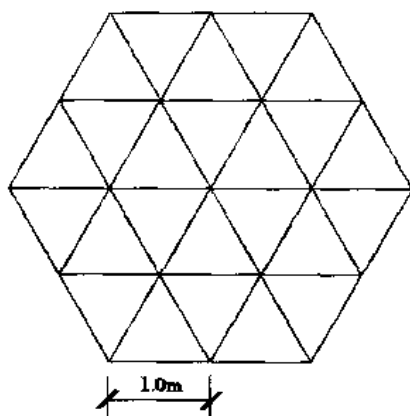


图 1-24 三向交叉梁系

拟采用 ANSYS 的空间梁单元 BEAM4，对这一三向交叉梁系结构进行分析。由于结构较为简单，因此用直接法进行建模，即首先逐个定义各节点，然后连接节点形成梁单元。

#### 1.3.1 GUI 中的分析过程

下面按照操作的先后顺序，对建模和分析的步骤进行介绍。

##### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 FISRT EXAMPLE；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示区域的标题为 ANALYSIS OF BEAMS。

##### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

##### 第 3 步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，图 1-25 所示。

对于本问题，拟采用三维杆单元 Beam4，因此在窗口左侧选择 Structural Beam，右侧选择 3D elastic 4，单击 OK 按钮退出。

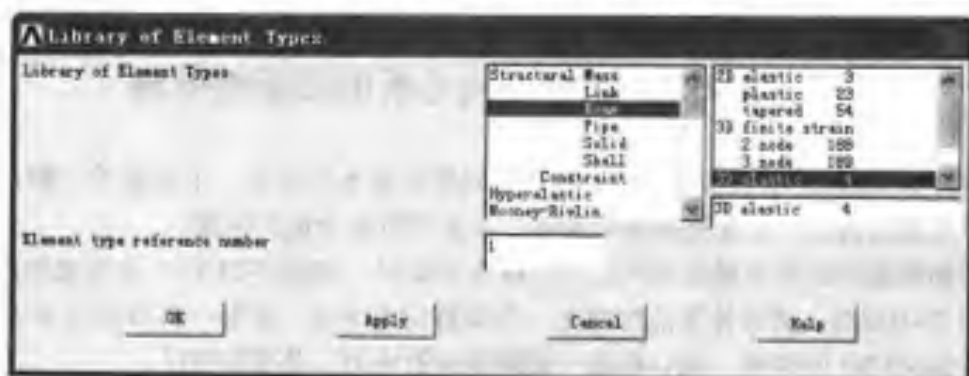


图 1-25 定义单元类型

#### 第 4 步：定义单元实参数

为梁单元指定截面参数，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant，在 Real Constants 对话框中，单击 Add...按钮，在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中，接受默认值，直接单击 OK，最后在图 1-26 所示的对话框中输入梁单元的截面参数。



图 1-26 定义实参数

定义完成后，单击 OK 按钮退出该对话框。

#### 第 5 步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在出现的图 1-27 所示的对话框中输入材料弹性模量  $2.07 \times 10^{11}$  以及泊松比 0.3。

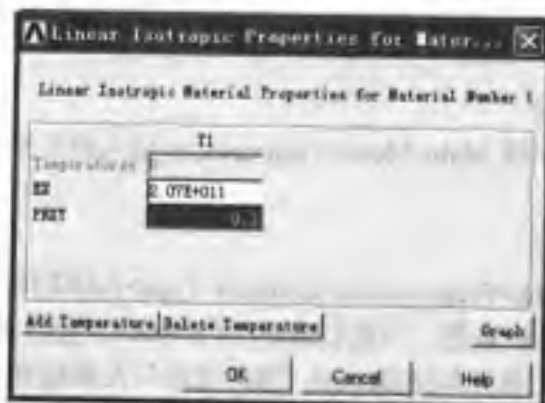


图 1-27 定义材料参数

单击 OK 按钮，返回到 Define Material Model Behavior 窗口，关闭后返回图形用户界面。

### 第6步：建立分析模型

由于本问题的单元数不多，因此采用直接法建立有限元结构分析模型。具体建模操作如下：

#### 1. 建立节点

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS，在 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框中依次输入 19 个节点的坐标，定义结构的所有节点。其操作过程很简单，不赘述。

#### 2. 建立梁单元

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，弹出对象拾取框，用鼠标在屏幕上依次点选梁系中的相邻节点，单击 Apply 按钮，两两之间形成梁单元。

#### 3. 施加约束及负载

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement > On Nodes，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选 12 个外围节点，然后单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，如图 1-28 所示，在 DOFs to be constrained 中选中 UX, UY, UZ，单击 OK 按钮，对周边的节点施加位移约束。

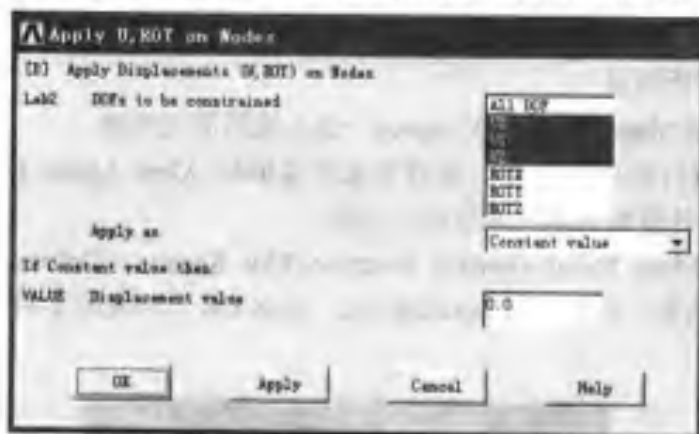


图 1-28 施加位移约束

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Force/Moment > On Nodes，弹出 Apply F/M on Nodes 对象拾取框，用鼠标在屏幕上点选中间的 7 个内节点，然后单击 OK 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，如图 1-29 所示，选择 FZ，输入载荷的数值为-100000，单击 OK 按钮退出。

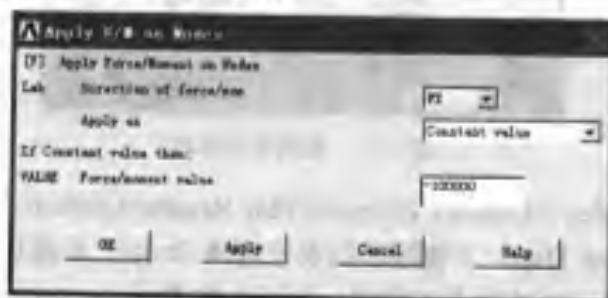


图 1-29 施加竖向载荷

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape, 弹出 Size and Shape 对话框中, 选中/ESHape 复选框, 单击 OK 按钮, 图形显示区域中将出现如图 1-30 所示的结构分析模型。

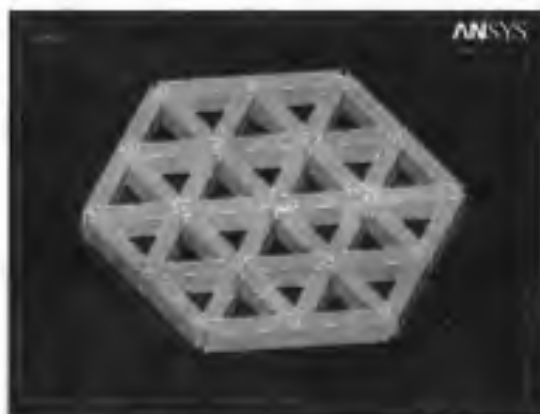


图 1-30 施加位移约束以及载荷后的模型

至此, 已经完成了建模的全部操作, 单击 Main Menu>Finish 退出前处理器。

#### 第 7 步: 求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 对问题进行求解。在求解结束后, 点 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

#### 第 8 步: 观察分析结果

通过菜单项 Main Menu>General Postproc, 进入通用后处理器。

在对计算结果进行后处理之前, 需首先通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 将计算结果读入通用后处理器。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results >Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 选择 Def+undeformed, 单击 OK, 出现图 1-31 所示的结构变形显示结果。



图 1-31 结构变形形状

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu, 弹出 Contour Element Solution Data, 左侧项目列表中选择 Stress, 右侧项目列表中选择 S1, 单击 OK 按钮, 图形显示第一主应力的分布情况, 如图 1-32 所示。

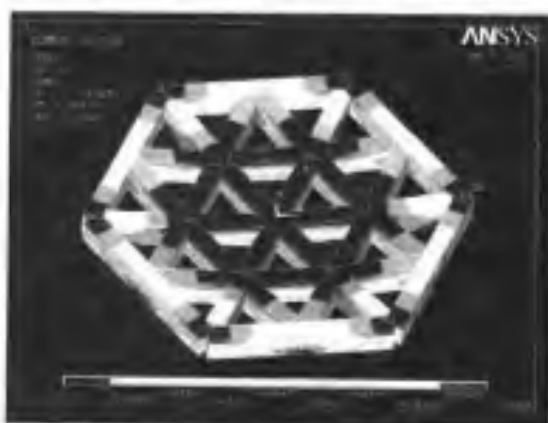


图 1-32 第一主应力分布

### 1.3.2 批处理分析过程

如果上述分析过程采用批处理形式，则相应的操作命令流如下：

```
! *****
!           工程结构分析演示性例题命令流
! *****
/REP7                                     ! 进入前处理器
ET,1,BEAM4                                 ! 定义单元类型
R,1,0.006,0.0002,0.00045,0.3,0.2,,      ! 定义实参数

MP,EX,1,2.07e11                            ! 定义材料的杨氏模量
MP,PRXY,1,0.3                              ! 定义材料的泊松比
! 定义结构的所有节点
N,1,2.000,0.000,0.000
N,2,1.000,1.732,0.000
N,3,-1.000,1.732,0.000
N,4,-2.000,0.000,0.000
N,5,-1.000,-1.732,0.000
N,6,1.000,-1.732,0.000
N,7,0.000,0.000,0.000
N,8,1.000,0.000,0.000
N,9,0.500,0.866,0.000
N,10,-0.500,0.866,0.000
N,11,-1.000,0.000,0.000
N,12,-0.500,-0.866,0.000
N,13,0.500,-0.866,0.000
N,14,1.500,0.866,0.000
N,15,0.000,1.732,0.000
N,16,-1.500,0.866,0.000
N,17,-1.500,-0.866,0.000
N,18,0.000,-1.732,0.000
N,19,1.500,-0.866,0.000
```

```

! 定义所有的梁单元
*DO,I,1,5,1
E,I,I+13      $      E,I+13,I+1
E,I,I+7       $      E,I+13,I+7
E,I+13,I+8   $      E,I+7,7      $      E,I+7,I+8
*ENDDO
E,6,13  $  E,13,7  $  E,6,19  $  E,19,13  $  E,8,13
E,8,19  $  E,19,1

NSEL,S,LOC,X,1.1,2.1      ! 选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,X,-2.1,-1.1   ! 继续选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,Y,1.5,2.0     ! 继续选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,Y,-2.0,-1.5  ! 继续选择周边受约束节点
D,ALL,,0,,UX,UY,UZ,,    ! 约束所选择节点的线位移自由度
ALLSEL,ALL               ! 恢复选择全体对象

NSEL,S,LOC,Y,-1.0,1.0
NSEL,R,LOC,X,-1.1,1.1   ! 选择内部受载的节点
F,ALL,FZ,-100000       ! 施加竖向载荷
ALLSEL,ALL              ! 恢复选择全体对象
/ESHAPE,1.0             ! 显示单元实际截面形状
EPLOT                    ! 绘制单元
FINI                     ! 退出前处理器

/SOLU                    ! 进入求解器
SOLVE                    ! 求解
FINI                     ! 退出求解器

/POST1                   ! 进入通用后处理器
SET,FIRST                ! 将结果读入后处理器
PLDISP,1                 ! 绘制结构变形前后形状
PLESOL,S,1,0,1           ! 绘制结构的主应力分布等值线图
FINI                     ! 退出通用后处理器

```

## 第2章 桁架杆系有限元分析及 ANSYS 实例

### 本章导读

桁架杆件系统的有限元问题是最为简单的结构分析问题，但是其包含的结构有限元分析的基本思路是具有普遍意义的。而且在工程中有大量的桁架结构的应用实例，比如各种空间网架结构。本章向读者介绍桁架结构的 ANSYS 分析原理和方法。

本章包括如下的一些主题：

- 桁架杆系的有限元分析概要
- ANSYS 的桁架杆单元简介
- 应用实例：平板网架结构的静力分析

### 2.1 桁架杆系的有限元分析概要

桁架杆件结构体系是工程中最常见的结构形式之一，如图 2-1 所示的屋架桁架，又比如各类空间网架结构、塔吊的机架等，都是桁架在工程中的应用实例。

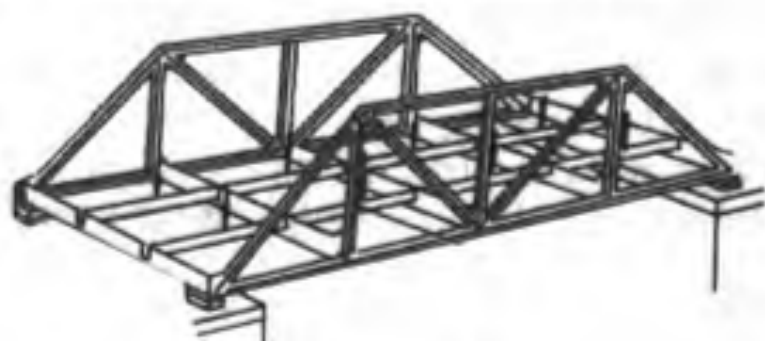


图 2-1 屋架桁架图

桁架结构的特点是，所有杆件仅承受轴向力，所有载荷集中作用于节点上。由于桁架结构具有自然离散的特点，因此可以将其每一根杆件视为一个单元。上一章已经提到，结构有限元分析要经过如下的一些环节：

- (1) 结构离散化。
- (2) 单元特性分析。
- (3) 结构分析。
- (4) 引入边界条件。
- (5) 求解线性方程组得到节点位移解。
- (6) 后处理与计算结果的评价。

上述过程中最难理解也最为重要的分析环节有两个，这就是单元特性分析和结构分析。前者是通过分析建立单元节点力与节点位移之间的关系(或者说单元分析的目的是建立单刚)，



后者则是进行结构的总体分析，建立结构的所有节点载荷与节点位移之间的关系（或者说结构分析目的是将单刚组合成总刚）。

先来看一个简单例题，希望通过这个题向大家说明上面两个结构有限元分析中最为核心的概念性问题，即如何得到单元刚度矩阵的各系数以及如何通过元件（单元）特性集成得到系统（结构）的特性——节点力与节点位移之间的关系：

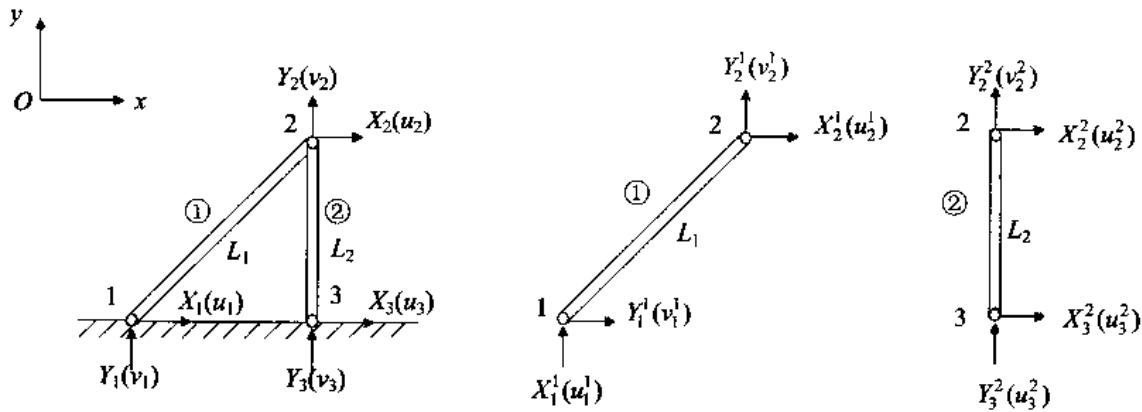


图 2-2 桁架结构有限元分析的原理

如图 2-2 所示的由两根杆件①和②组成的平面桁架，杆件的截面积均为  $A$ ，材料的弹性模量都是  $E$ ，长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ 。图中， $X_i$  和  $Y_i$  分别为桁架结构在第  $i$  个节点处所受到的水平以及竖向外力， $u_i$  和  $v_i$  分别为结构中节点  $i$  的水平和竖向节点位移， $u_i^j$  和  $v_i^j$  分别为单元  $j$  杆端节点  $i$  的水平和竖向杆端位移（上标  $j$  表示单元号，节点编号采用结构中的节点编号）， $X_i^j$  和  $Y_i^j$  分别为单元  $j$  的杆端节点  $i$  处的水平和竖向杆端力。

由于杆件在节点处均为铰支，因此杆端无力矩作用，每个节点的力和位移均有两个分量，或者说，一个节点具有两个自由度。我们取以上与坐标方向平行的正交分量，分析杆端节点力和节点位移之间的关系。

对于杆件①，设其轴线方向（由节点 1 指向节点 2）与  $x$  轴正向成  $\alpha$  角，则其杆端力与杆端位移之间的关系可以表示为：

$$\begin{Bmatrix} X_1^1 \\ Y_1^1 \\ X_2^1 \\ Y_2^1 \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L_1} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^1 \\ v_1^1 \\ u_2^1 \\ v_2^1 \end{Bmatrix}$$

其中，杆端力与杆端位移之间的系数矩阵称为单元刚度矩阵，用  $k_{ij}$  来表示刚度矩阵中位于第  $i$  行  $j$  列的元素。下面，以位于第 1 列的各元素  $k_{i1}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为例，说明刚度矩阵元素的计算方法和力学意义。

首先，令单元①节点力与节点位移关系式中的  $u_1^1=1$ ， $v_1^1=v_2^1=u_2^1=0$ ，则得到  $X_1^1=k_{11}$ ， $Y_1^1=k_{21}$ ， $X_2^1=k_{31}$ ， $Y_2^1=k_{41}$ ，这表明当单元①的节点 1 发生单位微小水平位移（ $u_1^1=1$ ）且同时约束单元①的其他所有节点位移（ $v_1^1=v_2^1=u_2^1=0$ ）时，单元①在各节点处受到的杆端力，这

时的杆端力组成一个平衡力系，它们在数值上（以与坐标轴正向一致为正值）就等于刚度矩阵中的元素，表征单元①抵抗节点 1 水平位移  $u_1^1$  的刚度。这些力的数值很容易由材料力学求得：

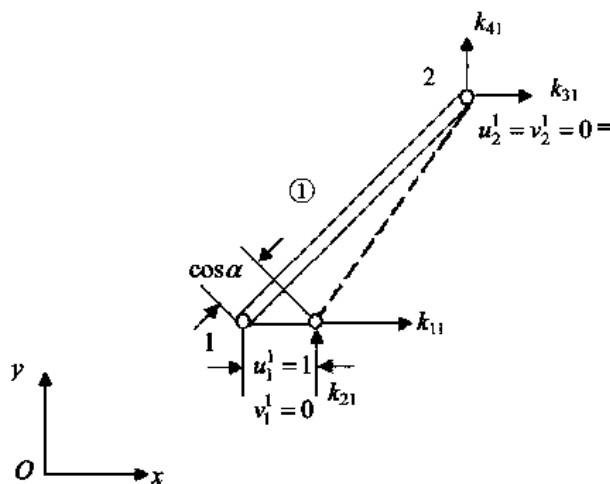


图 2-3 刚度系数的意义图示

当  $u_1^1=1$ ，其余节点位移分量  $v_1^1=v_2^1=u_2^1=0$  时，杆单元①的缩短量为  $\Delta l = \cos \alpha$ ，于是杆件受到的轴向压力为  $EA \cos \alpha / L_1$ ，这就是杆件①在结点 1 处受到的节点力，其在 x 方向和 y 方向的分量分别为：

$$k_{11} = EA \cos^2 \alpha / L_1, \quad k_{21} = EA \cos \alpha \sin \alpha / L_1$$

杆件①在节点 2 处受到的力，其大小等于杆件的轴力，且方向与节点 1 处的节点力相反，其在 x 方向和 y 方向的分量分别为：

$$k_{31} = -EA \cos^2 \alpha / L_1, \quad k_{41} = -EA \cos \alpha \sin \alpha / L_1$$

继续对各位移分量做类似的分析，即可得到刚度矩阵的全部元素，完成桁架单元①特性的分析。实际上，通过这一操作，已经得到了平面桁架杆单元的一般刚度特性，对于桁架单元②，其相当于倾角为 90 度的特例，可直接得到单元刚度方程为：

$$\begin{Bmatrix} X_2^2 \\ Y_2^2 \\ X_3^2 \\ Y_3^2 \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L_2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2^2 \\ v_2^2 \\ u_3^2 \\ v_3^2 \end{Bmatrix}$$

单元分析结束后，就需要进行结构分析，将单元的刚度特性集成得到结构的刚度方程，根据几何条件——相邻单元公共节点位移的协调关系，即：

$$u_1 = u_1^1, \quad v_1 = v_1^1; \quad u_2 = u_2^1 = u_2^2, \quad v_2 = v_2^1 = v_2^2; \quad u_3 = u_3^2, \quad v_3 = v_3^2$$

又根据节点处力的平衡条件，作用于某节点上的外力应等于包含该节点的各单元的杆端节点力的合力，即：

$$X_1 = X_1^1, \quad Y_1 = Y_1^1; \quad X_2 = X_2^1 + X_2^2, \quad Y_2 = Y_2^1 + Y_2^2; \quad X_3 = X_3^2 = 0, \quad Y_3 = Y_3^2$$

以上 3 个节点处沿坐标轴方向的力的平衡条件，就是结构的节点力与节点位移的关系，

代入单元杆端力与杆端位移的关系（两个单元的刚度方程），即得到总体刚度矩阵的显式。显然，总刚是一个  $6 \times 6$  的矩阵。由于节点 2 同时连在杆件①和②上，因此两根杆件将共同抵抗公共节点 2 的变位，这在结构总体刚度矩阵中表现为两个单元对应刚度系数的叠加，即：

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & 0 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{22}^2 & K_{23}^2 \\ 0 & K_{32}^2 & K_{33}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{Bmatrix}$$

其中  $F_i = \{X_i, Y_i\}^T$ ， $\Delta_i = \{u_i, v_i\}^T$ ， $K_{ij}^m$  表示单元  $m$  的节点  $i$  和节点  $j$  之间的刚度关系（单元刚度矩阵的子块），即节点  $i$  的位移引起节点  $j$  处的杆端力，反之也对。

这样就完成了结构分析，得到总体刚度矩阵，这其中包含了整个有限元分析中最为核心的基本概念。后面的步骤就比较简单了，包括引入约束条件，求解线性方程组等，一般的有限元教科书中都有详细介绍，此处不再赘述。

上面介绍了平面桁架结构有限元分析的基本概念思想，这同样适用于空间桁架结构和其他各种结构的有限元分析，有了这个基础就一定可以正确的使用 ANSYS 进行各种结构的分析。

## 2.2 ANSYS 中提供的二力杆单元

ANSYS 程序中提供了一系列仅能承受轴向力的二力杆单元来模拟各类平面桁架杆、空间桁架杆以及悬索等结构构件。本节向读者介绍 ANSYS 中三种常用的桁架单元类型，即 Link1, Link8, Link10。

### 2.2.1 Link1 单元特性简介

Link1 单元的形状如图 2-4 所示。

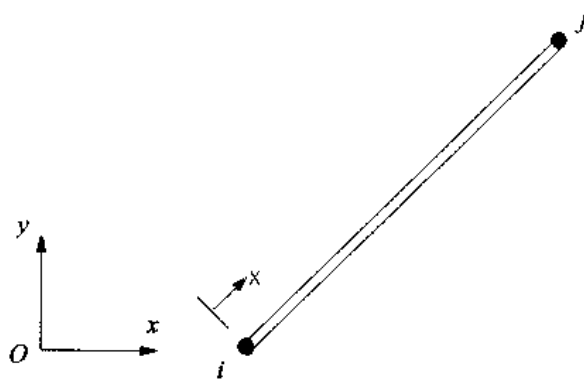


图 2-4 Link1 单元的形状

二维杆单元 LINK1 是轴向的拉伸-压缩单元，具有两个结点，每个结点有沿 X 和 Y 方向的平移自由度，可以用来模拟两端铰接的杆，不计杆件的弯曲和扭转变形。LINK1 可以用于许多工程领域，可以用其来模拟桁架构件、连杆或者弹簧等。

Link1 单元在使用过程中需要注意如下几点：

- (1) 杆件为均质等直杆，且单元端点所受载荷合力沿轴线方向。杆的长度不能为零，即节点 I 和 J 不能重合。所分析杆件必须处于 X-Y 平面内，且截面积不应为零。
- (2) 温度被假设为沿着杆的长度方向线性变化。
- (3) 位移函数的设置使得杆件内部的应力为均匀分布。
- (4) 如可能的话，应该在分析的第一次迭代过程中考虑初始应变对应力刚度矩阵的影响。
- (5) 单元不具备阻尼材料特性。
- (6) 不能向 Link1 施加流体的载荷。
- (7) 允许采用应力强化刚度和大变形分析。

在分析之前，必须为 Link1 单元输入表 2-1 所列的数据信息（通过前处理的具体操作来实现数据的传递）。

表 2-1 LINK1 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	LINK1
节点编号	I,J
节点自由度	UX,UY
实常数	AREA（横截面积），ISTRN（初始应变）
材料参数	EX,ALPX(or CTEX or THSX),DENS,DAMP
表面载荷	无
体载荷 (用于热分析)	温度: T(I),T(J) 热流量: FL(I), FL(J)
特殊功能	塑性,蠕变,膨胀,应力强化,大变形

### 2.2.2 Link8 单元特性简介

Link8 单元的形状如图 2-5 所示。

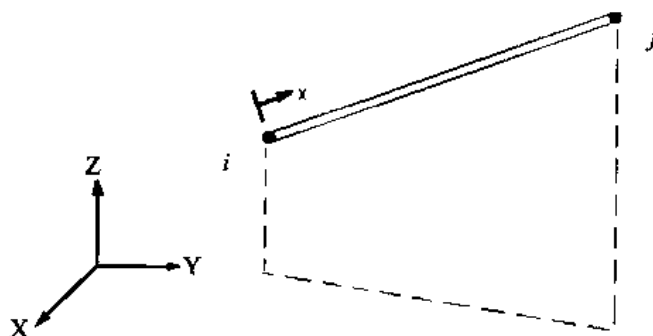


图 2-5 Link8 单元的形状

三维杆单元 LINK8 是轴向的拉伸-压缩杆件单元，具有两个结点，每个结点有三个平移自由度（沿 X, Y 以及 Z 方向），可用以模拟两端铰接的空间杆件，不考虑杆件的弯曲以及扭转变形。

LINK8 可以用于许多工程问题的分析，可以利用它来模拟空间桁架的杆件（如各类空间网架结构的杆件），机械系统的连杆或者三维线弹簧等。

在使用 Link8 单元的过程中需要注意以下几点：

(1) 单元为匀质的等直杆，且杆端外力的合力只能沿杆件的轴向。杆件的长度应大于零，即节点  $i$  和  $j$  不能重合，杆件的横截面积应大于零。

(2) 温度被假设为沿着杆的长度方向线性变化。

(3) 位移函数的设置使得杆件内部的应力为均匀分布。

(4) 如可能的话，应该在分析的第一次迭代过程中考虑初始应变对应力刚度矩阵的影响。

(5) 单元不具备阻尼材料特性。

(6) 不能向单元施加流体载荷。

(7) 只允许采用应力强化刚度和大变形两种单元。

在分析之前，必须为 Link8 单元输入表 2-2 所列举的数据信息（通过前处理的具体操作来实现相关数据的传递）。

表 2-2 LINK8 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	LINK8
节点编号	I,J
节点自由度	UX,UY,UZ
实常数	AREA,ISTRN
材料参数	EX,ALPX,DENS,DAMP
表面载荷	无
体载荷	温度: T(I),T(J) 热流量: FL(I), FL(J)
特殊功能	塑性, 蠕变, 膨胀, 应力强化, 大变形, 单元死活

### 2.2.3 Link10 单元特性简介

Link10 单元的形状如图 2-6 所示。

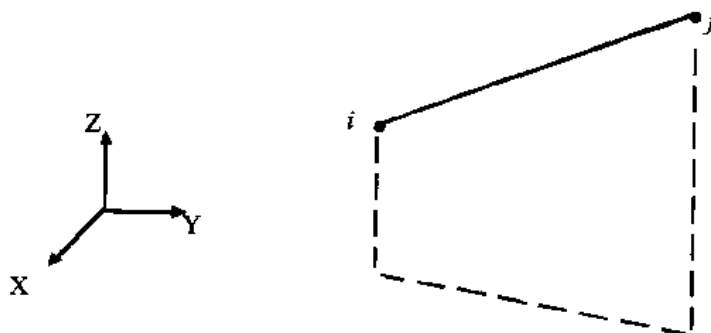


图 2-6 Link10 单元的形状

三维杆单元 LINK10 具有独特的性质，它具有双线性刚度矩阵，因而只能单向受拉或受压，

如图 2-7 所示。当它是单向受拉选项时，只要受压（与松弛的绳索和链条相似），它的刚度将变为 0，这个特征使得 Link10 适用于分析静态的电缆、钢索等问题。该单元也可用于动态问题的分析中，计入惯性以及阻尼的影响。

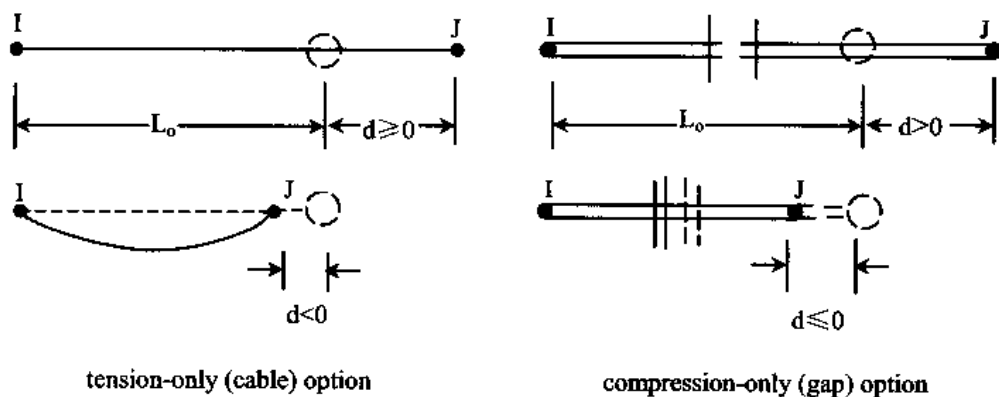


图 2-7 link10 单元的拉压选项

LINK10 单元具有两个结点，每个结点有三个平移自由度（分别沿 X、Y 和 Z 方向）。该单元在使用过程中需要注意以下几点：

- (1) 杆的长度不能为零，即节点 I 和 J 不能重合。横截面积必须大于零。
- (2) 温度被假设为沿着杆的长度方向线性变化。
- (3) 单元是非线性的，需要迭代解。
- (4) 如果 ISTRN=0.0，单元刚度包括在第一个子步中。
- (5) 在裂缝分析中（只能承受压力的选项），节点 J 相对于 I 有正的轴向位移（在单元坐标系中）意味着裂缝扩大。
- (6) 对于非线性问题求解的程序如下（有关的概念请参考本书第 9 章）：  
程序的第一个子步由初始应变或裂缝决定。对于绳索而言输入值如果小于零，或者对于裂缝而言输入值大于零，在这一步，单元的刚度取零。如果最后一个子步，STAT=2，下一步刚度为零。如果 STAT=1，下一步就单元就有刚度。对于绳索而言如果相对位移为负，或者对于裂缝而言相对位移为正，刚度意义不大。
- (7) 当在一个子步中，单元状态发生改变，这个改变产生的影响包含在下一个子步中。非收敛的子步不平衡。初始应变用于计算应力强度矩阵，用于第一步迭代。
- (8) 下垂的绳索必须用应力强化来保证数值稳定。应力强化和大变形效应一起用于绳索问题中。
- (9) 不能使用阻尼材料属性。
- (10) 不能使用生死单元特性。

在分析之前，必须为 Link10 单元输入表 2-3 所列的数据信息（通过前处理的具体操作来实现数据的传递）。

Link10 单元的输出数据包括节点位移以及附加的单元计算结果，具体的结果输出项目参照表 2-4。

表 2-3 LINK10 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	LINK10
节点编号	I,J
节点自由度	UX,UY,UZ
实常数	AREA (横截面积), ISTRN (初始应变)
材料参数	EX,ALPX(or CTEX or THSX),DENS,DAMP
表面载荷	无
体载荷	温度:T(I),T(J)
特殊功能	非线性, 应力强化, 大变形, 单元死活
KEYOPT(2)	松弛的绳索的刚度 0-无刚度 1-沿径向有较小的刚度 2-径向和法向都有小刚度 (只有在应力强化时应用)
KEYOPT(3)	拉伸/压缩选项 0-只受拉 (绳索) 1-只受压 (裂缝)

注: 如果 KEYOPT(3)=0, 并且 ISTRN 小于 0, 绳索起始状态是松弛的;  
如果 KEYOPT(3)=1, 并且 ISTRN 大于 0, 裂缝起始状态是张开的。

表 2-4 LINK10 单元的结果输出数据

变量名称	变量含义
EL	单元编号
NODES	单元节点编号 I 和 J
MAT	单元的材料编号
VOLU	单元体积
XC, YC, ZC	结果输出位置
STAT	单元状态
TEMP	I 和 J 节点位置的温度 T(I),T(J)
MFORX	在单元坐标系中的膜力
SAXL	单元的轴向应力
EPELAXL	单元的轴向弹性应变
EPHAXL	单元的轴向热应变
EPINAXL	单元的轴向初始应变

注: (1) 单元状态值: 1-绳索受拉或裂缝受压; 2-绳索松弛或裂缝张开。  
(2) 仅在质心可采用\*GET 命令。

### 2.3 应用实例: 平板网架结构的静力分析

作为轴力杆单元的结构有限元分析的应用实例, 本节介绍如图 2-8 所示的平板网架结构的

ANSYS 建模以及静力分析方法。

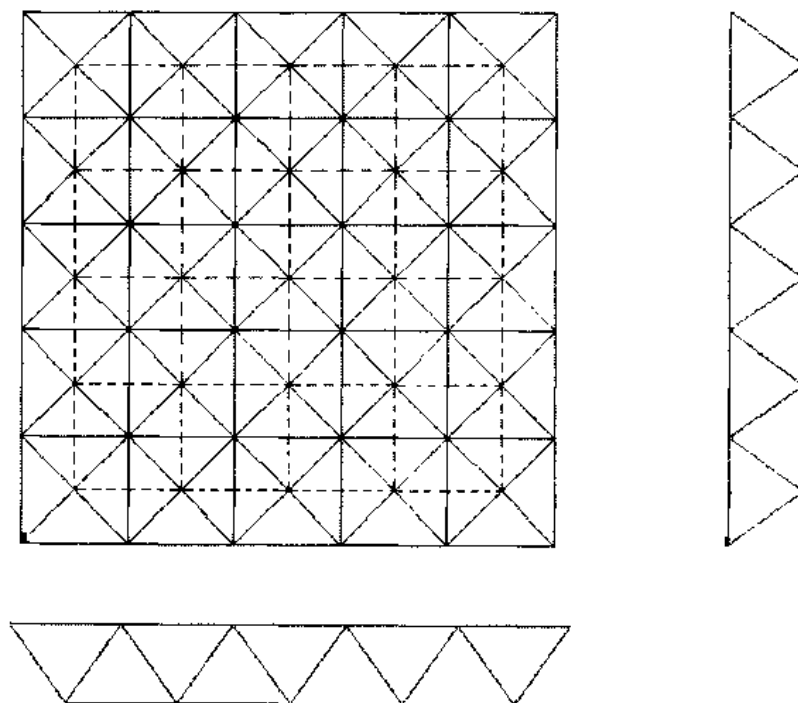


图 2-8 平板网架结构的示意图

问题简单描述如下：

正方形平板网架结构，上弦平面边长 5.0m，下弦平面边长 4.0m，弦杆长度均为 1.0m，网架的高度（上下弦平面之间的垂直距离）为 0.7m 上弦平面周边节点均铰支，其余节点和下弦平面均自由。杆件材料采用钢材，密度  $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，弹性模量 207GPa，泊松比 0.3，试分析这一网架结构在自重作用下的内力以及变形情况。

下面按照操作的先后步骤，对整个建模以及分析的过程进行介绍。

第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后：

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 RACK；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示标题为 ANALYSIS OF RACK UNDER SELF-WEIGHT。

第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

第 3 步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD..按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 2-9 所示。

对于本问题，拟采用三维杆单元 Link8 进行分析，因此在窗口左侧选择 Structural Link，右侧选择 3D,spar 8，单击 OK 按钮退出。



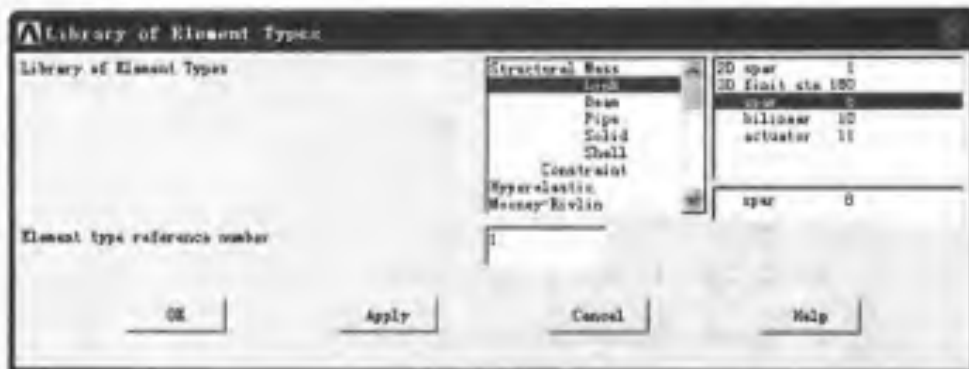


图 2-9 定义单元类型

#### 第 4 步：定义杆件截面积

为杆单元指定截面积，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant，在 Real Constants 对话框中，点 Add...按钮，在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中，接受默认值，直接单击 OK 按钮，最后在图 2-10 所示的对话框中输入杆单元的截面积为  $4.91\text{E-4}$  ( $\text{m}^2$ )。

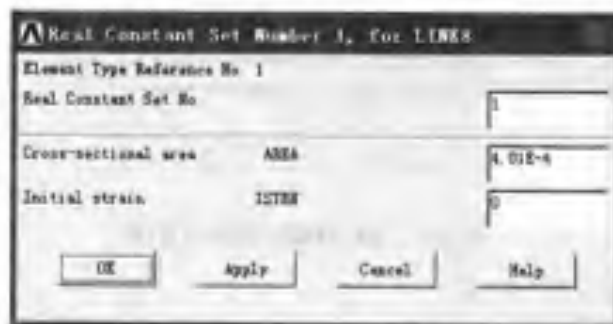


图 2-10 定义杆件截面积

定义完成后，单击 OK 按钮退出该对话框。

#### 第 5 步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在图 2-11 所示的对话框中输入材料弹性模量  $2.07\text{e}11$  以及泊松比 0.3。

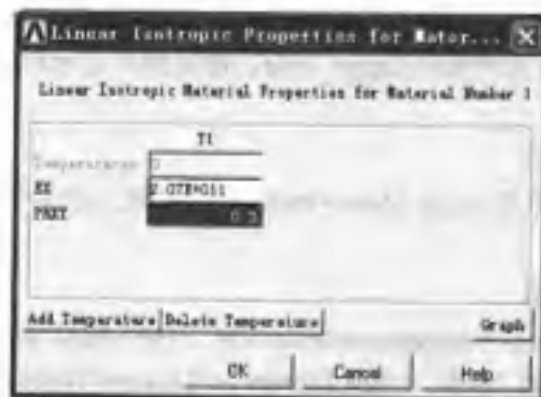


图 2-11 定义材料参数

单击 OK 按钮，返回 Define Material Model Behavior，在右侧选择 Density，双击打开定义密度的对话框，如图 2-12 所示，在其中输入材料的密度 7800（本题必须定义密度），单击 OK 按钮退出，然后关闭 Define Material Model Behavior，返回图形用户界面。

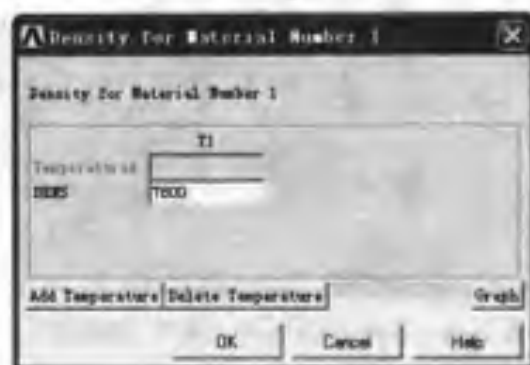


图 2-12 定义材料密度

### 第 6 步：建立分析模型

采用直接建模的方式建立网架结构的分析模型，其操作步骤如下：

#### 1. 建立上弦平面的节点

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS，在弹出的 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框中输入如下一些节点的坐标，单击 Apply 按钮，即可完成定义节点。

上弦平面节点的 X 坐标分别为 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0，对于每个 X 坐标值，Y 坐标分别取 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0，Z 坐标均为 0.0，即共定义 36 个节点。

#### 2. 建立下弦平面的节点

采用和上一步相同的操作，定义下弦平面的所有节点，这些节点的坐标位置依次为：X 坐标 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5，对于每个 X 坐标，Y 坐标分别取 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5，Z 坐标均为 -0.7。

注意：在定义节点的过程中，无需输入节点的编号，程序将会按照输入次序的先后自动为所有的节点编号。

#### 3. 建立杆件单元

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，弹出 Element from Nodes 对象拾取框，依次在屏幕上点选各杆件的两端节点，然后单击 Apply 按钮，形成所有的弦杆以及斜腹杆。

图 2-13 所示为通过节点连线直接建模方式得到的网架结构模型。

注意：由于 APDL 提供了循环操作命令，因此可以通过循环语句极大地简化烦琐的 GUI 界面操作，读者可以参考后面建模过程的命令流。

### 第 7 步：退出前处理器进入求解器

至此，我们已经完成了结构分析模型的建立，点 Main Menu>Finish 菜单项，退出前处理器。选取 Main Menu>Solution 菜单项，进入求解器进行加载以及求解。

### 第 8 步：施加位移边界条件

网架上弦平面周边的节点为固定铰支座，需向这些节点施加三向线位移约束。



图 2-13 网架结构的有限元模型（俯视图）

### 1. 选择需约束的节点

选择菜单项 `Utility Menu>Select>Entities`，在弹出的 `select entities` 对话框中，自上到下依次选择 `Nodes`→`By Location`→`X coordinates`，在 `Min,Max` 一栏中填写 `-0.1,0.1`，选中下面的 `From Full` 复选框，单击 `Apply` 按钮，即可选中左边的一列节点。然后，将 `Min,Max` 一栏改写为 `4.9,5.1`，选中下面的 `Also Select` 复选框，单击 `Apply` 按钮，即可选中右边的一列节点。然后将选择设置改为：`Nodes`→`By Location`→`Y coordinates`，在 `Min,Max` 一栏中填写 `-0.1,0.1`，选中下面的 `Also Select` 复选框，单击 `Apply` 按钮，即可选中下边的一列节点，再将 `Min,Max` 一栏改写为 `4.9,5.1`，选中下面的 `Also Select` 复选框，单击 `Apply` 按钮，即可选中上面的一排节点。

### 2. 施加

选择菜单项 `Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement>On Nodes`，在弹出的对象拾取对话框中，单击 `Pick All` 按钮，出现 `Apply U, ROT on Nodes` 对话框，在 `DOFs to be constrained` 一栏中，选择 `ALL DOF`，然后单击 `OK` 按钮。施加了约束之后的模型如图 2-14 所示。

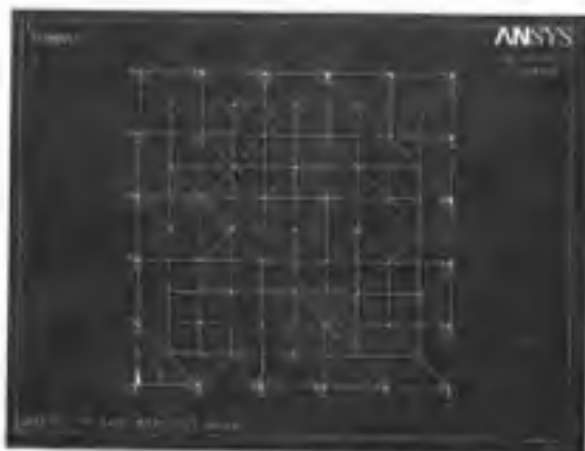


图 2-14 施加约束后的模型

### 3. 恢复选择全部对象

通过菜单项 `Utility Menu>Select>Everything`，恢复选择整个模型的全部实体对象。

### 第9步：施加重力

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity, 在弹出的 Apply (Gravitational) Acceleration 对话框中, 输入重力加速度的数值为 9.8, 如图 2-15 所示。

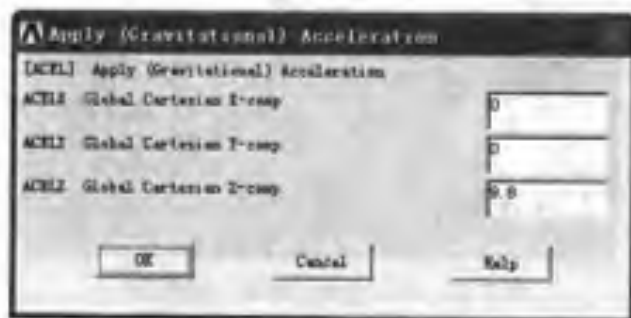


图 2-15 施加重力加速度

注意：在 ANSYS 中，通过施加加速度的形式来施加体力（重力以及惯性力），且根据惯性力的特性，其方向总是与加速度方向相反。因此在这个问题中，重力是沿着 Y 轴的负向，重力加速度的正方向应与重力恰好相反（ANSYS 将重力也视为惯性力）。

### 第10步：求解

#### 1. 求解

加载完成后，即可点菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 开始求解。程序会弹出一个计算模型的信息摘要窗口，同时弹出 Solve Current Load Step 信息确认对话框。确认信息无误后，单击 OK 按钮，即可开始求解。

#### 2. 退出求解器

求解结束后，弹出 Solution is done! 消息提示框。选择菜单项 Main Menu>Finish, 退出求解器。

注意：由于程序默认的分析类型就是静力分析，因此这里无需专门设置分析类型。

### 第11步：结果后处理

下面对计算的结果进行可视化后处理及分析，可按如下的步骤进行：

#### 1. 进入通用后处理器

点菜单项 Main Menu>General Postproc 进入通用后处理器。

#### 2. 读入结果文件

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入计算结果。

#### 3. 进行图形显示

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Pan, Zoom, Rotate, 通过 Pan, Zoom, Rotate 视图控制面板，选择视图方向为 Bot。

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def Shape Only 选项，单击 OK 按钮，即可得到结构变形后的侧视图，如图 2-16 所示。

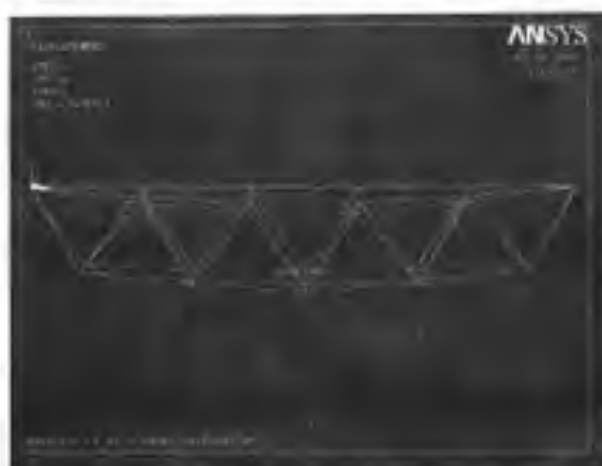


图 2-16 结构变形后形状 (侧视图)

通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu, 在弹出的 Contour Nodal Solution Data 对话框最上边的下拉列表中, 左侧选择 DOF Solution, 右侧选择 Translation UZ, 选中中间的 Def+Undeformed 复选框。单击 Apply 按钮, 通过 Pan Zoom Rotate 面板适当调整视图角度, 即可观察到图 2-17 所示的结构竖向挠度分布等值线图。



图 2-17 竖向挠度等值线与结构变形形状

如果本节的上述建模以及分析过程采用批处理方式, 则相应操作命令流如下:

```
! *****
!           平板网壳结构静力分析命令流
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME,RACK
/TITLE,ANALYSIS OF RACK UNDER SELF-WEIGHT

! (2) 进入前处理器
/PREP7

! (3) 定义单元类型
```

```

ET,1,LINK8

! (4) 定义杆件的截面积
R,1,4.91E-4

! (5) 定义材料模型及参数
MP,EX,1,2.07e11           ! 弹性模量
MP,PRXY,1,0.3            ! 泊松比
MP,DENS,1,7800           ! 密度

! (6) 建立分析模型
! 以循环的方式建立第一列上弦节点, 然后通过节点复制形成所有上弦节点:
*DO,I,1,6,1
N,I,0.0,(I-1)*1.0,0.0
*ENDDO
NGEN,6,6,ALL,,,1.0,0.0,0.0      ! 节点复制
! 以循环的方式建立第一列下弦节点, 然后通过节点复制形成所有下弦节点:
*DO,I,37,41,1
N,I,0.5,(I-37)*1.0+0.5,-0.7
*ENDDO
NGEN,5,5,37,41,1,1.0,0.0,0.0    ! 节点复制
! 通过循环(纵向单元采用两重循环)形成所有的上弦杆单元:
*DO,I,1,31,6                    ! 外循环
*DO,J,1,5,1                     ! 内循环
E,I+J-1,I+J
*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,1,30,1
E,I,I+6
*ENDDO
! 通过循环(纵向单元采用两重循环)形成所有的下弦杆单元:
*DO,I,37,57,5                  ! 外循环
*DO,J,1,4,1                    ! 内循环
E,I+J-1,I+J
*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,37,56,1
E,I,I+5
*ENDDO
! 通过循环形成所有的斜腹杆单元, 注意是对下弦所有节点进行循环;
! 将下弦平面的所有节点依次与4个相邻的上弦节点连线,
! 节点编号之间的映射系数是通过待定系数法得到的, 最后采用两重循环实现:
*DO,I,37.0,57.0,5.0
*DO,J,1.0,5.0,1.0
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J-1
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J

```

```

E,I+J-1,1.2*I-43.4+J+5
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J+6
*ENDDO
*ENDDO

! (7) 退出前处理器进入求解器
FINI
/SOLU

! (8) 对上弦周边节点施加三向位移约束
NSEL,S,LOC,X,-0.1,0.1
NSEL,A,LOC,X,4.9,5.1
NSEL,A,LOC,Y,-0.1,0.1
NSEL,A,LOC,Y,4.9,5.1
D,ALL,ALL
allsel,all

! (9) 对整个结构施加重力 (以惯性力的形式, 施加加速度)
ACEL,0,0,9.8,
FINI                                ! 退出前处理器

! (10) 求解并退出求解器
/SOLU                                ! 进入求解器
Solve                                ! 求解
FINI                                  ! 退出求解器

! (11) 后处理
/POST1                                ! 进入通用后处理器
SET,FIRST                             ! 读入结果文件
/VIEW,1,,-1                          ! 改变视图角度
/REP,FAST                             ! 重新绘图
PLDISP,0                              ! 绘制结构变形图
PLNSOL,U,Z,1,1                       ! 绘制结构竖向位移分布等值线图

```

## 第3章 梁系结构分析方法及 ANSYS 实例

### 本章导读

平面以及空间梁系和刚架结构的有限元分析，是杆系结构分析中最为重要的主题。在各类实际工程中有大量的梁系以及刚架结构的应用实例，比如网壳结构就是空间的交叉梁系。本章向读者介绍桁架结构的 ANSYS 分析原理和方法。

本章包括如下的一些主题：

- 梁系结构有限元分析理论提要
- ANSYS 中的梁单元
- 分析实例：建筑井式梁格的分析

### 3.1 梁系结构有限元分析提要

梁系以及刚架结构在工程上有着非常广泛的应用，图 3-1 所示的建筑井式楼盖的梁格就是一个典型的工程实例，各类空间网壳、轻钢门式刚架厂房等都是刚架结构在工程中应用的实际例子。

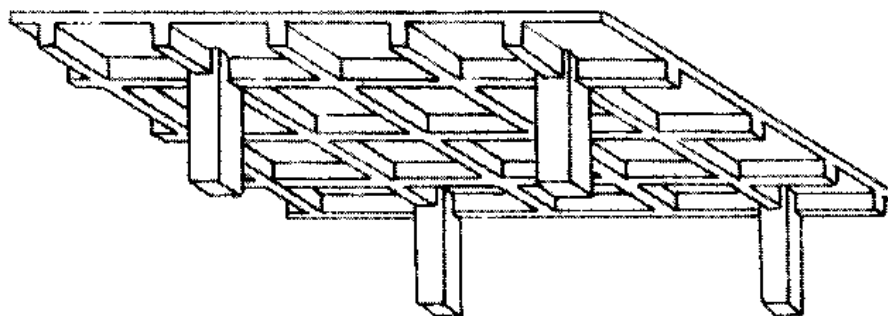


图 3-1 井式楼盖的梁格

在上一章桁架结构有限元分析中，举过一个两杆平面桁架的简例，用来向读者说明结构有限元分析的基本过程及核心概念。相信通过那个例题的学习，大家已经对结构有限元分析的实现过程有了充分的认识。

由于梁系结构也属于自然离散结构体系，因此其有限元分析过程与桁架结构完全相似，也经过单元分析（找单刚）、结构分析（组总刚）、引入边界条件并求解等步骤。由于一般计算力学教科书上对梁系结构的分析都有系统的介绍，因此本节不再介绍相关的内容。

对于平面梁单元，在计及其轴向变形时，每个节点将有 3 个位移分量（轴向位移、横向位移和弯曲转角）和有 3 个杆端力（矩）分量（轴力、剪力和弯矩），因此其单元刚度矩阵（单元节点力与节点位移的关系）将为一个 6 行 6 列矩阵。

对于一个最一般情况下的空间梁单元，其一个节点将具有 6 个运动自由度，其中包括三



个线位移自由度（一个轴向位移以及平面内外的横向位移）以及三个转动自由度（一个扭转角和两个弯曲转角自由度）；一个节点具有 6 个杆端力（矩）分量，其中包括三个杆端力分量（一个轴力和两个剪力）以及三个杆端力矩分量（一个扭矩和两个弯矩），因此，其单元刚度矩阵将是一个 12 行 12 列矩阵。

各类梁单元单刚中的元素意义都不难理解，其实质都是弹性刚度系数，即：一个自由度方向上的单位位移（固定其他所有自由度的位移）引起的其他自由度方向上的反力。一般教科书上都有具体的推导过程（基于材料力学概念或基于位移模式和虚功原理），在此不展开叙述。

## 3.2 ANSYS 中的梁单元

ANSYS 程序中提供了多种二维和三维的梁单元，来模拟各类结构中的平面以及空间的梁构件。本节向读者介绍两种常用的梁单元类型：BEAM3 和 BEAM4，此外，对空间梁单元 BEAM188 和 BEAM189 的特性也进行一些简单的介绍。

### 3.2.1 BEAM3 单元特性介绍

BEAM3 单元的形状如图 3-2 所示。

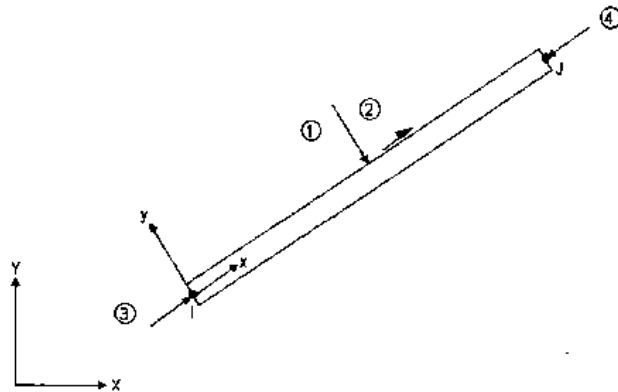


图 3-2 BEAM3 单元的形状

梁单元 BEAM3 为考虑了轴向变形的平面梁单元，在每一个节点上有三个自由度，即沿着坐标 X 轴和 Y 轴方向的平动自由度和绕着 Z 轴旋转的转角自由度。利用该单元可以模拟各种平面刚架、多跨连续梁等平面梁系结构。BEAM3 单元的截面应力分布如图 3-3 所示。

该单元在使用的过程中需要注意如下一些问题：

- (1) BEAM3 梁单元只能处于 X-Y 平面内，且长度和横截面积均不能为零。
- (2) 在 BEAM3 梁单元中，对于转动惯量参数的输入，可以是任意形状横截面的计算结果。但是应力计算时取截面底端到中性轴的距离为截面高度的一半。
- (3) 单元的高度仅仅在弯曲计算和热应力分析时才会用到。应力沿着截面高度方向为线性分布。
- (4) 温度梯度在高度方向和长度方向一般都被认为是线性的。
- (5) 在不使用大挠度的情况下，惯性矩可以为 0。

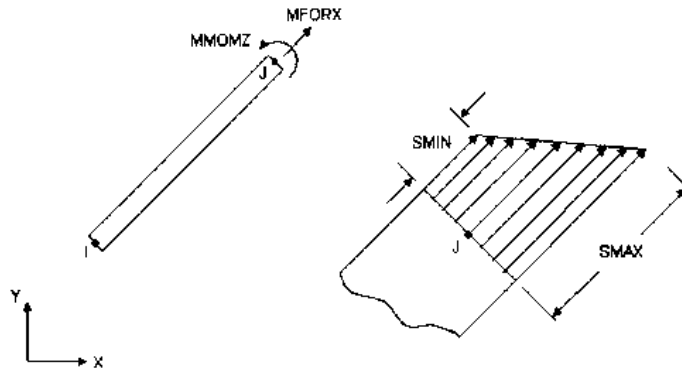


图 3-3 BEAM3 的截面应力分布

(6) 该单元不能使用阻尼材料特性。

(7) 只适用应力强化和大变形分析。

在分析之前，必须为 BEAM3 单元输入表 3-1 所列的数据信息（通过前处理的具体操作来实现数据的传递）。

表 3-1 BEAM3 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	BEAM3
节点编号	I,J
节点自由度	UX,UY,ROTZ
实常数	AREA (横截面积), IZZ (面积惯量), HEIGHT (单元高度), SHEARZ (剪切变形常数), ISTRN (初始应变), ADDMAS (单位长度增加的质量)
材料参数	EX,ALPX(or CTEX or THSX), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1(I-J)-Y 法线方向 表面 2 (I-J)+X 切线方向 表面 3 (I-J)+X 轴线方向 表面 4 (I-J)-X 轴线方向 当加载在相反的方向时采用负值
体载荷	温度: T1,T2,T3,T4
特殊功能	应力强化, 大变形, 单元死活
KEYOPT(6)	膜力和力矩输出控制变量 0-不输出膜力和力矩 1-在单元坐标系输出膜力和力矩
KEYOPT(9)	控制 I 和 J 点中间的节点的输出 N-输出中间的 N 个位置(N=0,1,3,5,7,9)
KEYOPT(10)	用于 SFBEAM 命令指定的线性表面载荷 0-单位长度载荷的位置按长度偏移量定义 1-单位长度载荷的位置按长度比值 (0.0~1.0) 偏移量来定义

注: SHEARZ 随 IZZ 而变, 如果 SHEARZ=0, 单元在 Y 方向没有剪切变形。

### 3.2.2 BEAM4 单元特性介绍

BEAM4 单元的形状如图 3-4 所示。

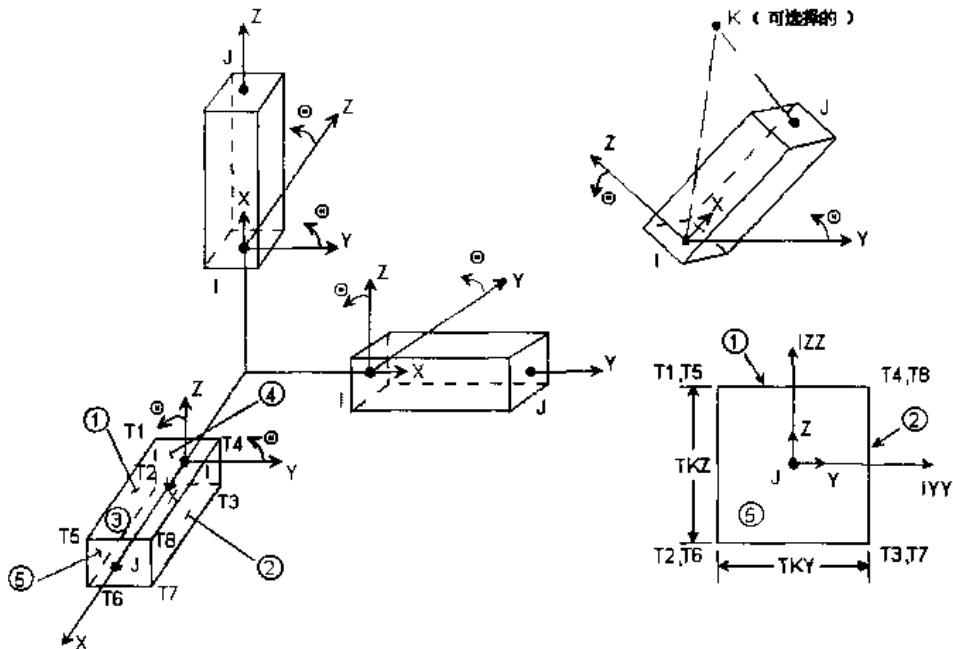


图 3-4 BEAM4 单元的形状

BEAM4 梁单元为空间刚架单元，此单元具有两个节点，在每一个节点上有六个自由度，即沿着坐标 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的平动自由度和绕着 X 轴、Y 轴和 Z 轴的旋转自由度。

可选的 K 节点用于该单元在空间的定位。图 3-4 中表示了几种 BEAM4 单元的空间放置情况，比如当梁轴向与总体直角坐标的 Y 轴平行，则梁的横截面 Z 轴与总体直角坐标的 Z 轴平行。

该单元在使用过程中需要注意如下几点：

(1) 梁单元长度和横截面积均不能为零。对于如果没有大的剪切变形，它的惯性矩可以为零。

(2) 在梁单元中，对于惯性矩的计算，横截面可以是任意形状。但是，应力计算时取截面低端到中性轴的距离为相对应的截面高度的一半。单元的高度仅仅在弯曲计算和热应力分析时才会使用。

(3) 温度梯度在高度方向和长度方向一般都被认为是线性的。

(4) 如果刚度矩阵一致，注意比例，因为这是计算单元应力的依据，如果人为地放大或缩小了横截面属性，应力计算和相应的应力强化矩阵都将是错误的。

(5) 在回转仪模型分析中，改变初始位移值对计算影响很大，会导致真实或虚构特征值存在潜在的错误。

(6) 该单元不能采用阻尼材料特性。

(7) 只允许使用应力强化和大变形这两个非线性特性。

表 3-2 所列为 BEAM4 单元的输入数据。

表 3-2 BEAM4 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	BEAM4
节点编号	I,J,K
节点自由度	UX,UY,UZ,ROTX, ROTY, ROTZ
实常数	AREA,IZZ,IYY,TKZ,THETA,ISTRN,IXX,SHEARZ,SHEARY,SPIN,ADDMAS
材料参数	EX,ALPX(or CTEX or THSX), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1(I-J)-Z 法线方向 表面 2 (I-J)-Y 法线方向 表面 3(I-J)+X 切线方向 表面 4(I)+X 轴线方向 表面 5 (J)-X 轴线方向 当加载在相反的方向时采用负值
体载荷	温度: T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8
特殊功能	应力强化, 大变形, 单元死活
KEYOPT(2)	应力强化选项 0-当 NLGEOM 打开时, 只采用主要的切向刚度矩阵 1-采用一致的切向刚度矩阵 2-不采用一致的切向刚度矩阵
KEYOPT(6)	膜力和力矩输出控制变量 0-不输出膜力和力矩 1-在单元坐标系输出膜力和力矩
KEYOPT(7)	回转仪阻尼矩阵选项 0-无 1-计算回转仪阻尼矩阵, 实常数 SPIN 必须大于 0, IYY=IZZ
KEYOPT(9)	控制 I 和 J 点中间的节点的输出 N-输出中间的 N 个位置 (N=0,1,3,5,7,9)
KEYOPT(10)	用于 SFBEAM 命令指定的线性表面载荷 0-单位长度载荷的位置按长度偏移量定义 1-单位长度载荷的位置按长度比值 (0.0~1.0) 偏移量来定义

表 3-3 所列为 BEAM4 单元的实常数。

表 3-3 BEAM4 单元的实常数

名称	说明
AREA	横截面积
IZZ	面积惯性矩
IYY	面积惯性矩
TKZ	沿 Z 轴的高度

续表

名称	说明
TKY	沿 Y 轴的高度
THETA	与 X 轴的夹角
ISTRN	初始应变
IXX	扭矩
SHEARZ	剪切变形常量 Z
SHEARY	剪切变形常量 Y
SPIN	转动率 (当 KEYOPT(7)=1 时需要)
ADDMAS	单元长度增加的质量

### 3.2.3 BEAM188 和 BEAM189 梁单元特性简介

BEAM188 和 BEAM189 两种梁单元都是建立在 Timoshenko 梁分析理论基础上的, 计入了剪切效应和大变形效应。定义 BEAM188 和 BEAM189, 需要三个节点, 定位节点与主节点位于同一个平面内, 确定梁的截面主轴方向。

比之于其他简单的梁单元, BEAM188 和 BEAM189 具有更强的非线性分析能力, 尽管还是保持了“梁”的主要特征, 即近似描述三维实体结构的一维构件的特点, 但是 ANSYS 赋予 BEAM188 和 BEAM189 梁单元强大的横截面定义功能, 改进了梁构件另外两维 (横截面形状) 的可视化特性。

通过表 3-4 所列的一系列命令, 可以实现建模以及后处理过程中空间梁单元 BEAM188 和 BEAM189 横截面及其上各种参数分布情况的图形显示。

表 3-4 与 BEAM18X 截面操作有关的命令

命令	用以实现的功能
SECTYPE	定义梁截面的 ID 号, 截面形状以及截面网格加密水平
SECDATA	指定横截面的类型以及参数 (ANSYS 提供了 11 种标准截面)
SECOFFSET	指定梁横截面的偏置量
SECPLOT	显示梁单元的截面几何形状
PRSSOL	输出梁单元横截面的计算结果

可用的梁截面形状有如图 3-5 所示的一些。

与以上各条命令相应的菜单操作路径很容易从 ANSYS 帮助中查得, 这里不再逐个介绍。对于 SECDATA 命令, 其对应的菜单项为 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam> Common Sections, 在弹出的 Beam Tool 工具面板中, 可以选择 ANSYS 程序提供的各种标准截面形状, 然后为其定义相关的几何参数、截面偏置量等。程序将会自动计算截面的各种参数值 (面积、惯性矩、形心位置等)。

图 3-6 所示为通过 Beam Tool 定义的工字形截面 (截面类型用 I 表示) 以及角钢截面 (截面类型用 L 表示), 其截面的各种特性都显示在右侧。图中的 Centroid 和 Shear Center 分别表示截面的重心以及剪切中心。

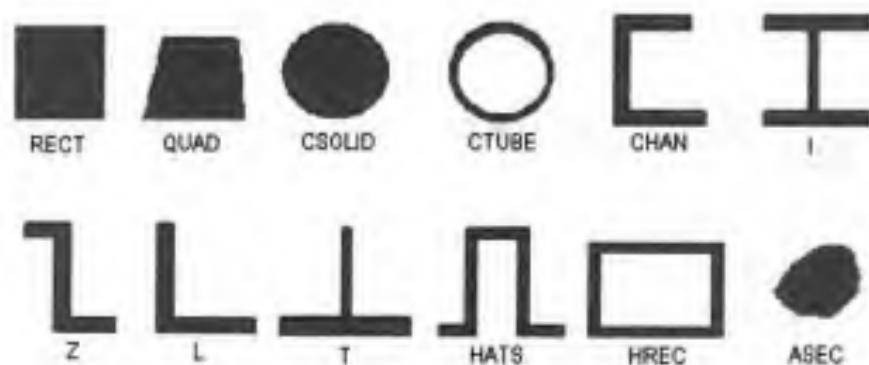


图 3-5 可供使用的梁截面形状



图 3-6 定义的工字形截面和角钢截面

图 3-7 所示为通过 Beam Tool 中的 Coarse-Fine 水平滚动条得到的不同网格加密水平的横截面图形，这一滚动条的作用等价于 SECTYPE 命令中的 REFINEKEY 参数。



图 3-7 不同加密水平的横截面网格

在本书的第 10 章，将有一个使用 BEAM188 单元的例子，读者可以结合阅读。

### 3.3 分析实例：建筑井式斜梁格的分析

作为梁单元的结构有限元分析的应用实例，本节介绍如图 3-8 所示的梁式结构的 ANSYS 建模以及静力分析方法。

由相同截面的井式梁组成的钢筋混凝土梁格水平放置，各内梁与边梁成 45 度角，如图 3-8 所示。其所有的内节点均承受竖向载荷  $F=100\text{kN}$ ，所有外节点均简支。所有内梁的边长均为  $1.5\text{m}$ ，梁的横截面为  $0.2\text{m}\times 0.3\text{m}$  的矩形。试分析这一梁格结构的受力以及变形情况。

拟采用 ANSYS 的空间梁单元 BEAM4，对这一梁格结构进行分析，由于结构较为简单，因此用直接法进行建模，即首先逐个定义各节点，然后连接节点形成梁单元。

下面按照操作的先后顺序，对建模和分析的步骤进行介绍。

#### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 GRID OF BEAMS；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示区域的标题为 ANALYSIS OF BEAMS。

#### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

#### 第 3 步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 3-9 所示。

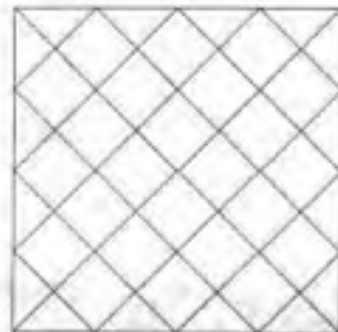


图 3-8 斜井式梁格



图 3-9 定义单元类型

对于本问题，拟采用三维杆单元 Beam4。因此在窗口左侧选择 Structural Beam，右侧选择 3D elastic 4，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

#### 第 4 步：定义单元实参数

为梁单元指定截面参数，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant，在 Real Constants 对话框中，单击 Add...按钮，在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中，接受默认值，直接单击 OK，最后在图 3-10 所示的对话框中输入梁单元的截面参数。

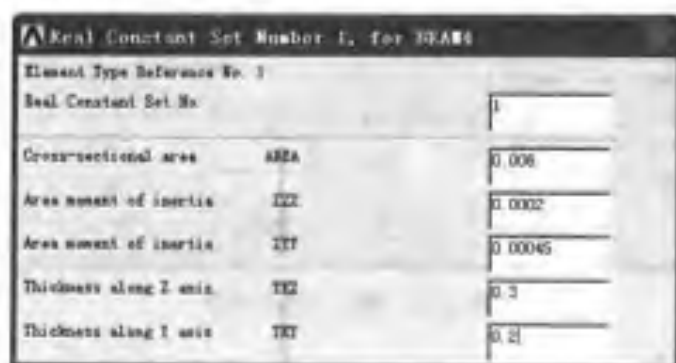


图 3-10 定义实参数

定义完成后，单击 OK 按钮退出该对话框。

#### 第 5 步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在出现的对话框中输入材料弹性模量 3.0E10 以及泊松比 0.2，如图 3-11 所示。

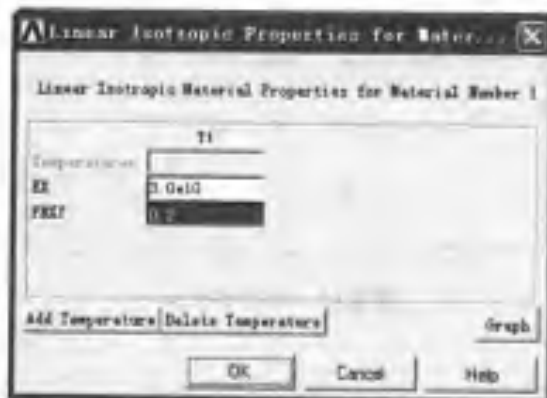


图 3-11 定义材料参数

单击 OK 按钮，返回到 Define Material Model Behavior 窗口，关闭之，返回图形用户界面。

#### 第 6 步：建立节点

由于本问题的单元数不多，因此采用直接法建立有限元结构分析模型。首先建立所有的节点，具体建模操作如下。

##### 1. 建立局部坐标系

选择菜单项 Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At Specified Loc，弹出 Create CS at location，选中 Global Cartesian，输入“0,0,0”，单击 OK 按钮。出现 Create Local CS at Specified Location 对话框，如图 3-12 所示，在该对话框中，输入 THXY 为 45，单击 OK 按钮。



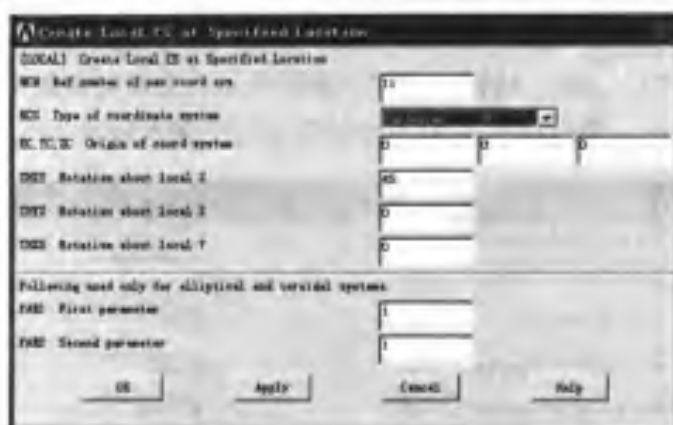


图 3-12 建立局部坐标系

## 2. 建立所有的节点

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS, 在 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框中依次输入 41 个节点的坐标, 定义结构的所有节点。其操作过程很简单, 不赘述。图 3-13 所示为所有节点的图形显示结果。

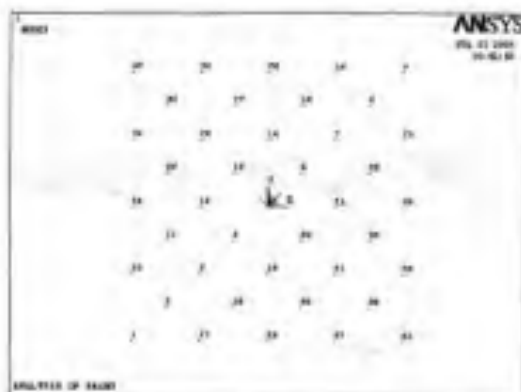


图 3-13 所有的节点

## 第 7 步: 建立单元

### 1. 连接节点形成梁单元

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes, 弹出对象拾取框, 用鼠标在屏幕上依次点选梁系中的相邻节点, 单击 Apply 按钮, 两两之间形成梁单元。

### 2. 打开梁单元实际形状显示开关

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape, 弹出 Size and Shape 对话框, 打开其中的[/ESHAPE]开关, 使之处于 On 状态, 在最下方的[/REPLOTT]选项列表中选择 Replot 项, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。图 3-14 所示为结构模型的实体显示效果。

## 第 8 步: 施加约束及负载

### 1. 改变当前坐标系

选择菜单项 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian, 将当前活动坐标系改为总体直角坐标系。

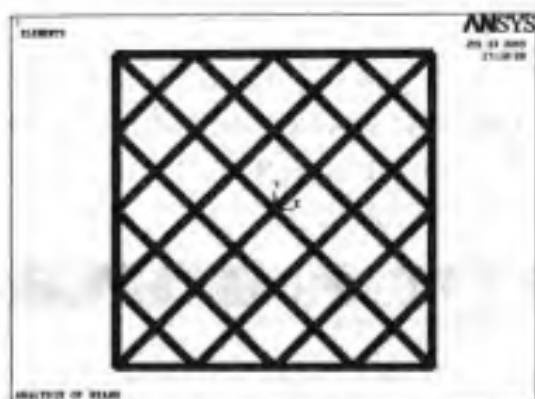


图 3-14 井式梁格的分析模型

### 2. 选择周边节点

选择菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 在弹出的 select entities 对话框中, 自上到下依次选择 Nodes→By Location→X coordinates, 在 Min, Max 一栏中填写-4.5,-4.0, 选中下面的 From Full 复选框, 单击 Apply 按钮, 即可选中左边的一列节点。然后, 将 Min, Max 一栏改写为 4.0,4.5, 选中下面的 Also Select 复选框, 单击 Apply 按钮, 即可选中右边的一列节点。再将选择设置改为 Nodes→By Location→Y coordinates, 在 Min, Max 一栏中填写-4.5,-4.0, 选中下面的 Also Select 复选框, 单击 Apply 按钮, 即可选中下边的一列节点。然后, 将 Min, Max 一栏改写为 4.0,4.5, 选中下面的 Also Select 复选框, 单击 OK 按钮, 即可选中上边的一列节点。

### 3. 施加线位移约束

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement > On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对象拾取框, 单击 Pick All 按钮, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 如图 3-15 所示, 在 DOFs to be constrained 中选中 UX,UY,UZ, 单击 OK 按钮, 对周边的节点施加位移约束。

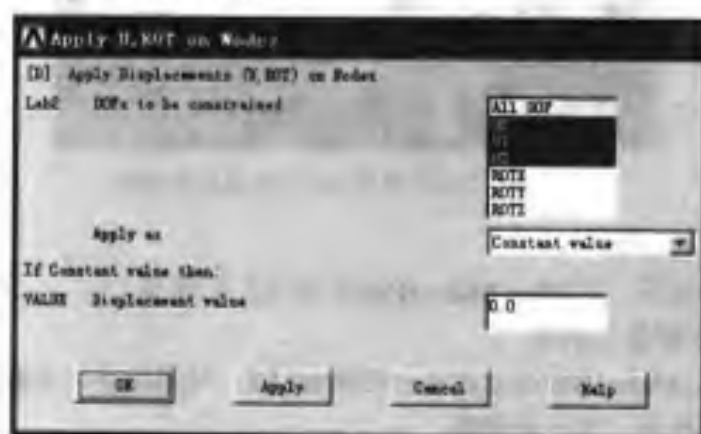


图 3-15 施加位移约束

### 4. 选择内节点

选择菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 在弹出的 select entities 对话框中, 选择 Nodes 并选中 Invert 按钮, 即可选中所有的内节点。

### 5. 施加竖向载荷

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Force/Moment > On Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上点选中间各个内节点, 然后单击 OK 按钮, 弹出 Apply F/M on Nodes 对话框, 如图 3-16 所示, 选择 FZ, 输入载荷的数值为-100000, 单击 OK 按钮退出。

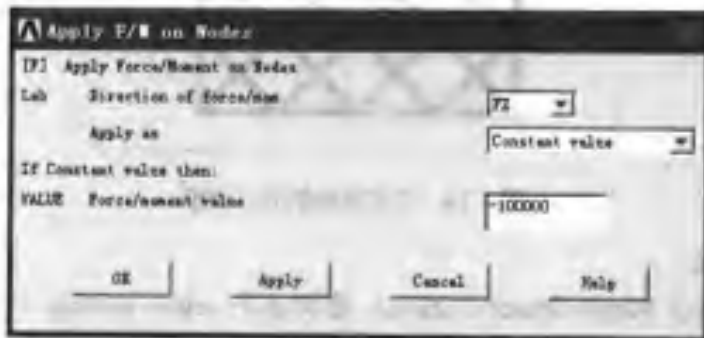


图 3-16 施加竖向载荷

### 6. 恢复选择全部的对象

加载完成后, 通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 恢复选择全部的实体对象。施加边界条件以及载荷之后的结构模型如图 3-17 所示。

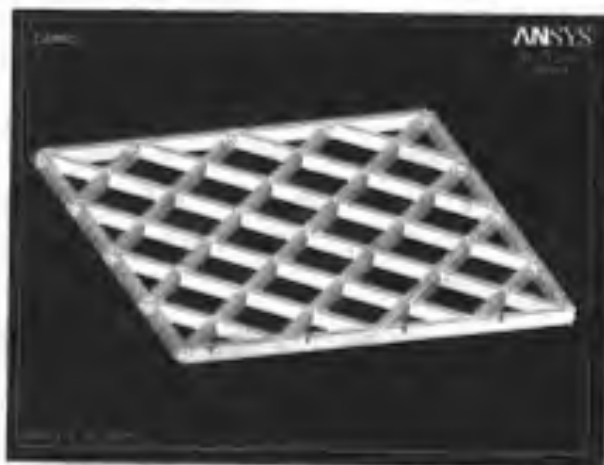


图 3-17 施加位移约束以及载荷后的模型

### 第 9 步: 退出前处理器

完成上述建模操作后, 点 Main Menu>Finish 退出前处理器。

### 第 10 步: 进入求解器并求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 对问题进行求解。在求解结束后, 点 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

### 第 11 步: 进入通用后处理器并载入结果文件

通过菜单项 Main Menu>General Postproc, 进入通用后处理器。

在对计算结果进行后处理之前, 需首先通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 将计算结果读入通用后处理器。

## 第12步：观察分析结果

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results >Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 选择“Def+undeformed”, 单击 OK, 出现图 3-18 所示的结构变形显示结果。

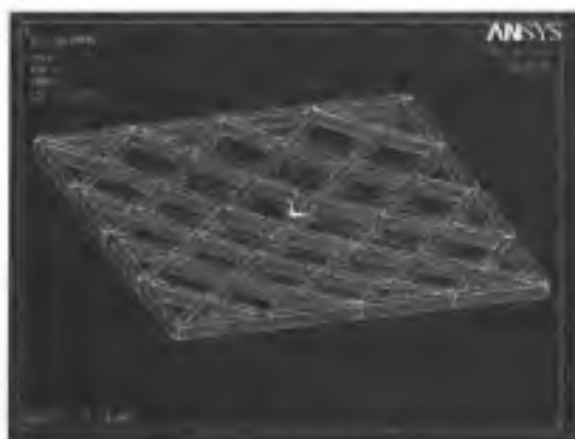


图 3-18 结构变形形状

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu, 弹出 Contour Element Solution Data, 左侧项目列表中选择 Stress, 右侧项目列表中选择 S1, 单击 OK 按钮, 即可显示图 3-19 所示第一主应力的分布情况。

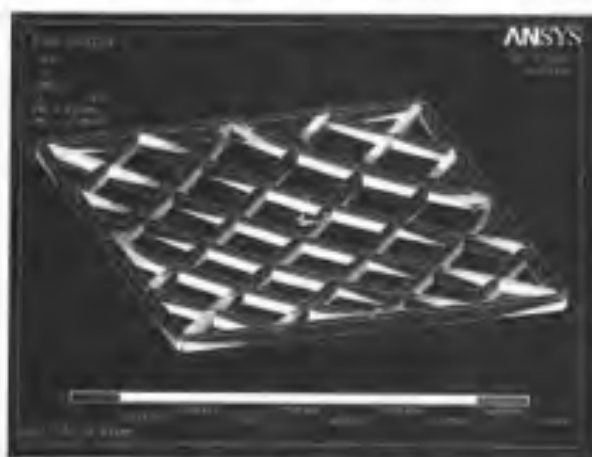


图 3-19 第一主应力分布

如果上述建模以及分析过程采用批处理形式, 则相应操作的 ANSYS 命令流如下:

```
! *****
!                               斜向井式梁格静力分析命令流
! *****
! (1) 分析环境设置
/FILNAME,GRID OF BEAMS        ! 设置工作名称
/TITLE,ANALYSIS OF BEAMS      ! 设置图形显示标题

! (2) 进入前处理器
```

```

/PREP7                                ! 进入前处理器

! (3) 定义单元类型
ET,1,BEAM4                             ! 定义单元类型

! (4) 定义实参数
R,1,0.006,0.0002,0.00045,0.3,0.2,,    ! 定义实参数

! (5) 定义材料参数
MP,EX,1,2.07e11                        ! 定义材料的杨氏模量
MP,PRXY,1,0.3                          ! 定义材料的泊松比

! (6) 定义结构的所有节点
LOCAL,11,0,0,0,0,45,0,0,1,1,         ! 建立局部坐标系
! 循环建立所有的节点 (分两栏)
*DO,I,1,9,1
N,I,-6.0+(I-1)*1.5,0.0,0.0
*ENDDO
*DO,I,10,16,1
N,I,-4.5+(I-10)*1.5,1.5,0.0
*ENDDO
*DO,I,17,23,1
N,I,-4.5+(I-17)*1.5,-1.5,0.0
*ENDDO
*DO,I,24,28,1
N,I,-3.0+(I-24)*1.5,3.0,0.0
*ENDDO
*DO,I,29,33,1
N,I,-3.0+(I-29)*1.5,-3.0,0.0
*ENDDO
*DO,I,34,36,1
N,I,-1.5+(I-34)*1.5,4.5,0.0
*ENDDO
*DO,I,37,39,1
N,I,-1.5+(I-37)*1.5,-4.5,0.0
*ENDDO
*DO,I,40,41,1
N,I,0.0,6.0+(40-I)*12,0.0
*ENDDO

! (7) 建立所有的梁单元
TYPE,1                                  ! 梁单元类型
MAT,1                                    ! 单元材料属性
REAL,1                                   ! 实参数类型
! 通过节点之间两两连接形成所有的单元
*DO,I,1,8

```

```
E,I,I+1
*ENDDO
*DO,I,10,15
E,I,I+1
*ENDDO
*DO,I,17,22
E,I,I+1
*ENDDO
*DO,I,24,27
E,I,I+1
*ENDDO
*DO,I,29,32
E,I,I+1
*ENDDO
```

```
E,34,35
E,35,36
E,37,38
E,38,39
E,1,10
E,10,24
E,24,34
E,34,40
E,40,36
E,36,28
E,28,16
E,16,9
E,9,23
E,23,33
E,33,39
E,39,41
E,41,37
E,37,29
E,29,17
E,17,1
E,17,2
E,2,10
E,29,18
E,18,3
E,3,11
E,11,24
E,37,30
E,30,19
E,19,4
E,4,12
E,12,25
```

```

E,25,34
E,41,38
E,38,31
E,31,20
E,20,5
E,5,13
E,13,26
E,26,35
E,35,40
E,39,32
E,32,21
E,21,6
E,6,14
E,14,27
E,27,36
E,33,22
E,22,7
E,7,15
E,15,28
E,23,8
E,8,16
/ESHAPE,1.0          ! 打开单元形状显示开关
/REPLOT              ! 重新绘图

! (8) 施加约束和载荷
CSYS,0               ! 改变当前坐标系
NSEL,S,LOC,X,-4.5,-4.0 ! 选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,X,4.0,4.5 ! 继续选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,Y,-4.5,-4.0 ! 继续选择周边受约束节点
NSEL,A,LOC,Y,4.0,4.5 ! 继续选择周边受约束节点
D,ALL,UX             ! 约束三向位移
D,ALL,UY
D,ALL,UZ
NSEL,INVE           ! 反选其他的节点 (内节点)
F,ALL,FZ,-100000    ! 施加竖向载荷
ALLSEL,ALL          ! 恢复选择所有的对象

! (9) 退出前处理器
FINI                ! 退出前处理器

! (10) 求解
/SOLU               ! 进入求解器
SOLVE               ! 求解
FINI                ! 退出求解器

! (11) 进入通用后处理器并读入结果文件

```

```
/POST1                ! 进入通用后处理器
SET,FIRST             ! 将结果读入后处理器

! (12) 观察计算结果
PLDISP,1              ! 绘制结构变形前后形状
PLESOL,S,1,0,1        ! 绘制结构的主应力分布等值线图
FINI                  ! 退出通用后处理器
```



## 第4章 弹性平面问题的有限元分析及 ANSYS 算例

### 本章导读

杆件结构分析是在一定条件下的结构简化分析方法（构件的一维尺度显著大于另两维的尺度），但任何弹性结构都是空间实体，那么，是否都得进行三维分析呢？实际上，在一定条件下也可能简化为平面问题进行分析。比如，长的隧道工程、条形基础以及载荷作用方向在梁平面内的薄片梁等，都可以作为平面问题进行分析。本章就来向读者介绍弹性结构分析中最常见的一类问题——弹性平面问题的 ANSYS 有限元分析方法，同时介绍了一个岩体中的公路隧道工程分析实例。

本章包括如下的一些主题：

- 弹性平面问题有限元分析的基本方法
- ANSYS 提供的平面问题单元
- 分析实例：岩体中的公路隧洞工程

### 4.1 弹性平面问题有限元分析的基本方法

弹性力学平面问题包括平面应力问题和平面应变问题，其基本概念在一般的弹性力学教科书中都有详细的叙述。图 4-1 所示为平面问题的实际例子。

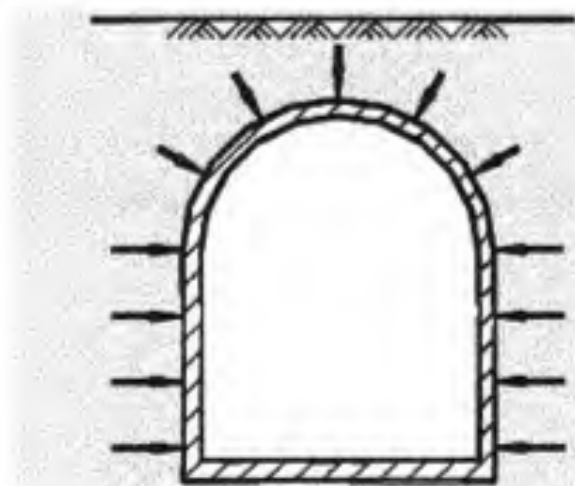


图 4-1 平面问题实例——地下隧道

对于平面应力，其基本特点是平面外的应力为零，对于平面应变问题则是平面外的位移（应变）为零。平面应力问题和平面应变问题都可以将平面内的位移  $u$  和  $v$  作为基本未知量，进行位移法的求解。通过弹性力学的学习可以知道，只有在结构对称、载荷形式简单的少数情况下，可以得到问题的解析解。对绝大多数的实际问题，根本找不到解析解。有限单元法为这些实际问题的解决提供了新的思路。

对于平面问题,首先需要将实际的结构剖分为离散单元的组合体。对于每一个单元,如果能得到像杆系结构一样的节点力和节点位移之间的关系(找单刚),然后通过公共节点的位移协调关系建立起结构的总体平衡方程(组总刚),那么问题就可以迎刃而解了。

下面简单介绍一下平面问题有限元分析中的单元分析(找单刚)的基本过程。单元分析分为如下的几个步骤。

### 1. 假设单元内部的位移模式

比如线性的位移模式:  $u = a + bx + cy$        $v = d + ex + fy$

### 2. 计算形函数

通过节点位移(有限元法求解的基本未知量)代入位移模式,确定其中的待定系数,合并包含同一节点位移因子的各项,得到节点位移插值函数形式表达的位移:

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^n N_i v_i$$

其中,  $N_i$  ( $i$  为单元的节点数) 为确定的线性函数(对上面假定的线性位移模式),有限元分析中,称之为节点位移插值函数,又称形函数。本书的附录中列出了常用的 ANSYS 结构单元的形函数。

### 3. 求应变表达式

以节点的位移值按一定位移模式进行插值,只能得到近似的位移场表达式。得到这一近似式以后,通过几何方程得到应变的近似表达式。单元节点位移向量  $\Delta$  与应变向量  $\varepsilon$  之间的关系可以通过应变矩阵  $B$  来表示,即:  $\varepsilon = B\Delta$ 。

对平面问题而言,  $\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}$ , 各应变分量都被表示成节点位移的函数。对于线性位移元,其内部各点的应变为常数,因此又称为常应变单元。

### 4. 计算应力表达式

对于线弹性问题,通过应力应变关系矩阵  $D$ ,得到应力向量  $\sigma$  各分量的表达式,对于平面应力、平面应变以及下面几章的空间轴对称问题、空间问题,因其问题特征和应力分量个数的不同,需采用不同的关系矩阵  $D$ ,这一点在一般的弹性力学书籍中都有介绍。

对于平面问题而言,  $\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}$ , 各应力分量也被表示为节点位移的函数。由广义的 Hooke 定律可知,常应变元也肯定是常应力元。

### 5. 通过虚功原理得到单刚

这是单元分析最为关键的一步,根据变形体虚功原理,即处于平衡状态的弹性单元体,当发生约束允许的任意微小虚位移时,外力在虚位移上作的虚功等于应力在虚应变上所做的虚功,对单元应用即得到:

$$\Delta^T F = \int_A (B\Delta)^T D B \Delta dA$$

将单元节点虚位移和实际位移向量提出,消掉虚位移,得到:  $F = \left( \int_A B^T D B dA \right) \Delta$ , 其中的  $\int_A B^T D B dA$ , 就是平面单元的单元刚度矩阵  $K$ , 这样通过虚功原理完成了一般弹性单元的

单元分析，得到其节点力和节点位移之间的关系：

$$F = K\Delta$$

在得到单刚的过程中，内虚功项应当在单元体积上积分，考虑到平面问题的特点，已经将其厚度取为单位厚度，因此简化为单元面上积分。

对于各种平面单元和空间单元，都可以按照如上过程得到其单刚，这也意味着完成了有限元分析的最关键环节。之后组合总刚，引入边界条件并求解，结果后处理等环节，都可按照前面几章介绍的方法进行分析。

## 4.2 ANSYS 提供的平面问题单元

ANSYS 程序提供了一系列平面单元类型，用于分析各种平面结构问题。常用的单元包括二次单元 **Plane2**（6 个节点的三角形单元）、线性单元 **Plane42**（具有四边形和三角形选项）以及二次单元 **Plane82**（8 节点四边形单元，具有 6 节点三角形选项）。

对于 **Plane2** 和 **Plane82** 单元，由于其具有二次插值函数，因此适合于边界形状不规则问题的网格划分，图 4-2 所示为这两种单元的形状。对于 **Plane2** 单元，在分析之前，需要为其输入如表 4-1 所列的数据信息（通过前处理的具体操作来实现数据的传递）。

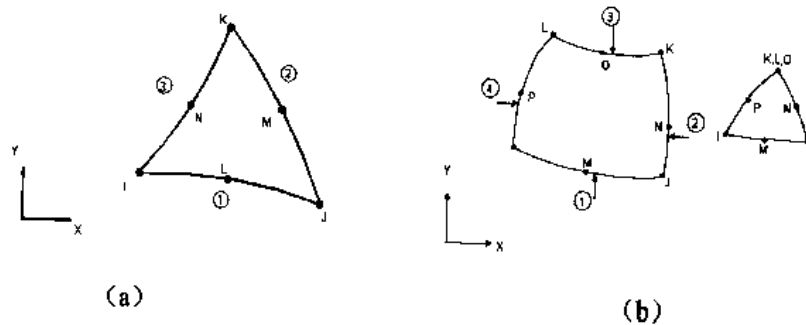


图 4-2 **Plane2** 和 **Plane82** 单元的形状

对于线性单元 **Plane42**，其具有退化为三角形单元的选项，在单元的内部，应力以及应变值均为一常量。

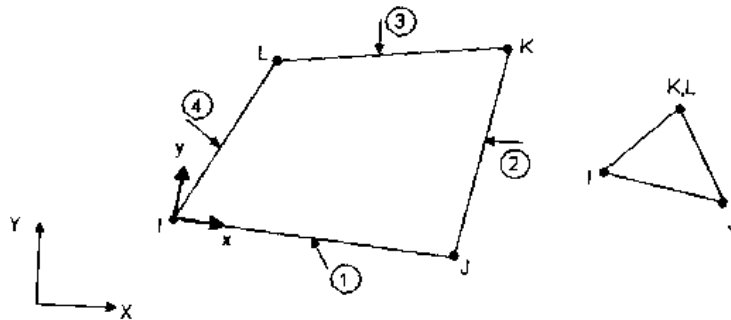


图 4-3 **Plane42** 单元的形状

表 4-1 Plane2 单元输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	PLANE42
节点编号	I,J,K,L,M,N
节点自由度	UX,UY
实常数	如果 KEYOPT(3)=0,1 或 2,无 如果 KEYOPT(3)=3,THK-厚度
材料参数	EX,EY,EZ,PRXY,PRYZ,PRXZ(orNUXY,NYYZ,NYXZ),ALPX, ALPY, ALPZ (or CTEX,CTEY,CTEZ or THSX,THSY,THSZ), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1(J-I), 表面 2(K-J), 表面 3 (I-K)
体载荷	温度: T(I), T(J), T(K), T(L),T(M),T(N) 热流量: FL(I), FL(J), FL(K), FL(L),FL(M),FL(N)
特殊功能	塑性, 蠕变, 膨胀, 应力强化, 大变形, 大应变, 单元死活, 自适应下降, 初始应力引入
KEYOPT(3)	0-平面应力 1-轴对称 2-平面应变 (Z 方向的应变为零) 3-有厚度输入的平面应力问题
KEYOPT(5)	0-基本单元解 1-所有积分点的重复基本解 2-节点应力解
KEYOPT(6)	0-基本单元解 3-每个积分点的非线性解 4-非零压力表面的表面解
KEYOPT(9)	0-没有提供初始应力的用户子程序 1-从用户子程序 USTRESS 中读入初始应力值

在分析之前, 需要为 Plane42 单元输入如表 4-2 所列的数据信息 (通过前处理的具体操作来实现数据的传递)。

表 4-2 Plane42 单元输入信息

输入项目	变量名称
单元名称	PLANE42
节点编号	I,J,K,L
节点自由度	UX,UY
实常数	如果 KEYOPT(3)=0,1 或 2,无 如果 KEYOPT(3)=3,THK-厚度
材料参数	EX,EY,EZ,PRXY,PRYZ,PRXZ(orNUXY,NYYZ,NYXZ),ALPX, ALPY, ALPZ (or CTEX,CTEY,CTEZ or THSX,THSY,THSZ), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1(J-I), 表面 2(K-J), 表面 3 (L-K), 表面 4 (I-L)

续表

输入项目	变量名称
体载荷	温度: T(I), T(J), T(K), T(L) 热流量: FL(I), FL(J), FL(K), FL(L)
特殊功能	塑性, 蠕变, 膨胀, 应力强化, 大变形, 单元死活, 自适应下降, 初始应力引入
KEYOPT(1)	单元坐标系定义 0-单元坐标系平行于整体坐标系 1-单元坐标系取决于单元 I-J 方向
KEYOPT(2)	0-包括附加位移形函数 1-不包括附加位移形函数
KEYOPT(3)	0-平面应力 1-轴对称 2-平面应变 (Z 方向的应变为零) 3-有厚度输入的平面应力问题
KEYOPT(5)	0-基本单元解 1-所有积分点的重复基本解 2-节点应力解
KEYOPT(6)	0-基本单元解 1-表面 I-J 的表面解 2-表面 I-J 和 K-L 的表面解 3-每个积分点的非线性解 4-非零压力表面的表面解
KEYOPT(9)	0-没有提供初始应力的用户子程序 1-从用户子程序 USTRESS 中读入初始应力值

对于上述各种 PLANE 单元, 在使用的过程中需要选择是平面应力还是平面应变选项。下面以 PLANE2 单元为例进行介绍。

在 ANSYS 的 GUI 中定义了单元类型 PLANE2 之后, 可以单击 Options... 按钮, 在 PLANE2 element type options 对话框的 Element behavior 选项列表中选择是 Plane stress 或是 Plane strain, 如图 4-4 所示。

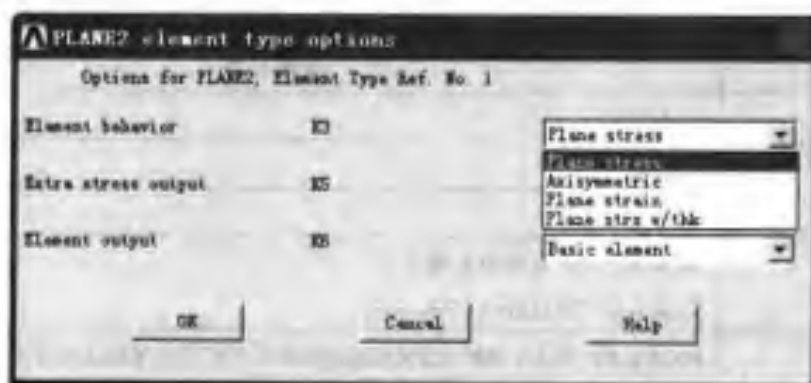


图 4-4 PLANE2 单元的选项

### 4.3 分析实例：岩体中的公路隧洞工程

在多山地区修建公路常常需要在山体中打开隧道。已知一个山体隧道的几何尺寸如图 4-5 所示。山体岩石的材料参数为：密度  $= 2.45 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ ，弹性模量  $E = 7.85 \times 10^3 \text{ MPa}$ ，泊松比  $\nu = 0.12$ 。已知该山体的两侧都与周围山体接触，可以认为两侧是固定的，而山体的底部也认为是固定的。重力加速度为  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。试计算山体隧道结构在重力作用下的变形和受力情况。

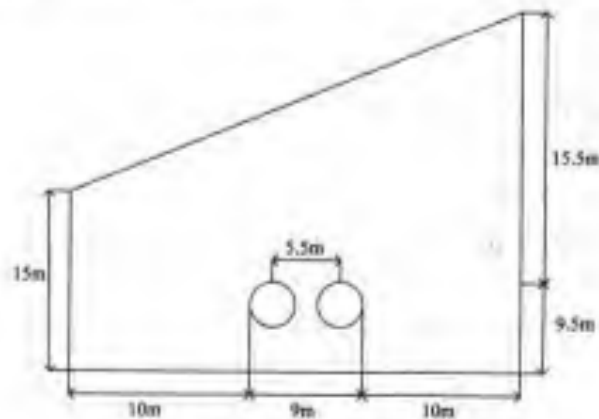


图 4-5 山体隧道截面

由于隧道较长，而且重力作用在隧道横截面内，所以隧道的受力状态满足平面应变的条件。下面按照操作的先后顺序，对建模和分析的步骤进行介绍。

#### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 Tunnel；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示区域的标题为 STRESS ANALYSIS OF a Tunnel in a Hill。

#### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

#### 第 3 步：定义关键点

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，弹出如图 4-6 所示对话框。

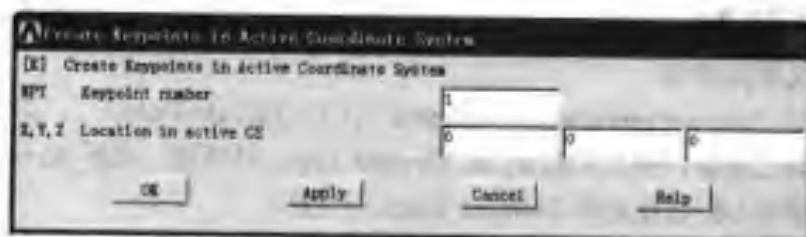


图 4-6 定义关键点

输入关键点序号和关键点坐标，定义模型的 1~4 号关键点，其编号以及坐标如表 4-3 所列。

表 4-3 节点的编号与坐标

关键点 ID	X	Y	Z
1	0	0	0
2	29	0	0
3	29	25	0
4	0	15	0

#### 第 4 步：定义山体面积

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Keypoints，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，建立由关键点 1、2、3、4 构成的面积。

#### 第 5 步：定义两个隧道面积

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle，弹出如图 4-7 所示的对话框。

输入代表隧道截面的圆的圆心坐标 (11.75, 7.75)、(17.25, 7.75) 和半径 1.75，建立两个圆面积。

#### 第 6 步：从山体面积减去两个隧道面积

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas，弹出拾取对话框要求拾取从哪个面积中减去，点选山体面积，单击 OK 按钮，弹出拾取对话框要求拾取减去哪个面积，点选两个隧道面积（圆形），单击 OK 按钮，得到如图 4-8 所示的断面。

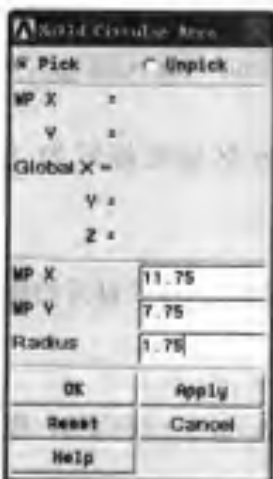


图 4-7 定义隧道断面

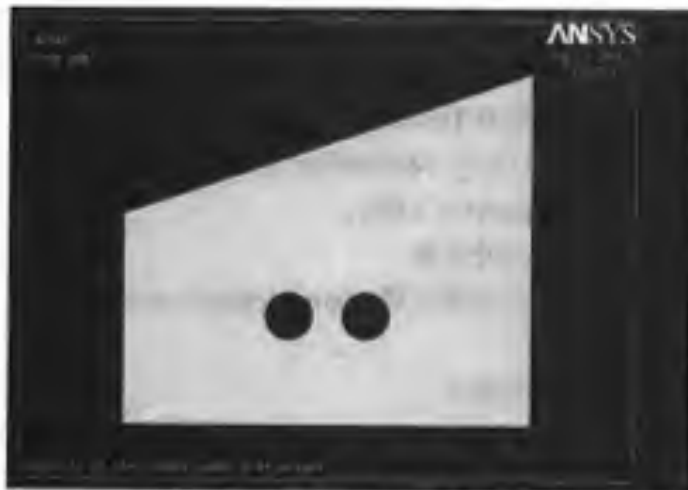


图 4-8 从山体面积减去两个隧道面积

#### 第 7 步：定义单元类型

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete...，弹出 Element Types 对话框，单击 Add...按钮，弹出 Library of Element Types 对话框。选择 Structural>Solid>Quad 4node 42 单元，单击 OK 按钮返回 Element Types 对话框。

#### 第 8 步：设置单元平面应变性质

设置单元平面应变性质。当 Element Types 对话框仍然打开时候，单击 Options...按钮，弹

出如图 4-9 所示的对话框，在 Element behavior 列表框中选择 Plane Strain 选项，单击 OK 按钮关闭对话框。

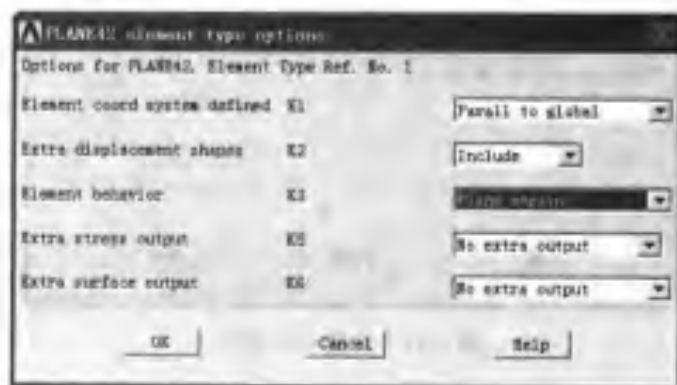


图 4-9 设置单元轴对称属性

#### 第 9 步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在出现的对话框中输入材料弹性模量  $7.85 \times 10^3 \text{e}6$ （单位  $\text{N/m}^2$ ，与长度单位 m 对应）以及泊松比 0.12。单击 OK 按钮，返回到 Define Material Model Behavior 窗口。在 Define Material Model Behavior 对话框中双击 Structural>Linear>Density，弹出如图 4-10 所示的对话框以定义单元材料密度在 DENS 文本框中输入材料密度  $\text{DENS} = 2.45 \text{e}3 \text{Kg/m}^3$ 。这里要注意长度单元都统一为米。

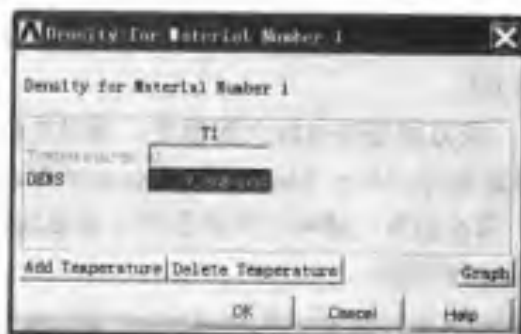


图 4-10 定义密度

#### 第 10 步：定义网格密度

单击菜单 Main Menu>Meshing>Size Cntrl>Manual Size>Areas>All Areas，在弹出的对话框中定义单元尺寸 1m，最后单击 OK 按钮关闭。

#### 第 11 步：划分网格

建立单元之前，需要对单元的属性进行指定，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes，弹出 Element Attributes 对话框，指定单元类型、材料类型以及实常数类型，如图 4-11 所示，单击 OK 按钮退出。

单击菜单 Main Menu>Meshing>Mesh>Areas>Free，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，得到如图 4-12 所示的网格划分。



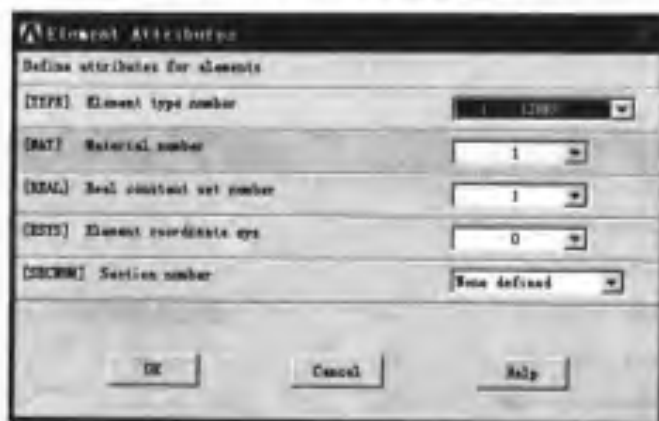


图 4-11 设置单元属性

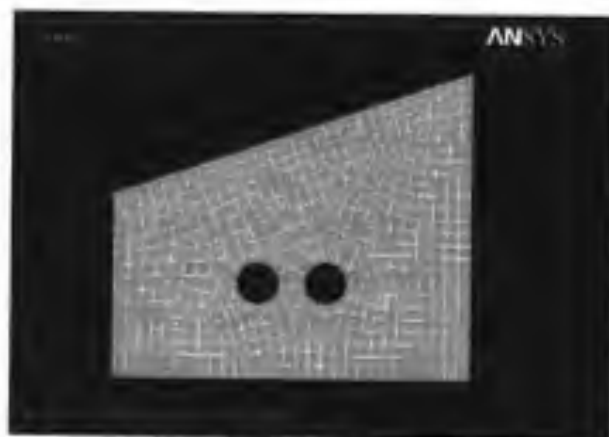


图 4-12 网格划分

#### 第 12 步：细化隧道附近网格

隧道附件由于应力集中，应力和变形有较大的梯度，所以在隧道附近需要划分比较密集的网格以增加计算精度。单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Modify Mesh>Refine At>Lines，弹出拾取对话框，依次拾取组成两个隧道圆的 8 条曲线，单击 OK 按钮，弹出如图 4-13 所示的 Refine Mesh at Line 对话框。

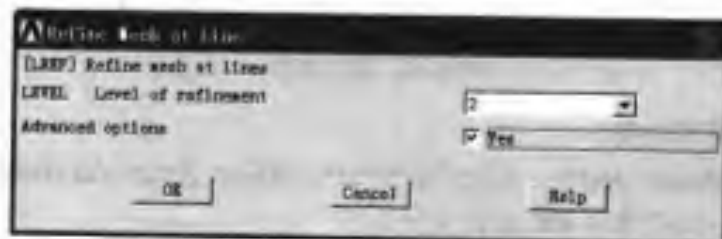


图 4-13 细化局部网格

在 Level of refinement 列表中选择 2，选中 Advanced options 复选框，单击 OK 按钮，弹出如图 4-14 所示的对话框。

在 Depth of refinement 域输入 2，单击 OK 按钮关闭。得到局部细化的网格划分，如图 4-15 所示。

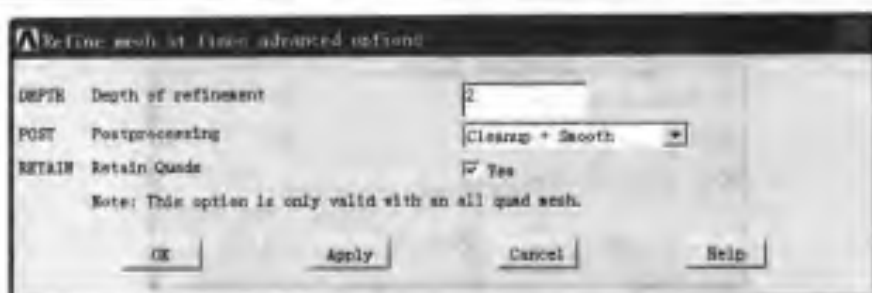


图 4-14 细化局部网格高级选项

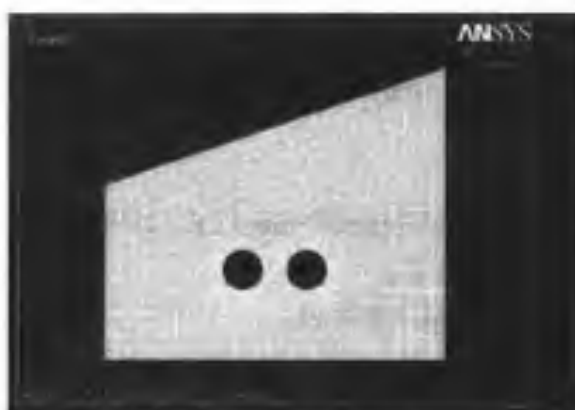


图 4-15 局部细化的网格划分

**第 13 步：保存有限元模型**

单击常用工具条上的 SAVE\_DB 按钮保存模型，也可以单击 Utility Menu>File 中的保存选项。

**第 14 步：退出前处理模块**

至此，已经完成了除加载之外建模的全部操作，点 Main Menu>Finish 菜单项，退出前处理器。

**第 15 步：进入求解器**

点 Main Menu>Solution 菜单项，进入求解器。

**第 16 步：定义位移边界条件**

选择菜单项 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Displacement > On Lines，弹出 Apply U, ROT on Lines 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选山体底边，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Lines 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 All DOF，单击 Apply 按钮，此时重新弹出 Apply U, ROT on Lines 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选山体两个侧边，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Lines 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 UX，单击 OK 按钮。

**第 17 步：定义重力加速度**

要考虑重力的影响，必须定义结构当地的重力加速度方向和大小。单击菜单 Main Menu>Solution> Define Loads>Apply> Structural>Inertia>Gravity，弹出如图 4-16 所示的对话框。

按照图中所示在 ACELY 文本框中输入重力加速度 9.8，定义一个沿 Y 方向的重力加速度，大小为  $9.8\text{m/s}^2$ 。定义重力加速度后在图形窗口应该出现一个红色箭头指向 Y 轴正方向，这表示重力加速度已经定义并沿 Y 方向，而重力方向恰恰与重力加速度相反。

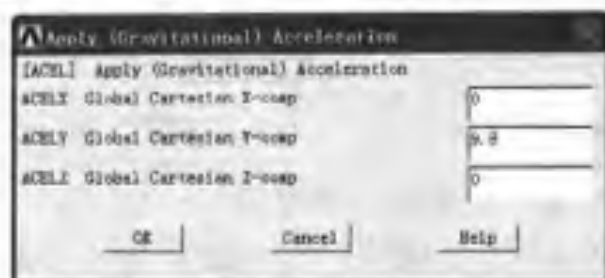


图 4-16 定义重力加速度

**第 18 步：求解选项设置**

在求解之前，需要对相关的选项进行设置，设定分析类型。通过菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，在 New Analysis 对话框中选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮退出。

**第 19 步：求解**

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，对问题进行求解。在求解结束后，弹出 Solution is done! 信息提示框，关闭之。

点 Main Menu>Finish 菜单项，退出求解器。

**第 20 步：进入通用后处理器**

通过菜单项 Main Menu>General Postproc，进入通用后处理器。

**第 21 步：绘制变形形状**

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape...，在弹出的对话框中选择 Def+undef edge，得到山体隧道变形情况，如图 4-17 所示。



图 4-17 绘制变形形状

**第 22 步：绘制位移图**

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution，在弹出的对话框中选择 DOF>USUM，得到的山体上各点的位移，如图 4-18 所示。

**第 23 步：绘制应力分布图**

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution，在弹出的对话框中选项 Stress>Von Mises，得到山体中的 Mises 应力分布，如图 4-19 所示。从图中可

以清楚地看到在隧道附近应力集中很明显,所以在工程施工时隧道附近的岩石容易破坏而发生危险,实践中必须注意到这一点。

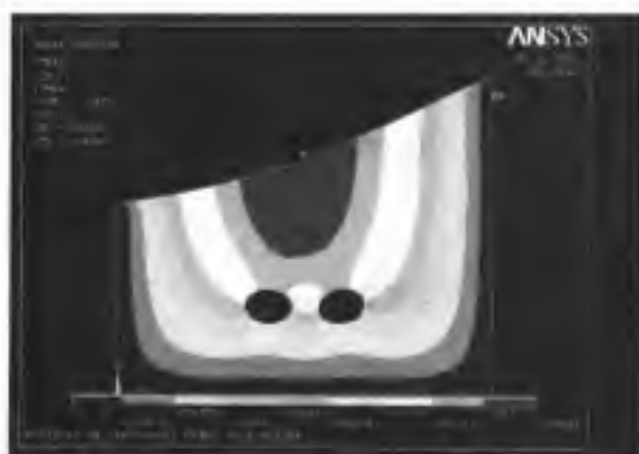


图 4-18 绘制位移图

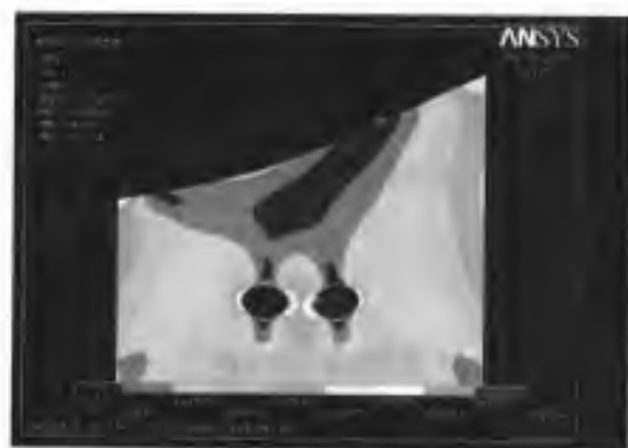


图 4-19 绘制应力分布图

如果上述建模和分析过程采用批处理操作方式,则相应的命令流如下:

```
! *****
! *      山体隧道在自重作用下变形和受力分析      *
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME, tunnel           ! 指定工作名称
/title, analysis of the tunnel under self_weight ! 指定图形显示标题

! (2) 进入前处理器
/PREP7                       ! 进入前处理器

! (3) 定义关键点
k,1,                          ! 定义关键点
k,2,29
k,3,29,25
```

```

k,4,,15

! (4) 定义山体面积
a,1,2,3,4                ! 定义山体面积

! (5) 定义两个隧道面积
CYL4,11.75,7.75,1.75    ! 定义两个隧道面积
CYL4,17.25,7.75,1.75

! (6) 从山体面积减去两个隧道面积
Asel,s,AREA,,2          ! 选取隧道面积
Asel,a,AREA,3
ASBA,      1,All,        ! 从山体面积减去两个隧道面积
Asel, all                ! 重新选取所有面积

! (7) 定义单元类型
ET,1,PLANE42            ! 定义单元类型

! (8) 设置单元平面应变性质
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,2            ! 设置单元平面应变性质
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

! (9) 定义材料模型
MPTEMP,,,,,,,,          ! 样式模量和泊松比
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,7.85*103e6
MPDATA,PRXY,1,,0.12
MPTEMP,,,,,,,,          ! 定义山体岩石密度
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2.45e3

! (10) 定义网格密度
AESIZE,ALL,1,           ! 定义网格密度

! (11) 划分网格
MSHAPE,0,2D             ! 网格划分选项
MSHKEY,0
AMESH,ALL               ! 划分网格

! (12) 细化隧道附近网格
LSEL,,LINE,,5,12,1,     ! 选取组成隧道圆的 8 条曲线 5~12
LREF,ALL,,2,2,1,1      ! 细化隧道附近网格

```

```

! (13) 保存有限元模型
SAVE                                ! 保存有限元模型

! (14) 退出前处理模块
FINISH                              ! 退出前处理模块

! (15) 进入求解器
/SOLU

! (16) 定义位移边界条件
LSEL,,LINE,,1,2,1,                 ! 选取直线 1、2、4
LSEL,A,LINE,,4,,
DL,ALL, ,ALL,                       ! 固定直线 1、2、4 上节点

! (17) 定义重力加速度
ACEL,0,9.8,0,                       ! 定义重力加速度

! (18) 求解选项设置
ANTYPE,0                            ! 求解选项设置

! (19) 求解
/STATUS,SOLU                        ! 求解状态
SOLVE                                ! 求解
FINISH                              ! 退出求解模块

! (20) 进入通用后处理器
/POST1                              ! 进入通用后处理器

! (21) 绘制变形形状
PLDISP,2                            ! 绘制变形形状

! (22) 绘制位移图
/EFACET,1
AVPRIN,0,
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0                ! 绘制位移图

! (23) 绘制应力分布图
/EFACET,1
AVPRIN,0,
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0                ! 绘制应力分布图

```

## 第5章 轴对称问题的有限元分析及 ANSYS 算例

### □ 本章导读

轴对称问题作为一类特殊的空间问题，其实质为二维问题。对于一些几何上轴对称且载荷分布也为轴对称的情况，采用二维分析可以显著节省计算时间。本章介绍轴对称问题的相关理论背景以及 ANSYS 中的单元选项，本章还提供了轴对称问题的分析实例。

本章包括如下的一些主题：

- ANSYS 轴对称问题有限元分析提要
- 分析实例：球形压力容器的轴对称分析

### 5.1 ANSYS 轴对称问题有限元分析提要

前面一章在介绍平面问题时曾经提到，一般结构体严格说都是三维的，平面问题只不过是有一定条件下的简化分析。

本章来介绍另外一种特殊的空间问题——轴对称问题，其基本特点是：结构具有空间的对称轴，载荷作用也具有相同的轴对称性。轴对称的结构在工程中有着很广泛的应用，比如图 5-1 所示的双曲线形冷却塔，就是一个典型的轴对称结构实例，此外，各种压力容器的分析也大多属于轴对称问题。



图 5-1 轴对称问题的工程实例

轴对称问题实质上是一种二维问题，即从其任何一个对称的剖面看去，结构以及载荷情况完全相同。利用有限元方法来分析这一类问题，可以在其某个对称的剖面划分网格，将其划分为一系列面积元素的集合，对其中每一个面积元素绕对称轴旋转形成一个环状的旋转体，即得到空间轴对称问题的分析单元。这种单元也具有轴对称特性，称为轴对称单元。

在柱坐标系下，轴对称单元的位移场仅与对称轴方向的位置以及径向位置有关，因此其实质为二维的单元。在进行这种单元的单元分析时，可仅取其一个剖面，因此其分析方法与平面单元没有什么本质的区别，只是要注意以下几点：

(1) 如果其对称轴用柱坐标的  $z$  轴表示，径向轴用柱坐标的  $r$  轴表示，则整个单元剖面都位于  $Orz$  象限 ( $r$  轴、 $z$  轴正向围成的象限)。

(2) 积分要在整个体积上进行积分，其体积元素为  $2\pi r dA$ ， $dA$  为轴对称单元剖面的面积元。

(3) 其应力分量除了对称剖面内的三个分量  $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{rz}$  以外，还有一个周向应力分量  $\sigma_\theta$ ；其应变分量除了对称剖面内的三个分量  $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_z$ 、 $\gamma_{rz}$  以外，还有周向应变分量  $\varepsilon_\theta$ 。

此外，注意轴对称载荷也要经过相应转化，将经过计算的周向作用力的合力施加到单元剖面边或节点上。

由于轴对称单元在形状上与平面单元完全相同，因此 ANSYS 中分析轴对称问题的单元仍然是 PLANE 系列单元，只不过在分析时，对 PLANE 单元选择轴对称选项。下面以 PLANE2 为例加以说明：

在 ANSYS 的 GUI 中定义了单元类型 PLANE2 之后，可以单击 Options... 按钮，在 PLANE2 element type options 对话框的 Element behavior 选项列表中选择 Axisymmetric 选项，如图 5-2 所示。

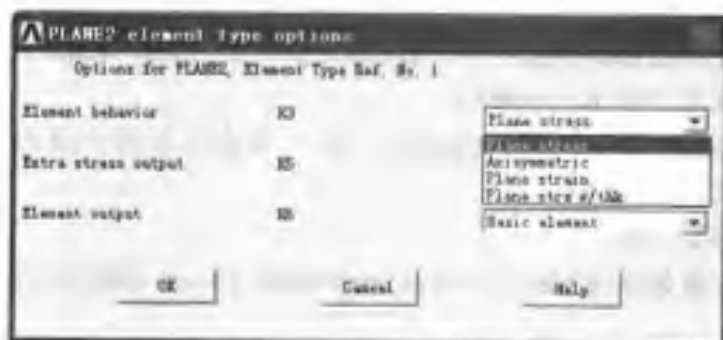


图 5-2 PLANE2 单元的选项

此外，利用 PLANE 系列单元进行轴对称问题的分析时，还需注意如下的两个问题：

- (1) 整个模型必须建立在  $X$  坐标大于零的一侧。
- (2) 如果向单元的表面施加压力，直接输入压力的实际数值即可，无需进行换算。

## 5.2 分析实例：厚壁空心球的轴对称分析

有一个如图所示的钢球（其图只画出了其中一半），其外表面承受压力  $p=1500\text{N/cm}^2$ 。已知钢球的外半径  $R=10.4\text{cm}$ ，内半径  $r=9.1\text{cm}$ 。钢球的材料参数弹性模量  $E=200\text{GPa}$ ，泊松比  $\nu=0.3$ 。试计算钢球内环向和径向应力沿半径的分布。

分析：根据弹性力学已经知道这个问题的解析解为：

$$\sigma_\theta = -4544[1 + 0.5(r/x)^3]$$

$$\sigma_r = -4544[1 - (r/x)^3]$$



其中  $x$  代表观察点距离球心距离。此问题是球对称问题，现将它作为轴对称问题求解，计算结果的分析可以在极坐标系中进行。由于对称性，只取  $1/4$  划分网格。边界条件是在  $\theta=0$  截面上  $UY=0$ ，在  $\theta=90$  度截面上  $UX=0$ 。



图 5-3 厚壁圆球

下面按照操作的先后顺序，对建模和分析的步骤进行介绍。

#### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 **Utility Menu>File>Change Jobname**，指定分析的工作名称为 **THICK\_SPHERE**；

通过菜单项 **Utility Menu>File>Change Title**，指定图形显示区域的标题为 **STRESS ANALYSIS OF THICK\_SPHERE**。

#### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 **Main Menu>Preprocessor** 进入前处理器 **PREP7** 开始建模以及其他的前处理操作。

#### 第 3 步：定义圆环面

单击菜单 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>By Dimensions**，弹出如图 5-4 所示的对话框。

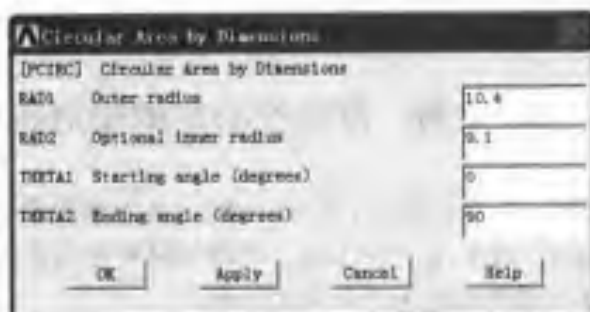


图 5-4 定义圆环面积

输入外半径 10.4cm，内半径 9.1cm，起始角度 0，终止角度 90，最后单击 **OK** 按钮，得到如图 5-5 所示的圆环。



图 5-5 定义圆环面

#### 第 4 步：定义单元类型

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete...，弹出 Element Type 对话框，单击 Add...按钮，弹出如图 5-6 所示的对话框，选择 Structural>Solid>Triangle 6node 单元，单击 OK 按钮返回 Element Types 对话框。

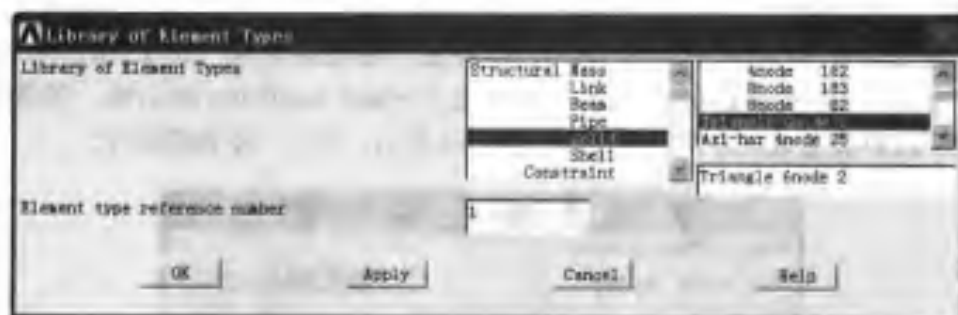


图 5-6 添加单元类型

#### 第 5 步：设置单元轴对称性质

设置单元轴对称属性。当 Element Types 对话框仍然打开时候，单击 Options...按钮，弹出如图 5-7 所示的对话框，在 Element behavior 列表框中选择 Axisymmetric 选项，单击 OK 按钮关闭对话框。

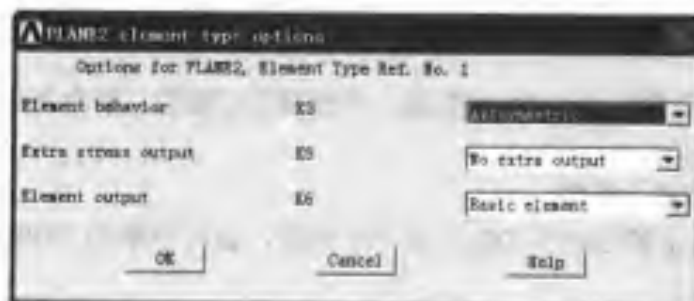


图 5-7 设置单元轴对称属性

#### 第 6 步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define

Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在出现的对话框中输入材料弹性模量  $2.00e7$ （单位  $N/cm^2$ ，与长度单位 cm 对应）以及泊松比 0.3。单击 OK 按钮，返回到 Define Material Model Behavior 窗口，关闭之，返回图形用户界面。

#### 第 7 步：定义网格密度

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Manual Size>Lines>Picked Lines，弹出拾取对话框。拾取圆环的上截面，单击 Apply 按钮，在弹出的对话框中设置 NDIV=4，单击 Apply 按钮确认，此时重新显示拾取对话框，拾取圆环的内外圆弧，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中设置 NDIV=20，单击 OK 按钮确认并关闭窗口。

#### 第 8 步：设置网格划分选项

单击菜单 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool，弹出 Mesh Tool 对话框，如图 5-8 所示，选择单元形状为 Tri（三角形），划分类型为 Mapped。



图 5-8 设置网格划分选项

#### 第 9 步：划分网格

划分网络之前，需要对单元的属性进行指定，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes，弹出 Element Attributes 对话框，在该对话框中指定单元类型、材料类型以及实常数类型等，图 5-9 所示，单击 OK 按钮退出。

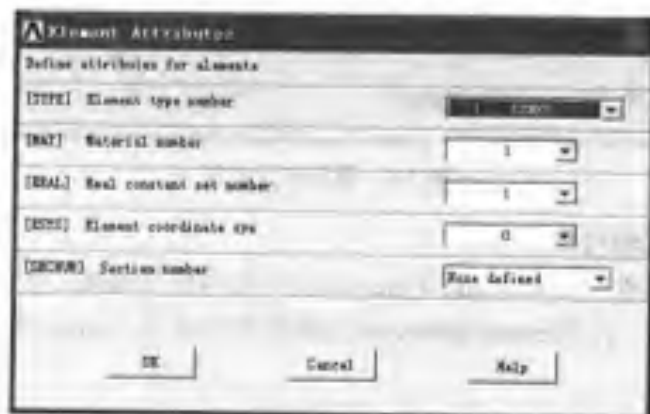


图 5-9 设置单元属性

在 Mesh Tool 对话框中单击 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，得到如图 5-10 所示的网格划分。

#### 第 10 步：保存有限元模型

单击常用工具条上的 SAVE\_DB 按钮保存模型，也可以单击 Utility Menu>File 中的保存选项。

#### 第 11 步：退出前处理模块

至此，已经完成了除加载之外建模的全部操作，点 Main Menu>Finish 菜单项，退出前处理器。



图 5-10 网格划分

**第 12 步：进入求解器**

点 Main Menu>Solution 菜单项，进入求解器。

**第 13 步：定义位移边界条件**

选择菜单项 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Displacement > On Lines，弹出 Apply U, ROT on Lines 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选圆环位于 X 轴上的截面，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Lins 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 UY，单击 Apply 按钮，此时重新弹出 Apply U, ROT on Lines 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选圆环位于 Y 轴上的截面，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Lins 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 UX，单击 OK 按钮。

**第 14 步：定义压力载荷**

单击菜单 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Pressure>On Lines，在图形窗口用鼠标点选圆环的外边圆弧，单击 Apply 按钮，弹出如图 5-11 所示的对话框，VALUE 设置为 1500，即在直线上施加沿曲线内法线方向  $1500\text{N}/\text{cm}^2$  大小的压力。

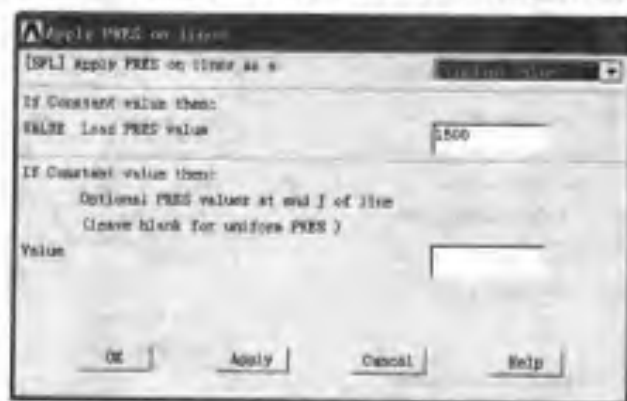


图 5-11 定义压力载荷

完成位移约束和压力载荷施加后的模型显示如图 5-12 所示，其中压力载荷显示为一条与圆环外边缘重合的红色曲线。

**第 15 步：求解选项设置**

在求解之前，需要对相关的选项进行设置，设定分析类型。通过菜单项 Main

Menu>Solution> Analysis Type>New Analysis, 在 New Analysis 对话框中选择分析类型为 Static, 单击 OK 按钮退出。



图 5-12 完成位移约束和压力载荷

#### 第 16 步: 求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 对问题进行求解。在求解结束后, 弹出 Solution is done! 信息提示框, 关闭。

点 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

#### 第 17 步: 进入通用后处理器

通过菜单项 Main Menu>General Postproc, 进入通用后处理器。

#### 第 18 步: 切换结果坐标系

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Options for Output, 弹出如图 5-13 所示的 Options for Output 对话框。

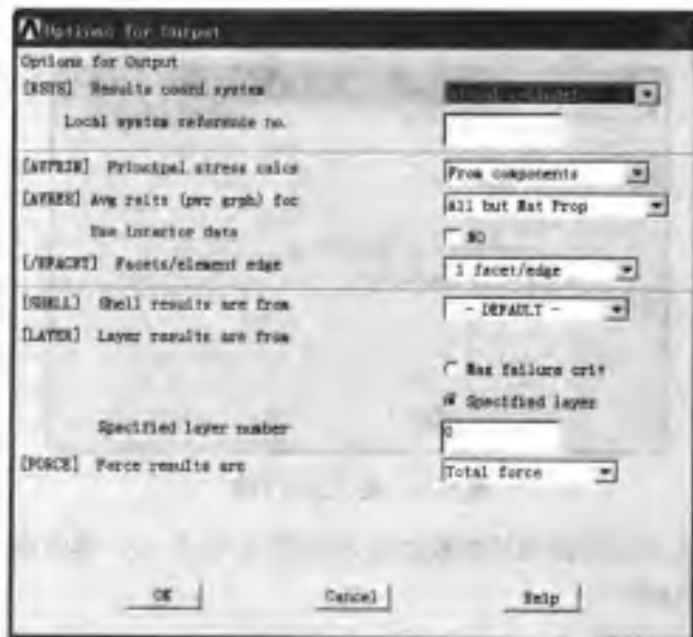


图 5-13 切换结果坐标系

在 Results coord system 列表中选择 Global cylindrical, 采用柱坐标显示结果, 单击 OK 按钮确定。

#### 第 19 步: 绘制径向应力沿半径的分布

单击菜单 Main Menu>General PostProc>Plot Results>Contour Plot>Element Solution, 弹出如图 5-14 所示的对话框, 选择 Stress>X-Components of stress, 单击 OK 按钮, 得到如图 5-15 所示的径向应力沿半径的分布图。从这个图中可以看出径向应力只与半径有关, 而与角度无关, 这与理论解析解一致。

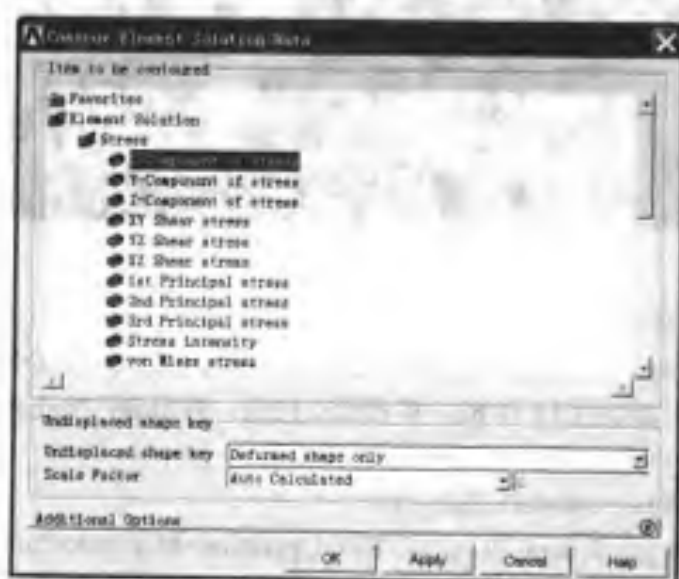


图 5-14 绘制径向应力沿半径的分布

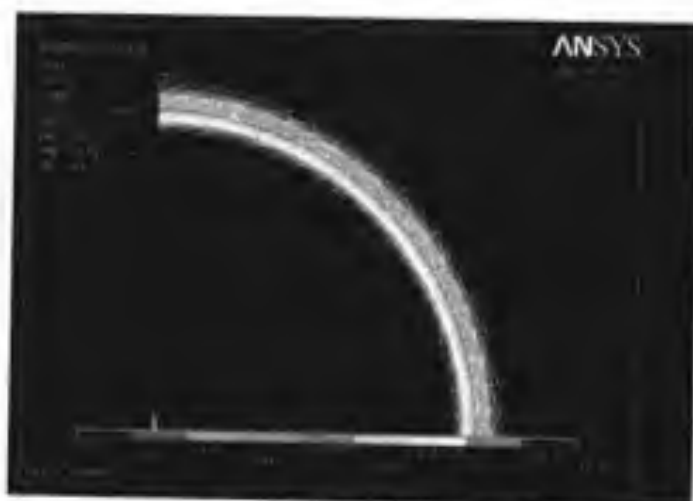


图 5-15 径向应力沿半径的分布

#### 第 20 步: 绘制切向应力沿半径的分布

单击菜单 Main Menu>General PostProc>Plot Results>Contour Plot>Element Solution, 弹出如图 5-14 所示的对话框, 选择 Stress>Y-Components of stress, 单击 OK 按钮, 得到如图 5-16 所示的切向应力沿半径的分布图。从这个图中可以看出切向应力只与半径有关, 而与角度无关,

这与理论解析解也是一致的。

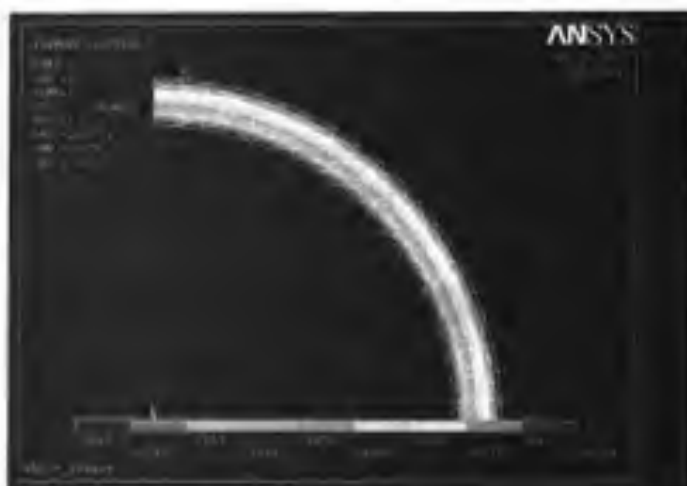


图 5-16 切向应力沿半径的分布

#### 第 21 步：定义径向路径

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Path Operation>Define Path>By Nodes, 弹出拾取对话框, 依次拾取圆环中部节点 14 和 62, 单击 OK 按钮, 弹出 By Nodes 对话框, 输入路径名称 Path\_AB, 单击 OK 按钮。

#### 第 22 步：映射径向应力到路径 Path\_AB

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Path Operation>Map onto Path, 弹出如图 5-17 所示的对话框。在 Lab 域输入名称 Stress\_R, 表示径向应力, 在列表中选择 Stress>X direction, 单击 OK 按钮确定。



图 5-17 映射径向应力到路径 Path\_AB

#### 第 23 步：绘制径向应力沿路径 Path\_AB 分布

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Path Operation>Plot Path Items>On Graph, 弹出 Plot of Path Items On Graph 对话框, 在列表中选择 Stress\_R 选项, 单击 OK 按钮, 得到如图 5-18 所示的径向应力沿路径 Path\_AB 分布。

#### 第 24 步：映射切向应力到路径 Path\_AB

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Path Operation>Map onto Path, 弹出如图 5-17 所示

的对话框。在 Lab 域输入名称 Stress\_t, 表示径向应力, 在列表中选择 Stress>Y direction, 单击 OK 按钮确定。

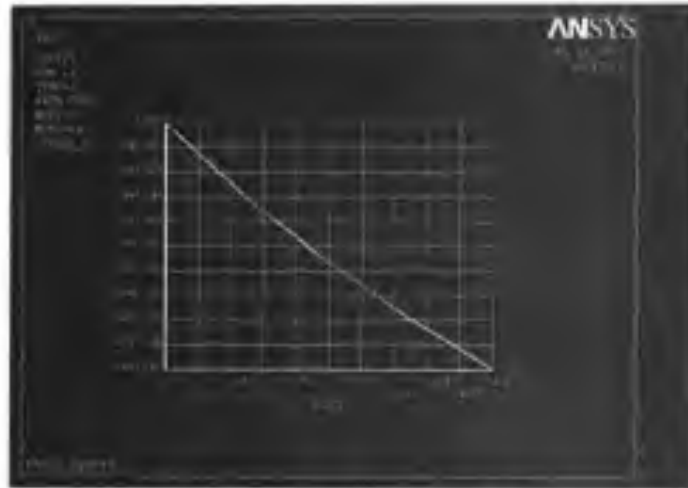


图 5-18 径向应力沿路径 Path\_AB 分布

第 25 步: 绘制切向应力沿路径 Path\_AB 分布

单击菜单 Main Menu>General Postproc>Path Operation>Plot Path Items>On Graph, 弹出 Plot of Path Items On Graph 对话框, 在列表中选择 Stress\_t 选项, 单击 OK 按钮, 得到如图 5-19 所示的径向应力沿路径 Path\_AB 分布。

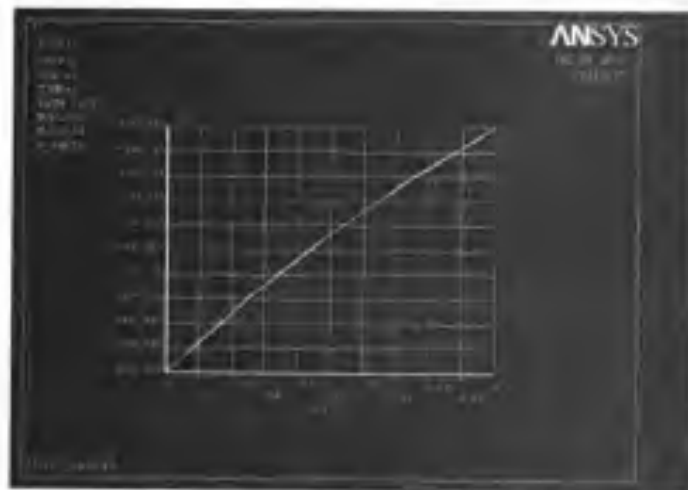


图 5-19 切向应力沿路径 Path\_AB 分布

如果上述建模和分析过程采用批处理操作方式, 则相应的命令流如下:

```
! *****
! *                               *
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME,STRESS ANALYSIS OF thick_sphere ! 指定工作名称
/title,thick_sphere                       ! 指定图形显示标题
```



```

! (2) 进入前处理器
/PREP7                                ! 进入前处理器

! (3) 定义圆环面积
PCIRC,10.4,9.1,0,90,                 ! 定义圆环面积

! (4) 定义单元类型
ET,1,PLANE2                           ! 定义单元类型

! (5) 设置单元轴对称性质
KEYOPT,1,3,1                          ! 设置单元轴对称性质
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

! (6) 定义材料模型
MP,EX,1,2.00e11                       ! 指定弹性模量
MP,PRXY,1,0.3                         ! 指定泊松比

! (7) 定义网格密度
LESIZE,2,,.4,,,,1                    ! 沿圆环径向网格密度
LESIZE,1,,.20,,,,1                   ! 沿圆环切向网格密度
LESIZE,3,,.20,,,,1

! (8) 设置网格划分选项
MSHAPE,1,2D                           ! 三角形单元
MSHKEY,1                               ! 映射网格划分

! (9) 划分网格
TYPE, 1                                ! 单元类型
MAT, 1                                 ! 材料类型
REAL,                                  ! 单元常数
ESYS, 0                                ! 单元坐标系
AMESH,1                                ! 划分网格

! (10) 保存有限元模型
SAVE                                    ! 保存有限元模型

! (11) 退出前处理模块
FINISH                                  ! 退出前处理模块

! (12) 进入求解器
/SOLU                                   ! 进入求解器

```

```

! (13) 定义位移边界条件
DL,4, ,UY,          ! 定义位于 X 轴上截面的边界条件
DL,2, ,UX,          ! 定义位于 Y 轴上截面的边界条件

! (14) 定义压力载荷
SFL,1,PRES,1500,    ! 定义压力载荷

! (15) 求解选项设置
ANTYPE,0            ! 求解选项设置

! (16) 求解
SOLVE               ! 求解
SAVE                ! 保存计算结果
FINISH              ! 退出求解模块

! (17) 进入通用后处理器
/POST1              ! 进入通用后处理器

! (18) 切换结果坐标系
RSYS,1              ! 切换结果坐标系

! (19) 绘制径向应力沿半径的分布
AVPRIN,0,
PLESOL, S,X, 0,1,0 ! 绘制径向应力沿半径的分布

! (20) 绘制切向应力沿半径的分布
AVPRIN,0,
PLESOL, S,Y, 0,1,0 ! 绘制切向应力沿半径的分布

! (21) 定义径向路径
FLST,2,2,1          ! 拾取节点 62 和 14
FITEM,2,62
FITEM,2,14
PATH,path_AB,2,30,20, ! 定义径向路径 Path_AB
PPATH,P51X,1

! (22) 映射径向应力到路径 Path_AB
PDEF,stress_r,S,X,AVG ! 映射径向应力到路径 Path_AB
/PBC,PATH, ,0

! (23) 绘制径向应力沿路径 Path_AB 分布
PLPATH,STRESS_R     ! 绘制径向应力沿路径 Path_AB 分布
AVPRIN,0, ,

```

! (24) 映射切向应力到路径 Path\_AB

PDEF,s\_theta,S,Y,AVG ! 映射切向应力到路径 Path\_AB

/PBC,PATH,0

! (25) 绘制切向应力沿路径 Path\_AB 分布

PLPATH,S\_THETA ! 绘制切向应力沿路径 Path\_AB 分布

! (26) 退出 ANSYS 并保存结果

/EXIT,ALL ! 退出 ANSYS 并保存结果

## 第 6 章 三维实体结构的 ANSYS 分析及算例

### □ 本章导读

实际的结构构件都是三维实体，只不过在一定条件下，可简化为一维的杆件、二维的板壳、平面问题或轴对称问题进行分析。对于各种三维的机械零件以及一些建筑构件或细部构造的力学分析，都需要建立三维的有限元模型。本章目的在于介绍在 ANSYS 进行三维实体结构有限元分析的基本方法，结合工程实例进行讲解。

本章包括如下的一些主题：

- 三维实体结构 ANSYS 有限元分析提要
- 分析实例：工业厂房牛腿柱的受力分析

### 6.1 三维实体结构 ANSYS 有限元分析提要

三维实体结构的分析属于弹性力学空间问题，空间弹性力学问题一般情况下很难得到解析解，有限单元法是解决这类问题的有效手段。三维实体结构分析常见于各类机械零部件的力学分析，建筑结构构件分析中（比如框架节点的分析）也有时用到。

对于弹性力学的空间问题，有 3 个位移分量、6 个应力（或应变）分量，但其分析过程和分析方法与平面问题或轴对称问题完全类似，也要经过结构离散为单元、找单刚、组总刚、引入边界条件、求解以及结果分析等环节。其中，关键性的问题在于单元分析，即计算单元刚度矩阵。其方法在平面问题一章已经介绍过，这里不再展开叙述。采用不同的位移模式，可以得到不同的单元类型，如：线性单元、二次单元等。

ANSYS 程序的单元库中有一系列的三维实体单元可供选择，如 8 节点线性单元 SOLID45，如图 6-1 所示。

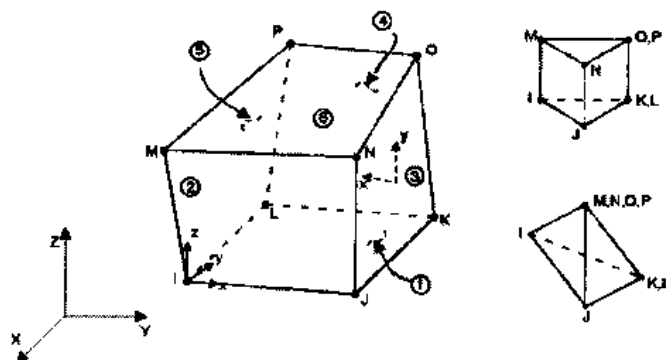


图 6-1 SOLID45 单元及其退化元的形状

此外，还有 10 节点二次单元 SOLID92（如图 6-2 所示）以及 20 节点二次单元 SOLID95（如图 6-3 所示）等。这些单元，由于其具有二次插值函数，因此适合于边界形状不规则问题

的网格划分。

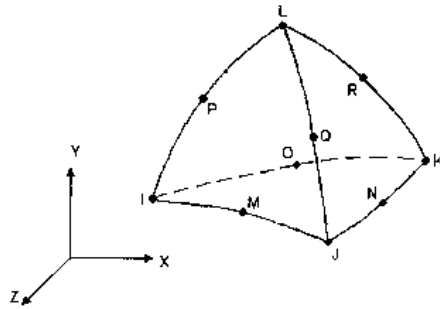


图 6-2 SOLID92 单元的形状

图 6-3 为三种实体单元的形态，可以发现六面体单元一般可以通过合并节点形成棱柱形状、金字塔形状或四面体形状的退化单元。各种单元及其退化单元的位移插值函数（形函数）可以参照本书的附录 A。

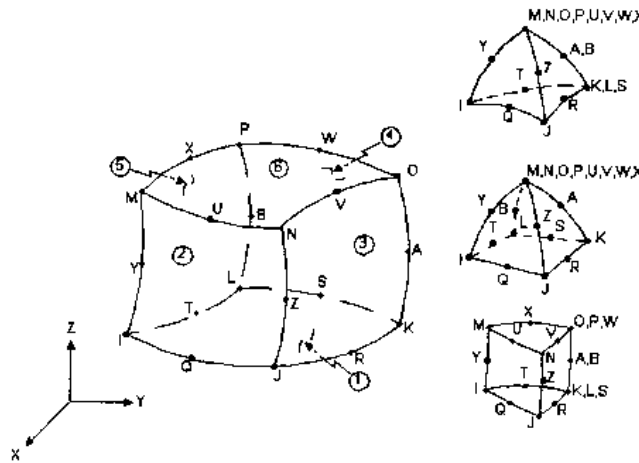


图 6-3 SOLID95 单元及其退化元

## 6.2 分析实例：工业厂房牛腿柱的受力分析

作为空间实体结构有限元分析的实例，本节介绍如图 6-4 所示的工业厂房牛腿排架柱的 ANSYS 建模以及分析方法。问题简单描述如下：

某工业厂房的带牛腿钢筋混凝土排架柱，相关的尺寸已经标在图中，密度  $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 30.0GPa，泊松比 0.2，试分析这一结构在自重以及屋架和吊车梁载荷作用下的内力以及变形情况。

下面按照操作的先后步骤，对整个建模以及分析的过程进行介绍。

第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 COLUMN；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示标题为 COLUMN OF WORKSHOP。

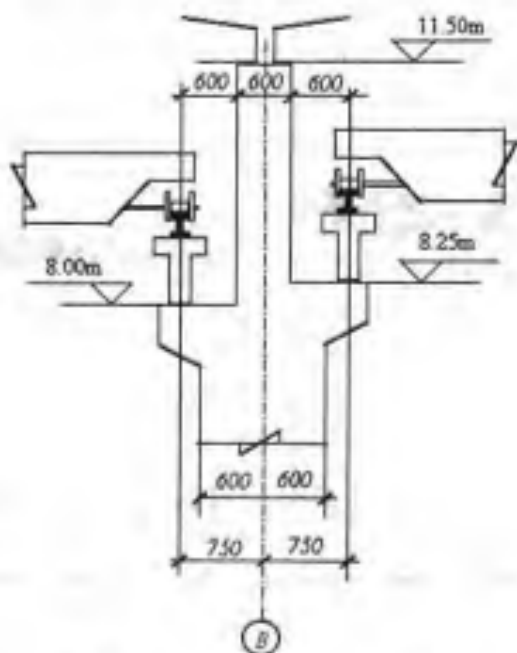


图 6-4 工业厂房排架牛腿柱示意图

#### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

#### 第 3 步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 6-5 所示。

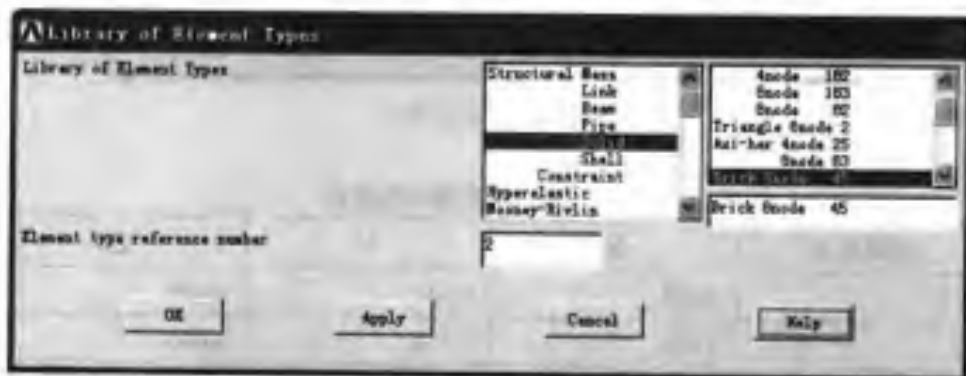


图 6-5 定义单元类型

对于本问题，拟采用三维实体单元 SOLID45 进行分析，同时建模时采用平面网格拉伸到三维的方式，在平面中划分辅助网格，采用 PLNAE42 单元。在窗口中依次选择这两种单元类型，然后单击 OK 退出。

#### 第 4 步：定义材料类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→

Isotropic, 在出现的对话框中输入材料弹性模量  $3.0 \times 10^{10}$  以及泊松比 0.2, 如图 6-6 所示。

单击 OK 按钮, 返回到 Define Material Model Behavior 窗口, 在右侧选择 Density, 双击打开定义密度的对话框, 如图 6-7 所示, 在其中输入材料的密度 2500 (本题必须定义密度), 单击 OK 按钮退出, 然后关闭 Define Material Model Behavior, 返回图形用户界面。

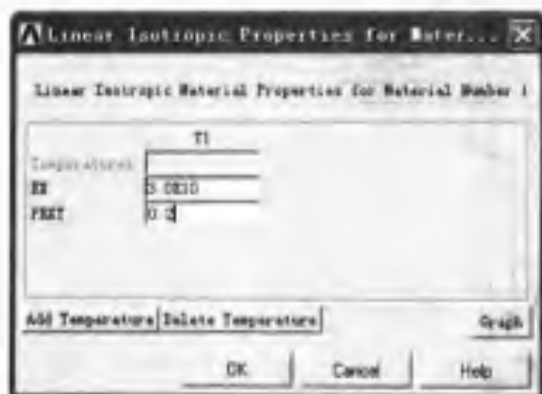


图 6-6 定义材料参数

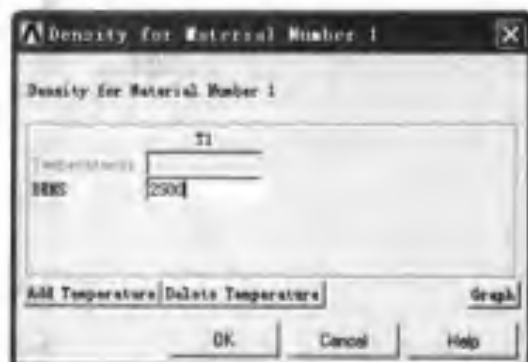


图 6-7 定义质量密度

### 第 5 步: 建立剖面几何模型

#### 1. 建立关键点

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS, 弹出如图 6-8 所示的对话框, 定义表 6-1 所列的一些关键点。

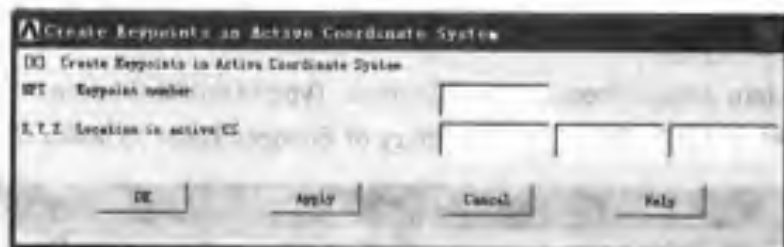


图 6-8 建立关键点

表 6-1 关键点的编号与坐标

关键点 ID	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	0.000	7.550	0.000
3	-0.350	7.700	0.000
4	-0.350	8.000	0.000
5	-0.250	8.000	0.000
6	-0.050	8.000	0.000
7	0.300	8.000	0.000
8	0.300	11.500	0.000
9	0.900	11.500	0.000

续表

关键点 ID	X	Y	Z
10	0.900	8.250	0.000
11	1.250	8.250	0.000
12	1.450	8.250	0.000
13	1.550	8.250	0.000
14	1.550	7.950	0.000
15	1.200	7.800	0.000
16	1.200	0.000	0.000

## 2. 建立面

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs, 弹出 Create Area Through Kps 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上依次点选 16 个关键点 (按照关键点号), 然后单击 OK 按钮, 即可得到柱子的侧面形状。

### 第 6 步: 对面划分网格

#### 1. 设置网格属性

通过选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Areas, 弹出如图 6-9 所示的 Area Attributes 对话框中, 选择材料号以及单元类型号均为 1, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

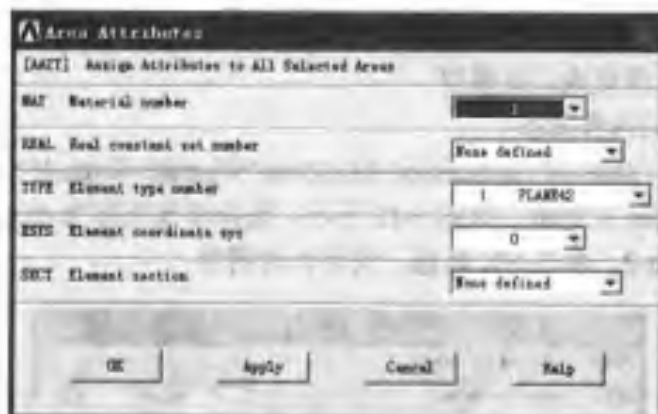


图 6-9 单元属性设置

#### 2. 设置单元尺寸

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Manual Size>Areas>All Areas, 在弹出的 Element Sizes on All Selected Areas 对话框中的输入单元边长为 0.15, 如图 6-10 所示。

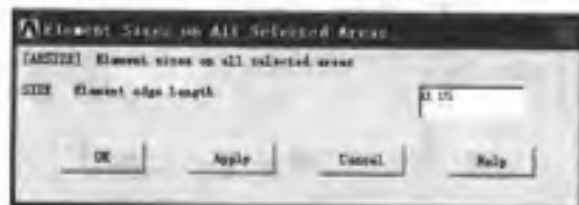


图 6-10 单元尺寸设置



### 3. 划分面单元

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool, 弹出 MeshTool 面板, 在面板的最下面, 选择单元形状 Shape 选项为 Quad, 选择单元划分方式为 Free, 单击 Mesh 按钮, 弹出 Mesh Areas 对象拾取框, 然后用鼠标在屏幕上选择柱侧面, 单击 OK 按钮, 即可完成对柱侧面的网格划分。图 6-11 所示为划分的二维网格图 (局部的放大)。

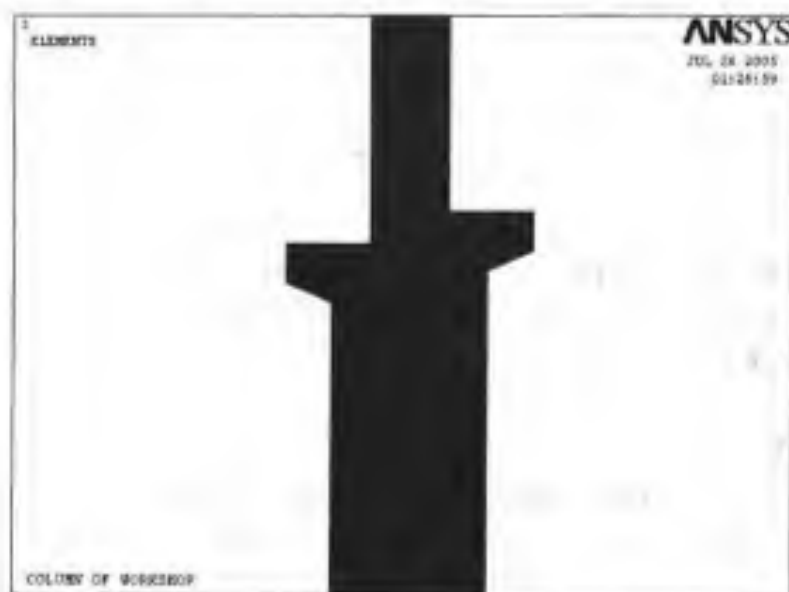


图 6-11 二维网格图

### 第 7 步: 沿法向拉伸形成三维模型

#### 1. 设置拉伸形成的网格属性

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Elem Ext Opts, 弹出 Element Extrusion Options 对话框, 如图 6-12 所示, 选择单元类型为 SOLID45, 选择厚度方向单元数 No. Elem divs 为 2, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

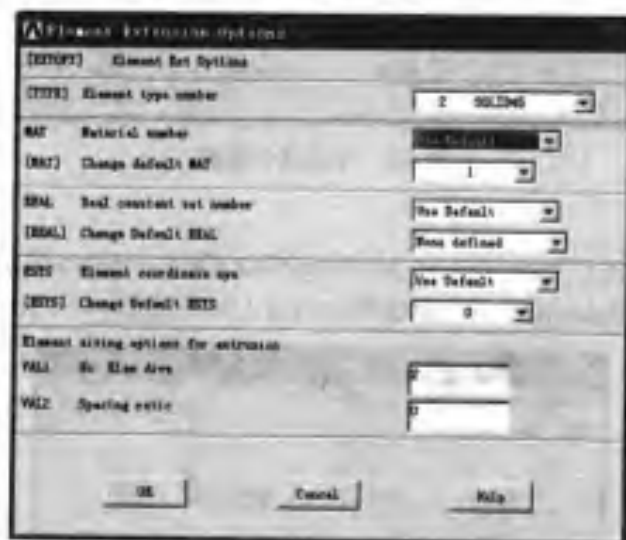


图 6-12 拉伸形成网格属性设置

## 2. 执行拉伸操作

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>Along Normal, 弹出 Extrude Area By Normal 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上选择下柱侧面, 点 Apply 按钮, 弹出 Extrude Area along Normal 对话框, 如图 6-13 所示, 在 DIST 一栏中填 0.3, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

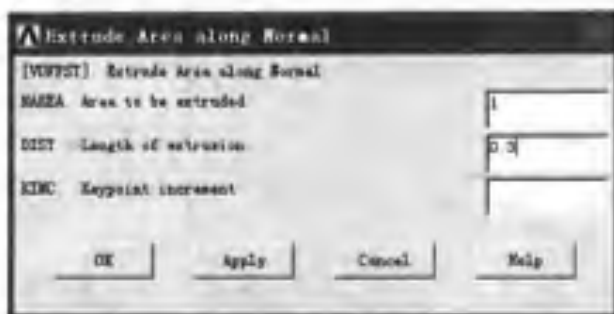


图 6-13 拖拉面形成体

对上柱的侧面重复上述操作, 得到三维实体有限元模型, 如图 6-14 所示 (局部放大)。



图 6-14 三维有限元模型的局部放大

## 第 8 步: 施加位移约束

### 1. 选择所有基础顶面的节点

在计算中认为柱底固定于基顶上, 为此选择所有的基顶节点, 通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 在弹出的 select entities 对话框中, 自上到下依次选择 Nodes→By Location→Y coordinates, 在 Min, Max 一栏中填写-0.1,0.1, 选中下面的 From Full 复选框, 单击 OK 按钮, 即可选中基础顶面的所有节点。

### 2. 施加位移约束

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displace-

ment > On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对象拾取框, 单击 Pick All 按钮, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 如图 6-15 所示, 在 DOFs to be constrained 列表中选中 ALL DOF, 单击 OK 按钮, 对基础顶面的节点施加位移约束。



图 6-15 约束所有自由度

### 3. 恢复选择所有的对象

通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 恢复选择所有的对象。

#### 第 9 步: 施加屋架传来的集中载荷

假设两侧屋架传来的载荷作用点对称, 于是其合力应作用于上柱顶面的中心节点上。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Force/Moment > On Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上点选上柱顶面的中心节点, 然后单击 OK 按钮, 弹出 Apply F/M on Nodes 对话框, 选择 FY, 输入载荷的数值为-10000, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

#### 第 10 步: 施加吊车梁传来的面载

假设吊车梁的宽度为 0.2m, 在牛腿的这一宽度上受到来自吊车梁的均布压力作用。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure> On Areas, 弹出 Apply PRES on areas 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上选择牛腿面上的两个受载面, 如图 6-16 所示。



图 6-16 牛腿表面的受荷部分

单击 Apply 按钮，弹出 Apply PRES on areas 对话框，如图 6-17 所示，输入均布压力的数值 50000，单击 OK 按钮，关闭该对话框。图 6-18 所示为施加均布压力后的图示。



图 6-17 施加均布压力



图 6-18 施加均布压力后的图示

#### 第 11 步：施加重力

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity，弹出 Apply Acceleration 对话框，如图 6-19 所示，填 ACELY 为 9.8，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

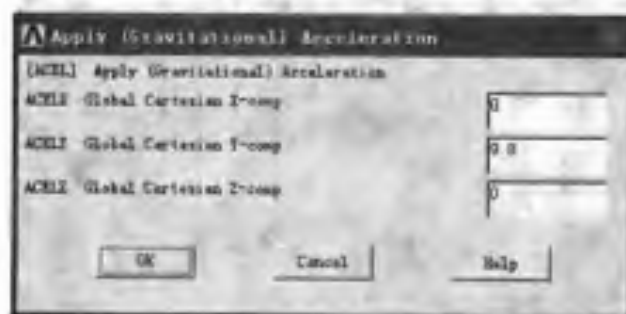


图 6-19 施加重力

施加约束和载荷后的整体模型如图 6-20 所示。



图 6-20 施加约束和载荷后的模型

**第 12 步：退出前处理器**

完成上述建模操作后，点 Main Menu>Finish 退出前处理器。

**第 13 步：求解**

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，对问题进行求解。在求解结束后，点 Main Menu>Finish 菜单项，退出求解器。

**第 14 步：进入通用后处理器并读入结果**

通过菜单项 Main Menu>General Postproc，进入通用后处理器。在对计算结果进行后处理之前，需首先通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set，将计算结果读入通用后处理器。

**第 15 步：观察变形情况**

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results >Deformed Shape，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def+undeformed，单击 OK 按钮，适当调整视图方向，出现如图 6-21 所示的显示结果。

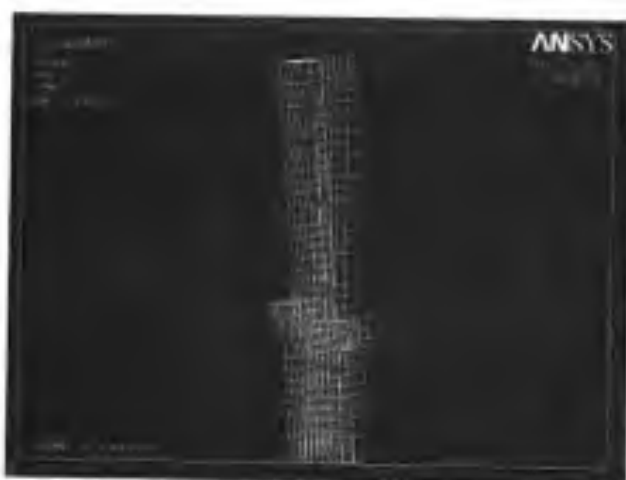


图 6-21 结构变形形状

第16步：观察等效应力分布情况

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu, 弹出 Contour Element Solution Data, 左侧项目列表中选择 Stress, 右侧项目列表中选择 SEQV, 单击 OK 按钮, 适当调整视图, 图形显示第一主应力的分布情况, 如图 6-22 所示。

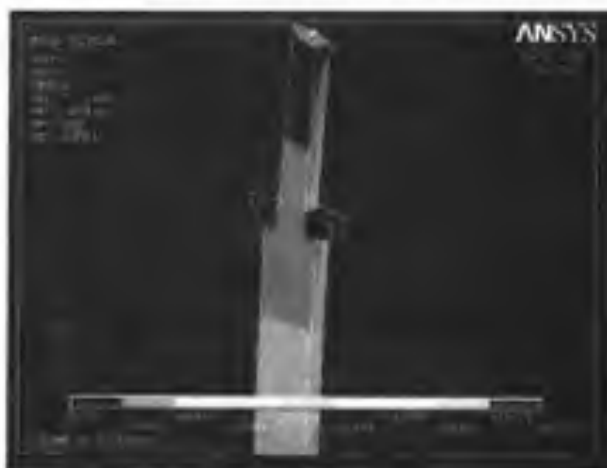


图 6-22 第一主应力分布

如果本节的上述建模以及分析过程采用批处理方式, 则相应操作的 ANSYS 命令流如下:

```
! *****
!                               带牛腿的排架柱结构静力分析命令流
! *****

! (1) 工作环境设置
/FILENAME,COLUMN                ! 工作名称
/TITLE,COLUMN OF WORKSHOP      ! 图形显示标题

! (2) 进入前处理器
/PREP7                            ! 进入前处理

! (3) 定义单元类型
ET,1,PLANE42                      ! 定义平面单元
ET,2,SOLID45                       ! 定义三维单元

! (4) 定义材料参数
MP,EX,1,3.0E10                    ! 弹性模量
MP,PRXY,1,0.2                     ! 泊松比
MP,DENS,1,2500                    ! 密度

! (5) 建立剖面几何模型
! 建立所有的剖面关键点 (共 16 个)
k,1, 0.000 ,0.000 ,0.000
k,2, 0.000 ,7.550 ,0.000
k,3, -0.350 ,7.700 ,0.000
k,4, -0.350 ,8.000 ,0.000
```

```

k,5, -0.250 ,8.000 ,0.000
k,6, -0.050 ,8.000 ,0.000
k,7, 0.300 ,8.000 ,0.000
k,8, 0.300 ,11.500 ,0.000
k,9, 0.900 ,11.500 ,0.000
k,10, 0.900 ,8.250 ,0.000
k,11, 1.250 ,8.250 ,0.000
k,12, 1.450 ,8.250 ,0.000
k,13, 1.550 ,8.250 ,0.000
k,14, 1.550 ,7.950 ,0.000
k,15, 1.200 ,7.800 ,0.000
k,16, 1.200 ,0.000 ,0.000

```

! 顺次连接 16 个关键点, 建立柱的侧面:

```
A,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16
```

! (6) 对面划分网格

```

AATT,1, ,1           ! 设置网格属性
AESIZE,ALL,0.15     ! 设置网格大小
MSHKEY,0            ! 设置网格形状
AMESH,1             ! 划分网格

```

! (7) 沿法向拉伸形成三维模型

```

TYPE, 2              ! 指定拉伸形成的网格属性
EXTOPT,ESIZE,2,0    ! 指定拉伸后形成单元的层数
VOFFST,1,0.3        ! 沿法向拉伸平面 0.3m

```

! (8) 施加位移约束

```

NSEL,S,LOC,Y,-0.1,0.1 ! 选择基础顶面结点
D,ALL,ALL           ! 约束基础顶面结点
ALLSEL,ALL          ! 恢复选择全部的对象

```

! (9) 施加屋架传来的等效集中载荷

```
F,838,FY,-10000      ! 施加屋架传来的等效集中力
```

! (10) 施加两侧吊车梁传来的压力

```

SFA,13,1,PRES,50000 ! 施加右侧吊车梁压力
SFA,7,1,PRES,50000 ! 施加左侧吊车梁压力

```

! (11) 施加结构重力

```
ACEL,0,9.8,0,        ! 施加结构重力
```

! (12) 退出前处理器

```
Fini                 ! 退出前处理器
```

! (13) 求解

```
/SOLU                ! 进入求解器
```

```
SOLVE                ! 求解
FINI                 ! 退出求解器
! (14) 进入通用后处理器并读入结果
/POST1              ! 进入后处理
SET,LAST            ! 将结果读入后处理器

! (15) 观察变形情况
PLDISP,1           ! 绘制结构变形前后形状

! (16) 观察等效应力分布情况
PLESOL,S,EQV,0,1   ! 绘制结构的等效应力分布等值线图
FINI               ! 退出通用后处理器
```



## 第 7 章 板壳结构的 ANSYS 分析及算例

### 本章导读

板壳结构是一种重要的结构形式，也是三维实体结构的简化形式（一维尺度远小于另两维的尺度）。本章将向读者介绍在 ANSYS 中进行板壳结构有限元分析的基本方法，同时结合一个圆柱面屋顶结构的受力分析实例进行讲解。

本章包括如下的一些主题：

- 板壳结构 ANSYS 有限元分析提要
- 应用实例：圆柱壳屋面结构的静力分析

### 7.1 板壳结构 ANSYS 有限元分析提要

板壳结构是一类重要的工程结构，其分析的理论基础为板壳力学。板壳结构在工程中有着广泛的应用，如各种平台结构的平台板、各类曲面壳体穹顶（如图 7-1 所示的悉尼歌剧院壳结构）等。关于板壳结构的有限元分析方法，一般的有限元教程中都有介绍，这里不再展开叙述。



图 7-1 悉尼歌剧院壳结构

ANSYS 中提供了一系列壳单元，常见的有 SHELL63（4 节点弹性壳单元）、SHELL93（8 节点壳单元，适合于曲面壳体的单元划分）以及 SHELL51（2 节点轴对称壳单元）等。下面以 SHELL63 为例，简单介绍壳单元的特点以及输入参数。

SHELL63 单元是一种 4 节点弹性壳单元，每个节点具有 6 个自由度，即三个方向的线位移和三个方向的转角，如图 7-2 所示。SHELL63 单元可以同时承受壳面内、外的载荷，同时具有壳单元算法和膜单元算法，该单元还考虑了应力刚化效应以及大变形效应。

使用该单元时，须注意以下问题：

- (1) 壳单元的面积不能为零。
- (2) 不允许单元厚度为零或者在角点减小为零的情况。
- (3) 在壳单元组合中，只要每个单元不超过 15 度，可很好的产生一个曲边壳面。

在分析之前，需要为 SHELL63 单元输入如表 7-1 所列的数据信息（通过前处理的具体操作来实现数据的传递）。

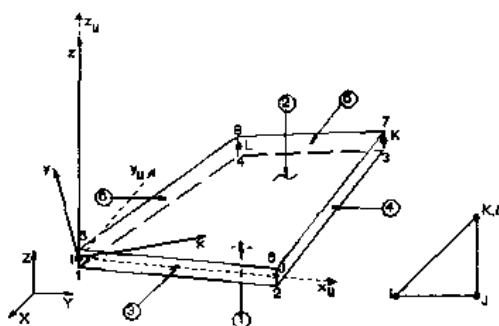


图 7-2 SHELL63 单元

表 7-1 SHELL63 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	SHELL63
节点编号	I,J,K,L
节点自由度	UX,UY,UZ,ROTX, ROTY, ROTZ
实常数	TK(I),TK(J),TK(K),TK(L),EFS, THETA,RMI,CTOP,CBOT,ADMSUA
材料参数	EX,EY,EZ,(PRXY,PRYZ,PRXZ or NUXY,NYYZ,NYXZ),ALPX(or CTEX,CTEY,CTEZ or THSX,THSY,THSZ), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1(I-J-K-L) (底面,+Z 方向) 表面 2(I-J-K-L) (顶面,-Z 方向) 表面 4(J-I) 表面 5(L-K) 表面 6(I-L)
体载荷	温度: T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8
特殊功能	应力强化, 大变形, 单元死活
KEYOPT(1)	单元强化 0-弯曲刚度和薄膜刚度 1-只要薄膜刚度 2-只要弯曲刚度
KEYOPT(2)	应力强化选项 0-当 NLGEOM 打开时,只采用主要的切向刚度矩阵 1-采用一致的切向刚度矩阵 2-不采用一致的切向刚度矩阵
KEYOPT(3)	附加位移形状 0-包括附加位移形状, 使用弹簧形式的面内绕单元 Z 轴的转动刚度 (如果 KEYOPT(1)=0, 程序自动添加一个微小刚度, 以保证数值计算稳定) 1-不包括附加位移形状, 使用弹簧形式的面内绕单元 Z 轴的转动刚度 (如果 KEYOPT(1)=0, 程序自动添加一个微小刚度, 以保证数值计算稳定) 2-包括附加的位移形函数, 并使用面内绕单元 Z 轴的转动刚度
KEYOPT(5)	0-基本单元输出 2-节点应力输出

续表

输入项目	变量名称
KEYOPT(6)	0-折减的压力载荷 (当 KEYOPT(1)=0 时必须使用) 1-一致的压力载荷
KEYOPT(7)	1-一致的质量矩阵 2-折减的质量矩阵
KEYOPT(8)	0-接近一致的应力刚度矩阵 (默认) 1-折减的应力刚度矩阵
KEYOPT(9)	0-没有用户程序来定义单元坐标系 4-单元 X 轴由用户程序 USERAN 指定
KEYOPT(11)	0-只保存顶面和底面的数据 1-保存顶面, 底面和中间面的数据

## 7.2 应用实例：圆柱壳屋面结构的静力分析

作为板壳结构有限元分析的应用实例，本节介绍如图 7-3 所示的圆柱壳屋面的 ANSYS 静力分析方法。问题简单描述如下：



图 7-3 圆柱壳屋面示意图

某圆柱壳屋面，厚度 0.15m，拱的半径为 20.0m，长度为 36m，半圆心角  $30^\circ$ ，侧向长边方向铰支，曲边自由，密度  $2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，材料弹性模量 30GPa，泊松比 0.2，试分析其在自重作用下的内力以及变形情况。

下面按操作的先后步骤，对整个建模以及分析的过程进行介绍：

第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 ROOF；

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示标题为 ANALYSIS OF ROOF UNDER SELF-WEIGHT。

第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

### 第3步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，点 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 7-4 所示。

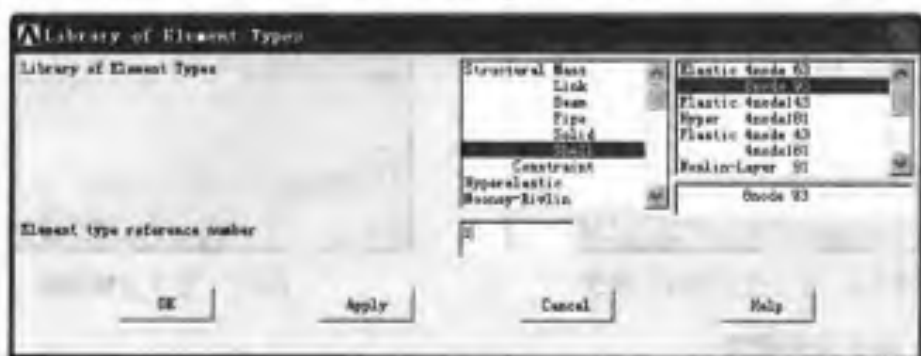


图 7-4 定义单元类型

对于本问题，拟采用壳单元 SHELL93 来划分柱面。因此在窗口左侧选择 Structural Shell，右侧选择 Elastic,8 node 93，点 OK 退出。

### 第4步：定义单元厚度

为壳单元指定厚度，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant，在 Real Constants 对话框中，点 Add...按钮，在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中，接受默认值，直接点 OK，最后在图 7-5 所示的对话框中输入壳单元的厚度为 0.15 米，定义完成后，单击 OK 按钮退出该对话框。

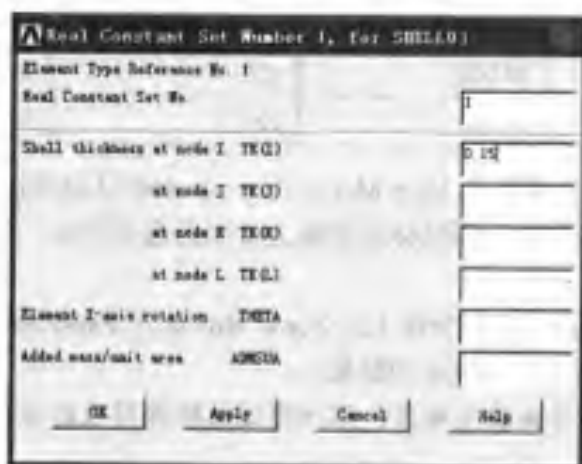


图 7-5 定义实参数

### 第5步：定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic，在出现的对话框中输入材料弹性模量  $3.0 \times 10^{10}$  以及泊松比 0.2，如图 7-6 所示。单击 OK 按钮，返回 Define Material Model Behavior 对话框，在右侧选择 Density，双击打开定义密

度的对话框，如图 7-7 所示，在其中输入材料的密度 2500（本题必须定义密度），单击 OK 按钮退出，然后关闭 Define Material Model Behavior 对话框，返回图形用户界面。



图 7-6 定义线弹性材料参数

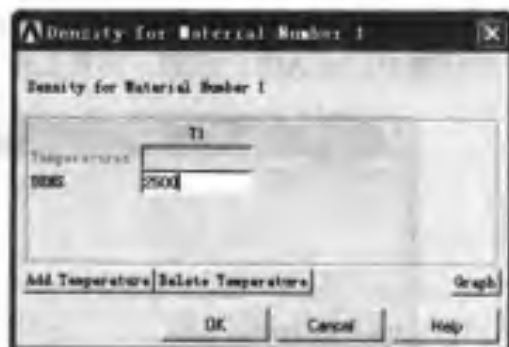


图 7-7 定义材料模型

### 第 6 步：建立几何模型

按如下的具体操作建立几何模型：

(1) 将总体柱面坐标系设为当前活动坐标系：通过菜单项 **Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cylindrical** 来实现。

(2) 建立关键点：选择菜单项 **Main menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS**，定义表 7-1 所列的一些关键点。

表 7-1 关键点的编号与坐标

关键点 ID	X	Y	Z
1	20.000	60	0.000
2	20.000	60	36.000
3	20.000	120	36.000
4	20.000	120	0.000

(3) 建立圆柱面：选择菜单项 **Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs**，弹出对象拾取框，用鼠标在屏幕上依次点选关键点 1 至 4，然后单击 OK 按钮，即可形成柱面。

选择菜单项 **Utility Menu>PlotCtrls>Pan Zoom Rotate**，在 **Pan-Zoom-Rotate** 窗口中，选择视图方向为 **Obliq**，则显示如图 7-8 所示的结果。

**注意：**当前坐标系为总体柱坐标系，因此通过关键点形成的面，其各边默认与当前坐标系的坐标方向一致。

### 第 7 步：网格划分前的设定

对面划分单元之前，需要先指定面单元的属性。

选择菜单项 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Areas**，出现 **Area Attributes** 对话框，接受默认设置即可，单击 OK 退出。

接下来，需要对网格尺寸进行设置，选择菜单项 **Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>ManualSize>Areas>All Areas**，在 **SIZE (Element edge length)** 中填写 2，如图 7-9 所示，

单击 OK 按钮退出。



图 7-8 在总体柱坐标系中建立的圆柱面

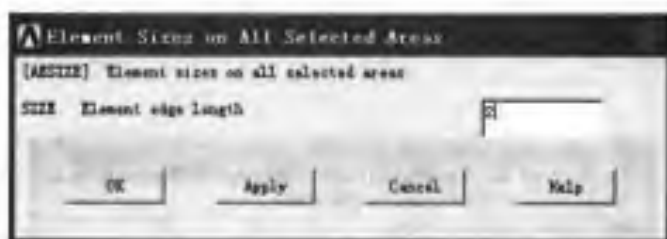


图 7-9 单元尺寸设置

#### 第 8 步：对柱面进行网格划分

上述设置完成后，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool，打开网格划分工具 MeshTool 窗口，在 Mesh 下拉列表中选择 Area，Shape 选项选 Quad，网格划分方式选择 Mapped，Mapped 复选框下面的下拉列表中选择 3 or 4 sided，单击 Mesh 按钮，出现 Mesh Areas 对象拾取框，在图形显示区域中选择柱面，然后单击 OK 按钮，即完成单元的划分，如图 7-10 所示。点 MeshTool 窗口的 Close 按钮，退出该窗口。

通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape，在弹出的窗口中，将[ESHAPE]一栏选择 On，单击 OK 按钮，即可看到壳单元及其实际厚度，如图 7-10 所示。



图 7-10 划分形成的壳单元

#### 第 9 步：施加位移边界条件

板的纵向长边为铰支边（约束所有的线位移自由度，转动不受约束）。

选择需约束的节点。首先选择菜单项 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian, 将当前坐标系变为总体直角坐标系, 通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 在弹出的 select entities 对话框中, 自上到下依次选择 Nodes→By Location→X coordinates, 在 Min, Max 一栏中填写-10.1,-9.9, 选中下面的 From Full 复选框, 单击 Apply 按钮, 即可选中左边的一列节点, 然后, 将 Min, Max 一栏改写为 9.9,10.1, 选中下面的 Also Select 复选框, 单击 OK 按钮, 即可选中右边的一列节点。

通过选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes, 在弹出的对象拾取对话框中, 单击 Pick All 按钮, 出现 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 在 DOFs to be constrained 一栏中, 选择 UX、UY 以及 UZ, 然后点 OK 按钮。

通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 恢复选择整个模型的全部实体对象。

#### 第 10 步: 施加重力

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity, 在弹出的 Apply (Gravitational) Acceleration 对话框中, 输入重力加速度的数值为 9.8, 如图 7-11 所示。

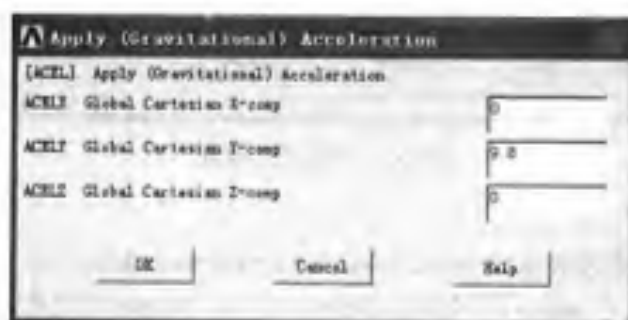


图 7-11 施加重力加速度

**注意:** 在 ANSYS 中, 通过施加加速度的形式来施加体力(重力以及惯性力), 且根据惯性力的特性, 其方向总是与加速度方向相反。因此在这个问题中, 重力是沿着 Y 轴的负向, 重力加速度的正方向应与重力恰好相反(ANSYS 将重力也视为惯性力)。

施加了位移约束以及重力之后的图形显示结果如图 7-12 所示。

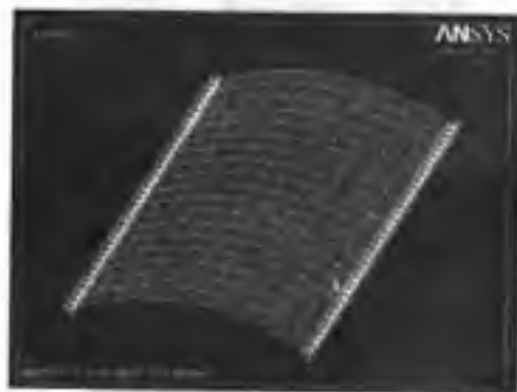


图 7-12 施加位移约束以及载荷

至此, 已经完成了分析模型的建立, 点菜单项 Main Menu>Finish, 退出前处理器。

## 第11步：求解

选择菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，程序将开始求解。求解结束后，弹出 Solution is done! 信息提示框，关闭。

注意：由于程序默认的分析类型就是静力分析，因此这里无需专门设置分析类型。

## 第12步：后处理

## 1. 进入通用后处理器并读入结果

选择菜单项 Main Menu>General Postproc 进入通用后处理器，选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，读入计算结果。

## 2. 观察计算结果

通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，在弹出的 Contour Nodal Solution Data 对话框最上边的下拉列表中，左侧选择 DOF Solution，右侧选择 Translation UY，选中中间的 Def+Undeformed 复选框，单击 Apply 按钮，即可观察到竖向挠度分布等值线图以及整个结构的变形情况与变形前的形状比较，如图 7-13 所示。

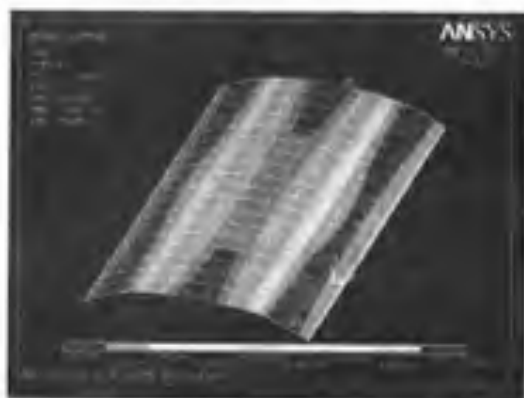


图 7-13 竖向挠度等值线与结构变形形状

如果图形显示的挠度过大，并非实际的计算结果，是后处理显示过程中自动放大的。缩放比例系数可以通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Displacement Scaling，在弹出的 Displacement Display Scaling 对话框中进行设置，如图 7-14 所示。这里选择 User Specified，放大系数填 100，选择 Replot 选项，单击 OK 按钮，即可看到改变缩放比例的结构变形图。

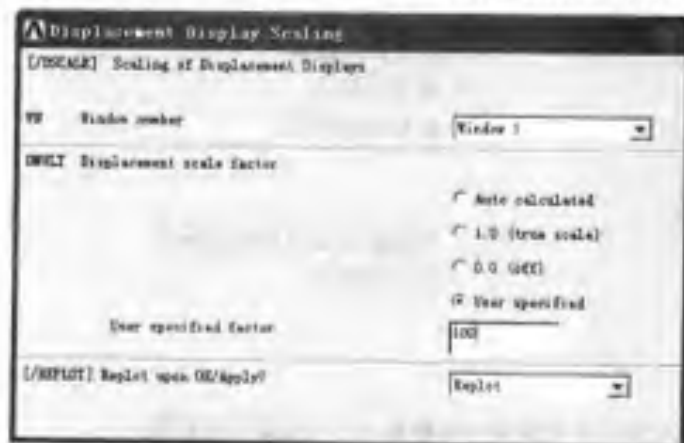


图 7-14 位移显示比例缩放系数的设置



利用 Contour Nodal Solution Data 对话框，还可以通过选择下拉列表栏中的 Stress 和 Von Mises SEQV 观察柱壳中的应力分布情况，如图 7-15 所示。

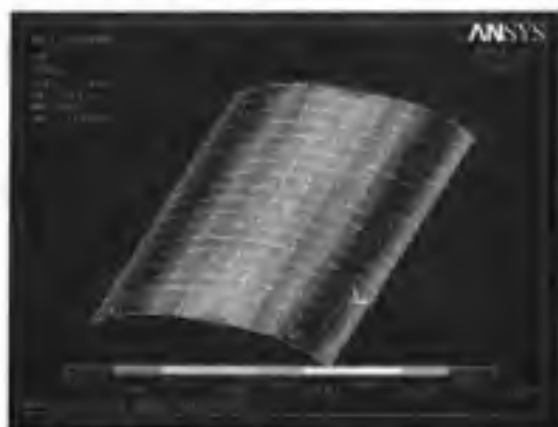


图 7-15 柱壳中的等效应力等值线

如果本节的上述建模以及分析过程采用批处理方式，则相应操作的命令流如下：

```
! *****
!                               圆柱壳屋盖的静力分析命令流
! *****
! (1) 分析环境设置
/FILNAME,ROOF
/TITLE,ANALYSIS OF ROOF UNDER SELF-WEIGHT

! (2) 进入前处理器
/PREP7

! (3) 定义单元类型
ET,1,SHELL93

! (4) 定义壳的厚度
R,1,0.15,,,,,

! (5) 定义材料模型及参数
MP,EX,1,3.0e10           ! 定义弹性模量
MP,PRXY,1,0.2           ! 定义泊松比
MP,DENS,1,2500          ! 定义材料密度

! (6) 建立几何模型
CSYS,1                   ! 柱坐标系设为当前坐标系
k,,20.000,60,0.000      ! 建立关键点
k,,20.000,60,36.000
k,,20.000,120,36.000
k,,20.000,120,0.000
! 通过关键点建立圆柱面，注意是在柱坐标系中，形成的面是柱面：
A,1,2,3,4
```

```

/VIEW,1,1,2,3      ! 改变视图角度
/REP               ! 重新绘图

! (7) 网格划分选项设定
AATT,1,1,1,       ! 单元属性设置
AESIZE,ALL,2,     ! 单元尺寸设置
MSHAPE,0,2D      ! 单元形状设置
MSHKEY,1         ! 划分方式为映射网格划分

! (8) 划分网格
AMESH,ALL        ! 划分网格
/REPLOT

! (9) 施加位移约束
AMESH,ALL        ! 划分网格
CSYS,0           ! 指定当前坐标系为总体直角坐标系
NSEL,S,LOC,X,-10.1,-9.9 ! 选择受约束节点
NSEL,A,LOC,X,9.9,10.1
D,ALL,UX        ! 约束三向线位移
D,ALL,UY
D,ALL,UZ
ALLSEL,ALL      ! 恢复选择全部对象

! (10) 施加重力
ACEL,0,9.8,0,    ! 对整个模型施加重力
FINI             ! 退出前处理器

! (11) 求解并退出求解器
/SOLU           ! 进入求解器
Solve           ! 求解
FINI           ! 退出求解器

! (12) 后处理
/POST1         ! 进入通用后处理器
SET,FIRST     ! 读入结果文件
/VIEW,1,,-1   ! 改变视图角度
/REP,FAST     ! 重新绘图
/DSCALE,1,100 ! 设置缩放比例
/REPLOT       ! 重新绘图
PLDISP,0     ! 绘制结构变形图
PLNSOL,U,Z,1,1 ! 绘制结构竖向位移分布等值线图
PLNSOL,S,EQV,0,1 ! 绘制等效应力分布等值线图

```

## 第 2 篇 ANSYS 结构分析高级专题

---

### 本篇学习导引

在前面一篇的基础上，本篇继续向读者介绍几个专题性的 ANSYS 有限元结构分析问题，这些问题同样是利用有限元技术进行实际工程结构分析过程中不可或缺的内容。

本篇共分为五章，内容主要涉及到结构的各种非线性问题（包括几何非线性、材料非线性、状态非线性）的分析、结构的动力分析（包括结构的固有振动特性分析、瞬态动力过程的分析以及各种频率响应分析）、弹性结构的稳定性分析、结构最优化设计以及子结构技术的应用等五个专题性的问题。本篇在内容选择上由浅入深，从结构分析的基本概念及 ANSYS 分析的基本过程入手，通过一系列生动而富有代表性的工程实例来讲解这些基本概念和分析操作过程，这是目前同类书籍所不具有的特色。

与前一篇文章相比，本篇中所讨论的问题无疑具有更强的综合性和更高的复杂程度，但只要清楚的结构分析概念，以及通过前一篇文章学习所掌握的软件操作基本功，读者是不难掌握本篇所讲述的内容的。相信读者在通过对本篇内容的学习之后，一定能够掌握实际分析中所需要的 ANSYS 结构高级有限元分析的方法。

## 第 8 章 ANSYS 动力有限元分析

### 本章导读

本章主要针对实际工程中的动力学问题，全面介绍各种分析类型的相关概念、用途以及对应的 ANSYS 操作步骤，每种分析类型都结合具体实例，以加深读者对动力分析的理解，便于读者掌握 ANSYS 处理动力问题的方法。

本章主要包括以下内容：

- 动力分析综述
- 结构振动模态分析的过程和实例
- 谐响应分析的过程和实例
- 瞬态分析的过程和实例
- 谱分析的过程和实例

### 8.1 动力分析综述

实际结构总是受到随时间变化的载荷作用，当这种动载荷与静载荷相比不占主要地位时，它的影响可以忽略不及，只需做静态计算。但是有些结构则不然，它受到显著的动载荷作用，如房屋受地震作用、船舶受海浪作用、桥梁受车辆作用等，这时必须进行动力分析。有的结构虽然受到动载荷作用并不显著，但由于作用载荷的频率和结构某一阶固有频率相接近，会引起结构显著的振幅，在其内部产生很大的动应力，以致结构破坏或产生不允许的变形，这时也必须进行动力分析。

动力分析的应用非常广泛，建筑工程、机械加工、飞机制造等许多领域都离不开动力分析。以下列举一些动力分析实例，从中可以看出动力分析的应用。

图 8-1 所示的是 2008 北京奥运会的主体育场——“鸟巢”。体育场作为重要的大跨度公共建筑结构，在设计过程中必须考虑结构的抗震问题。

图 8-2 所示的是上海卢浦大桥。卢浦大桥属于肋拱桥，桥身横跨江面，侧向的风载荷以及桥面来往行驶的车辆作用都具有明显的动力效应。

图 8-3 所示的是空中客车公司制造的 A380 大型客机。飞机部件的设计必须要考虑动力因素，其研制过程更是需要大量的风洞试验。

图 8-4 所示的是一汽大众公司的捷达轿车生产线。汽车外观设计需要借助空气动力学，舒适度设计需要考虑车身的振动特性，出于安全考虑，新车投放市场前需要做撞击破坏试验，这属于冲击动力学的范畴。

图 8-5 所示的是某海洋平台。作为海上作业设施，风载荷、波浪力以及工作设备这些动载荷都是设计时需要考虑的因素。

图 8-6 所示的吉他属于弦乐器的一种，无论何种乐器，其音频和音色的调制无不与其固有振动特性有着密切的关系。



图 8-1 2008 北京奥运会主体育场



图 8-2 上海卢浦大桥



图 8-3 空中客车 A380 客机



图 8-4 捷达轿车生产线



图 8-5 海洋平台



图 8-6 吉他

ANSYS 动力分析包括振动模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析和谱分析等四种类型，可以用来解决各类工程动力问题。

下面分别对这四种分析的原理作些简要介绍。在本章的后续几节中，将会陆续介绍这些分析类型的 ANSYS 操作过程，同时结合一系列工程实例来详细介绍 ANSYS 分析结构动力问题的具体方法。

### 8.1.1 结构固有振动特性的分析

在 ANSYS 中，结构的固有振动特性分析又称为模态分析。这种分析用于确定结构的固有

频率和振型,其分析结果可作为瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析等其他动力分析的基础。

任何结构或部件都有固有频率和相应的模态振型,这些属于结构或部件自身的固有属性。模态分析的实质是计算结构振动特征方程的特征值和特征向量。

典型的无阻尼结构自由振动的运动方程如下:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\}$$

式中:

$[M]$ ——质量矩阵;

$[K]$ ——刚度矩阵;

$\{\ddot{X}\}$ ——加速度向量;

$\{X\}$ ——位移向量。

如果令:

$$\{X\} = \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi)$$

则有:

$$\{\ddot{X}\} = -\omega^2 \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi)$$

代入运动方程,可得:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\phi\} = \{0\}$$

上式称为结构振动的特征方程,模态分析就是计算该特征方程的特征值 $\omega$ 及其对应的特征向量 $\{\phi\}$ 。

### 8.1.2 谐响应分析

持续的周期载荷作用于结构或部件上都产生持续的周期响应。谐响应分析用于确定线性结构在随时间以正弦规律变化的载荷作用下的稳态响应,从而得到结构部件的响应随频率变化的规律。

设计人员可以通过响应随频率的变化规律来分析结构的持续动力特性,以此作为参实验证结构能否克服共振、疲劳等有害效果,同时也可以利用共振的有益效用,设计出合理的结构形式。

在周期变化载荷的作用下,结构将以载荷频率做周期振动。周期载荷作用下的运动方程如下:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \sin \theta t$$

式中:

$[C]$ ——阻尼矩阵;

$\{F\}$ ——简谐载荷的幅值向量;

$\theta$ ——激振力的频率。

位移响应为:

$$\{X\} = \{A\} \sin(\theta t + \varphi)$$

式中:

$\{A\}$ ——位移幅值向量，与结构固有频率  $\omega$  和载荷频率  $\theta$  以及阻尼  $[C]$  有关

$\varphi$ ——位移响应滞后激励载荷的相位角。

结构的其他响应可以通过位移响应求出。

### 8.1.3 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析又称时间历程分析，用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的动力学响应，目的是得到结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力和力。

瞬态动力学求解的运动方程如下：

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\}$$

式中：

$\{F(t)\}$ ——载荷向量，可以随时间任意变化。

瞬态动力学分析的求解方法主要分为振型叠加法和逐步积分法。

振型叠加法的思路是：利用振型矩阵作为变换矩阵，将多自由度系统原本相互耦合的振动方程组转化为等数量彼此独立的单自由度振动方程并分别求解，以求得的单自由度解作为系数将结构的各阶模态进行叠加并求和，最终得出结构的瞬态响应。

逐步积分法的思想是：将原本在任意时刻  $t$  都需要满足的运动方程的位移矢量  $X(t)$ ，代之以只要在离散时间点满足动力学方程，而在一定时间间隔内，对位移、速度和加速的关系采取某种假设，这样就可由初始条件逐步求出后续各个时间点的响应值。

### 8.1.4 谱分析

谱分析是一种将模态分析的结果和已知谱联系起来计算结构响应的分析方法，主要用于确定结构对随机载荷或随时间变化载荷的动力响应。在本章的谱分析一节中将会详细介绍有关 ANSYS 谱分析的具体内容和操作。

## 8.2 结构振动模态分析的过程和实例

本节将首先对 ANSYS 模态分析基本操作环节和相关分析选项进行简要的说明，然后结合一个预应力简支梁的分析实例，介绍利用 ANSYS 进行结构固有振动特性分析的具体分析过程和步骤。

### 8.2.1 模态分析操作过程

一个典型的模态分析过程主要包括建模、模态求解、扩展模态以及观察结果四个步骤，为了使读者对模态分析的过程有一个较为清楚的认识，下面对各个步骤的操作过程以及一些注意事项进行说明。

#### 1. 建模

模态分析的建模过程与其他分析类型的建模过程是类似的，主要包括定义单元类型、单元实常数、材料性质、建立几何模型以及划分有限元网格等基本步骤。

模态分析的建模过程需要注意两点：

(1) 模态分析属于线性分析，在模态分析中只有线性行为是有效的，任何非线性行为都将被忽略并作为线性处理。

(2) 在模态分析中，材料可以是线性的、各向同性或者正交各向异性的、恒定的或者与温度相关的。分析中必须指定材料的弹性模量 EX 和密度 DENS。

## 2. 模态求解

进入 ANSYS 求解器，设置分析类型为 Modal。下面详细介绍模态求解中的选项设置和操作步骤。

(1) 设置分析选项。选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，在随后弹出的 Modal Analysis 对话框中进行相关分析选项的设置如图 8-7 所示，此对话框主要包括了如下的模态分析选项：

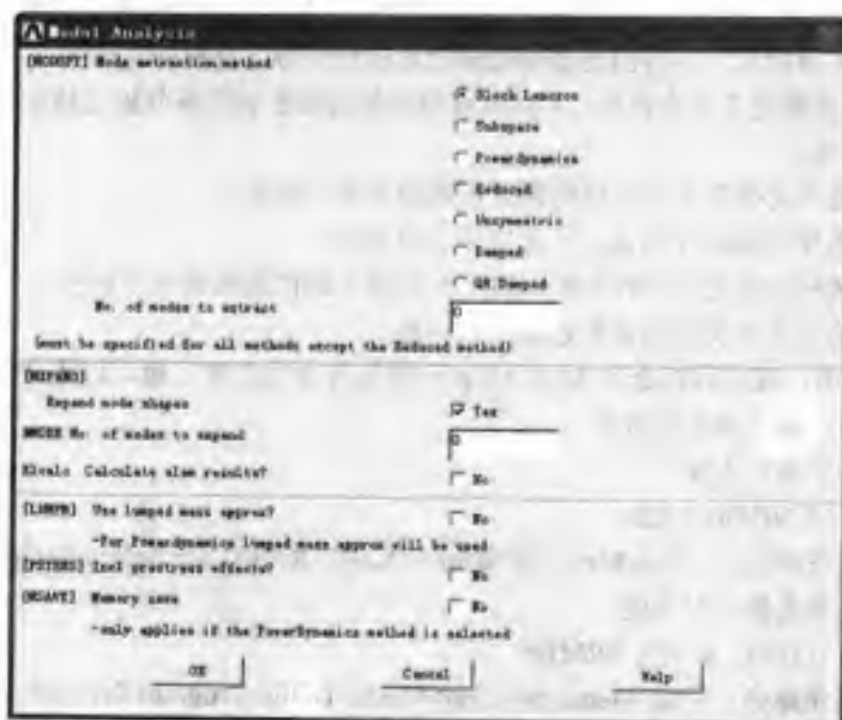


图 8-7 模态分析选项对话框

### ➤ Mode extraction method

此选项设定模态提取方法，ANSYS 提供了 7 种模态提取方法：

- ✧ Block Lanczos 法
- ✧ Subspace 法
- ✧ PowerDynamic 法
- ✧ Reduced 法
- ✧ Unsymmetric 法
- ✧ Damped 法
- ✧ QR Damped 法

一般情况下，使用 Block Lanczos 法、Subspace 法、PowerDynamic 法或者 Reduced 法，而



Unsymmetric 法、Damped 法、QR Damped 法只在特殊场合会用到。

➤ Number of modes to extract

此选项设定模态提取数目，除了 Reduced 法外，所有模态提取法都要设置该选项。

➤ Number of modes to expand

此选项只在采用 Reduced 法、Unsymmetric 法和 Damped 法时需要设置。如果需要计算单元解，则无论采取何种模态提取方法，都必须打开 Calculate elem results 选项。

➤ Use lumped mass approx

此选项设定质量矩阵的形式，缺省情况下采用一致质量矩阵，多数情况下建议采用一致质量矩阵。当模态提取方法选择 PowerDynamic 法时，将要用到集中质量矩阵，集中质量矩阵求解时间短，需要的内存少。

➤ Include prestress effects

此选项设定预应力效应，缺省情况下不包括预应力效应，即结构处于无预应力状态。

(2) 定义主自由度。主自由度是指能够描述结构动力学特性的自由度，在使用 Reduced 模态提取方法时需要定义主自由度，主自由度的选择直接影响模态分析的精度，下面是选择主自由度的基本原则：

- a. 主自由度的总数至少应该是感兴趣模态数总数的两倍。
- b. 将预计的结构或部件的振动方向定为主自由度。
- c. 在质量或转动惯量相对较大而刚度又相对较小的位置选择主自由度。
- d. 在施加力或非零位移的位置选择主自由度。

在 ANSYS 中，既可以用命令 M 和 MGEN 来选择主自由度，也可以用 TOTAL 命令让程序在求解过程中自动选择主自由度。

➤ 用户选择主自由度

操作命令：M, NODE, LAB

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>Master DOFs>User Selected>Define

➤ 程序自动选择主自由度

操作命令：TOTAL, NTOT, NRMDF

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>Master DOFs>Program Selected

(3) 施加载荷。在典型的模态分析中只有零位移约束是有效的；如果施加了非零的位移约束，程序将以零位移约束代替。可以施加除位移约束外的其他载荷，但是会被程序忽略。载荷可以施加在实体模型（点、线、面、体）上，也可以施加在有限元模型（节点、单元）上。

操作命令：D, NODE, LAB, VALUE

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement

(4) 指定载荷步选项。模态分析中惟一可用的载荷步选项是阻尼选项。ANSYS 提供了 4 种阻尼，操作命令以及相应的 GUI 菜单路径如表 8-1 所示。

表 8-1 阻尼选项

选项	命令	GUI 菜单路径
Alpha (质量) 阻尼	ALPHAD	Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc> Damping
Beta (刚度) 阻尼	BETAD	Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc> Damping

续表

选项	命令	GUI 菜单路径
恒定阻尼比	DMPRAT	Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc> Damping
材料阻尼	MP/DAMP	Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc> Other> Change Mat Props

注意：阻尼只有在有阻尼的模态提取方法中有效，在其他模态提取方法中将被忽略。

(5) 求解。求解前应该保存数据库文件，以便重新进入 ANSYS 后用命令 RESUME 来恢复模型，然后通过菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解计算。

### 3. 扩展模态

模态求解完成后，模态振型被写入结果文件，此时可以通过通用后处理器 POST1 观察结构的模态振型。如果观察特定振型中的相对应变和应力等派生数据时，需要扩展模态。

完整的模态扩展过程分为以下步骤：

(1) 激活扩展选项。

操作命令：EXPASS, ON

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>ExpansionPass。打开 Expansion pass on/off 选项。

(2) 设置扩展选项

操作命令：MXPAND

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Expand Modes。弹出 Expand Modes 对话框，如图 8-8 所示。该对话框中的选项作用如下：

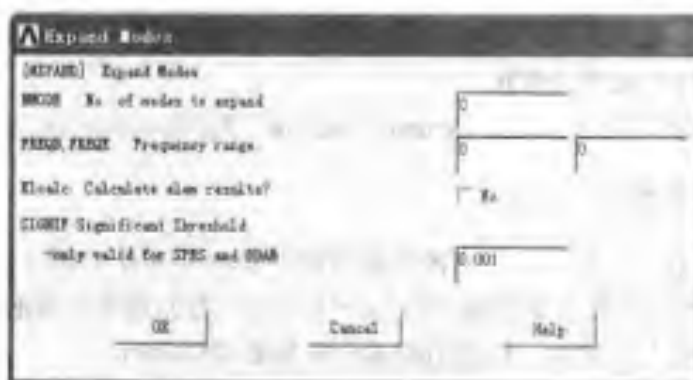


图 8-8 扩展模态选项

#### ◆ Number of modes to expand

指定需要扩展的模态数。只有经过扩展的模态才能在通用后处理器 POST1 中观察。

#### ◆ Frequency range

通过指定频率范围来控制扩展的模态数。

#### ◆ Calculate elem results

如果需要计算单元解，打开该选项。

#### ◆ Significant Threshold

此选项用于设定重要性参数标准，只有那些重要性参数高于标准的模态才会被扩展。该选项只对单点响应谱分析 (SPOPT, SPRS) 和动力设计分析方法 (SPOPT, DDAM) 有效。

### (3) 扩展求解。

选取菜单路径 **Main Menu>Solution>Solve>Current LS** 开始扩展求解。

如果需要扩展其他模态，可以重复上述步骤。每一次扩展处理的结果文件应该存储为一个单独的载荷步。扩展处理的输出包括已扩展的模态振型，还可以包括各阶模态的相对应力分布。

### 4. 观察结果

模态分析的结果写入在分析结果文件 **Jobname.RST** 中。分析结果包括固有频率、振型以及相对应力分布和力分布等。一般在通用后处理器 **POST1** 观察模态分析的结果。

#### (1) 列表显示固有频率。

操作命令: **SET, LIST**

GUI 菜单操作路径: **Main Menu>General Postproc>Results Summary**

#### (2) 读入结果数据。

每阶模态在结果文件中被存为一个单独的载荷子步，观察结果之前需要读入相关载荷子步的结果。

操作命令: **SET, SBSTEP**

GUI 菜单操作路径: **Main Menu>General Postproc>Read Results**

#### (3) 图形显示变形。

该步骤用于图形显示结构的模态振型。

操作命令: **PLDISP**

GUI 菜单操作路径: **Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape**

#### (4) 等值图显示结果项。

该步骤以云图的形式显示结构模型在特定模态中位移、应变、应力等变量的相对分布。

操作命令: **PLNSOL** 或 **PLESOL**

GUI 菜单操作路径: **Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot**

## 8.2.2 预应力模态分析

预应力模态分析用于计算有预应力的结构或部件的固有频率和模态振型，如钢筋混凝土预应力梁。预应力模态分析首先需要进行静力分析把预应力加到结构或部件上，随后的模态分析步骤和常规模态分析大致相同。预应力模态分析需要说明两点：

(1) 静力分析和获取模态解的过程中需要打开预应力效应[**PSTRES,ON**]。

(2) 静力分析质量矩阵的设置[**LUMPM**]必须和随后的预应力模态分析一致。

## 8.2.3 模态分析实例：预应力简支梁的模态分析

### 1. 问题描述

该实例对一根预应力简支梁进行模态分析，以确定该预应力简支梁的固有频率和模态振型，同时与无预应力情况下的结果进行比较。梁的长度和截面形状如图 8-9 所示，梁为混凝土材料，相关参数如下：

弹性模量  $EX=3.0 \times 10^{10} \text{Pa}$

波松比  $PRXY=0.2$

密度  $DENS=2500 \text{kg/m}^3$

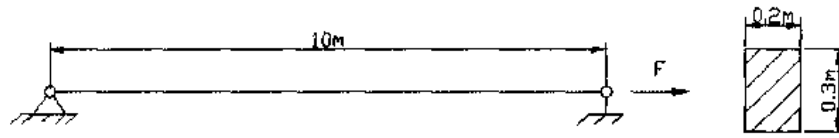


图 8-9 预应力简支梁模型简图

## 2. 创建模型

### 第 1 步：设置分析工作名称和图形标题

设定工作文件名称为 PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM，图形标题为 PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM。

操作命令如下：

```
/FILENAME, PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM
```

```
/TITLE, PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM
```

GUI 菜单路径操作：

选取菜单路径 Utility Menu>File>Change jobname，输入 PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM，单击 OK。

选取菜单路径 Utility Menu>File>Change Title，输入 PRESTRESS SIMPLY-SUPPORTED BEAM，单击 OK。

### 第 2 步：定义单元类型

选取 BEAM3 作为 1 号单元。

操作命令如下：

```
ET, 1, BEAM3
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

### 第 3 步：定义单元实常数

BEAM3 的单元实常数包括截面积、主轴惯性矩和截面高度等，按照图 8-9 中的截面信息定义实常数。

操作命令如下：

```
R, 1, 0.08, 0.00107, 0.3
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

### 第 4 步：定义材料参数

模型为混凝土材料，弹性模量 EX 取  $3.0 \times 10^{10}$  Pa，波松比 PRXY 取 0.2，密度 DENS 取  $2500 \text{ kg/m}^3$ 。

操作命令如下：

```
MP, EX, 1, 3.0E10
```

```
MP, NUXY, 1, 0.2
```

```
MP, DENS, 1, 2500
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Modals

### 第 5 步：创建节点

创建两端节点，节点编号为 1 和 11。

操作命令如下：

```
N, 1, 0, 0, 0
```

```
N, 11, 10, 0, 0
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS

在两端节点之间插入 9 个节点。

操作命令如下：

```
FILL,1,11,9,
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>Fill between Nds

节点创建完毕后如图 8-10 所示。



图 8-10 模型节点

### 第 6 步：创建单元

创建单元之前应定义单元属性，包括单元类型、材料性质和实常数等。

操作命令如下：

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,1
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes

由节点生成单元，操作命令如下：

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,1
```

```
*DO,11,1,10
```

```
    E,11,11+1
```

\*ENDDO

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes

计算静力解

第7步: 设定分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 设置分析类型为 Static。

第8步: 设置分析选项

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 在 Basic 标签下打开 Calculate prestress effects 选项, 其他采用默认设置。

第9步: 施加位移约束

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Node 拾取框, 在图形窗口拾取左端节点 1, 单击 OK, 随后弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 选择 UX 和 UY, 在 VALUE 栏输入 0, 单击 Apply, 再次弹出 Apply U, ROT on Node 拾取框, 在图形窗口拾取右端节点 11, 单击 OK, 随后弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 选择 UY, 在 VALUE 栏输入 0, 单击 OK。

第10步: 施加载荷

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes, 弹出 Apply F/M on Node 拾取框, 在图形窗口拾取右端节点 11, 单击 OK, 弹出 Apply F/M on Node 对话框, 载荷方向 Direction of force/mom 选择 FX, 在 VALUE 栏输入  $1.0e7$ , 单击 OK。

施加位移约束和节点载荷后的模型如图 8-11 所示。



图 8-11 模型约束位移和载荷意图

第11步: 静力分析求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始计算静力解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退求解器。

#### 4. 计算模态解

##### 第 12 步：设定模态分析类型

重新进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 Modal。

##### 第 13 步：设置分析选项

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Modal Analysis 对话框，模态提取方法采用 Block Lanczos，提取模态数设为 6，打开 Calculate prestress effects 选项，如图 8-12 所示。

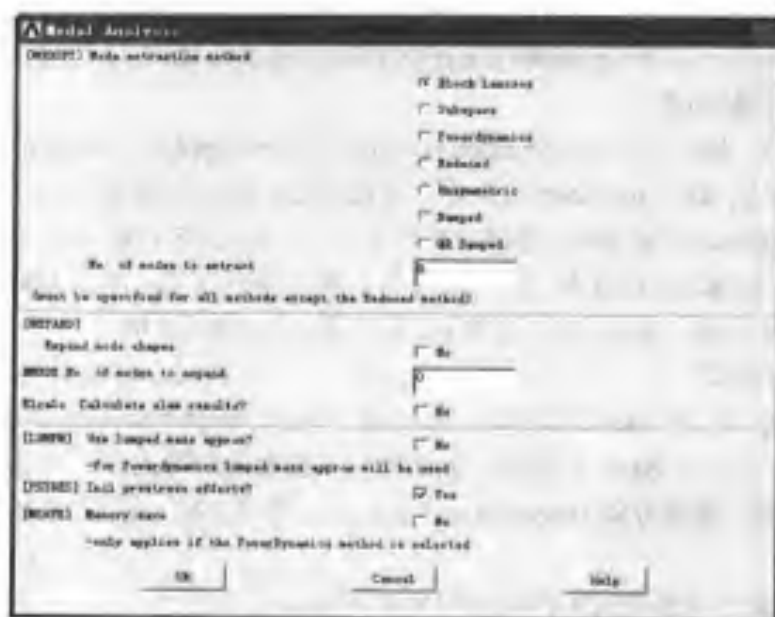


图 8-12 模态分析选项设置

##### 第 14 步：扩展模态设置

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Expansion Pass>Single Expand>Expand Modes，弹出 Expand Nodes 对话框，模态扩展数设为 6，如图 8-13 所示。

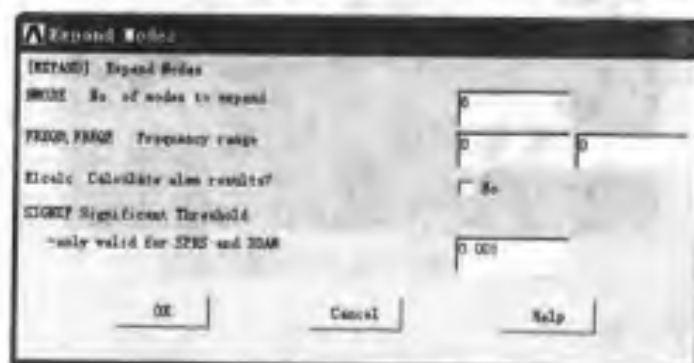


图 8-13 模态扩展选项

##### 第 15 步：模态分析求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话

框, 单击 OK, 开始计算模态解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退出现求解器。

#### 5. 观察模态分析结果

##### 第 16 步: 观察模型固有频率

进入通用后处理器 POST1, 选择菜单路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary, 观察模型固有频率。

这里将该简支梁在无预应力和有预应力两种情况下的前 6 阶固有频率汇总于表 8-2 中, 读者可以作比较。

通过表 8-2 中两组固有频率的比较可以看出, 预应力简支梁的固有频率高于无预应力简支梁对应的固有频率, 这主要因为预应力的存在使得原有简支梁的刚度增大所致。

有兴趣的读者可以通过静力分析, 比较在相同横向载荷作用下无预应力简支梁和有预应力简支梁的挠度, 可以验证上述结论。

##### 第 17 步: 读入结果数据

选择菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入第 1 载荷子步的计算结果。

##### 第 18 步: 观察模态振型

选择菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 显示一阶模态振型, 如图 8-14 所示。

为了便于观察, 建议读者选择菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape, 在 Size and Shape 对话框打开 Display of element shapes based on real constant descriptions 选项, 以便在图形窗口以单元实际截面形状显示模型的模态振型。

重复上述操作可以得出其他五阶模态振型, 如图 8-15~图 8-19 所示。

表 8-2 简支梁固有频率比较

模态	固有频率 (Hz)	
	无预应力	预应力
1	9.1929	11.159
2	36.703	38.814
3	82.346	84.482
4	126.72	126.72
5	145.89	148.03
6	227.16	229.29



图 8-14 一阶模态



图 8-15 二阶模态





图 8-16 三阶模态



图 8-17 四阶模态



图 8-18 五阶模态



图 8-19 六阶模态

以上求解和后处理操作的完整 APDL 命令流如下:

! 静力分析施加预应力

```

/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC                        ! 设置分析类型为静力分析
D,1,LUX                              ! 施加位移约束
D,1,UY
D,11,UY
F,11,FX,10000000                    ! 施加初始载荷
PSTRES,ON                            ! 打开预应力效应选项
SOLVE                                ! 求解
FINISH                                ! 退出求解器

```

! 模态分析

```

/SOL
ANTYPE,MODAL                         ! 设置分析类型为模态分析
MODEOPT,LANB,6                       ! 采用 Block Lanczos 模态提取法, 提取数为 6
MXPAND,6                             ! 模态扩展数设为 6
PSTRES,ON                            ! 打开预应力效应选项
SOLVE                                ! 求解
FINISH                                ! 退出求解器

```

! 后处理观察模态振型	
/POST1	! 进入通用后处理器
SET, LIST	! 列表显示模型的固有频率
SET, FIRST	! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的一阶模态振型
SET, NEXT	! 读入第二载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的二阶模态振型
SET, NEXT	! 读入第三载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的三阶模态振型
SET, NEXT	! 读入第四载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的四阶模态振型
SET, NEXT	! 读入第五载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的五阶模态振型
SET, NEXT	! 读入第六载荷步的计算结果
PLDISP,0	! 显示模型的六阶模态振型
FINISH	! 退出通用后处理器

### 8.3 谐响应分析的过程和实例

本节将首先对 ANSYS 三种谐响应分析方法的基本操作过程和相关选项进行简要说明, 然后结合一个悬索拱桥的分析实例, 介绍利用 ANSYS 进行谐响应分析的方法和过程。

ANSYS 谐响应分析分为三种方法: 完全法 (Full)、缩减法 (Reduced) 和模态叠加法 (Mode Superposition)。

#### ◇ 完全法

完全法采用完整的系统矩阵计算谐响应, 是三种方法中最容易使用的方法。

#### ◇ 缩减法

缩减法通过选取主自由度和压缩矩阵来减小问题的规模, 先计算主自由度的结果, 然后扩展到初始所有自由度上。

#### ◇ 模态叠加法

模态叠加法通过模态分析得到的振型乘上因子并求和来计算结构的响应。

无论哪种分析方法, 谐响应分析都需要注意以下三点:

- a. 载荷必须随时间按正弦规律变化。
- b. 所有载荷的频率必须相同。
- c. 不允许有非线性效应。

#### 8.3.1 完全法谐响应分析操作过程

##### 1. 完全法谐响应分析过程

完全法谐响应分析过程包括: 建模、加载求解和观察结果。为了使读者对完全法谐响应分析的过程有一个较为清楚的认识, 下面对各个步骤的操作以及一些注意事项进行说明:

##### 2. 建模

谐响应分析的建模过程与其他分析类型的建模过程是类似的, 主要包括定义单元类型、

单元实常数、材料性质、建立几何模型以及划分有限元网格等基本步骤。

谐响应分析的建模过程需要注意两点：

a. 谐响应分析属于线性分析，在谐响应分析中只有线性行为是有效的，任何非线性行为都将被忽略并作为线性处理。

b. 在谐响应分析中，材料可以是线性的、各向同性或者正交各向异性的、恒定的或者与温度相关的。分析中必须指定材料的弹性模量 EX 和密度 DENS。

### 3. 加载求解

进入 ANSYS 求解器，设置分析类型为 Harmonic。

下面依次介绍分析选项设置、施加载荷、设置载荷步选项，最后进行谐响应分析求解。

#### (1) 设置分析选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Harmonic Analysis 对话框，如图 8-20 所示。

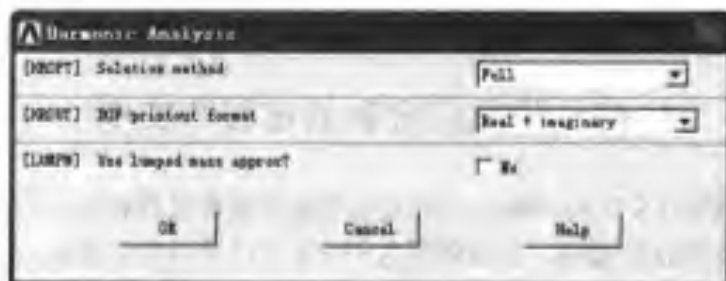


图 8-20 谐响应分析选项对话框

此对话框主要包括以下选项：

#### > Solution method

此选项设定分析求解方法，完全法应该选择 Full。

#### > DOF printout format

此选项设定输出文件 Jobname.out 中谐响应分析位移解的输出格式。可选的方式有“Real + imaginary（实部与虚部）”形式（缺省）和“Amplitud + phase（幅值与相位角）”形式。

#### > Use lumped mass approx

此选项设定质量矩阵的形式，在模态分析中已有介绍。

设定分析选项后弹出 Full Harmonic Analysis 对话框，如图 8-21 所示，该对话框中的选项作用如下：

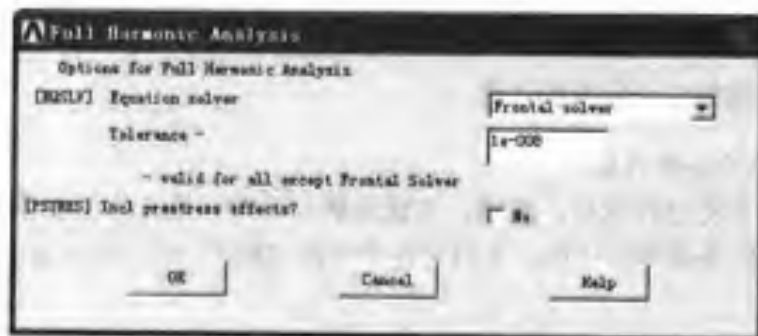


图 8-21 完全法分析设置

◇ Equation solver

此选项用于选择求解器。

◇ Include prestress effects

此选项设定预应力效应，缺省情况下不包括预应力效应。

(2) 施加载荷。

谐响应分析所施加的载荷随时间按正弦规律变化，完整的载荷需要输入三条信息：Amplitude（幅值）、phase angle（相位角）和 forcing frequency range（强制频率范围）。

注意：谐响应分析不能计算频率范围不同的多个载荷作用下的响应。

除惯性载荷外，载荷可以施加在实体模型（点、线、面、体）上，也可以施加在有限元模型（节点、单元）上。表 8-3 列出了谐响应分析施加载荷的类型、命令以及对应的 GUI 菜单路径。

表 8-3 谐响应分析中的施加载荷操作

载荷类型	命令	GUI 菜单路径
Displacement(UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ)	D	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Displacement
Force,Moment(FX,FY,FZ,MX,MY,MZ)	F	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Force/Moment
Pressure	SF	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Pressure
Temperature Fluence	BF	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Temperature
Gravity,Spinning 等		Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Other

(3) 指定载荷步选项。

通过菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Freq and substeps 弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，如图 8-22 所示，该对话框中的选项作用如下：

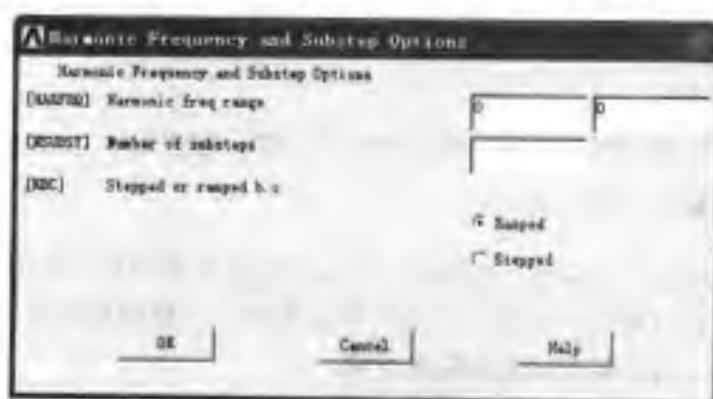


图 8-22 谐响应载荷步选项设置

◇ Harmonic freq range

此选项用于指定求解的频率范围。

操作命令：HARFRQ

◇ Number of substeps

此选项设定求解的载荷子步数，载荷子步均匀分布在指定的频率范围内。

操作命令：NSUBST

◇ Stepped or Ramped b.c

此选项设定载荷变化方式，缺省为 Ramped，即载荷的幅值随载荷子步逐渐增长，如果选择 Stepped，则载荷在频率范围内每个载荷子步中保持恒定。

操作命令：KBC

(4) 谐响应求解。

通过菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，完成谐响应分析的求解。如果需要计算其他载荷和频率范围的结果可以重复上述操作步骤。

#### 4. 观察结果

谐响应分析的结果被保存到结果文件 Jobname.out 中，所有数据在求解频率范围内按照正弦规律变化，可以用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 观察结果。下面介绍一些谐响应分析常用的后处理操作。

(1) 通用后处理器 POST1。

POST1 用于观察在指定时间点整个模型的结果。具体的 POST1 操作，可以参考模态分析的相关部分，这里不再重复。

(2) 时间历程后处理器 POST26。

POST26 用于观察模型中指定点随时间变化的结果。

a. 定义变量。POST26 操作最终是要得到结果变量随时间（频率）的变化曲线，首先需要定义变量。

操作命令：

NSOL ! 定义节点位移

ESOL ! 定义单元数据

RFORCE ! 定义反作用力

GUI 菜单路径：Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variable

b. 绘制变化曲线。定义变量后即可在图形窗口显示该变量随时间（频率）的变化曲线。

操作命令：PLVAR

GUI 菜单路径：Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables

### 8.3.2 缩减法谐响应分析过程

缩减法首先计算模型主自由度的谐响应，然后将结果扩展到整个模型自由度。

缩减法谐响应分析过程包括建模、加载计算缩减解、扩展解和观察结果等。建模和观察结果与完全法相同，下面主要介绍其他操作步骤。

#### 1. 加载计算缩减解

关于谐响应分析的基本选项设置和加载操作，缩减法和完全法大致相同，这里仅就缩减法中需要注意的方面进行简要介绍。

(1) 求解方法选择 Reduced。

(2) 缩减法需要定义主自由度，关于主自由度的选取在模态分析一节有专门介绍。

(3) 只能施加位移和力载荷，并且载荷只能施加在主自由度上。

## 2. 扩展解

扩展过程是指将求解出的模型主自由度上的结果（如位移、应力等）扩展到模型所有自由度上。

**注意：**扩展过程不是必须的，如果主自由度上的结果已经满足要求，扩展无需进行，如果需要了解主自由度外的结果则必须进行扩展操作。

进行扩展操作前需要重新进入 ANSYS 求解器。

(1) 激活扩展过程。

操作命令：EXPASS,ON

GUI 菜单操作路径：Main Menu>Solution>Analysis Type>ExpansionPass

(2) 设置扩展选项。

操作命令：NUMEXP

GUI 菜单路径：

Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand>Range of Solu's

扩展选项设置对话框如图 8-23 所示。

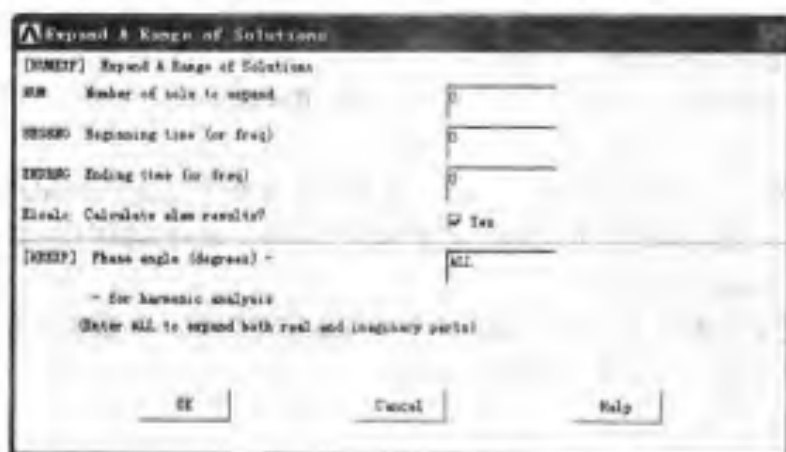


图 8-23 扩展设置选项

下面就图 8-23 所示对话框的选项分别加以说明：

◆ **Number of solu to expand**

此选项设置扩展解的数目，该数目是指在扩展频率范围内均匀分布的扩展解数目。

◆ **Beginning freq/Ending freq**

此选项设定扩展频率范围。

◆ **Calculate elem results**

如果不需要单元解，可以关闭此选项，缺省情况下计算单元解。

◆ **Phase angle for harmonic analysis**

如果在频率范围内扩展多个解，建议对实部和虚部都进行扩展[HREXP, ALL]，如果扩展的是单一解[EXPSOL]，则可以指定峰值位移所对应的相位角。

(3) 扩展求解。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，进行扩展求解。

如果需要其他扩展解可以重复以上操作步骤。

### 8.3.3 模态叠加法谐响应分析

模态叠加法通过模态分析得到结构的模态振型，然后乘上因子并求和来计算谐响应。

模态叠加法谐响应分析过程包括建模、计算模态分析解、计算模态叠加谐响应解、扩展模态叠加解和观察结果等。建模和观察结果与完全法相同，扩展模态叠加解的操作在缩减法中有介绍，下面主要介绍其他操作步骤和注意事项。

#### 1. 计算模态分析解

在模态分析一节中已经对模态分析的步骤做了详细的介绍，这里仅对模态叠加法中需要注意的问题进行说明：

(1) 模态提取方法采用 Block Lanczos 法、Subspace 法、Reduced 法、PowerDynamic 法或 QR Damped 法，其他提取方法在模态叠加谐响应分析中不能采用。

(2) 如果采用 PowerDynamic 模态提取法，不能施加非零的载荷和位移。

(3) 如果采用 Reduced 模态提取法，必须将施加载荷的位置定义在主自由度上。

(4) 如果采用 QR Damped 模态提取法，必须在模态分析阶段指定阻尼。

(5) 模态叠加法不需要扩展模态。

#### 2. 计算模态叠加谐响应解

下面介绍该步骤的具体操作，首先进入 ANSYS 求解器。

(1) 指定分析类型并设置分析选项。

指定分析类型的方法和完全法相同，不同之处在于分析方法选择 Mode Superpos'n。随后出现模态叠加法的分析选项设置对话框（如图 8-24 所示），该对话框中的选项作用如下：

##### ◇ Range of Mode Number

此选项用于设定求解的模态数，模态数关系到求解的精度，一般要求指定的模态数能够覆盖所施加的简谐载荷频率范围的 50% 以上。

##### ◇ Spacing of solutions

此选项设置解的分布情况，可以均匀分布[Uniform]，也可以在固有频率处聚集，后者可以使得到的曲线更光滑更精确。

##### ◇ Print node contrib's

此选项控制是否在各频率处输出一个包含各阶模态振型对结构总响应贡献的表格。

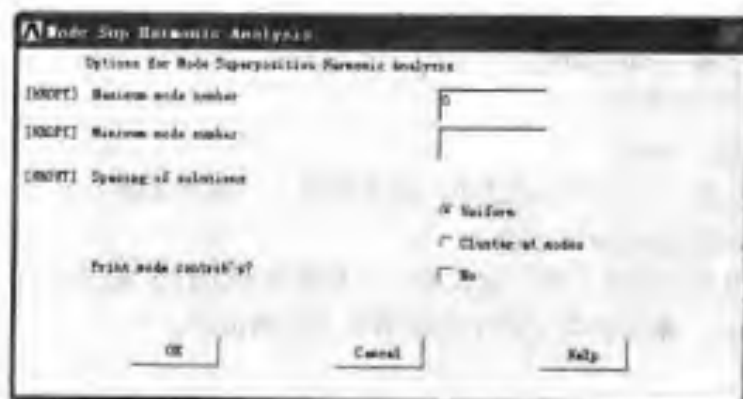


图 8-24 模态叠加法的选项设置

### (2) 施加载荷。

这一步骤和完全法基本相同，但需要说明以下两点：

- a. 只可施加力、加速度和模态分析生成的载荷向量。
- b. 如果模态分析中采用的是 Reduced 提取法，载荷只能施加在主自由度上。

### (3) 设置载荷步选项。

除了可以提供振型阻尼外，该步骤和完全法相同。

### (4) 求解。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，完成分析求解。

注意：这一步要求振型文件 Jobname.MODE 必须存在并且有效，如果采用 Block Lanczos 法或 Subspace 法提取模态并按照分布质量矩阵的形式计算模态解，要求矩阵文件 Jobname.FULL 存在并且有效。

## 8.3.4 谐响应分析实例：悬索拱桥的谐响应分析

### 1. 问题描述

该实例对图 8-25 所示的悬索拱桥进行谐响应分析，以确定该悬索拱桥在单位简谐载荷作用下的结构响应，桥体框架采用钢材，桥面采用混凝土材料。

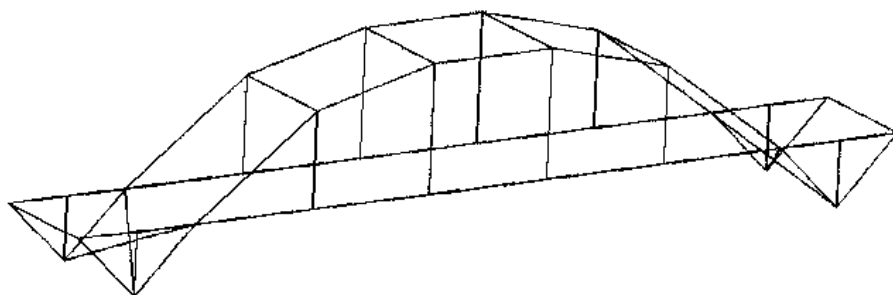


图 8-25 悬索拱桥模型

### 2. 创建模型

第 1 步：设置分析工作名称和图形标题

设定工作文件名称为 BRIDGE HARMONIC ANALYSIS，图形标题为 BRIDGE HARMONIC ANALYSIS。

操作命令如下：

```
/FILENAME, BRIDGE HARMONIC ANALYSIS
```

```
/TITLE, BRIDGE HARMONIC ANALYSIS
```

GUI 菜单路径：

选取菜单路径 Utility Menu>File>Change jobname，输入 BRIDGE HARMONIC ANALYSIS，单击 OK。

选取菜单路径 Utility Menu>File>Change Title，输入 BRIDGE HARMONIC ANALYSIS，单击 OK。

第 2 步：定义单元类型

选取 BEAM4 作为 1 号单元，LINK10 作为 2 号单元，SHELL63 作为 3 号单元。



操作命令如下:

```
ET, 1, BEAM4
ET, 2, LINK10
ET, 3, SHELL63
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 3 步: 定义单元实常数

定义 3 组实常数, 其中实常数 1 针对 BEAM4 单元, 实常数 2 针对 LINK10 单元, 实常数 3 针对 SHELL63 单元。

这一步操作的命令如下:

```
R,1,2,0.6667,0.1667,1,2
R,2,0.0314,0.1
R,3,0.5,0.5,0.5,0.5,,,
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

第 4 步: 定义材料参数

整个模型采用两种材料: 桥身框架采用钢材, 弹性模量 EX 取  $2.0 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比 PRXY 取 0.3, 密度 DENS 取  $7800 \text{ kg/m}^3$ ; 桥面采用混凝土, 弹性模量 EX 取  $3.0 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比 PRXY 取 0.2, 密度 DENS 取  $3000 \text{ kg/m}^3$ 。

这一步操作的命令如下:

```
MP, EX, 1, 2.0E11
MP, NUXY, 1, 0.3
MP, DENS, 1, 7800
MP, EX, 2, 3e10
MP, PRXY, 2, 0.2
MP, DENS, 2, 3000
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

第 5 步: 创建关键点

由于桥体具有对称性, 首先创建单侧的关键点, 然后通过平移复制得到另一侧的关键点。按照关键点的编号依次创建关键点, 操作命令如下:

```
K, NPT, X, Y, Z
```

具体的关键点编号和坐标信息可以参考本节附加的 APDL 命令流。

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

该步操作执行后, 显示界面如图 8-26 所示。

选择已创建的关键点, 沿着 Z 轴负方向平移 20 个单位, 复制关键点, 操作命令如下:

```
KGEN, 2, ALL, , , , -20, , 0
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints



图 8-26 模型关键点

#### 第 6 步：创建桥体框架

按照图 8-25 所示的模型，连接相应关键点，建立模型桥体的框架结构。

操作的命令：

L, P1, P2

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line

采用命令方式创建时可以利用关键点编号的规律性，通过循环语句 DO-ENDDO 完成。完整的桥体框架如图 8-27 所示。



图 8-27 模型桥体框架

#### 第 7 步：创建桥面

参考桥体模型图，在桥面位置每四个关键点创建一个平面。这一步操作的命令如下：

A, P1, P2, P3, P4

注意：在由关键点创建平面时，组成关键点应该按照顺时针或逆时针的顺序排列，平面

的法线方向由关键点的排列顺序按照右手法则确定。

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Area>Arbitrary>Through Kps

整个桥面由 9 块平面组成, 桥面创建完毕后如图 8-28 所示。



图 8-28 桥体几何模型

至此, 图 8-25 所示的悬索拱桥的几何模型已创建完毕。

第 8 步: 划分有限元网格

(1) 桥体框架。

桥体框架采用 BEAM4 单元、1 号实常数和 1 号材料, 网格大小指定为 2, 划分网格前需要选定桥体框架对应的直线, 具体划分操作命令如下:

```
LSEL,S,,1,32
```

```
LATT,1,1,1,,,
```

```
LESIZE,ALL,2
```

```
LMESH,ALL
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

(2) 悬索。

桥面上的 8 根悬索采用 LINK10 单元、2 号实常数和 1 号材料, 网格划分数 NDIV 设为 1, 操作命令如下:

```
LSEL,S,,33,40
```

```
LATT,1,2,2
```

```
LESIZE,ALL,,1
```

```
LMESH,ALL
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

注意: 由于 LINK10 只能承受张拉作用, 网格划分数 NDIV 必须指定为 1。

(3) 桥面。

桥面采用 SHELL63 单元、3 号实常数和 2 号材料, 网格大小指定为 2, 操作命令如下:

AATT,2,3,3

AESIZE,ALL,2

AMESH,ALL

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool

至此,悬索拱桥的有限元模型创建完毕,如图 8-29 所示。



图 8-29 悬索拱桥有限元模型

### 3. 谐响应分析

#### 第 9 步: 设定分析类型

进入 ANSYS 求解器,选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 设置分析类型为 Harmonic。

#### 第 10 步: 设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options, 弹出 Harmonic Analysis 对话框,求解方法 Solution method 选择 Full, 输出形式 DOF printout format 选择 Real+imaginary, 单击 OK。随后弹出 Full Harmonic Analysis 对话框,接受默认设置,单击 OK。

#### 第 11 步: 载荷步选项设置

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Freq and Substeps, 弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框,频率范围 Harmonic freq range 设定为 0~2.5Hz, 载荷子步数 Number of substeps 取 50, 载荷形式 Stepped or ramped b.c 选择 Ramped, 单击 OK。

#### 第 12 步: 施加位移约束

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Node 拾取框,在图形窗口拾取支座处的 4 个节点,单击 OK, 随后弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框,选择 All DOF, 在 VALUE 栏输入 0, 单击 OK 关闭对话框。采取同样的方法选择桥面两端的节点,在 Apply U, ROT on Nodes 对话框中选择 UX, 在 VALUE 栏输入 0, 单击 OK 关闭对话框(如图 8-30 所示)。

#### 第 13 步: 施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On

Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 对话框, 在图形窗口拾取节点 5 和节点 25, 单击 OK, 弹出 Apply A/M on Nodes 对话框, 载荷方向 Direction of force/mom 选择 FY, 载荷实部 Real part of force/mom 输入 1, 载荷虚部 Imag part of force/mom 输入 0, 单击 OK。



图 8-30 模型位移约束和施加载荷

#### 第 14 步: 谐响应求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始计算谐响应解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退求解器。

#### 4. 观察结果

##### 第 15 步: 定义位移变量

进入时间历程后处理器, 弹出 Time History Variables 对话框, 单击右上方的 Add Data 键, 弹出 Add Time-History Variable 对话框, 依次点击 Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement, 变量名取为 UY\_1, 单击 OK, 弹出 Node for Data 拾取框, 在图形窗口拾取左侧悬索和桥面连接处的节点 (如图 8-31 所示), 单击 OK 确定。

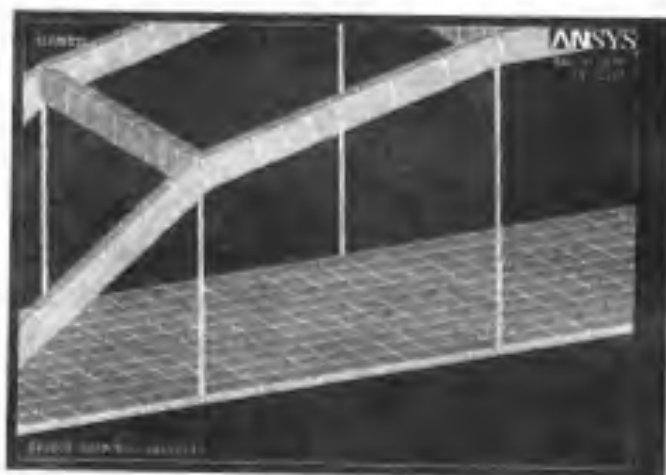


图 8-31 定义位移变量

重复上述操作，将中间悬索和桥面连接处的节点 Y 方向位移定义为 UY\_2。

第 16 步：显示变量变化曲线

在 Time History Variables 对话框的变量列表中选择变量 UY\_1 和 UY\_2，单击右上方的 Graph Data 键，图形窗口显示变量 UY\_1 和 UY\_2 随频率的变化曲线，如图 8-32 所示。

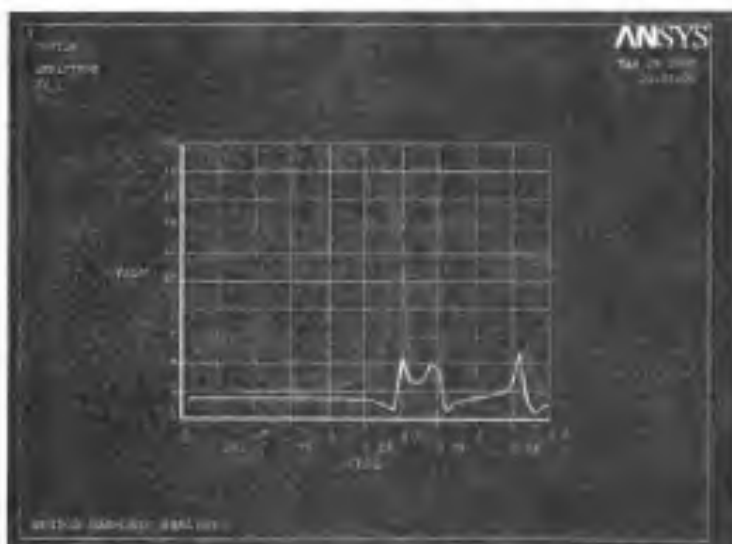


图 8-32 桥面挠度响应曲线

建模几何模型以及求解和后处理操作对应的 APDL 命令流如下：

! 定义桥体单侧关键点

K,1,-60,-10,0

K,2,-50,0,0

K,3,-30,15,0

K,4,-10,20,0

K,5,10,20,0

K,6,30,15,0

K,7,50,0,0

K,8,60,-10,0

K,9,-70,0,

K,10,-60

K,11,-30

K,12,-10,

K,13,10

K,14,30

K,15,60

K,16,70

KGGEN,2,ALL, , , , -20, 0

! 平移复制关键点

\*DO,II,1,7

! 创建拱线

  L,II,II+1

  L,II+16,II+17

\*ENDDO

\*DO,II,2,7

! 创建拱间连线

```

    L,II,II+16
*ENDDO

! 桥座支撑线
L,1,9
L,1,10
L,17,25
L,17,26
L,8,15
L,8,16
L,24,31
L,24,32
L,1,18
L,2,17
L,8,23
L,7,24

*DO,II,3,6                                ! 创建悬索线
    L,II,II+8
    L,II+16,II+24
*ENDDO

! 创建桥面
A,9,10,26,25
A,10,2,18,26
A,2,11,27,18
A,11,12,28,27
A,12,13,29,28
A,13,14,30,29
A,14,7,23,30
A,7,15,31,23
A,15,16,32,31

! 谱响应分析选项设置与求解
/SOL                                        ! 进入求解器
ANTYPE,HARMONIC                            ! 设置分析类型
HROPT,FULL                                  ! 设置求解方法
HARFRQ,0,2.5,                               ! 设置简谐载荷频率范围
NSUBST,50,                                   ! 设置载荷子步数
NSEL,S,LOC,Y,-10                            ! 施加位移约束
D,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-70
NSEL,A,LOC,X,70
D,ALL,UX
ALLSEL,ALL                                  ! 施加简谐载荷
ASEL,S,,2,6
SFA,ALL,1,PRES,1

```

```

SOLVE          ! 求解
FINISH        ! 退出求解器

! 后处理观察结构响应
/POST26       ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,305,U,Y,UY_1 ! 定义位移变量
NSOL,3,307,U,Y, UY_2
PLVAR,2,3,    ! 显示位移变化曲线
FINISH       ! 退出时间历程后处理器

```

## 8.4 瞬态分析的过程和实例

本节将首先对 ANSYS 三种瞬态分析方法的基本操作过程和相关选项进行简要说明, 然后结合一个吊车梁的分析实例, 介绍利用 ANSYS 进行瞬态分析的方法和过程。

ANSYS 瞬态分析分为三种方法: 完全法 (Full)、缩减法 (Reduced) 和模态叠加法 (Mode Superposition)。

### (1) 完全法。

完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应, 在三种方法中最容易使用, 功能最为强大。完全法可以包含非线性特性, 但是在时间和存储方面比其他两种方法开销大。

### (2) 缩减法。

缩减法通过选取主自由度和压缩矩阵来减小问题的规模, 先计算主自由度的结果, 然后扩展到初始所有自由度上。缩减法开销小, 积分步长保持恒定, 不允许自动时间步长。

### (3) 模态叠加法。

模态叠加法通过模态分析得到模态振型, 再乘以因子并求和来计算结构的响应。模态叠加法的开销在三种方法中最小, 允许考虑模态阻尼, 和缩减法一样积分步长保持恒定, 不允许自动时间步长。

下面分别就这三种方法的操作步骤进行介绍。首先介绍完全法瞬态分析过程, 然后分别介绍缩减法和模态叠加法与完全法不同的操作步骤。

#### 8.4.1 完全法瞬态动力学分析

完全法瞬态分析过程包括: 建模、加载求解和观察结果。为了使读者对完全法瞬态分析的过程有一个较为清楚的认识, 下面对各个步骤的操作以及一些注意事项进行说明。

##### 1. 建模

瞬态分析的建模过程与其他分析类型的建模过程类似, 主要包括定义单元类型、单元实常数、材料性质, 建立几何模型以及划分有限元网格等基本步骤。

对于完全法瞬态分析的建模过程, 需要注意两点:

(1) 可以采用线性单元和非线性单元。

(2) 必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS, 材料可以是线性的和非线性的。

##### 2. 加载并求解

首先进入 ANSYS 求解器, 设置分析类型为 Transient, 分析方法选择 Full。



下面依次介绍建立初始条件、设置求解控制、施加载荷、存储载荷步设置，最后计算瞬态解。

### (1) 建立初始条件。

进行完全法瞬态动力学分析之前，需要建立初始条件和正确使用载荷步。瞬态动力学分析中，载荷随时间变化，为了描述这种载荷-时间关系，ANSYS 采用载荷步的方式，如图 8-33 所示。

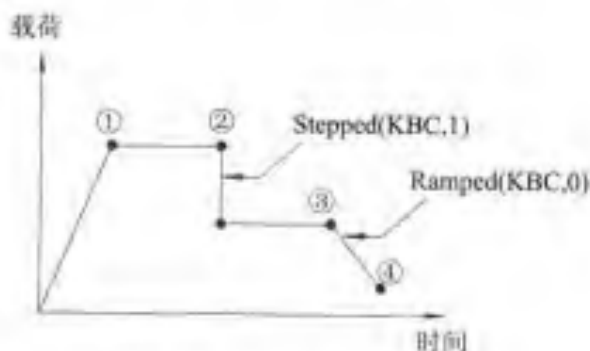


图 8-33 载荷-时间关系曲线

通常情况下，第一个载荷步用来建立初始条件，然后施加后续载荷并设置载荷步选项。每个载荷步需要指定载荷以及截止时间，同时设置其他载荷选项，如载荷形式、时间步长等，将每个载荷步设置写入载荷步文件，最后求解所有载荷步。

施加瞬态载荷首先要建立初始条件。瞬态动力学分析要求两种初始条件：初始位移 ( $u_0$ ) 和初始速度 ( $\dot{u}_0$ )。缺省情况下，初始位移和初始速度一般为零 ( $u_0 = 0$ ,  $\dot{u}_0 = 0$ )，对于非零初始条件需要设置。

操作命令：IC

GUI 菜单操作：

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define，弹出 Define Initial Conditions 对话框，如图 8-34 所示。

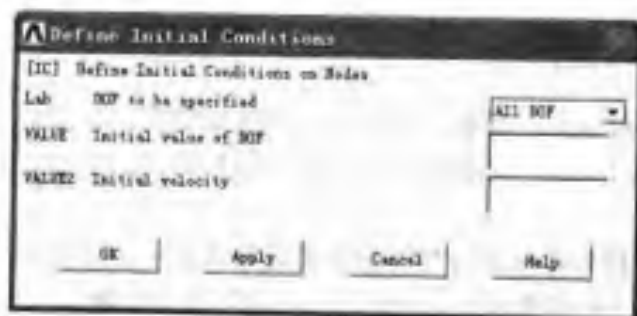


图 8-34 初始条件对话框

### (2) 设置求解控制选项。

求解控制选项包括分析选项、时间步长、载荷类型、输出控制、阻尼设置等，ANSYS 提供了方便的求解控制对话框，建议采用对话框设置求解选项，当然，熟悉命令的读者同样可以通过输入命令的方式完成求解控制选项的设置。

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Control's

Solution Controls 对话框包含 Basic, Transient, Sol's Options, Nonlinear 和 Advanced NL 五个标签。对于一般的瞬态分析,只需要用到 Basic 和 Transient 两个标签,下面分别介绍这两个标签的相关选项,如果分析中涉及到其他标签的选项,读者可以参考 Help 帮助。

图 8-35 所示的是 Basic 标签的内容, Basic 标签下主要包括以下基本设置:

➤ Analysis Options

该选项用于设置瞬态分析类型是小变形还是大变形,如果需要考虑预应力效应,可以打开 Calculate prestress effects 选项。

➤ Time control

该选项用于设置载荷步的截止时间[TIME]和时间步长。时间步长可以直接设置,也可以通过指定载荷子步数目[NSUBST]设置。对于多数问题,建议打开自动时间步长[AUTOTS]并指定时间步长的上下限[DELTIM],这样程序可以基于结构的响应自动调整时间步长。

➤ Write Items to Results File

该选项用于设置写入结果文件的数据项。

➤ Frequency

缺省情况下只将每载荷步的最后子步的结果写入结果文件,如果需要其他载荷子步的结果,可以在下拉列表选择相关选项。

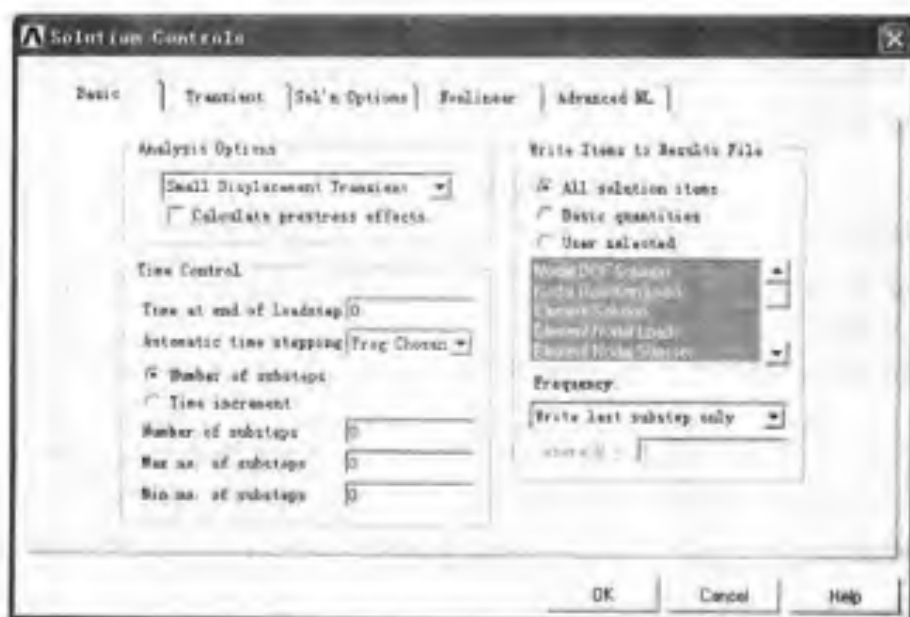


图 8-35 瞬态分析求解控制 Basic 标签

图 8-36 所示的是 Transient 标签的内容, Transient 标签下主要包括以下设置:

◆ Transient Options

该选项用于指定是否考虑时间积分效应[TIMINT]和载荷类型[KBC]。

◆ Damping Coefficients

该选项指定质量阻尼[ALPHAD]和刚度阻尼[BETAD]。

#### ◆ Integration Parameters

该选项指定积分参数，用于控制 Newmark 时间积分。



图 8-36 瞬态分析求解控制 Transient 标签

#### (3) 施加载荷。

瞬态分析中，除了惯性载荷外，其他载荷既可以施加在实体模型（关键点、线、面和体），也可以施加在有限元模型（节点和单元），表 8-4 列出了瞬态分析中可以施加的载荷类型以及对应的命令和菜单操作路径。

表 8-4 瞬态分析的施加载荷操作

载荷类型	命令	GUI 菜单路径
Displacement(UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ)	D	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Displacement
Force,Moment(FX,FY,FZ,MX,MY,MZ)	F	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Force/Moment
Pressure	SF	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Pressure
Temperature Fluence	BF	Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Temperature
Gravity,Spinning 等		Main Menu>Solution>Load-Apply>Structural>Other

#### (4) 存储载荷步设置。

载荷步设置结束后需要写入载荷步文件，以便最终求解。

操作命令：LSWRITE

GUI 菜单路径：

Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File

重复上述步骤直至所有载荷步定义完毕。

#### (5) 求解载荷步。

操作命令: LSSOLVE

GUI 菜单路径:

Main Menu>Solution>Solve>From LS Files

### 3. 观察结果

瞬态动力学分析的结果保存在结果文件 Jobname.RST 中, 所有数据都是时间的函数。可以通过通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 观察结果, 具体操作可以参考模态分析和谐响应分析, 这里不再重复。

## 8.4.2 缩减法瞬态动力学分析

缩减法通过缩减矩阵计算结构主自由度的动力学响应并将结果扩展到整个结构自由度。

缩减法瞬态分析过程包括: 建模、加载计算缩减解、扩展解和观察结果。建模和完全法相同, 扩展解和观察结果可以参考谐响应分析的 Reduced 法, 这里仅就加载求得缩减解的操作进行介绍。

进入 ANSYS 求解器, 设置分析类型为瞬态分析 Transient, 求解方法选择 Reduced。

### (1) 定义主自由度。

关于定义主自由度的原则和方法可以参考模态分析。

### (2) 建立初始条件。

和完全法一样, 在进行加载前, 首先需要建立初始条件。需要说明的是, 在缩减法中, 需要明确设置初始位移 ( $u_0$ ), 初始速度和初始加速度必须为零 ( $\dot{u}_0 = 0$ ,  $\ddot{u}_0 = 0$ ), 具体操作和完全法相同。

### (3) 载荷步选项。

缩减法载荷步选项的操作路径和完全法相比有一定的差异。

#### ◇ 通用选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time-Time Step, 弹出 Time and Time Step Options 对话框, 如图 8-37 所示。选项的具体功能和完全法类似。同样的功能也可通过菜单路径 Main Menu>Solution> Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Substeps 完成。

#### ◇ 阻尼选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Damping, 弹出 Damping Specifications 对话框, 设置质量阻尼和刚度阻尼。

### (4) 存储载荷步设置。

和完全法相同, 在载荷步设置结束后通过菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File 将设置写入载荷步文件, 以便最终求解。

### (5) 求解载荷步。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>From LS Files, 完成载荷步的求解过程。

## 8.4.3 模态叠加法瞬态动力学分析

模态叠加法通过模态分析得到结构的模态振型, 然后乘上因子并求和来计算动力学响应。模态叠加法瞬态分析过程包括: 建模、计算模态解、计算模态叠加法瞬态分析解、扩展

解和观察结果。建模和观察结果和完全法相同，扩展解在缩减法中有介绍，下面主要介绍其他步骤的操作和注意事项。

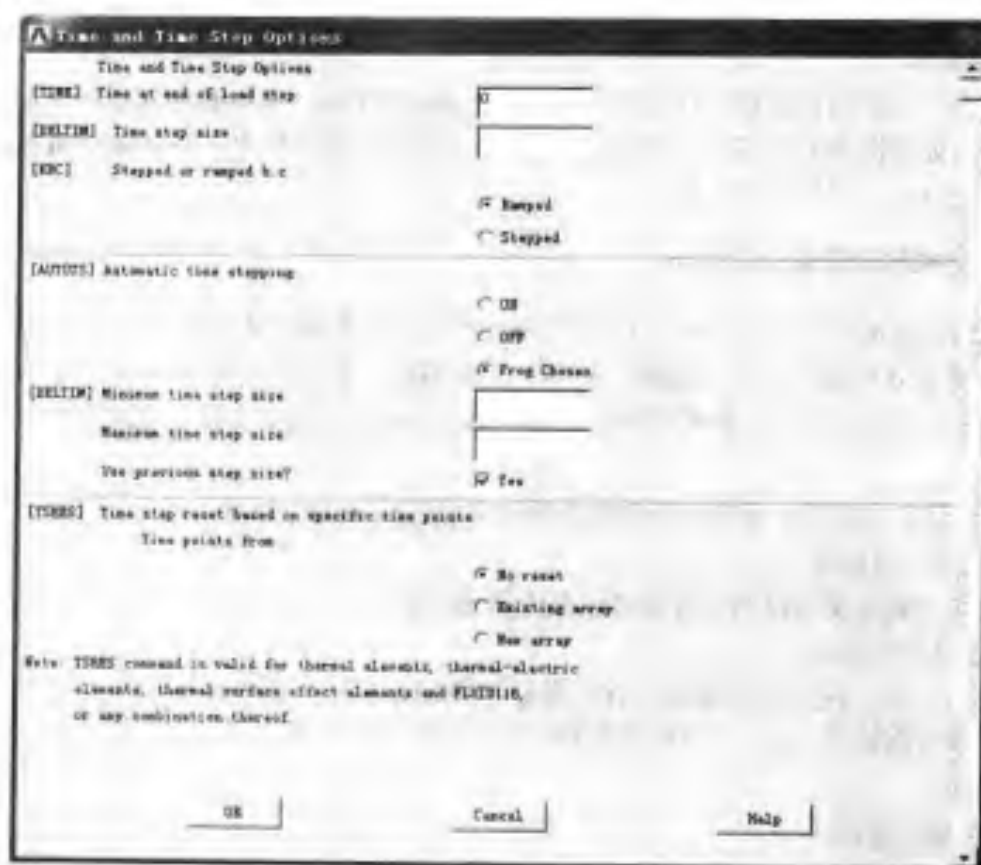


图 8-37 时间步长设置对话框

### 1. 计算模态解

在模态分析一节中已经对模态分析的步骤做了详细的介绍，这里仅对模态叠加法中需要注意的问题进行说明：

(1) 模态提取方法采用 Block Lanczos 法、Subspace 法、Reduced 法、PowerDynamic 法和 QR Damped 法，其他提取方法在模态叠加法瞬态分析中不能采用。

(2) 需要提取对动力学响应有贡献的所有模态。

(3) 如果采用 QR Damped 模态提取法，必须在模态分析阶段指定阻尼。

(4) 如果在瞬态分析中需要单元载荷，必须在模态分析中施加。

(5) 模态叠加法不需要扩展模态。

### 2. 计算模态叠加法瞬态分析解

和完全法、缩减法一样，模态叠加法瞬态分析同样需要设置分析类型，建立初始条件，设置载荷步并写入载荷步文件，最后求解载荷步文件，这里仅就模态叠加法中需要注意的方面进行简要介绍：

(1) 求解方法选择 Mode Superpos'n。

(2) 设置分析选项需要设置求解模态数。

(3) 建立初始条件必须明确设置初始位移。

(4) 可以施加力、平动加速度和模态分析中生成的载荷向量。

(5) 如果模态提取方法采用 Reduced 法, 载荷只能施加在主自由度上。

#### 8.4.4 瞬态分析实例: 吊车梁在移动载荷作用下的响应分析

##### 1. 问题描述

图 8-38 所示的吊车梁, 梁上的移动载荷  $F$  以  $1.0\text{s/m}$  的速度从梁的一段移动到另一段, 计算在此过程中吊车梁的位移和应力响应。

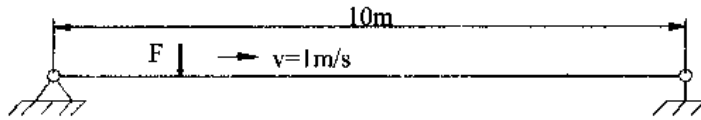


图 8-38 吊车梁简化模型

弹性模量  $E_X=2.0 \times 10^{11}\text{Pa}$

波松比  $PRXY=0.3$

密度  $DENS=7800\text{kg/m}^3$

吊车梁采用“工”字型截面 (如图 8-39)

$W1=150\text{mm}$

$W2=300\text{mm}$

$T1=20\text{mm}$

$T2=10\text{mm}$

##### 2. 创建模型

第 1 步: 设置分析工作名称和图形标题

设定工作文件名称为 CRANE-BEAM ANALYSIS, 图形标题为 CRANE-BEAM ANALYSIS。

操作命令如下:

```
/FILNAME, CRANE-BEAM ANALYSIS
```

```
/TITLE, CRANE-BEAM ANALYSIS
```

GUI 菜单路径操作:

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change jobname, 输入 CRANE-BEAM ANALYSIS, 单击 OK。

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change Title, 输入 CRANE-BEAM ANALYSIS, 单击 OK。

第 2 步: 定义单元类型

选取 BEAM188 作为 1 号单元。

操作命令如下:

```
ET, 1, BEAM188
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 3 步: 定义材料参数

模型为工字钢, 弹性模量  $E_X$  取  $2.0 \times 10^{11}\text{Pa}$ , 波松比  $PRXY$  取 0.3, 密度  $DENS$  取  $7800\text{kg/m}^3$ 。

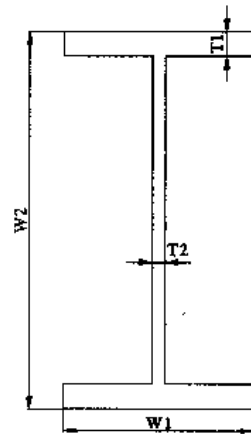


图 8-39 吊车梁截面

操作命令如下:

MP, EX, 1, 2.0E11

MP, NUXY, 1, 0.3

MP, DENS, 1, 7800

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Modals

第 4 步: 定义梁截面

该操作建议用 GUI 菜单操作, 选择路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections, 弹出 Beam Tool 对话框, 如图 8-40 所示, 在对话框中输入截面的几何参数。

相关操作命令:

SECTYPE,1,BEAM,I,3

SECOFFSET, CENT

SECDATA,0.15,0.15,0.3,0.02,0.02,0.01,0,0,0,0

第 5 步: 创建几何模型

创建两端关键点, 编号为 1 和 2, 连接两点生成直线, 创建方向关键点 3。

操作命令如下:

K, 1, 0, 0, 0

K, 2, 10, 0, 0

K,3,0,2,0

L, 1,2

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Straight Line

第 6 步: 划分网格

设置梁沿着轴线网格划分数为 10, 单元类型、材料参数和截面标号都取 1, 方向点输入 3。

操作命令如下:

LESIZE,1,,10

LATT,1,,1,,3,,1

LMESH, ALL

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

第 7 步: 保存模型

操作命令:

SAVE

计算瞬态分析解

第 8 步: 设定分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis,

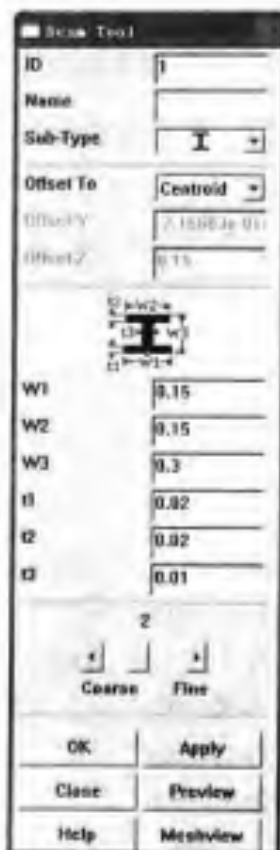


图 8-40 定义梁截面

设置分析类型为瞬态分析 Transient，分析方法选择 Full。

#### 第 9 步：施加位移约束

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints，分别约束左端关键点 1 的线位移 UX、UY 和 UZ 以及右端关键点 2 的线位移 UY 和 UZ，如图 8-41 所示。



图 8-41 模型位移约束示意图

#### 第 10 步：设置载荷步

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，弹出 Solution Controls 对话框，载荷步的结束时间设为 1.0，载荷子步数设为 10，其他选项采用默认设置。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，在节点 3 施加 Y 方向大小为-1000N 的作用力。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File，将上述载荷步设置作为载荷步 1 写入载荷步文件。

重复上述操作，每隔 1.0s 将载荷依次移动到节点 4~11，施加载荷前需要将上一载荷步所施加载荷删除。

#### 第 11 步：求解

选取菜单操作路径 Main Menu>Solution>Solve>From LS Files，弹出 Solve Load Step Files 对话框，起始载荷步输入 1，结束载荷步输入 9，如图 8-42 所示，单击 OK，开始计算瞬态解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

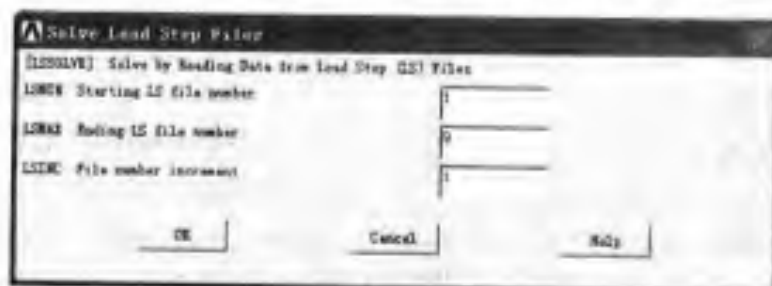


图 8-42 求解载荷步对话框



#### 4. 观察结果

##### 第 12 步：观察应力分布

进入通用后处理器 POST1，观察载荷移动到左端节点 3 和中间节点 7 时刻吊车梁的轴向应力分布。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read>By Load Step，在 Load Step number 栏输入 1，读入载荷步 1 的计算结果。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，在 Contour Nodal Solution Data 对话框选择 SX，显示吊车梁的轴向应力分布，如图 8-43 所示。



图 8-43 吊车梁的轴向应力分布图（载荷步 1）

采用类似的操作显示载荷步 5 的轴向应力分布，如图 8-44 所示。



图 8-44 吊车梁的轴向应力分布图（载荷步 1）

##### 第 13 步：观察挠度变化曲线

进入时间历程后处理器 POST26，观察中间节点 7 的挠度在载荷运动过程中的变化曲线。

单击 Time History Variables 对话框右上方的 Add Data 键，弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次点击 Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement，变量名取为 UY，单击 OK，弹出 Node for Data 拾取框，在图形窗口拾取中间节点 7，单击 OK 确定。

在 Time History Variables 对话框的变量列表中选择变量 UY，单击右上方的 Graph Data 键，

图形窗口显示吊车梁的跨中挠度在载荷移动过程中的变化曲线，如图 8-45 所示。

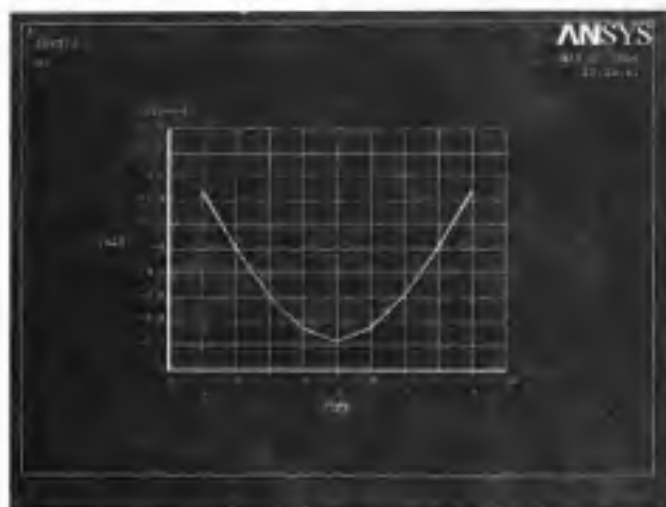


图 8-45 中间节点挠度曲线

以上求解和后处理操作对应的 APDL 命令流如下：

! 谱响应选项设置与求解

/SOL	! 进入求解器
ANTYPE,TRANSIENT	! 设置分析类型为瞬态分析
TRNOPT,FULL	! 选择分析方法
DK,1,,,0,UX,UY,UZ,...	! 施加位移约束
DK,2,,,0,UX,UY,...	
TIME,1	! 载荷步结束时间
NSUBST,10	! 载荷步子步数
F,3,FY,-1000	! 施加载荷
LSWRITE,1	! 写入载荷步文件
TIME,2	! 设置载荷步 2
FDELETE,ALL,ALL	
F,4,FY,-1000	
LSWRITE,2	
TIME,3	! 设置载荷步 3
FDELETE,ALL,ALL	
F,5,FY,-1000	
LSWRITE,3	
TIME,4	! 设置载荷步 4
FDELETE,ALL,ALL	
F,6,FY,-1000	
LSWRITE,4	
TIME,5	! 设置载荷步 5
FDELETE,ALL,ALL	

```

F,7,FY,-1000
LSWRITE,5

TIME,6                                ! 设置载荷步 6
FDELE,ALL,ALL
F,8,FY,-1000
LSWRITE,6

TIME,7                                ! 设置载荷步 7
FDELE,ALL,ALL
F,9,FY,-1000
LSWRITE,7

TIME,8                                ! 设置载荷步 8
FDELE,ALL,ALL
F,10,FY,-1000
LSWRITE,8

TIME,9                                ! 设置载荷步 9
FDELE,ALL,ALL
F,11,FY,-1000
LSWRITE,9
LSSOLVE,1,9,1                          ! 求解载荷步文件
FINISH                                  ! 退出求解器

! 观察应力分布
/POST1                                  ! 进入通用后处理器
SET,1,LAST,1                            ! 读入载荷步 1 计算结果
PLNSOL,S,X,0,1                          ! 显示应力分布
SET,5,LAST,1                            ! 读入载荷步 5 计算结果
PLNSOL,S,X,0,1                          ! 显示应力分布
FINISH                                  ! 退出通用后处理器

! 观察挠度变化曲线
/POST26                                  ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,7,U,Y,UY                         ! 定义节点位移为变量
PLVAR,2,                                  ! 显示变量变化曲线
FINISH                                  ! 退出时间历程后处理器

```

## 8.5 谱分析的过程和实例

谱是谱值和频率的关系曲线，反映了时间—历程载荷的强度和频率之间的关系。ANSYS 谱分析分为 3 种类型：

- ◇ 响应谱分析
- ◇ 动力设计分析

#### ◇ 随机振动分析

响应谱代表系统对一个时间—历程载荷函数的响应，是一个响应和频率的关系曲线。ANSYS 响应谱分为单点响应谱和多点响应谱，前者指在模型的一个点集定义一条响应谱，后者指在模型的多个点集定义多条响应谱。动力分析设计是一种用于分析船舶装备抗震性的技术。随机振动分析主要用于确定结构在具有随机性质的载荷作用下的响应。

本节将首先对 ANSYS 谱分析中比较常用的单点响应谱 (SPRS) 和随机振动 (PSD) 的基本操作过程和相关选项进行简要说明，然后结合分析实例，介绍利用 ANSYS 进行谱分析的方法和过程。

### 8.5.1 单点响应谱分析

完整的单点响应谱分析过程包括：建模、计算模态解、谱分析求解、扩展模态、合并模态和观察结果。下面对各个步骤的操作以及一些注意事项进行说明。

#### 1. 建模

单点响应谱分析的建模过程与其他分析类型的建模过程是类似的，主要包括定义单元类型、单元实常数、材料性质、建立几何模型以及划分有限元网格等基本步骤。

对于单点响应谱分析，需要注意两点：

(1) 谱分析中只允许线性行为，任何非线性特性均作为线性处理。

(2) 谱分析的材料可以是线性的、各向同性或者正交各向异性的、恒定的或者与温度相关的。分析中必须指定材料的弹性模量 EX 和密度 DENS。

#### 2. 计算模态解

结构的固有频率和模态振型是谱分析所必须的数据，在进行谱分析求解前需要先计算模态解，具体操作可以参考模态分析一节，这里需要说明几点：

(1) 模态提取方法采用 Block Lanczos 法、Subspace 法和 Reduced 法，其他提取方法在谱分析中不能采用。

(2) 提取的模态数应该足以表征感兴趣的频率范围内结构的响应。

(3) 如果采用 GUI 菜单操作，在模态设置对话框打开了 Expand mode shapes 选项，将在模态分析中进行扩展操作，否则扩展操作将在谱分析求解之后进行。

(4) 如果模态提取方法选择 Reduced 法，必须在施加激励的位置定义主自由度。

#### 3. 谱分析求解

首先进入 ANSYS 求解器，设置分析类型为 Spectrum。

下面依次介绍设置分析选项、设置激励谱选项、定义激励谱曲线、设置阻尼和谱分析求解。

##### (1) 设置分析选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Spectrum Analysis 对话框，如图 8-46 所示，此对话框主要包括以下选项：

##### ◇ Type of spectrum

该选项指定谱分析的类型，单点响应谱分析选择 Single-pt resp。

##### ◇ No. of mode for solu

该选项指定分析求解所需的扩展模态数。

##### ◇ Calculate elem stresses

如果需要计算单元应力，打开该选项。

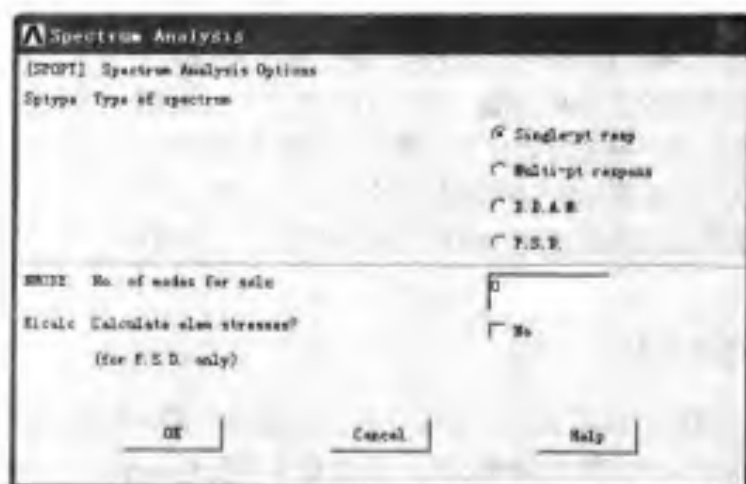


图 8-46 谱分析选项设置

(2) 设置激励谱选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Settings，弹出 Setting for Single-Point Response Spectrum 对话框，如图 8-47 所示，此对话框主要包括以下选项：

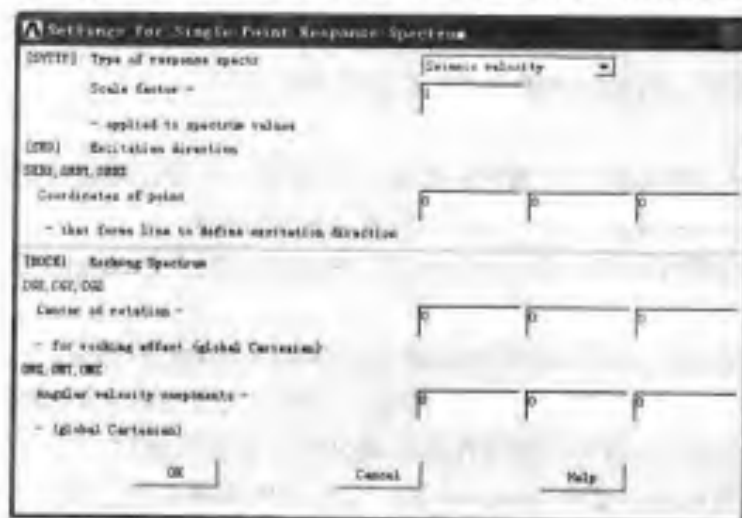


图 8-47 单点响应谱设置

#### ◆ Type of response spectrum

该选项设置响应谱的类型，包括：Seismic accel、Seismic velocity、Seismic displac、Force spectrum 和 PSD。前三种都属于地震谱，施加在结构的基础，Force pectrum 和 PSD 施加在非基础节点。

操作命令：SVTYPE

#### ◆ Excitation direction

设置激励谱的方向，该方向通过三个坐标分量确定。

操作命令：SED,X,Y,Z

(3) 定义激励谱的谱值—频率关系曲线。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Freq Table, 弹出 Frequency Table 对话框, 按照递增的顺序依次定义激励谱的各个频率点的频率值。

操作命令: `FREQ`

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Spectrum values, 弹出 Spectrum values 对话框, 依次设置各个频率点对应的谱值。

操作命令: `SV`

(4) 设置阻尼。

具体操作可以参考模态分析中关于阻尼的介绍。

(5) 求解。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 开始求解。

#### 4. 扩展模态

关于扩展模态的具体操作在模态分析一节有详细说明, 这里不再介绍。

#### 5. 合并模态

合并模态之前需要重新进入 ANSYS 求解器, 主要包括以下步骤:

(1) 指定分析选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 设置分析类型为 Spectrum。

(2) 选择模态合并方法。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Mode combine, 弹出 Mode Combination Methods 对话框, 如图 8-48 所示。



图 8-48 模态合并方法

#### ◆ Mode Combination Method

设置模态合并方法, 这里提供了 5 种合并方法: CQC 法、GRP 法、DSUM 法、SRSS 法和 NRLSUM 法。

#### ◆ Type of output

设置响应计算类型, ANSYS 允许计算 3 种响应类型: 位移 (包括位移、应力、载荷等)、速度 (速度、应力速度、载荷速度等) 和加速度 (加速度、应力加速度、载荷加速度等)。

(3) 合并求解。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 完成合并求解。

#### 6. 观察结果

首先进入通用后处理器 POST1, 需要选取菜单路径 Utility>File>Read Input From, 读入 Jobname.MCOM 文件。

操作命令: /INPUT,FILE,MCOM

有关后处理的具体操作在前面几节的分析类型中已有介绍,这里不再重复。

### 8.5.2 随机振动分析

随机振动分析过程包括:建模、计算模态解、谱分析求解、扩展模态、合并模态和观察结果,其中建模、模态求解、扩展模态和单点响应谱分析相同,这里主要介绍其他步骤的操作。

#### 1. 谱分析求解

首先进入 ANSYS 求解器,设置分析类型为 Spectrum。

下面详细介绍随机振动谱分析的操作步骤。

##### (1) 设置分析选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options,弹出 Spectrum Analysis 对话框,谱分析类型选择 P.S.D.。

##### (2) 设置激励谱选项。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Settings,弹出 Setting for PSD analysis 对话框,如图 8-49 所示。此对话框主要用于设置响应谱的类型,这里包括: Acceleration、Accal、Velocity、Displacement、Force spectrum 和 Pressure spct,其中 Force spectrum 和 Pressure spct 只能作为节点激励。



图 8-49 随机分析谱设置

##### (3) 定义激励谱的谱值—频率关系曲线。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>PSD vs Freq,弹出 PSD vs Frequency Table 对话框,按照递增的顺序依次定义激励谱的各个频率点以及对应的谱值。

##### (4) 施加功率谱密度激励。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Spectrum>Base PSD Excit/ Node PSD Excit,对模型施加基础 PSD 激励或节点 PSD 激励,同时可以通过输入缩放系数调整激励谱的大小。

##### (5) 计算 PSD 参与因子。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Calculate PF,弹出 Calculate Participation Factors 对话框,如图 8-50 所示。

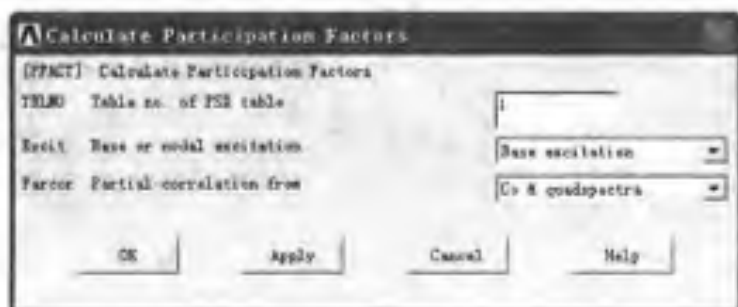


图 8-50 计算参与因子对话框

➤ Table no. of PSD table

指定所要计算的 PSD 谱编号。

➤ Base or nodal excitation

设置 PSD 激励谱的类型是基础激励还是节点激励。

操作命令:

PPACT,TBLNO, Excit,Parcor

(6) 设置输出控制。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Calc controls, 弹出 PSD Calculation Controls 对话框, 如图 8-51 所示。该对话框用于设置结果文件的数据数量和格式。这里可以计算三种数据结果: 位移解、速度解和加速度解, 每种数据结果可以是绝对值也可以是对于基准的相对值。

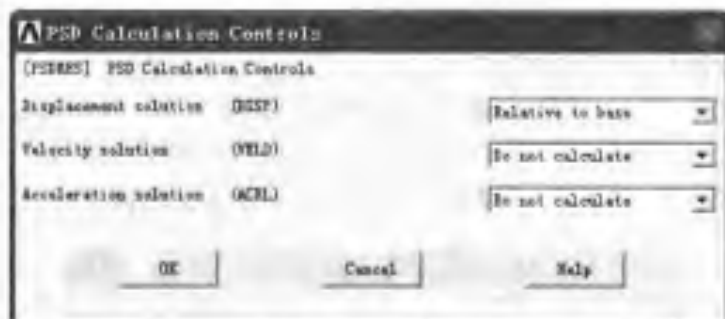


图 8-51 PSD 输出控制

(7) 求解。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 开始求解。

## 2. 合并模态

随机分析的合并模态操作和单点响应谱分析大致一样, 不同之处在于随机分析的合并方法只有 PSD 一种, 在分析设置对话框中需要指定需要合并的模态数。

## 3. 观察结果

随机分析的结果写入在结果文件 Jobname.RST 中, 包括:

- (1) 模态振型。
- (2) 基础激励静力解。
- (3) 位移解、速度解和加速度解。

以上结果数据在结果文件中的结构如表 8-5 所示。



表 8-5 PSD 结果文件数据结构

载荷步	子步	结果数据
1	1	第 1 阶模态的扩展模态解
	2	第 2 阶模态的扩展模态解
	.....	.....
2	1	第 1 个 PSD 谱的单位静力解
	2	第 2 个 PSD 谱的单位静力解
	.....	.....
3	1	位移解
4	1	速度解
5	1	加速度解

随机分析可以通过通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 观察结果, 关于 POST1 的操作, 所有分析类型大致相同, 这里主要介绍通过 POST26 观察随机分析结果的相关操作。

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro, 进入时间历程后处理器 POST26。

(1) 存储频率向量。

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Store Data, 弹出 Store Data from the Results File 对话框, 其中 NPDS 是加在固有频率两边的频率点数目, 以使频率向量变得平滑。

(2) 定义变量。

该操作可以参照前面几节的有关介绍。

(3) 计算响应 PSD 并保存为变量。

选取菜单操作 Main Menu>TimeHist Postpro>Calc Resp PSD, 弹出 Calculate Response PSD 对话框, 如图 8-52 所示。该对话框首先设置所要计算的响应谱的变量号, 在 Ref no. of variable 栏输入响应变量的变量号, 其余选项设置和求解设置中的意义相同。

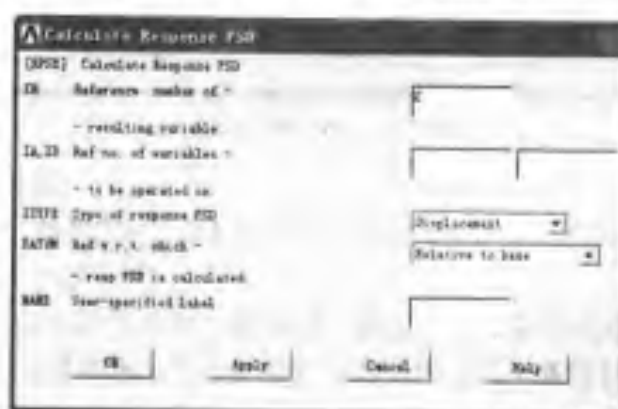


图 8-52 计算响应谱设置

### 8.5.3 单点响应谱分析实例: 悬索拱桥地震载荷响应

#### 1. 问题描述

结合谱响应分析一节中建立的悬索拱桥, 在桥体侧向施加表 8-6 所示的地震谱, 计算该桥

体的结构响应。

表 8-6 响应谱

频率 (Hz)	位移 ( $10^3\text{m}$ )
0.5	0.8
1.0	0.5
1.5	0.6
2.0	0.8
2.5	1.2

## 2. 计算模态解

第 1 步：设置分析类型为模态分析

进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 Modal。

第 2 步：设置模态分析选项

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Modal Analysis 对话框，模态提取方法采用 Block Lanczos，提取模态数设为 10，打开 Expand mode shapes 选项，模态扩展数设为 10。

第 3 步：模态分析求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始计算模态解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

求解完毕退出求解器。

## 3. 计算谱分析解

第 4 步：设置分析类型为谱分析

重新进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 Spectrum。

第 5 步：设置谱分析类型选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，在 Spectrum Analysis 对话框中谱类型选择 Single-pt resp，模态求解数设为 10。

第 6 步：设置激励谱选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Settings，弹出 Setting for Single-Point Response Spectrum 对话框，在 Type of response spectr 下拉列表选择 Seismic displac，在 Excitation direction 栏输入 1、0、0，单击 OK。

第 7 步：定义激励谱曲线

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Freq Table，弹出 Frequency Table 对话框，在 FREQ1~FREQ5 栏依次输入 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 (如图 8-53 所示)，单击 OK。

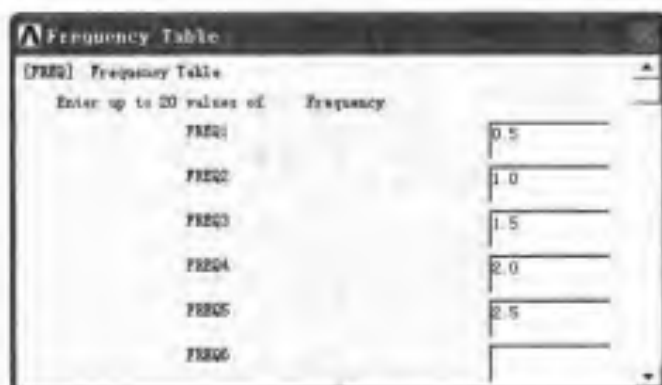


图 8-53 频率设置对话框

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Spectrum values, 弹出 Spectrum values 对话框, 在 SV1~SV5 栏依次输入 0.8, 0.5, 0.6, 0.8, 1.2 (如图 8-54 所示), 单击 OK。

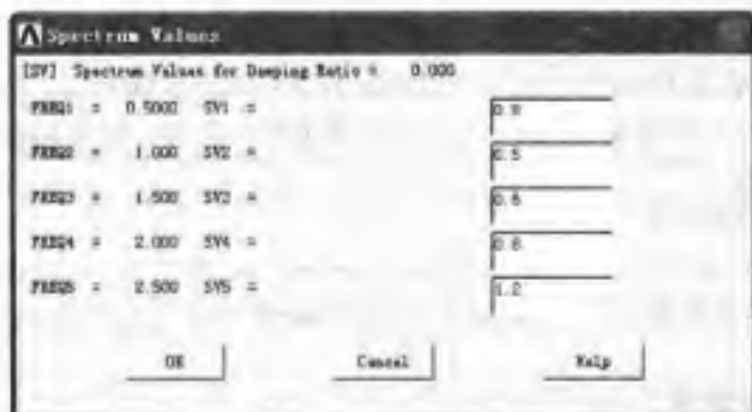


图 8-54 谱值设置对话框

#### 第 8 步: 谱分析求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始谱分析求解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕退出求解器。

#### 4. 模态合并

##### 第 9 步: 设置模态合并方法

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>Single Point>Mode combine, 弹出 Mode Combination Methods 对话框, 模态合并方法选择 CQC, Significant 栏输入 0.01, Type of output 下拉列表选择 Displacement, 单击 OK。

##### 第 10 步: 模态合并求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始模态合并求解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕退出求解器。

### 5. 观察结果

#### 第 11 步：读入结果文件

首先进入通用后处理器 POST1, 选取菜单路径 Utility Menu>File>Read Input from, 在工作路径中选择结果文件 Jobname.mcom, 单击 OK。

#### 第 12 步：观察位移变形

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solo, 弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框, 在 Item 栏选择 UX, 单击 OK, 在图形窗口将显示结构 X 方向的位移变形, 如图 8-55 所示。

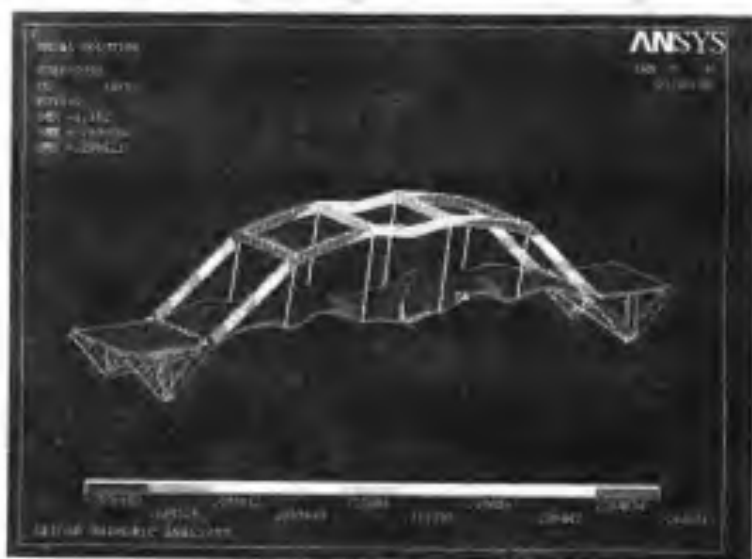


图 8-55 桥体结构位移变形—UX

改变激励谱得施加方向, 采取相同的操作步骤可以得到结构在 Y 方向和 Z 方向的位移变形, 分别如图 8-56 和图 8-57 所示。

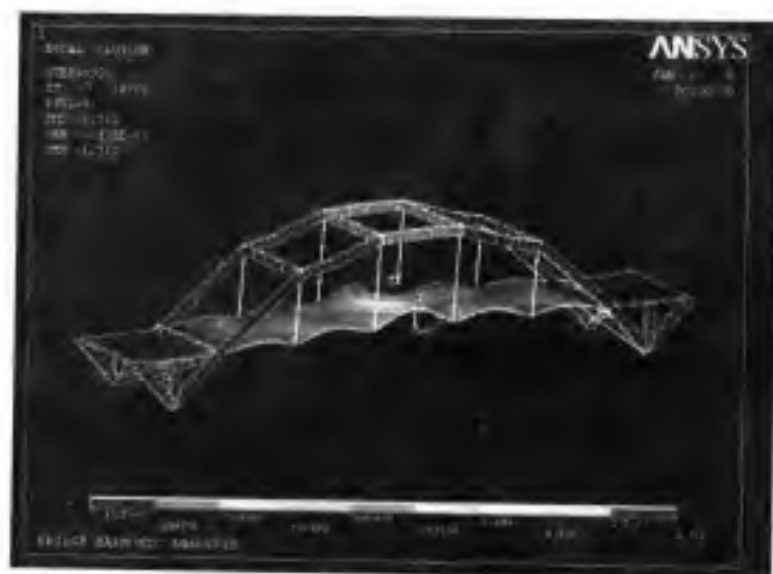


图 8-56 桥体结构位移变形—UY

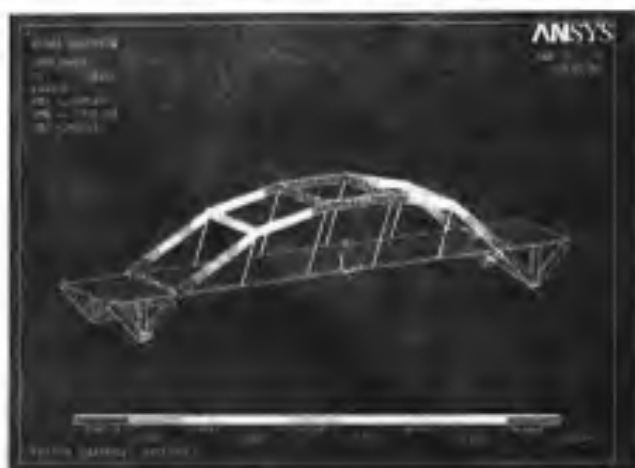


图 8-57 桥体结构位移变形—UZ

以上单点响应谱分析操作的完整 APDL 命令流如下：

! 计算模态解

```

/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,MODAL                        ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,10                      ! 模态分析选项设置
MXPAND,10                           ! 模态扩展数设置
SOLVE                                ! 求解
FINISH                               ! 退出求解器

```

! 谱分析求解

```

/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,SPECTRUM                    ! 设置分析类型为谱分析
SPOPT,SPRS,10,0                    ! 谱分析选项设置
SVTYP,3,1,                          ! 定义谱类型
SED,1,0,0,                          ! 定义激励方向
FREQ,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,0,0,0,0   ! 定义谱曲线
SV,0.8,0.5,0.6,0.9,1.2,           ! 定义谱曲线
SOLVE                                ! 求解
FINISH                               ! 退出求解器

```

! 合并模态

```

/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,SPECTRUM                    ! 设置分析类型为谱分析
SRSS,0.01,DISP                     ! 设置模态合并方法
SOLVE                                ! 求解
FINISH                               ! 退出求解器

```

! 后处理观察结果

```

/POST1                              ! 进入通用后处理器
/INPUT,'JOBNAME','MCOM'            ! 读入结果文件
PLNSOL,U,Y,0,1                     ! 显示位移变形
FINISH                               ! 退出求解器

```

## 第9章 利用 ANSYS 进行结构非线性分析

### 📖 本章导读

结构分析包括线性分析与非线性分析，前面各章中讨论的全部问题都是在线性结构的假定下进行的各种分析，即：结构的受力与变形之间、位移与应变之间均满足线性条件。但在实际工程中，几乎不存在具有理想线性行为的结构，为了能够对各类工程结构进行更加符合实际状况的仿真分析，就必须引入结构的非线性分析，其计算机实现手段就是基于结构的非线性有限元方法的非线性分析程序，ANSYS 中提供了非常强大的非线性分析功能。

本章将结合一系列分析实例，系统地介绍非线性结构分析的基本概念以及利用 ANSYS 进行结构非线性有限元分析的具体实现方法，本章涉及到如下的一些主题：

- ANSYS 结构非线性分析概述
- ANSYS 结构非线性分析的过程和选项
- 接触问题的分析方法
- 工程实例 1：油罐底效应的简化分析
- 工程实例 2：钢筋混凝土梁的弹塑性分析
- 工程实例 3：插销拔拉过程的接触分析

### 9.1 ANSYS 结构非线性分析概述

本节旨在介绍 ANSYS 结构非线性分析的基本概念、实现过程以及一些相关的求解与分析选项，以帮助读者建立对结构非线性分析的正确认识。

#### 9.1.1 结构非线性问题的三种类型

在第一篇各章所讨论的全部问题中，都采用了线性分析的两个基本假定，即：

- (1) 材料的本构关系（应力-应变关系）是线性的，即满足 Hooke 定律。
- (2) 应变与位移关系（几何方程）是线性的。

满足上述假定的问题才被看作线性问题进行分析，其余的问题都是非线性问题，只能进行非线性分析。

在工程实践中，有很多问题符合或者近似地符合上述假定，因此结构线性分析在工程问题的处理中得到了广泛的应用，但也有不少问题并不符合上述假定，如果仍作线性分析，就会造成很大的误差甚至得到不能接受的分析结果，这时就需要进行非线性分析。

下面通过一个简单问题来向读者说明三类非线性问题的基本概念。

(1) 图 9-1 所示的简单直杆拉伸问题中，若应变与杆端位移之间的关系是非线性的，则节点位移与节点力之间将不再成比例，图中右边的曲线就是这种关系的一个图示。这类由于应变位移非线性关系引起的有限元分析总刚度方程非线性的问题，被称为几何非线性问题。

(2) 在同一简单直杆拉伸问题中，若应力与应变的关系是非线性的，则节点位移与节

点力之间的线性比例关系也将不成立。这种由于材料本构关系的非线性引起的结构刚度的非线性问题，称为材料非线性问题。

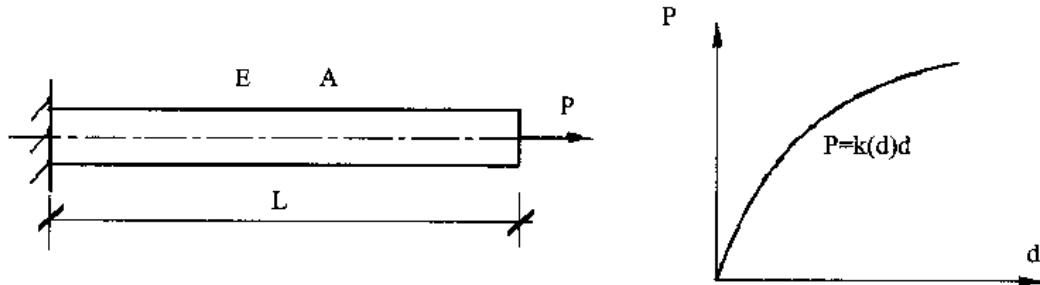


图 9-1 非线性问题概念图示

(3) 若直杆的右边放置一长为  $l$  的杆件 (图 9-2 所示), 且拉伸杆与右边杆件端部之间有微小的间隙  $\Delta$ , 水平作用力仍然作用于左边直杆的自由端, 则此种情况下直杆的杆端力与位移之间的关系为图 9-3 所示的形式。这种情况下, 虽然应变与位移之间、应力应变之间的关系都是线性的, 节点力与节点位移之间的关系在分段加载中也是线性的, 但是整个过程仍然表现为节点力与节点位移之间的非线性, 这种与结构所处的状态相关的非线性问题被称作状态非线性问题, 接触问题是最为常见的一类状态非线性问题。

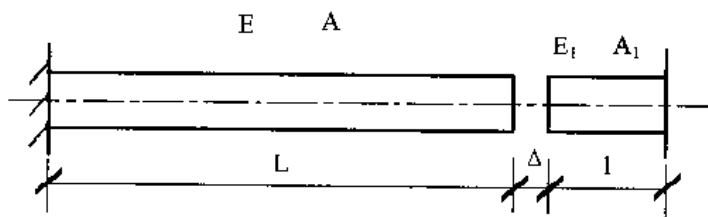


图 9-2 状态非线性问题简例

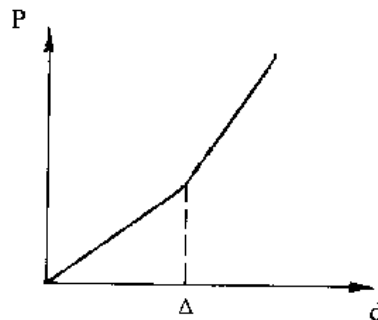


图 9-3 状态非线性载荷-位移关系

通过上述简单例子, 我们可以总结出各类非线性问题区别于线性问题的基本特点, 即刚度是与位移相关的变化量。

一般地, 非线性分析问题可以分为下面三大类:

➤ 几何非线性: 应变与位移关系的非线性。

对于几何非线性问题, 多指大位移情况下, 尽管位移很大, 但结构的应变依然不大, 即

大位移小应变问题，只表现为应变与位移之间的非线性关系，材料的应力-应变关系依然为线性的。也有大位移大应变的材料非线性问题，如超弹性材料（橡胶）的大变形。

➤ 材料非线性：材料的本构关系的非线性。

对于材料非线性问题，是指材料的本构关系（即应力-应变关系）为非线性。材料非线性问题中较常见的是结构弹塑性分析。

**注意：**如果位移-应变关系和应力-应变关系都是非线性的，则成为材料非线性和几何非线性的双重非线性的问题，比如大变形弹塑性问题就是这类问题。

➤ 状态非线性：状态变化（包括接触）引起的非线性。

许多实际结构常常表现出一种与状态相关的非线性行为，例如，悬索结构中的索可以处于松散的状态，也可能处于绷紧的状态；轴承套可能是接触的，也可能是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变可能与载荷直接有关（如在悬索问题中），也可能由某种外部原因引起（如引起冻土状态改变的热力学条件）。

### 9.1.2 非线性有限元问题的一般求解方法

对结构进行非线性有限元分析，实际上就是求解一组非线性代数方程。非线性代数方程的求解方法很多，为了使读者对非线性问题的数值计算有一个正确的认识，以更好地应用 ANSYS 的非线性分析功能，这里简单介绍如下三类数值方法。

#### 1. 直接迭代法

直接迭代法基于全量列式的求解过程，对于一般形式的非线性有限元方程（结构刚度矩阵与位移变化相关）：

$$[K(d)]\{d\} = \{P\}$$

首先，人为地设定一组位移向量  $\{d\}$  的初值  $\{d^0\}$ ，经改进的近似解为：

$$\{d^1\} = [K^0]^{-1}\{P\}$$

其中， $[K^0]$  为结构初始刚度矩阵，对单自由度系统退化为初始刚度系数，由图 9-7 所示的载荷位移曲线的初始斜率表示。整个迭代过程可由下式来表述：

$$\{d^n\} = [K^{n-1}]^{-1}\{P\}$$

取  $\{d^0\} = \{0\}$  时，对单自由度系统的迭代过程可以由图 9-4 形象地表示。

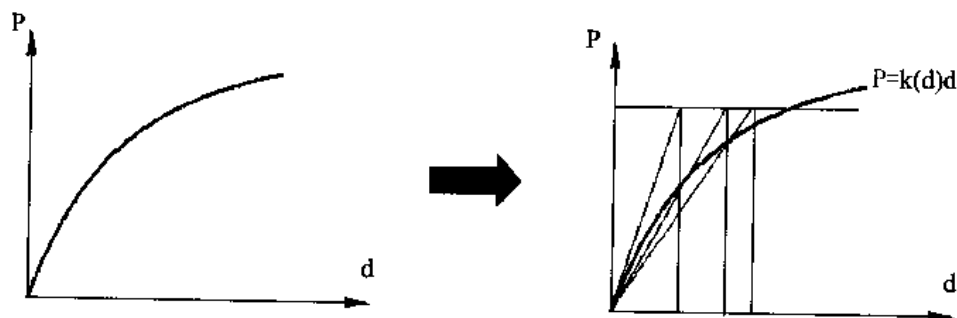


图 9-4 单自由度问题的零初值直接迭代法



直接迭代法计算简单，运算速度也比较快，可应用于一些轻度非线性的问题。但是这种解法中如果初值选择不当则可能造成计算的不收敛，读者可以参考数值计算相关书籍中对迭代方法的论述。

## 2. 简单增量法以及自校正增量法

增量形式的结构有限元列式，是将整个载荷-变形过程划分为一系列增量段，在每个增量段中，结构的载荷反应被近似看作是线性的。简单增量法的基本原理是，在每一级增量载荷后，按照所求得的状态变量值对结构的切线刚度矩阵进行一次修正，然后将这一状态视作平衡状态，继续作用下一级载荷增量，通过求解线性代数方程组求得位移增量，图 9-5 描述了简单增量法的求解过程。

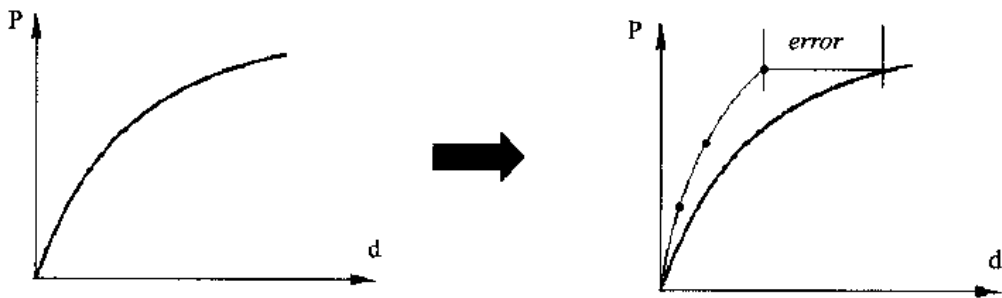


图 9-5 简单增量法

几何非线性问题的有限元分析最初多采用简单增量法进行，尽管这种求解方法对每一级载荷增量作用下的位移增量计算速度很快，但是由于每一级载荷作用前结构，并未精确地到达平衡位置，因此求得的解答会随着增量过程的继续而越来越偏离真实的载荷-变形过程。为保证计算精度，要求将增量（载荷步长）取得相当小。此外，为了评价解的精度，一般要求对同一问题在进一步较小的增量作用下再次求解，通过两次解的比较来判定结果是否收敛，这需要耗费大量的时间。

由于简单增量法忽略了各级载荷增量作用前结构内外力实际存在的不平衡，因此造成较大的偏移。最为理想的方法是将不平衡力作为一种修正载荷加到下一级载荷增量上，这样的方法称为带有一阶自校正的增量法，这一方法在求解塑性问题中得到广泛的应用。

## 3. Newton-Raphson 方法

如果希望得到较为精确的载荷-变形过程，则可以对每一级增量过程进行多次校正，以消除不平衡力，使得计算结果满足给定的精度要求，这就是 Newton-Raphson 方法，简称为 N-R 方法。图 9-6 为这一方法的示意图。

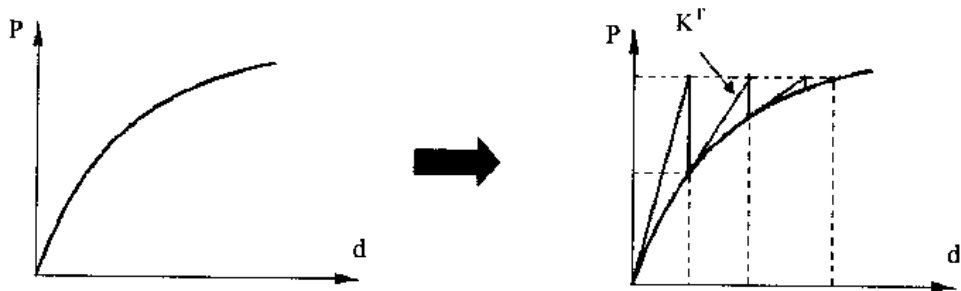


图 9-6 N-R 方法示意图

N-R 方法可以用于几何非线性程度较高的情况，这一方法所得的计算结果可信度较高，当然计算的时间也更长。为了避免在同一载荷增量的多次迭代中反复重新形成切线刚度矩阵，提出修正的 N-R 方法，即在同一级载荷增量的多次迭代中始终采用本级增量最初的刚度矩阵，这样计算时间大为缩短。此外，采用 N-R 方法进行求解时，可以结合松弛技术以加快计算速度。

ANSYS 程序通过使用 N-R 平衡迭代，迫使在每一个载荷增量结束时，在某个容限范围内求解能够达到平衡收敛。如果不满足收敛准则，重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新的解，持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性，如自适应下降、线性搜索、自动载荷步以及二分法等，可以在计算中激活相关选项来增强问题的收敛性。对某些不稳定系统的非线性静态分析，仅使用 N-R 方法，切线刚度矩阵可能变为降秩矩阵（奇异阵），导致严重的收敛问题。对这种情况，ANSYS 程序提供了另外一种非线性迭代方法，即弧长方法，来达到稳定的收敛。弧长方法的基本原理是：N-R 平衡迭代沿一段弧收敛，从而即使当切线刚度矩阵的斜率为零或负值时，也可以阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 9-7 中。

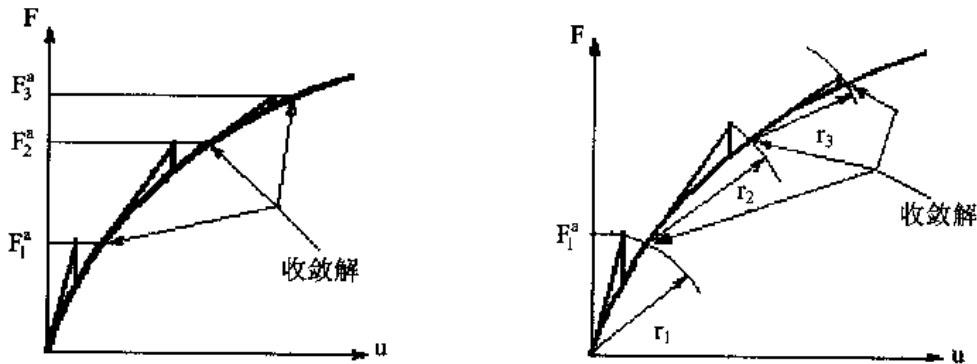


图 9-7 传统 N-R 方法与弧长法的比较

在本节的最后，对 ANSYS 非线性问题的求解组织级别进行简单的介绍：

在 ANSYS 求解器中，非线性求解分为三个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。最顶层的级别由在一定“时间”范围内的载荷步组成。对于静态分析，在载荷步内假定载荷是线性变化的。在每一个载荷步内，为了获得更高的求解精度，采用增量逐步加载的方式，即把载荷步分为一系列的子步或时间步。在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。图 9-8 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷-时间历程。

小的时间步（子步）通常可以使计算取得较好的精度，但计算花费的时间也将大幅增加。当使用多个子步时，需要考虑精度和计算成本之间的平衡。下一节中将会介绍到如下两种子步设置方案：

- ◆ 指定子步数或时间步长。

可以通过指定实际的子步数，也可以通过指定时间步长来控制子步数。

- ◆ 程序自动调整时间步长。

采用使用自动时间分步，程序将根据需要来调整时间步长，以便获得计算精度和计算成本之间的良好平衡。

ANSYS 程序提供了一种对收敛失败自动矫正步长的方法，即时间分步的二分法。如果在某一子步的平衡迭代收敛失败，二分法将把时间步长分成两半，然后从最后收敛的子步重启动

分析, 对于已经二分的时间步, 如果再次收敛失败, 程序将再次分割时间步长然后重启动, 持续这一过程直到获得收敛解或到达人为指定的最小时间步长。

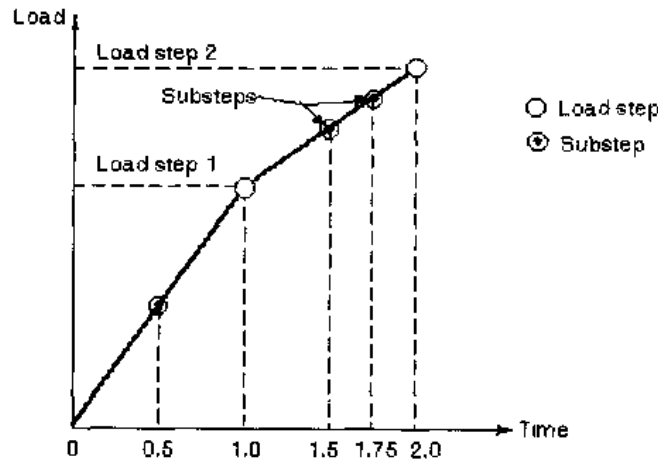


图 9-8 载荷步、子步以及“时间”

注意: 对于静力问题, “时间”并无实际意义, 但是可以标识加载的先后次序。

## 9.2 ANSYS 结构非线性分析的过程与选项

与结构线性问题的分析相比, 非线性问题的分析要复杂得多, 但它们的基本操作过程非常相似, 只不过在非线性分析的处理过程中, 需要设置与非线性求解相关的各种参数。

对于一般的非线性静态分析, 其处理流程主要由如下三个步骤组成。

### 1. 建立分析模型

这一步对线性 and 非线性分析都是必需的, 对于非线性分析, 非线性材料模型的参数必需符合实际情况。如果模型中包含大应变效应, 应力-应变数据必须依据真实应力和真实 (或对数) 应变表示。

### 2. 加载以及求解

非线性问题的加载方式与线性问题完全相同。需要注意的一点是, 在大变形问题中, 惯性力 (加速度) 和集中点载荷的作用方向会保持它们最初的方向, 而面力的作用方向将跟随单元表面的法向而变化, 如图 9-9 所示。

在程序开始对非线性问题进行求解之前, 需要对一系列求解以及输出选项进行设置。一个典型的非线性求解过程通常包括如下的一些步骤:

(1) 进入求解器并完成加载。

选择 GUI 菜单项 **Main Menu>Solution**, 或者直接输入命令 `/SOLU` 进入求解器, 然后对结构进行加载 (加载过程也可在前处理器中完成)。

(2) 选择分析类型。

通过菜单项 **Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type>New Analysis** 来选择分析的类型, 如静力分析、瞬态分析等。

(3) 设定一般分析选项。

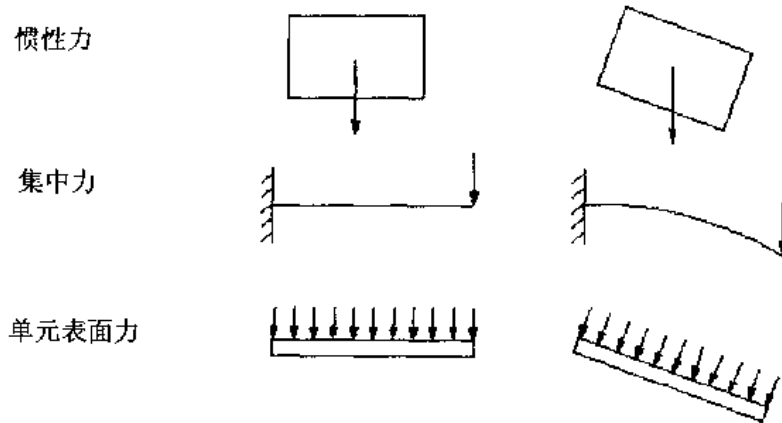


图 9-9 变形前后载荷方向

对于静态分析，通过菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，在弹出的 Static or Steady-State Analysis 对话框中设置如下的一些选项：

- 1) 大变形或大应变选项 (NLGEOM)：需要时使用。
- 2) 应力刚化效应选项 (SSTIF)：需要时使用。
- 3) 牛顿-拉普森选项 (NROPT)：仅在非线性分析中使用。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切矩阵，有如下的选项：

- ◇ 程序选择 (NROPT, ANTO)：程序基于模型中存在的非线性种类选择用选项中的一个。
- ◇ 完全 N-R 选项 (NROPT, FNLL)：程序使用完全的牛顿-拉普森处理方法，在这种处理方法中每进行一次平衡迭代修改刚度矩阵一次。
- ◇ 修正的 N-R 选项 (NROPT, MODI)：程序使用修正的牛顿-拉普森方法，在这种方法中切线刚度矩阵在每一子步中都被修正，而在一个子步的平衡迭代中间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。
- ◇ 初始刚度 (NROPT, INIT)：程序在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵这一选项比完全选项似乎更不易发散，但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。这个选项不适用于大变形分析，而且自适应下降是不可用的。

4) 方程求解器。根据分析需要，选择合适的求解器，也可由程序自动选择 (Program Chosen)。

(4) 指定载荷步选项。

通过菜单 Main Menu>Solution>Load Step Opts>下面的各菜单项目，设置相关的载荷步选项以及求解步长选项：

1) 时间步选项设置。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time - Time Step，弹出 Time and Time-Step Options 对话框，如图 9-10 所示，在 [TIME] 域中填写载荷步结束时间 (求解时间)。

注意：ANSYS 程序通过每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步，在没有指定 TIME 值时，程序将依据缺省自动地对每一个载荷步按 1.0 增加 TIME 值 (在第一个载荷步的

末端以 TIME=1.0 开始)。

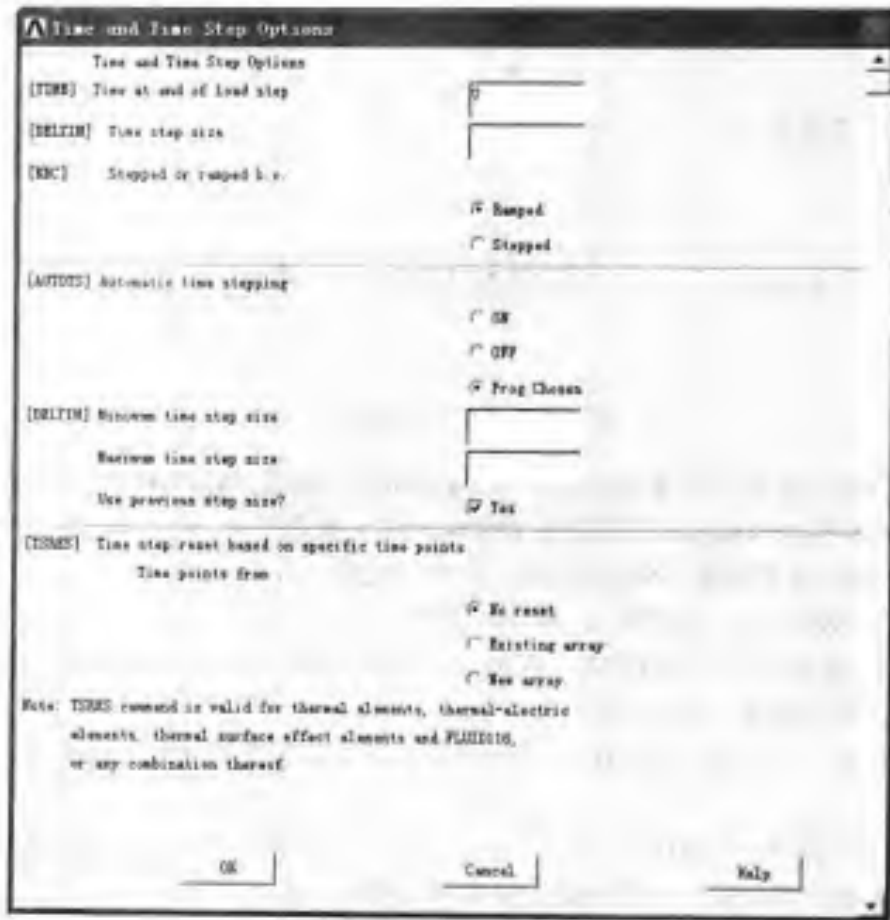


图 9-10 时间步选项设置

在 Time and Time-Step Options 对话框的[DELTIM]域中,填写用于当前荷载步的时间步长,可以通过[KBC]选项来指定是渐进式加载(Ramped loading)还是阶跃式加载(Stepped loading),如图 9-11 所示,缺省为渐进式。

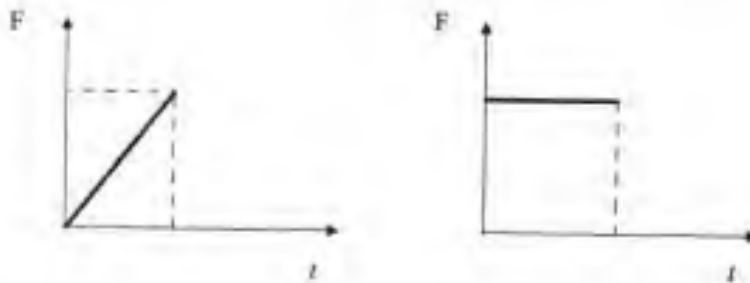


图 9-11 加载的形式

在 Time and Time-Step Options 对话框的[AUTOTS]选项中,可以选择是否打开自动时间步长选项(即:二分时间步长算法),也可选择 Program Chosen 项,由程序决定是否采用这一算法。如果采用了二分法或者 Program Chosen 选项,则可以在[DELTIM]命令的 Min/Max Time

Step 域中填写分析过程中的最大以及最小时间步长，以指定分析中时间步长的变化范围。

在前面一节中我们曾经讲到子步的概念，实际上对于静态分析，时间步和子步两个术语基本上是等效的，其作用都是使得 ANSYS 程序可以逐渐地施加给定的载荷，以得到精确的解。DELTIM 命令定义的时间步长和下面的 NSUBST 命令定义的子步设置都获得同样的效果，即设定载荷步的起始步长，对于采用自动时间步长的情况，可以设置分析过程的步长变化范围（最小步长以及最大步长）。这就是关于 DELTIM 命令和 NSUBST 命令的共同点。关于 DELTIM 命令和 NSUBST 命令之间的具体区别，将在下面介绍。

### 2) 子步选项设置。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Substps，弹出 Time and Substep Options 对话框，如图 9-12 所示，在该对话框中同样可以设置载荷步结束时间、加载的方式（渐进式或是阶越式）、是否打开自动时间步长等选项。此外，可以设置用于该载荷步分析的子步数、打开自动步长情况下的最大最小子步数等参数。

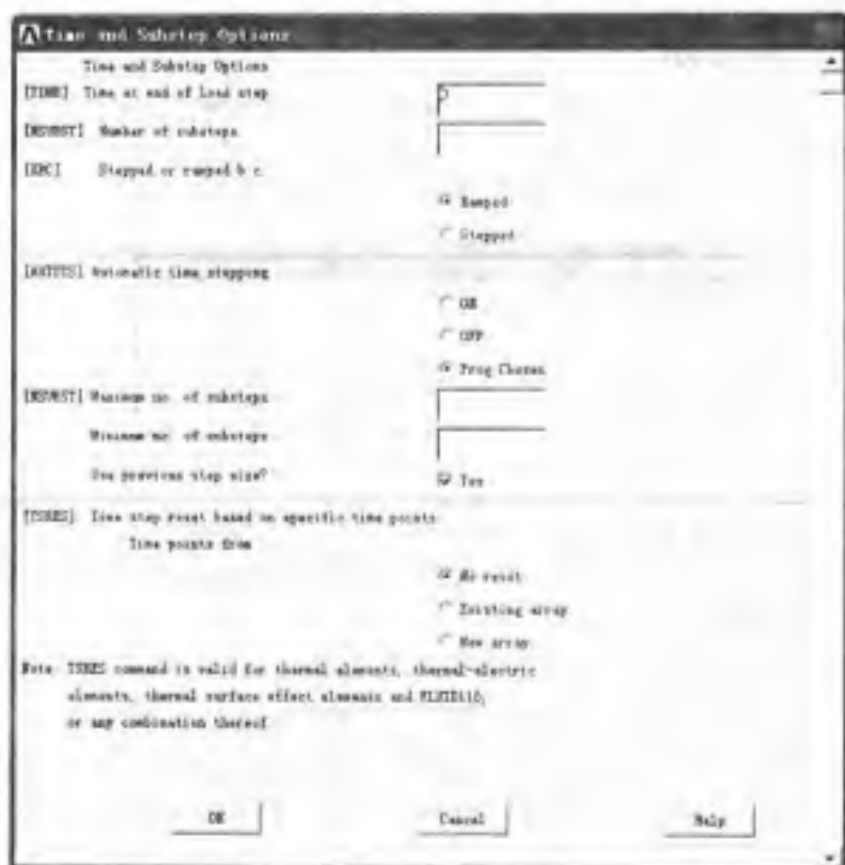


图 9-12 子步选项设置

下面，简单说明一下时间步与子步的主要区别。

NSUBST 命令定义在一个载荷步内表示将被使用的子步的数目，而 DELTIM 明确地定义时间步长。如果自动时间步长是关闭的，那么起始定义的子步长将适用于整个载荷步。程序的缺省设置是每一个载荷步有一个子步。

### 3) 非线性选项。

通过菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>下面的一系列菜单项，对一些

在非线性分析中可能用到的收敛准则以及平衡迭代的次数等选项进行相关的设置。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Convergence Crit. 来定义计算过程的收敛准则。收敛准则可以是力准则，也可以是位移准则。用户可以指定误差的绝对值 (VALUE)，也可以是相对误差 (TOLER)，程序中相对误差 TOLER 的缺省值是 0.001。

ANSYS 程序提供三种不同的收敛规范规则用于收敛检查：

- ◇ 无穷范数：计算模型中每一个自由度方向重复单自由度的计算结果来进行收敛检查。
- ◇ L1 范数：核查所有自由度方向的不平衡力（力矩）的绝对值进行收敛检查。
- ◇ L2 范数：核查所有自由度方向上的不平衡力（或力矩）的平方和的平方根进行收敛检查。

下面给出一个双收敛准则设置的命令，如果用不平衡力（在每一个 DOF 处单独检查）小于或等于  $5000 \times 0.0005$ （也就是 2.5），且如果位移的改变（以平方和的平方根检查）小于或等于  $10 \times 0.001$ （也就是 0.01），子步将认为是收敛的，收敛准则定义如下：

```
CNVTOL, F, 5000, 0.005, 0
```

```
CNVTOL, U, 10, 0.001, 2
```

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Equilibrium Iter, 在弹出的 Equilibrium Iterations 对话框中可以设置子步平衡迭代的最大次数，如图 9-13 所示。使用这个选项可以对每一个子步中进行的最大平衡迭代次数进行限制（缺省=25）。

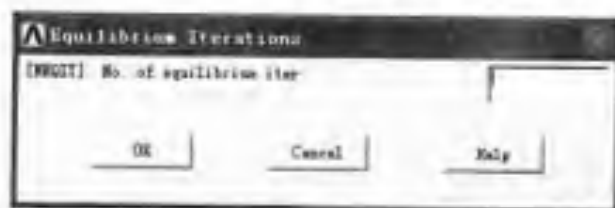


图 9-13 最大平衡迭代次数的设置

定义了收敛准则和平衡迭代次数后，ANSYS 计算程序将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则，或达到允许的平衡迭代的最大次数 (NEQIT)。使用严格的收敛准则将提高计算结果的精度，但以更多次的平衡迭代为代价。

如果在平衡迭代次数之内不能满足收敛准则，且如果自动步长是打开的 (AUTOTS)，分析将尝试使用二分法。如果不采用二分法，那么分析将或者终止，或者进行下一个载荷步。通过选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Criteria to Stop. 在 Criteria to stop an analysis 对话框中，对求解终止选项进行设置，可以选择各种终止标准，如设置 CPU 时间限制。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Arc-Length Opts. 在弹出的 Arc-Length Options 对话框中，可以打开弧长法的开关。当结构的载荷-位移曲线的斜率将为 0 或负时，需要借助弧长方法来得到稳定的数值解答。

(5) 输出控制选项的设置。

可以通过菜单目录 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>中的相关菜单项目，对程序的计算输出选项进行设置。输出控制选项包括下面的一些：

- 1) 打印输出 (OUTPR)。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>Solu Printout, 在弹出的 Solution Printout Controls 对话框中, 设置在计算输出文件 Jobname.out 中包含的结果数据项目以及输出的频率间隔, 其对应的操作命令为 OUTPR。

## 2) 结果文件输出 (OUTRES)。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File, 在弹出的 Controls for Database and Results File Writing 对话框中, 设置结果文件 Jobname.rst 中数据的输出项目以及频率间隔, 如图 9-14 所示, 这些输出设置将直接影响到后处理中可用的子步结果数据。如需输出全部的结果, 则在对话框的 Item 下拉选项中选择 All items, 输出频率可以选择每隔多少子步 (Every Nth substep) 或者所有子步 (Every substep) 等。其对应的操作命令为 OUTRES。



图 9-14 设置结果文件的输出控制选项

缺省情况下至多只能有 1000 个子步的数据可以被写入结果文件, 如果超过了这个数目, 程序将由于错误而终止。使用命令 /CONFIG, NRES 可以增加这个界限。

**注意:** 如果需要定义多个载荷步, 对每个其余的载荷步重复相关的步骤。

## (6) 开始求解。

选择菜单项 GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

## (7) 退出求解器。

求解结束后, 通过菜单项 Main Menu>Finish, 退出求解器。

## 3. 结果后处理及分析

对于非线性静态分析, 可供后处理程序显示的结果包括位移、应力、应变以及反作用力等。可用通用后处理器 POST1 或者时间历程后处理器 POST26 来考察这些结果。具体的操作过程这里不准备展开叙述, 请读者参考后面的实例操作。

需要注意的一点是, 用 POST1 一次仅可以读取一个子步的计算结果, 且来自那个子步的结果应当已被写入 Jobname.rst。载荷步选项命令 OUTRES 控制哪些子步的结果被存储到



Jobname.rst。

注意：在大变形分析中不修正结点坐标系方向，因此计算出的位移在最初的方向上输出。

## 9.3 接触问题的分析方法

本节向读者介绍接触问题分析的相关基本概念，以及 ANSYS 提供的接触分析功能和进行接触分析的一般方法。

### 9.3.1 接触问题概述

接触问题是常见的一类工程问题，弹性地基与地基梁及基础之间的作用、机械系统中齿轮面的相互咬合、硬度计与测量试件之间的作用等等，都涉及到接触问题的分析。

实际的接触过程在力学中可能会涉及到多种非线性因素，除大变形接触问题引起的材料非线性和几何非线性以外，还有接触界面间摩擦条件的非线性等。

接触问题具有如下的非线性特征：

(1) 接触区域的范围、接触物体的相互位置以及接触的具体状态都是未知的，比如：物体表面之间是接触或分开可能是突然变化的，在事先无法得知；由于在加载过程中材料的变形，点接触可能会发展为面接触，这都体现出接触问题的高度复杂性。在计算过程中，需要通过材料参数、载荷、边界条件等因素，进行综合分析后才能判断或确定当前的接触状态。

(2) 接触条件往往具有非线性特征。接触条件包括：①接触物体之间不可相互侵入；②接触界面间法向作用只能为压力；③切向接触的摩擦条件。这些条件的共同特征是具有高度非线性的单边性不等式约束。

接触界面特征的未知性以及接触条件的非线性特点，使得接触分析的过程中必须经常进行接触界面的搜索和判断的操作环节，这使得问题的收敛变得不那么容易。接触过程的高度非线性需要研究比求解其他非线性问题更为有效的分析方案和方法。

接触问题分为两种基本类型：

1) 刚体和柔性体之间的接触问题。

接触面的一个或多个被当作刚体（与和它接触的变形体相比，有大得多的刚度），一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，问题可以被假定为刚体—柔体的接触。许多金属成形问题归为此类接触。

2) 柔性体和柔性体之间的接触问题。

柔性体和柔性体之间的接触问题是更带有普遍性的接触问题类型。在这种问题中，接触的物体都是可变形体。

### 9.3.2 ANSYS 的接触分析功能

ANSYS 程序具有强大的接触分析能力，提供了多种类型的接触单元来解决各种不同类型的接触问题。另外，其显式分析模块 ANSYS/LS-DYNA 中整合了著名的显式求解器 LS-DYNA，其中也提供了功能强大的动态接触分析功能。

传统的 ANSYS 隐式求解器支持如下的三种接触方式：

### 1. 点-点接触

ANSYS 提供了用于二维问题分析的点对点接触单元 CONTACT12、用于三维问题的点对点接触单元 CONTACT52 和 CONTACT178，这些点-点接触单元主要用于模拟点对点的接触行为。为了使用点对点的接触单元，需要预先知道接触的具体位置，这类单元只能适用于接触面之间有较小的相对滑动的情况。如果两个物体面上的结点一一对应，相对滑动可忽略不计，两个面挠度（转动）保持小量，那么可以用点-点的接触单元来求解面-面的接触问题，端部与固定面有间隙的杆的热膨胀问题是一个用点对点的接触单元来模拟面对面的接触问题的典型例子，读者可以参考 ANSYS 的验证算例手册 ANSYS Verification Manual 的例题 VM27。

### 2. 点-面接触

点-面接触单元主要用于给点、面之间的接触行为的分析，例如两根梁的相互接触。

如果通过一组结点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点-面的接触单元来模拟面-面接触问题，面可以是刚性体也可以是柔性体，这类接触问题的一个典型例子是插头到插座的接触过程。使用点-面接触单元，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格，且允许有大的变形和大的相对滑动。

ANSYS 提供了 Contact26，Contact48 以及 Contact49 等点-面的接触单元。其中 Contact26 用来模拟柔性点-刚性面的接触，对有不连续的刚性面的问题，推荐采用 Contact48 单元，该单元使用伪单元算法，可以提供较好的建模能力。

### 3. 面-面接触

ANSYS 提供了刚体-柔体之间的面-面的接触算法，刚性面被当作目标面，分别用 Target169 和 Target170 来模拟 2-D 和 3-D 的目标面，柔性体的表面被当作接触面，可以用 Contal171，Contal172，Contal173，Contal174 来模拟。一个目标单元和一个接触单元叫作一个接触对，如：可使用 Target169 和 Contal171 或 Contal172 来形成 2-D 接触对，使用 Target170 和 Contal173 或 Contal174 来定义 3-D 接触对。程序通过一个共享的实常数号来识别接触对，即目标单元和接触单元采用相同的实常数号。

## 9.3.3 ANSYS 接触分析的一般过程

接触问题是一种高度非线性行为，需要耗费较大的计算机资源，为了完成有效的计算，理解问题的特性和建立合理的接触分析模型是非常关键的。

以面-面的接触分析为例，接触分析的一般过程包括如下的一些环节：

- (1) 建立几何模型并划分网格。
- (2) 识别接触对。
- (3) 定义刚性目标面和柔性接触面。
- (4) 设置接触参数（接触单元实常数及单元选项）。
- (5) 控制目标面的运动。
- (6) 定义边界条件。
- (7) 分析选项设置及求解。
- (8) 结果后处理。

本章的最后一节给出了一个接触分析的实例，读者可以结合实例操作理解以上各步骤。

## 9.4 工程实例 1: 油罐底效应的简化分析

本节以油罐效应的简化分析为例,向读者介绍在 ANSYS 中分析几何非线性问题的具体方法。问题简单描述如下:

在长期恒载作用下或在搬运过程中,油罐底经常出现突然从一侧鼓向另一侧的现象,这一现象被称为油罐效应。类似的现象在电灯开关等产品的制造中也得到应用。下面将采用桁架杆失稳模型对这一现象进行简化的分析,如图 9-15 所示。

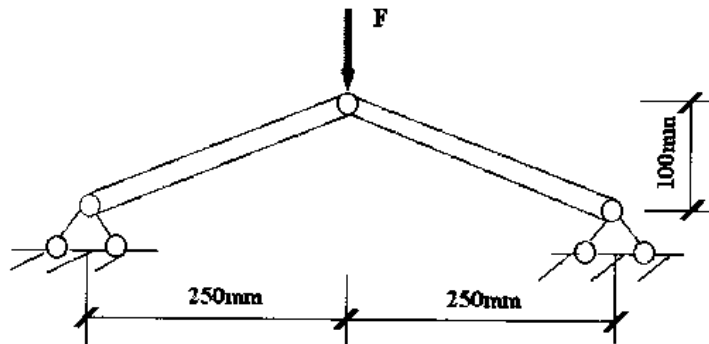


图 9-15 油罐效应的简化分析模型

两杆件的材料参数取为:弹性模量  $2.07e11\text{Pa}$ ,泊松比 0.3,杆件横截面积  $1\text{cm}^2$ ,相关几何参数已经标在图中。

按照操作的先后顺序,对建模和分析的步骤进行介绍:

### 第 1 步: 分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后,通过菜单项 `Utility Menu>File>Change Jobname`,指定分析的工作名称为 OILCAN;

通过菜单项 `Utility Menu>File>Change Title`,指定图形显示区域的标题为 OILCAN EFFECT。

### 第 2 步: 进入前处理器

设置完成后,点取菜单项 `Main Menu>Preprocessor` 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

### 第 3 步: 定义单元类型

选择菜单项 `Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete`,在弹出的 `Element Types` 对话框中,单击 `ADD...` 按钮,出现 `Library of Element Types` 对话框,如图 9-16 所示。

对于本问题,拟采用三维杆单元 LINK8,因此在窗口左侧选择 `Structural Link`,右侧选择 `3D spar 8`,单击 `OK` 退出。

### 第 4 步: 定义杆件截面积

为杆单元指定截面积,选择菜单项 `Main Menu>Preprocessor>Real Constant`,在 `Real Constants` 对话框中,单击 `Add...` 按钮,在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中,接受默认值,直接单击 `OK`,最后在图 9-17 所示的对话框中输入杆件单元的面积  $0.0001$  (单

位:  $\text{m}^2$ )。定义完成后,单击 OK 按钮退出该对话框。

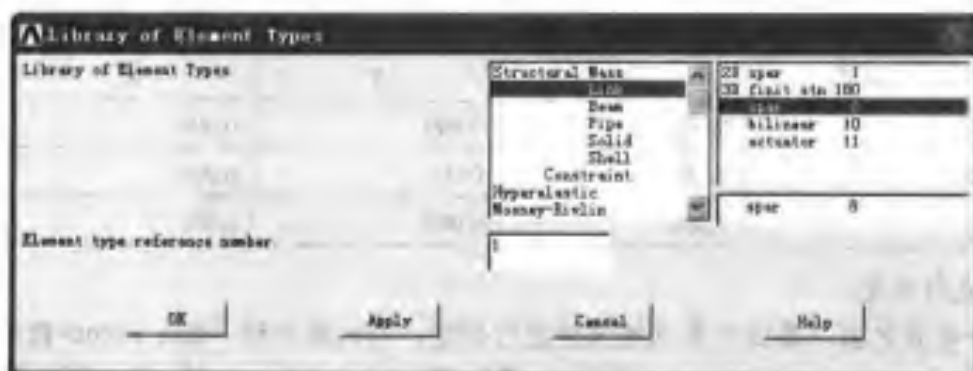


图 9-16 定义单元类型

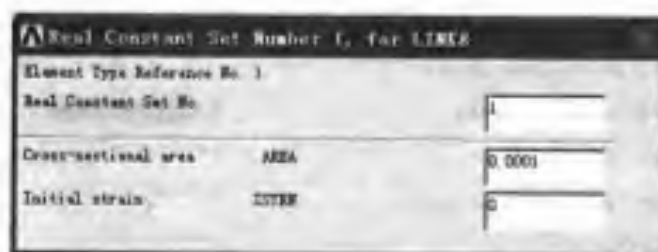


图 9-17 定义实参数

#### 第 5 步: 定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models, 将出现 Define Material Model Behavior 对话框, 在窗口的右侧, 依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 在出现的对话框中输入材料弹性模量  $2.07\text{e}11$  以及泊松比 0.3。单击 OK 按钮, 返回到 Define Material Model Behavior 窗口, 关闭之, 返回图形用户界面。



图 9-18 定义材料参数

#### 第 6 步: 建立分析模型

由于本问题的单元数很少, 因此采用直接法建立有限元结构分析模型。具体建模操作如下:

##### 1. 建立节点

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS, 定义模型的

三个节点，其编号以及坐标如表 9-1 所示。

表 9-1 节点的编号与坐标

节点 ID	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	0.250	0.100	0.000
3	0.500	0.000	0.000

## 2. 建立杆单元

建立杆单元之前，需要对单元的属性进行指定，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes，弹出 Element Attributes 对话框，指定单元类型、材料类型以及实常数类型，如图 9-19 所示，单击 OK 按钮退出。

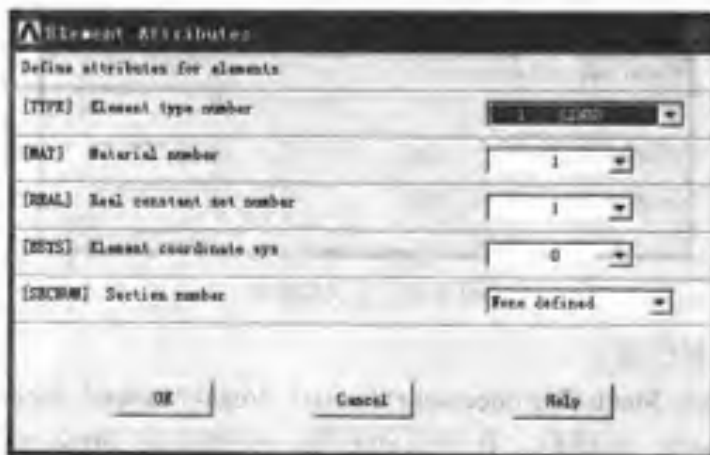


图 9-19 设置单元属性

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，弹出对象拾取框，用鼠标在屏幕上依次点选节点 1 和 2，点 Apply 按钮，再用鼠标在屏幕上点选节点 2 和 3，单击 OK 按钮，即可形成杆件单元。

### 第 7 步：施加约束

节点 1、3 为铰支，需对三向位移进行约束，节点 2 出平面的位移也需要约束。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement > On Nodes，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对象拾取框：

用鼠标在图形显示区域点选节点 1 和 3，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 All DOF，单击 OK 按钮。

用鼠标在图形显示区域点选节点 2，单击 Apply 按钮，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 UZ，单击 OK 按钮。

### 第 8 步：施加位移负载

用鼠标在图形显示区域再次点选节点 2，单击 OK 按钮，弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，在 DOFs to be constrained 中选中 UY，在 Displacement value 文本框中输入 -0.2，单击 OK 按钮，如图 9-20 所示。

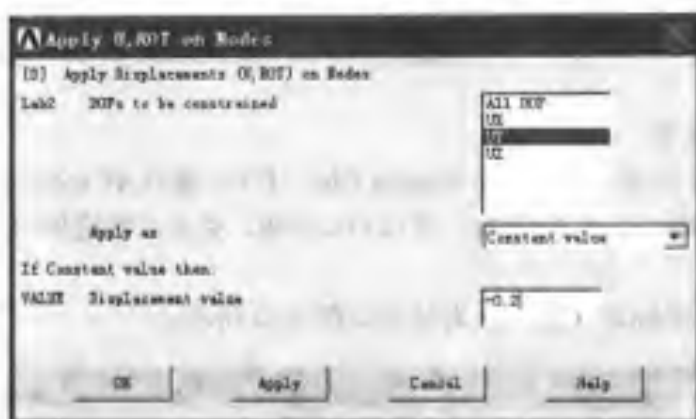


图 9-20 施加强迫位移负载

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape, 弹出 Size and Shape 对话框中, 选中/ESHape 复选框, 单击 OK 按钮, 图形显示区域中将出现如图 9-21 所示的结构分析模型。

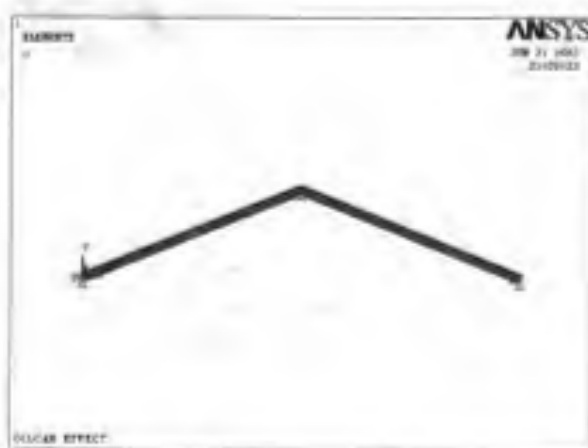


图 9-21 施加位移约束以及载荷后的模型

至此, 已经完成了建模的全部操作, 点 Main Menu>Finish 菜单项, 退出前处理器。

#### 第 9 步: 进入求解器

点 Main Menu>Solution 菜单项, 进入求解器。

#### 第 10 步: 求解选项设置

在求解之前, 需要对相关的选项进行设置。

##### 1. 设定分析类型

首先通过菜单项 Main Menu>Solution> Analysis Type>New Analysis, 在 New Analysis 对话框中选择分析类型为 Static, 单击 OK 按钮退出。

##### 2. 打开大变形选项

通过菜单项 Main Menu>Solution> Analysis Type>Sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 在 Basic 标签的 Analysis Options 一栏的下拉列表中, 选择 Large Displacement Static。

##### 3. 设置载荷步结束时间和子步数

在上述 Solution Controls 对话框 Basic 标签的 Time Control 一栏中, Time at end of load step

文本框中输入 1.0。选中 Number of Substeps 复选框，在 Number of Substeps 文本框中输入子步数为 100。

#### 4 结果文件输出设置

在上述 Basic 标签的 Write Items to Results File 一栏中，选中 All solution items，在 Frequency 下拉列表中，选择 Write every Substep，单击 OK 按钮，完成求解选项的设置，返回图形用户界面。

完成上述设置的 Solution Controls 对话框如图 9-22 所示。

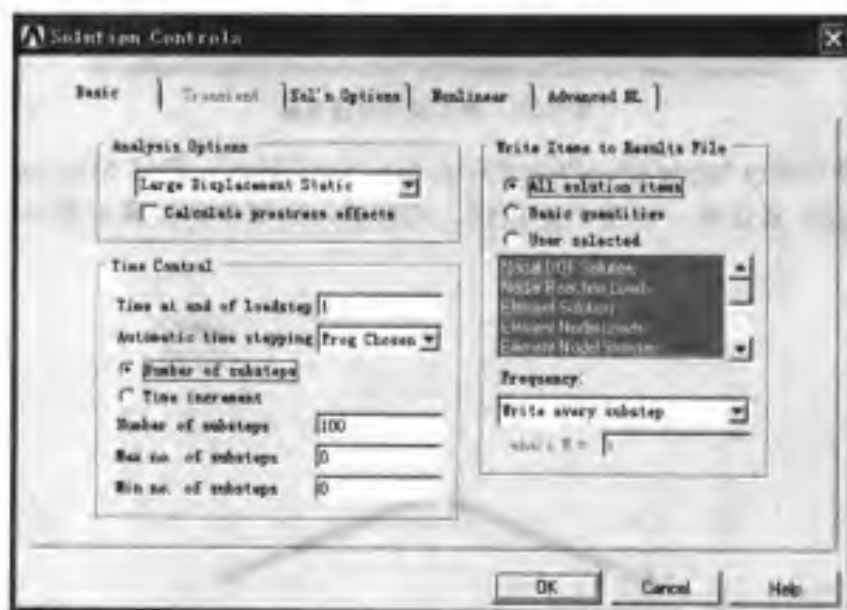


图 9-22 求解选项设置

#### 第 11 步：求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，对问题进行求解。在求解结束后，弹出 Solution is done! 信息提示框，关闭之。

点 Main Menu>Finish 菜单项，退出求解器。

#### 第 12 步：进入通用后处理器读入结果文件

通过菜单项 Main Menu>General Postproc，进入通用后处理器。

在对计算结果进行后处理之前，需首先通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，将计算结果读入通用后处理器。

#### 第 13 步：动画观察变形过程

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Animate Over Results，弹出 Animate Over Results 对话框，在最下边的 Contour Data for Animation 一栏的左侧项目列表中选择 DOF Solution，右侧项目列表中选择 Deformed Shape，单击 OK 按钮，图形显示区域将动画播放整个变形过程。

图 9-23 所示为是杆件由初始位置跳跃至对称位置的变形过程的系列中间图像，图 (a) 为失稳的临界位置，图 (b)、图 (c) 和图 (d) 分别为结构逐步向对称位置跳跃的过程。

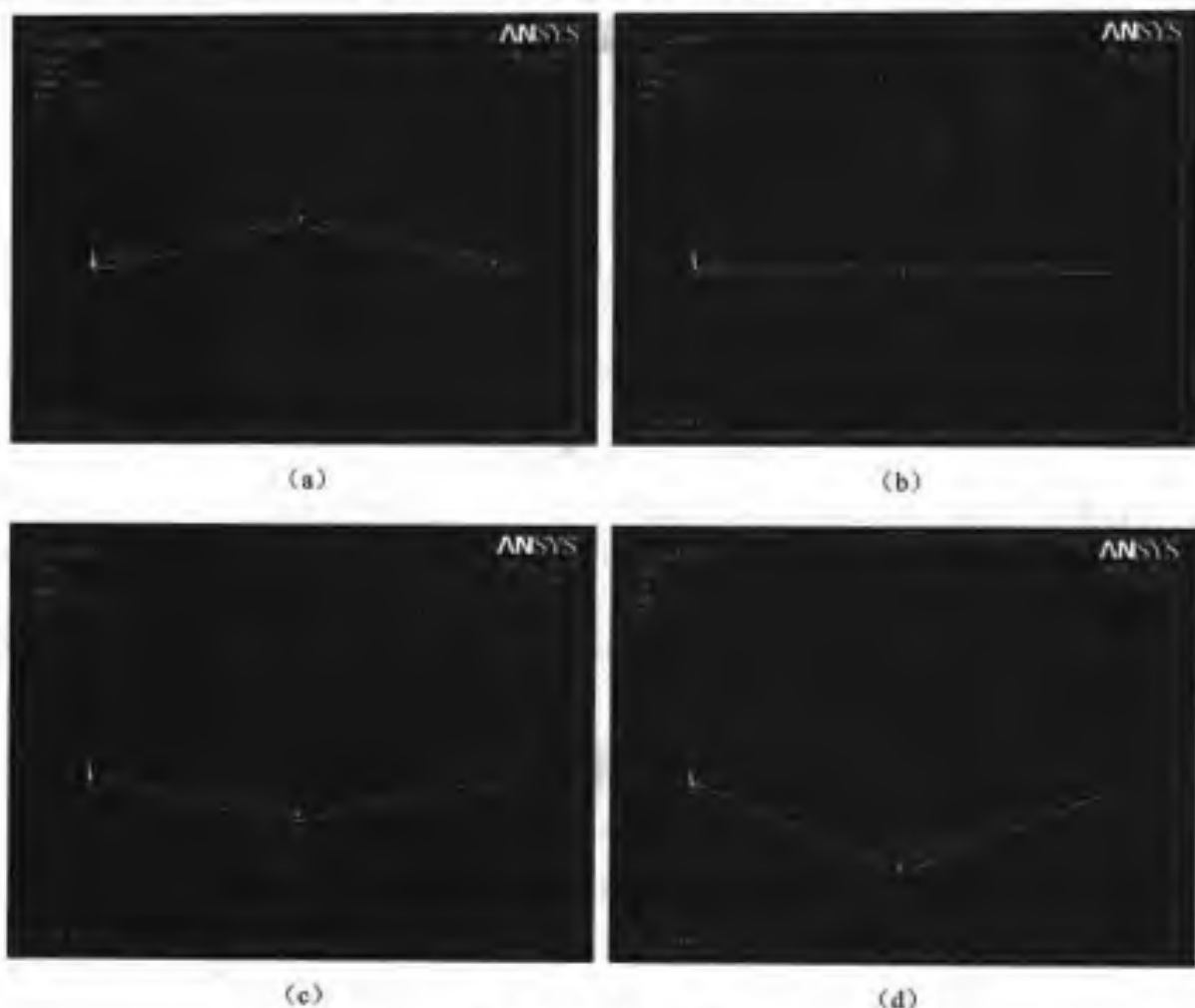


图 9-23 结构变形过程

读者可以在通用后处理器中对结构在变形过程中所关心的各种量（应力、应变等）进行等值线图形以及动画显示，操作结束后，通过菜单项 Main Menu>Finish，退出通用后处理器 POST1。

第 14 步：进入时间历程后处理器并定义后处理变量

通过菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro 进入时间历程后处理器。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables，在弹出的 Defined Time-History Variables 对话框中，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选中“Nodal DOF Result”，单击 OK 按钮。随后，屏幕出现 Define Nodal Data 拾取框。在图形显示窗口，选择节点 2，然后单击 OK 按钮。出现 Define Nodal Data 对话框，图 9-24 所示，其中，变量序号以及节点号都设为 2（也是程序的缺省设置，只需加以确认），变量名称取为 DISPLACEMENT，项目选 Translation UY。设置完成后，单击 OK 按钮退出，返回 Defined Time-History Variables 列表。再次按下“Defined Time-History Variables”对话框的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选中 Reaction forces，单击 OK 按钮。随后，屏幕出现 Define Nodal Data 拾取框。在图形显示窗口，选择节点 1（梁的固定端节点），然后单击 OK 按钮。出现 Define Nodal Data 对话框，确认变量序号为 3 节点号为 1，变量名称取为 F，项目选 Struct force FY。





图 9-24 定义时间历程变量

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables, 在弹出的 Defined Time-History Variables 对话框中, 单击 Add 按钮, 出现 Add Time-History Variables 对话框, 选中 Reaction forces, 单击 OK 按钮。

设置完成后, 单击 OK 按钮退出, 返回 Defined Time-History Variables 列表中, 已可以看到刚才定义的两个时间历程变量, 如图 9-25 所示。

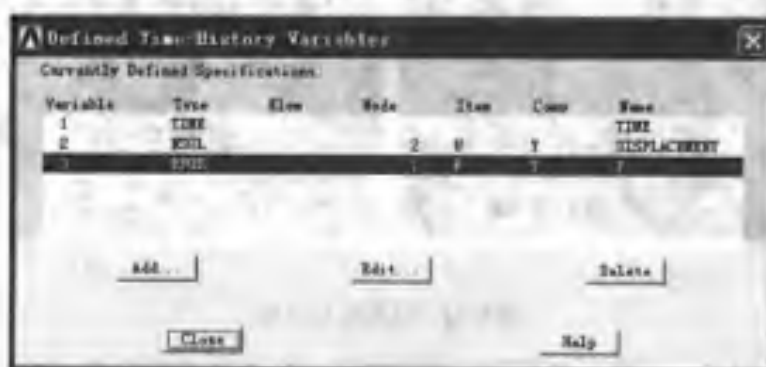


图 9-25 已定义的时间历程变量列表

#### 第 15 步: 绘制变形过程的载荷位移曲线

选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>Graph 菜单项, 定义横坐标 (X) 变量为侧向位移, 在 Graph Settings 对话框中的 XVAR (X-axis variable) 选中 Single variable. Single variable No. 文本框中填 2, 单击 OK 按钮退出该对话框。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes, 在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题, 分别为 DISPLACEMENT 和 F, 单击 OK 退出。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables, 弹出对话框中, NVAR1 文本框中指定 3, 单击 OK 按钮, 则可绘制载荷一位移曲线, 如图 9-26 所示。

沿着横坐标轴的负方向, 从上述的载荷-位移曲线中可以看出, 开始阶段随着位移绝对值的增加载荷也在逐渐增加, 平衡状态是稳定的。但是, 当位移的绝对值达到某一值以后 (按照解析解应当是模型中间节点 Y 坐标的一半), 不需要施加任何力位移就可以继续增加, 表现为随着位移的增加力反而减小, 直至结构变形到达初始位置的对称位置。之后, 如果位移继续增加, 力也将随之增加, 平衡状态又成为稳定的。

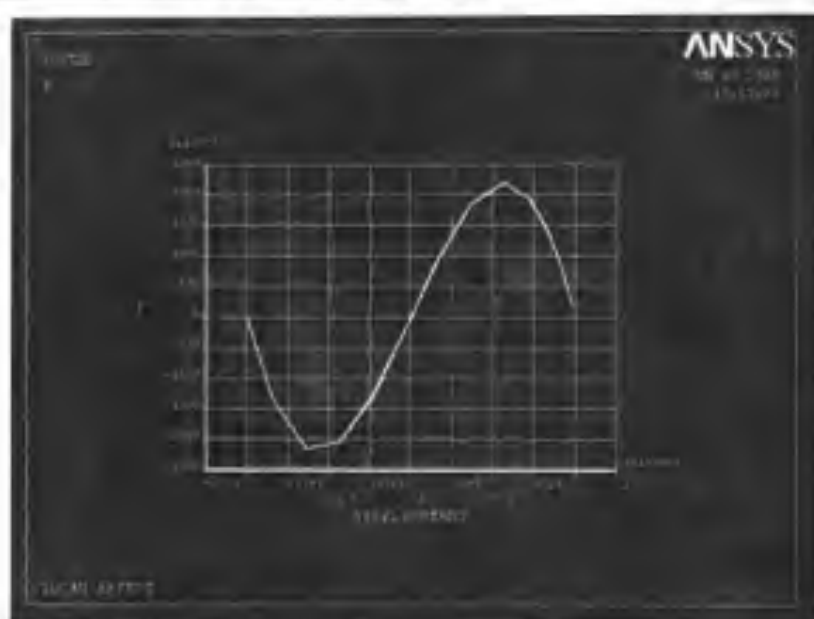


图 9-26 载荷-位移曲线

对于到达对称位置以后位移继续增加的这一段，在上述例子中没有计算，留给读者作为练习。

注意：以上问题是一个纯粹的几何非线性问题，在整个的结构变形过程中，尽管结构的位形发生了很大的变化，但是杆件的应力和应变之间一直保持着线性关系（正比例关系）。

如果上述建模和分析过程采用批处理操作方式，则相应的命令流如下：

```

! *****
! *           油罐效应的简化分析命令流           *
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME,OILCAN           ! 指定工作名称
/TITLE,OILCAN EFFECT      ! 指定图形显示标题

! (2) 进入前处理器
/PREP7                    ! 进入前处理器

! (3) 定义单元类型
ET,1,LINK8                ! 定义单元类型

! (4) 定义杆件截面积
R,1,0.0001,,             ! 定义单元横截面

! (5) 定义材料模型
MP,EX,1,2.07e11          ! 指定弹性模量
MP,PRXY,1,0.3            ! 指定泊松比

! (6) 建立分析模型
N,1,0,0,0,0,0            ! 定义模型的节点

```

```

N,2,0.25,0.10,0.0
N,3,0.5,0.0,0.0
N,1,0.0,0.0,0.0      ! 定义模型的节点
TYPE,1               ! 指定要形成的单元类型
MAT,1                ! 指定要形成单元的材料号
REAL,1               ! 指定要形成单元的实参数号
E,1,2                ! 建立节点 1 和 2 之间的杆件
E,2,3                ! 建立节点 2 和 3 之间的杆件

! (7) 施加约束
D,1,ALL              ! 约束节点 1 的全部位移
D,2,UZ               ! 约束节点 2 的出平面位移
D,3,ALL              ! 约束节点 3 的全部位移

! (8) 施加位移负载
D,2,,-0.2, , , ,UY, , , ,
/ESHAPE,1            ! 显示单元的实际形状
EPLOTT                ! 绘制单元

! (9) 退出前处理器, 进入求解器
FINISH                ! 退出前处理器
/SOLU                 ! 进入求解器

! (10) 求解选项设置
ANTYPE,0              ! 指定分析类型为静力分析
NLGEOM,1              ! 打开大变形选项
NSUBST,100,0,0        ! 指定子步数为 100
OUTRES,ALL,ALL        ! 指定结果文件包含所有子步的结果
TIME,1                ! 定义载荷步结束的时间为 1

! (11) 求解
SOLVE                 ! 求解
FINISH                ! 退出求解器

! (12) 进入通用后处理器读入结果文件
/POST1                ! 进入通用后处理器
SET, FIRST            ! 读入第一载荷步的计算结果

! (13) 动画观察变形过程
PLDI, ,               ! 绘制变形后的结构形状
ANDATA,0.5, ,0,0,0,1,0,1 ! 动画显示结构的变形过程
FINISH                ! 退出通用后处理器

! (14) 进入时间历程后处理器并定义后处理变量
/POST26                ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,2,U,Y,DISPLACEMENT ! 定义位移变量

```

```

RFORCE,3,1,F,Y,F          ! 定义反力变量

! (15) 绘制变形过程的载荷位移曲线
/AXLAB,X,DISPLACEMENT     ! 定义曲线横坐标标题
/AXLAB,Y,F                 ! 定义曲线纵坐标标题
XVAR,2                     ! 指定变量 2 作为横轴 (X) 变量
PLVAR,3                     ! 绘制变量 3 关于变量 2 变化的曲线
FINISH                     ! 退出时间历程后处理器

```

## 9.5 工程实例 2: 钢筋混凝土梁的弹塑性分析

钢筋混凝土结构是一种典型的复合材料结构。对于钢筋混凝土结构有限元分析中单元划分通常基于两个层次: 梁杆单元和实体单元。前者着重分析单元力(包括力和弯矩)与位移(包括位移和转角)之间的关系, 而后者着重于分析单元的应力—应变分布。

本节将以钢筋混凝土梁的弹塑性分析为例, 向读者介绍在 ANSYS 中分析材料非线性问题的具体实现方法, 问题的简单描述如下:

图 9-27 所示的钢筋混凝土梁, 横截面尺寸为  $b \times h = 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ , 梁的跨度为  $L = 3.0\text{m}$ , 支座宽度为  $250\text{mm}$ , 采用 C20 混凝土, 梁内受拉纵筋  $3\phi 20$ , 架立筋采用  $2\phi 12$ , 箍筋采用  $\phi 6@150$ , 钢筋保护层厚度为  $25\text{mm}$ 。

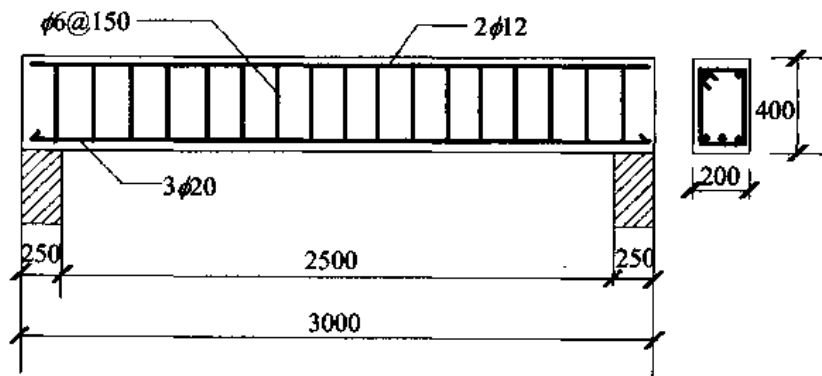


图 9-27 钢筋混凝土梁 (图中长度单位: mm)

对于梁中所采用的所有钢筋, 弹性模量为  $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ , 抗拉强度设计值  $210 \text{MPa}$ , 密度  $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ , 泊松比为 0.3。

根据 GB50010, 混凝土的弹性模量为  $2.55 \times 10^4 \text{MPa}$ , 混凝土的轴心抗压强度设计值为  $9.6 \text{MPa}$ , 轴心抗拉强度设计值为  $1.10 \text{MPa}$ 。相应于峰值压应力(抗压强度设计值)的应变以及极限压应变分别为 0.002 和 0.0033。

试分析梁的跨中截面发生  $5.0\text{cm}$  竖向位移时, 梁内的应力分布以及整体变形情况。

### 9.5.1 SOLID65 单元简介及问题分析规划

在开始介绍建模的具体操作之前, 首先对 ANSYS 的 SOLID65 单元作简单介绍:

Solid65 单元是 ANSYS 提供的专门用于钢筋混凝土结构分析的一种八节点六面体单元,

可以在一定程度上反映混凝土的压溃和开裂。该单元中加入了混凝土的三轴本构关系以及破坏准则，同时包含了由弥散钢筋单元组成的整体式钢筋模型。

SOLID65 单元输入信息包括：

(1) 实常数 (Real Constants)。

实常数包括在各个方向上的钢筋位置、角度、配筋率等参数。

(2) 材料模型 (Material Model)。

定义钢筋和混凝土的弹性模量、泊松比以及密度等参数。

(3) 本构关系数据表 (Data Table)。

定义钢筋以及混凝土的本构关系数据。对钢筋材料，需定义一个表征其应力应变关系的数据表；对混凝土则需要定义两个数据表，一个用于定义混凝土的应力—应变关系，比如多线性随动强化关系等，另一个数据表则用来定义 Solid65 单元的混凝土强度准则。

钢筋与混凝土的组合可以有如下的两种方式：

(1) 离散式模型。

离散钢筋单元 (discrete element)，一般采用 Link8 杆单元来建立钢筋，离散钢筋的 Link8 单元与混凝土单元共用节点，以实现整体工作过程中自由度的耦合。

(2) 整体式模型。

整体式模型又称为弥散钢筋单元 (smeared element)，直接在 Solid65 单元中通过定义实数的途径来实现。其优势在于建模简便，但无法得到钢筋的内力。

在本节的问题中，将采用离散式方式进行建模和分析。

钢筋材料模型采用线弹性模型 (Linear elastic) 和双线性弹塑性材料 (BKIN) 模型。为了体现混凝土的开裂特性，混凝土单元采用 Solid65 单元。混凝土模型考虑受拉开裂 (Cracking)，受压本构关系采用不带下降段的多折线随动强化模型 Multilinear Kinematic hardening plasticity 来定义，其本构关系的具体数学模型，采用混凝土设计规范 GB50010 建议的公式，上升段为二次抛物线，之后为一水平的直线段，即：

$$\text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ 时, } \sigma_c = f_c [1 - (1 - \varepsilon_c / \varepsilon_0)^2];$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时, } \sigma_c = f_c$$

其中： $f_c$  为混凝土的峰值压力，取其轴心抗压强度设计值， $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_{cu}$  分别为混凝土的峰值应变以及极限压应变。

按照上面的数据，可以得到混凝土的应力应变关系为如下的具体形式：

$$\text{当 } \varepsilon_c \leq 0.002 \text{ 时, } \sigma_c = 9.6 [1 - (1 - \varepsilon_c / 0.002)^2] \alpha;$$

$$\text{当 } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0033 \text{ 时, } \sigma_c = 9.6 \text{ (单位: MPa)}$$

这一关系式可通过数据表的形式在 ANSYS 的材料模型中定义，具体操作见下节。

### 9.5.2 建立分析模型

下面按照实际操作的先后顺序，对建模的具体步骤进行介绍：

第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 RC-BEAM。

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title, 指定图形显示区域的标题为 ANALYSIS OF A RC-BEAM。

#### 第2步: 进入前处理器

设置完成后, 点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

#### 第3步: 定义单元类型

##### (1) 定义钢筋单元类型。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete, 在弹出的 Element Types 对话框中, 单击 ADD...按钮, 出现 Library of Element Types 对话框。

对于本问题, 拟采用三维杆单元 LINK8 来模拟钢筋, 因此在窗口左侧选择 Structural Link, 右侧选择 3D spar 8, 单击 Apply 按钮, 定义第一种单元类型, 如图 9-28 所示。

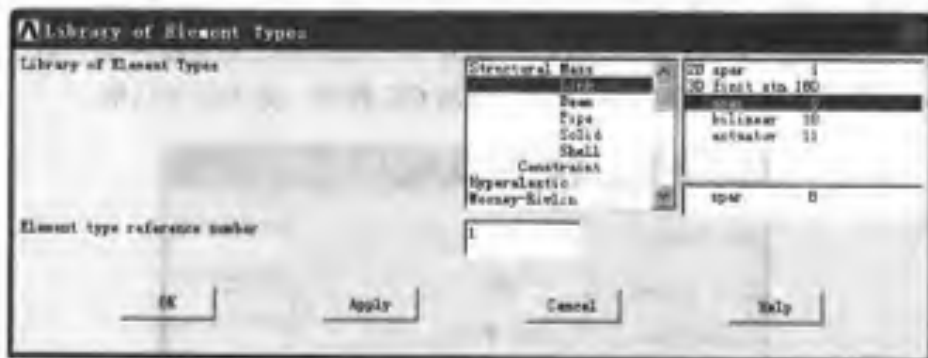


图 9-28 定义单元类型 1 (钢筋)

##### (2) 定义混凝土单元类型。

继续在 Library of Element Types 对话框窗口左侧选择 Structural Solid, 右侧选择 concret 65, 单击 Apply 按钮, 定义混凝土单元类型, 如图 9-29 所示。

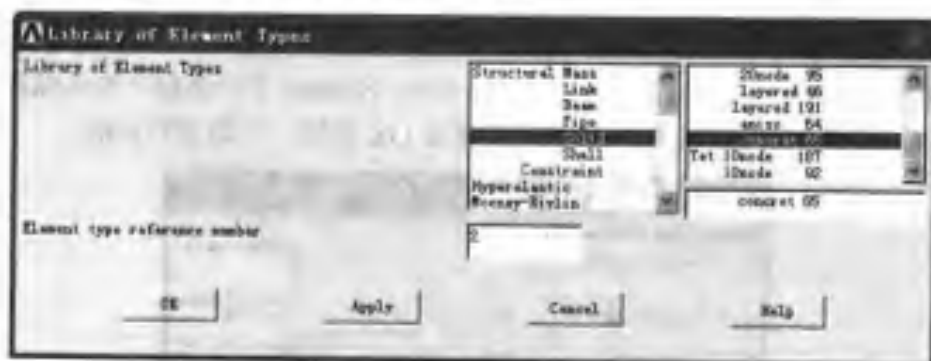


图 9-29 定义单元类型 2 (混凝土)

#### 第4步: 定义钢筋截面积

##### (1) 定义箍筋截面积。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant, 在 Real Constants 对话框中, 单击 Add...按钮, 在接下来的单元类型对话框中, 选择 Type 1, 单击 OK 按钮, 最后在弹出的 Real Constants Set Number 1 对话框中输入箍筋单元的截面积为  $28.3E-6$  (单位:  $m^2$ ), 如图 9-30 所

示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

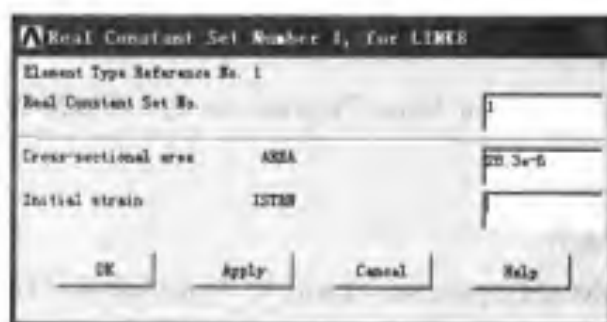


图 9-30 定义箍筋截面积

### (2) 定义架立钢筋截面积。

在 Real Constants 对话框中单击 Add...按钮，在接下来的单元类型对话框中，仍选择 Type 1，单击 OK 按钮，在弹出的 Real Constants Set Number 2 对话框中输入纵筋单元的截面积为  $113.1E-6$  (单位： $m^2$ )，如图 9-3 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

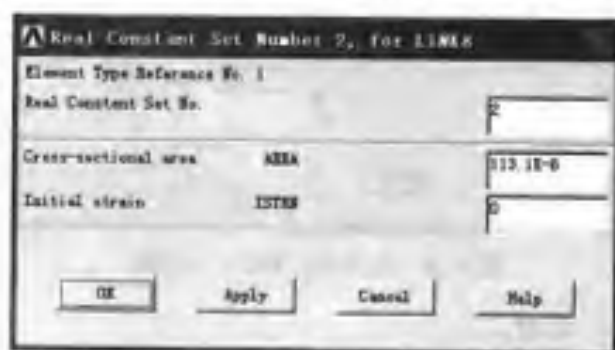


图 9-31 定义架立钢筋截面积

### (3) 定义纵筋截面积。

在 Real Constants 对话框中单击 Add...按钮，在接下来的单元类型对话框中，仍选择 Type 1，单击 OK 按钮，在弹出的 Real Constants Set Number 3 对话框中输入纵筋单元的截面积为  $314.1E-6$  (单位： $m^2$ )，如图 9-32 所示，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

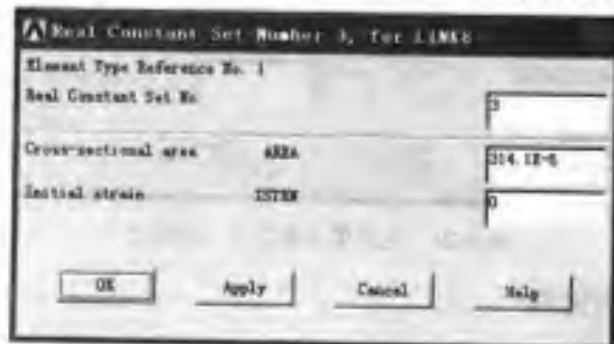


图 9-32 定义纵筋截面积

注意：对于预应力混凝土结构的分析，可在上述钢筋单元实参数定义时，输入初始应变 Initial Strain 的数值。

### 第5步：定义混凝土单元实参数

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant，在 Real Constants 对话框中，单击 Add...按钮，在接下来的单元类型对话框中，选择 Type 2，单击 OK 按钮，弹出 Real Constants Set Number 4, for Solid 65 对话框，由于我们在分析中采用离散式钢筋模型，因此定义一个空的实参数集，直接单击 OK 按钮，关闭该对话框。

### 第6步：定义钢筋材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 窗口，在窗口的右侧，依次双击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear，弹出消息提示框，提示要首先定义线弹性阶段的材料参数，单击 OK 按钮，在出现的对话框中输入材料弹性模量  $2.1e11$  以及泊松比 0.3，如图 9-33 所示。

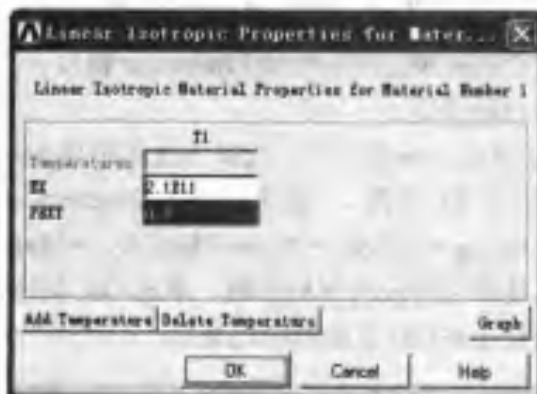


图 9-33 定义钢筋材料参数 1

输入完成后单击 OK 按钮，弹出 Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框，在其中输入钢筋的屈服应力设计值以及切线模量，由于采用理想弹塑性假设，因此切线模量取 0.0。

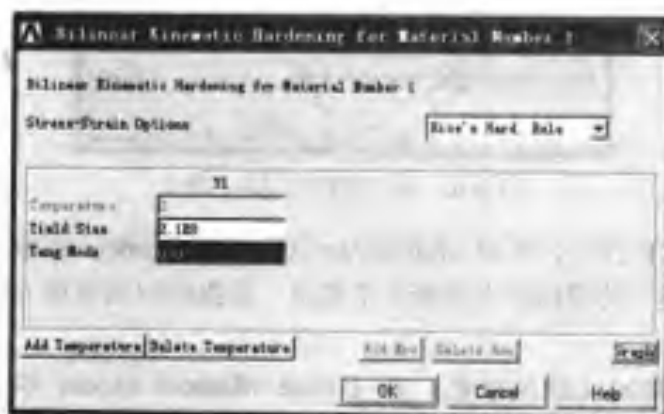


图 9-34 定义钢筋材料参数 2

点窗口的右下方 Graph 按钮，在图形显示区域将出现如图 9-35 所示的钢筋应力-应变关系的曲线。



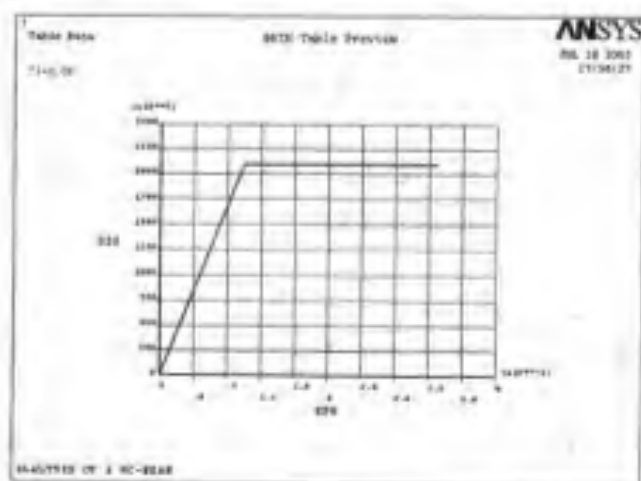


图 9-35 钢筋的应力应变关系

单击 OK 按钮，返回到 Define Material Model Behavior 窗口。

#### 第 7 步：定义混凝土的材料模型

在 Define Material Model Behavior 窗口中，选择下拉菜单项 Material>New Model，定义 ID 为 2 的材料模型。在窗口的右侧，依次双击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Multilinear (General)，弹出消息提示框，提示要首先定义线弹性阶段的材料参数，单击 OK 按钮，在出现的如图 9-36 所示的对话框中输入材料弹性模量 2.55E10 以及泊松比 0.3。

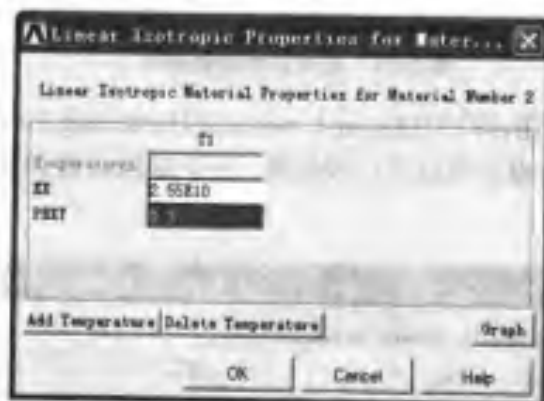


图 9-36 定义混凝土材料参数 1

输入完成后单击 OK 按钮，弹出 Multilinear Kinematic Hardening for Material Number 2 对话框，在其中输入混凝土的受压应力应变关系数组，数组的取值根据 GB50010 提供的公式计算，图 9-37 所示。

继续为混凝土材料定义强度准则，在 Define Material Model Behavior 窗口右侧选择 Structural→Nonlinear→Inelastic→Non-metal Plasticity→Concrete，弹出 Concrete for Material Number 2 对话框，在其中指定混凝土的开口裂缝剪应力传递系数、闭合裂缝剪应力传递系数、轴心抗拉强度以及轴心抗压强度等，如图 9-38 所示。输入完成后，单击 OK 按钮，关闭该对话框。

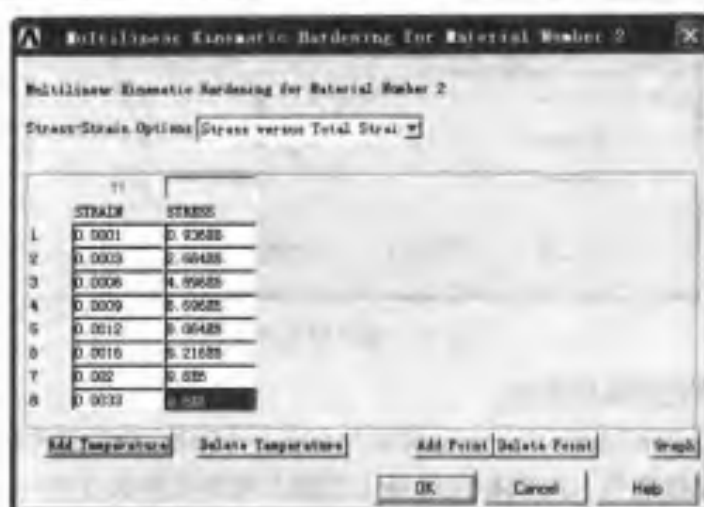


图 9-37 定义混凝土材料参数 2——混凝土的受压应力应变关系

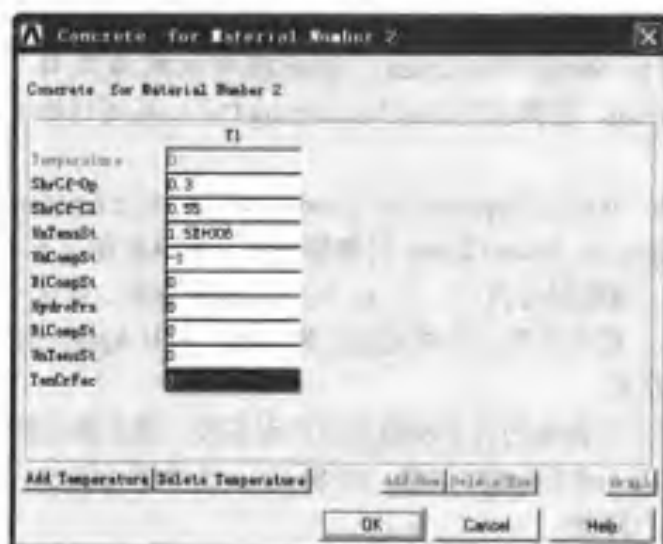


图 9-38 定义混凝土材料参数 3

注意：在上面混凝土的单轴抗压强度一栏中填写了-1，其意义为在计算过程中不考虑混凝土的受挤压破坏。此外，如在混凝土的单轴抗拉强度一栏中输入-1，则表示在计算过程中混凝土单元不发生开裂破坏。

#### 第 8 步：建立几何模型

##### (1) 建立矩形块。

通过选择菜单项：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions，在弹出的 Create Block by Dimensions 对话框中输入长方体的三向尺寸，如图 9-39 所示，单击 OK 按钮，建立两个长方体。

(2) 改变视图方向。为了便于后续操作，通过 Pan Zoom Rotate 视图控制面板设置视图角度为 Obliq，单击 OK 按钮。

#### 第 9 步：划分混凝土梁的体网格

按照如下的步骤进行体网格的划分。

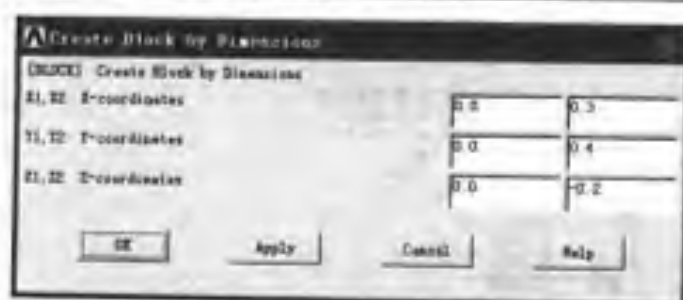


图 9-39 建立矩形体 1

(1) 为混凝土梁设置网格属性。

通过选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes, 弹出 Volume Attributes 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上选择上面建立的长方体, 点 Apply 按钮, 弹出 Volume Attributes 对话框, 选择材料号为 2, 单元类型为 2, 实参数号为 4, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

(2) 指定梁的线段划分尺度。

通过菜单项 Utility Menu>Plot>Lines, 显示所有的线段实体。选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering, 在弹出的 Plot Numbering Controls 对话框中打开 Line Numbers 显示开关。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Layers>Picked Lines, 弹出 Element Sizes on Picked Lines 对象拾取框, 用鼠标在屏幕上选择梁上与梁轴线平行的所有线段, 共 4 条, 线段编号为: 2, 7, 4, 5, 点 Apply 按钮, 弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框, 在 SIZE 一栏中填写划分单元边长为 0.05, 单击 Apply 按钮, 返回 Element Sizes on Picked Lines 对象拾取框。

继续用鼠标在屏幕上选择梁的各个横截面的所有各边, 共 8 条线段, 然后单击 OK 按钮, 弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框, 在 SIZE 一栏中填写划分单元边长为 0.025, 单击 OK 按钮, 返回图形用户界面。

(3) 对体积划分网格。

上述设置完成后, 通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool, 打开网格划分工具 Mesh Tool 窗口。在 Mesh 下拉列表中选择 Volume, Shape 选项选 Hex, 网格划分方式选择 Mapped, 单击 Mesh 按钮, 出现 Mesh Volumes 对象拾取框, 单击 Pick All 按钮, 程序即开始划分网格。

网格划分结束后的图形显示结果如图 9-40 所示。

第 10 步: 建立钢筋单元

下面通过与混凝土单元共用节点的方式, 建立离散钢筋单元。

(1) 建立箍筋单元。

首先来指定要形成的箍筋单元的属性, 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes, 在弹出的 Element Attributes 对话框中, 设置单元类型为 1, 实参数号为 1, 材料号为 1, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

最边缘的一圈箍筋距离梁端截面为 0.15m, 之后每隔 0.15m 设置一圈箍筋。

首先选择距梁左端 0.15m 截面的所有节点 (通过 X 坐标范围选择, 过程从略), 然后选择

菜单项 Utility Menu>Plot>Nodes, 并通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering, 打开节点编号显示开关。



图 9-40 划分实体网格

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor> Modeling>Create> Elements>Auto Numbered> Thru Nodes, 将距该截面边缘 0.025 的一圈节点顺次连接形成箍筋单元, 共形成 40 个单元。

通过 Pan, Zoom, Rotate 视图控制面板, 选择视图方向为 Right, 则得到如图 9-41 所示的结果。选择单元类型为 1 的所有单元(即新建立的箍筋)为当前的单元集(通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities), 然后选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy> Elements> Auto Numbered, 弹出 Copy Elems Auto Numbered 对象拾取框, 点 Pick All 按钮, 出现 Copy Elems Auto Numbered 对话框, 如图 9-42 所示, 将第一圈箍筋复制 19 次(包括本身), 复制的相邻两组箍筋单元, 其节点号相差为 315, 这可以通过观察沿轴向相隔 0.15m 的两个平面对应节点之间的号差得知。

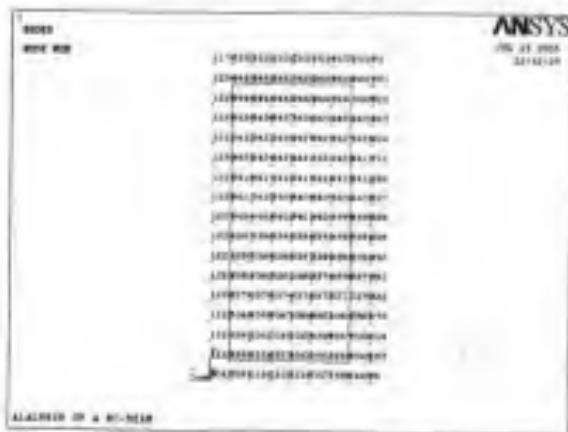


图 9-41 第 1 圈箍筋单元



图 9-42 箍筋单元复制

改变视图方向为 Obliq, 关闭节点编号显示开关, 则复制后形成的箍筋单元见图 9-43 所示。

## (2) 建立架立筋单元。

首先来指定要形成的纵筋单元的属性, 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>

Create>Elements>Elem Attributes, 在弹出的 Element Attributes 对话框中, 设置单元类型为 1, 实参数号为 2, 材料号为 1, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

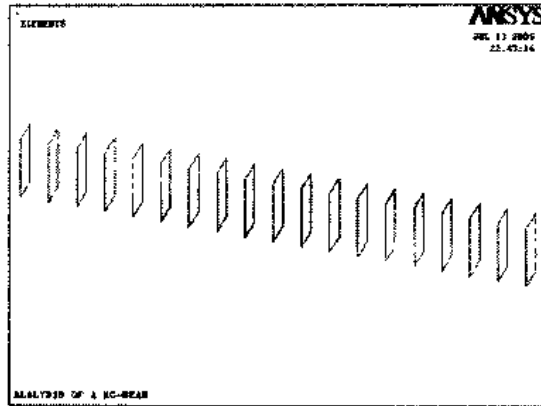


图 9-43 复制得到的箍筋单元

架立筋端部距离梁端截面为 0.05m, 2 根纵筋之间相距 0.15m。纵筋混凝土保护层厚度 0.025m, 近似取作钢筋节点到梁底面的距离。

选择距梁顶面 0.025m 截面的所有节点 (通过 Y 坐标范围在 0.37~0.38 之间进行选择), 然后选择菜单项 Utility Menu>Plot>Nodes, 并通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering, 打开节点编号显示开关。选择视图方向为顶视图。

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes, 找到距梁的侧面边缘 0.025m, 距梁左端面 0.05m 的 3237 号节点, 然后顺次连接后续的各节点, 形成一条架立筋。

选择实参数类型为 2 的所有单元 (即新建立的架立筋) 为当前的单元集 (通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities), 然后选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>Auto Numbered, 弹出 Copy Elms Auto Numbered 对象拾取框, 点 Pick All 按钮, 出现 Copy Elms Auto Numbered 对话框, 将第一根纵筋复制 3 次 (包括本身), 复制的相邻两组架立筋单元, 其节点号相差为 6, 这可以通过观察节点编号得知, 复制的间距为沿 Z 轴方向 0.15m。

### (3) 建立纵筋单元。

首先来指定要形成的纵筋单元的属性, 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes, 在弹出的 Element Attributes 对话框中, 设置单元类型为 1, 实参数号为 3, 材料号为 1, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

纵筋端部距离梁端截面为 0.05m, 3 根纵筋之间相距 0.075m。纵筋混凝土保护层厚度 0.025m, 近似取作纵筋节点到梁底面的距离。

选择距梁底面 0.025m 截面的所有节点 (通过 Y 坐标范围选择, 过程从略), 然后选择菜单项 Utility Menu>Plot>Nodes, 并通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering, 打开节点编号显示开关。选择视图方向为顶视图。

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes, 找到距梁的前侧面边缘 0.025m, 距梁左端面 0.05m 的 3145 号节点, 然后顺次连接后

续的各节点，形成第一条纵筋。

选择实参数类型为 3 的所有单元(即新建立的纵筋)为当前的单元集(通过菜单项 Utility Menu>Select>Entities)，然后选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>Auto Numbered，弹出 Copy Elems Auto Numbered 对象拾取框，点 Pick All 按钮，出现 Copy Elems Auto Numbered 对话框，将第一根纵筋复制 3 次(包括本身)，复制的相邻两组纵筋单元，其节点号相差为-3，这可以通过观察节点编号得知，复制的间距为沿 Z 轴方向-0.075m。

通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything，恢复选择所有对象。然后再选择所有的钢筋单元，即单元类型为 1 的所有单元，通过菜单项 Utility Menu>Plot>Elements，可以看到如图 9-44 所示的结果。

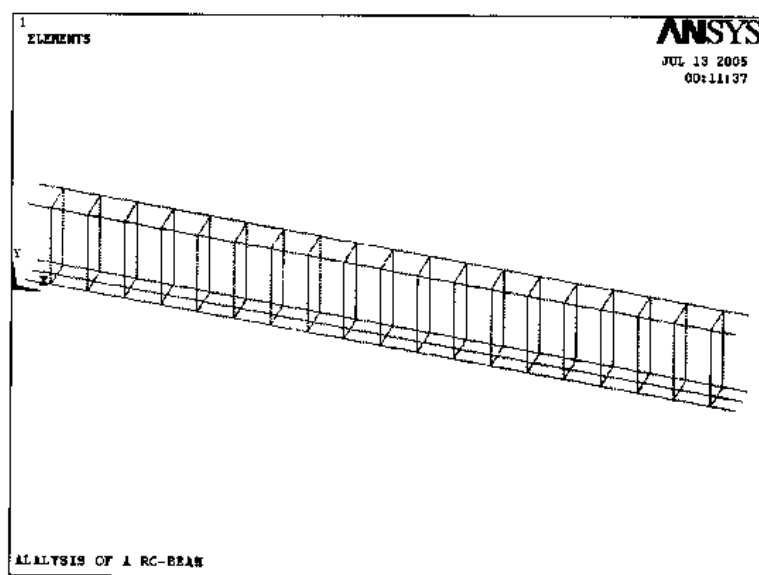


图 9-44 钢筋骨架模型

#### 第 11 步：施加约束条件

下面向梁端施加位移约束，固定两个端截面的一半高度线上的所有节点。

通过选择菜单项 Utility Menu>Select>Entities，在弹出的 Select Entities 对话框中，设置选择类型为 Nodes，分别选择 X 坐标范围在-0.01~0.01 和 2.99, 3.01，同时 Y 坐标范围均在 0.19~0.21 的两组节点，具体选择过程从略。

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement>On Nodes，对上面选择的两组节点分别施加三向位移约束。

需要注意的是以上操作要一组一组进行，即第一组约束施加完成后，先通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything，恢复选择全部对象，再从全集中选择第 2 组节点进行操作，第 2 组节点约束施加完成后，也要再次通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything，恢复选择全部对象。

#### 第 12 步：施加载荷

在梁的顶面上受到均布的压力  $50\text{kN/m}^2$  作用。

(1) 选择受载荷的节点。

首先选择菜单项 Utility Menu> Select>Entities，通过节点的坐标范围选择 Y 坐标在 0.39~0.41 之间的所有顶面节点。

(2) 向梁顶面施加均布的压力。

通过选择菜单项 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure> On Nodes 弹出 Apply Pres on Nodes 对象拾取框, 点 Pick All 按钮, 弹出 Apply Pres On Nodes 对话框, 如图 9-45 所示, 对上面选择的节点施加压力, Value 中填-50000, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。



图 9-45 向梁顶施加均布压力

(3) 恢复选择所有的对象。

加载完成之后, 通过菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 恢复选择全部对象。

第 13 步: 退出前处理器

以上操作完成后, 通过菜单项 Main Menu>Finish, 退出前处理器。

### 9.5.3 分析及后处理

下面介绍分析过程以及计算结果的后处理过程, 其具体的操作步骤如下:

第 1 步: 进入求解器

通过菜单项 Main Menu>Solution 进入求解器。在求解之前, 还需要对各种分析以及输出选项进行设置。

第 2 步: 求解选项设置

在求解之前, 需要对相关的选项进行设置。

(1) 设定分析类型。

首先通过菜单项 Main Menu>Solution> Analysis Type>New Analysis, 在 New Analysis 对话框中选择分析类型为 Static, 单击 OK 按钮退出。

(2) 分析选项设置。

首先通过菜单项 Main Menu>Solution>Unabridged Menu, 展开隐藏的菜单项目。选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options, 在弹出的 Static or Steady-State Analysis 对话框中, 对如下的分析选项进行设置:

1) 打开大变形选项。

在 Static or Steady-State Analysis 对话框 Nonlinear Option 一栏的[NLGEOM]选项置为 On 状态。

2) Newton-Raphson 选项。

在 Static or Steady-State Analysis 对话框 Nonlinear Option 一栏的[NROPT]选项下拉列表框中选择 Full N-R, 自适应下降 Adaptive descent 下拉选项中选择 On if necessary。

3) 选择求解器。

在 Static or Steady-State Analysis 对话框的[EQSLV]一栏中选择 Equation solver 为 Sparse solver。

(3) 设置载荷步结束时间和子步数。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Substps, 弹出 Time and Substep Options 对话框, 在[Time]一栏中, 输入 1.0, 在[NSUBST]一栏中, 输入子步数为 50, [KBC]选择 Ramped, [AUTOTS]置于 ON 状态, 即计算中采用二分法, 在[AUTOTS]选项下的[NSUBT]一栏中, Maximum no. of substeps 以及 Minimum no. of substeps 分别填 25, 100。设置完成后, 单击 OK 按钮, 关闭 Time and Substep Options 对话框。

(4) 设置收敛准则。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Convergence Crit, 弹出 Default Nonlinear Convergence Criteria 列表框, 单击 Replace 按钮, 弹出如图 9-46 所示的 Nonlinear Convergence Criteria 对话框, 选择收敛准则为位移收敛准则 Displacement U, 在 TOLER 一栏中填写 0.03, 在 NORM 选项列表中选择 Infinite norm。设置完成后, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。



图 9-46 设置收敛准则

(5) 设置平衡迭代次数。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Equilibrium Iter, 弹出如图 9-47 所示的 Equilibrium Iterations 对话框, 在文本框中输入 50, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

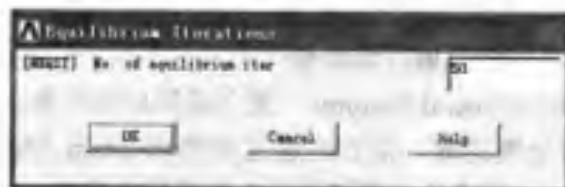


图 9-47 平衡迭代次数的设置

(6) 打开预测选项。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Predictor, 弹出如图 9-48 所示的 Predictor 对话框, 在选项列表中选择 On for all sbstp。

(7) 结果文件输出设置。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File, 弹出



Controls for Database and Results File Writing 对话框, 在 Item 一栏中选择 All items, 在 FREQ 选项中, 选择 Every Substep, 在 Cname 列表中, 选中 All entities。设置完成后, 单击 OK 按钮, 关闭该对话框。



图 9-48 打开预测选项

### 第 3 步: 求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 对问题进行求解。在求解过程中会看到如图 9-49 所示的收敛曲线。求解结束后, 弹出 Solution is done! 信息提示框, 关闭之。

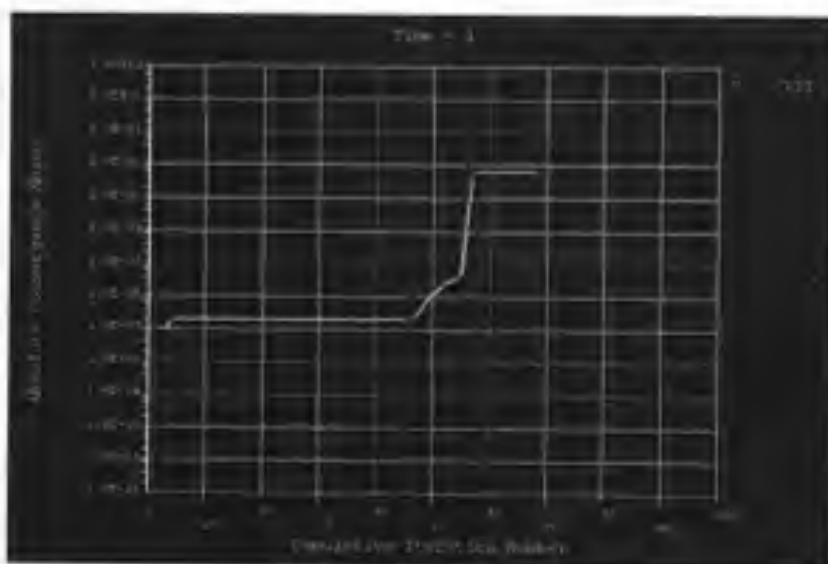


图 9-49 计算收敛曲线

### 第 4 步: 退出求解器

点 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

### 第 5 步: 进入通用后处理器读取计算结果

通过菜单项 Main Menu>General Postproc, 进入通用后处理器。

在对计算结果进行后处理之前, 需首先通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set, 将最后一个子步的计算结果读入通用后处理器。

### 第 6 步: 绘制结构变形图

(1) 设置位移计算值缩放系数。

为更好地观察梁的变形情况, 可以通过调整缩放比例合理地显示梁的整体变形形态。缩放比例系数可以通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Displacement Scaling, 在弹出的如图 9-50 所示的 Displacement Display Scaling 对话框中进行设置。这里选择 User Specified, 缩放系数填 100, 选择 Replot 选项, 单击 OK 按钮。

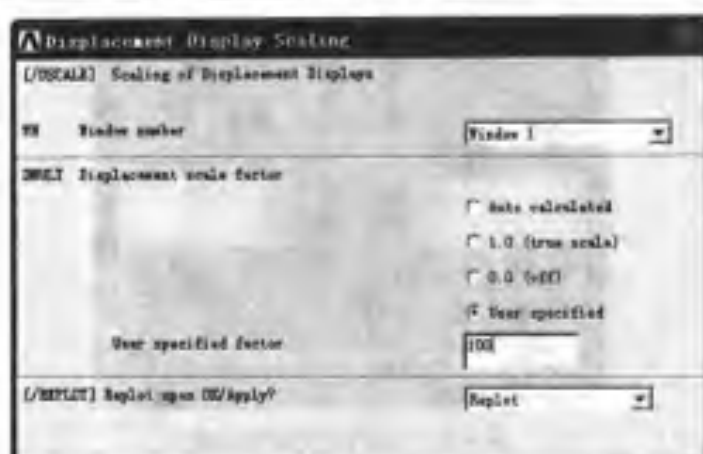


图 9-50 位移显示比例缩放系数的设置

### (2) 绘制结构变形图。

通过选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 选中 Def+undef edge, 单击 OK 按钮, 即可得到如图 9-51 所示的变形图。



图 9-51 结构变形前后的形状

### (3) 绘制梁的挠度等值线图。

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu, 弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框, 在 Item to be contoured 一栏中, 左侧项目列表中选择 DOF Solution, 右侧项目列表中选择 UY, 选中 Def shape only 选项, 单击 OK 按钮, 图形显示区域显示梁的挠度等值图, 如图 9-52 所示。

#### 第 7 步: 绘制混凝土开裂图

##### (1) 显示设备设置。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options, 在弹出的如图 9-53 所示的 Device Options 对话框中打开 Vector mode 选项, 使之处于 On 状态, 在最下面的[/REPLLOT]一栏中, 选中 Replot 选项。单击 OK 按钮, 关闭该对话框。

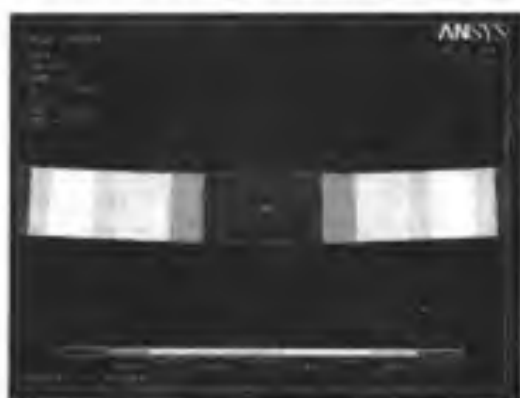


图 9-52 梁的挠度等值线图

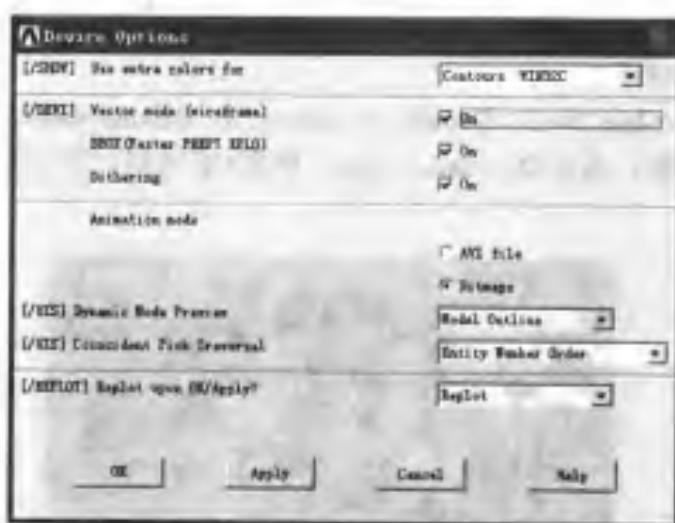


图 9-53 图形显示设备控制

### (2) 绘制开裂图。

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>ContcPlot>Crack/Crush, 在弹出如图 9-54 所示的 Cracking and Crushing Locations in Concrete Elements 对话框中, 选择 integration pts 和 all cracks, 单击 OK 按钮, 即可绘制当前子步的开裂图。

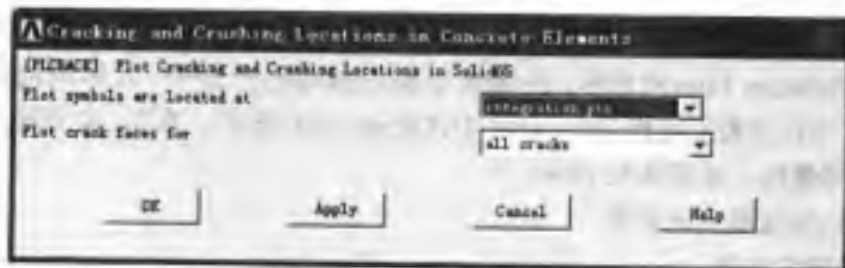


图 9-54 绘制混凝土开裂图设置

通过菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set 以及菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>Previous Set, 选择一系列不同的子步, 绘制各个子步的混凝土开裂图, 即可得到如图 9-55 所示的混凝土裂纹扩展的过程。

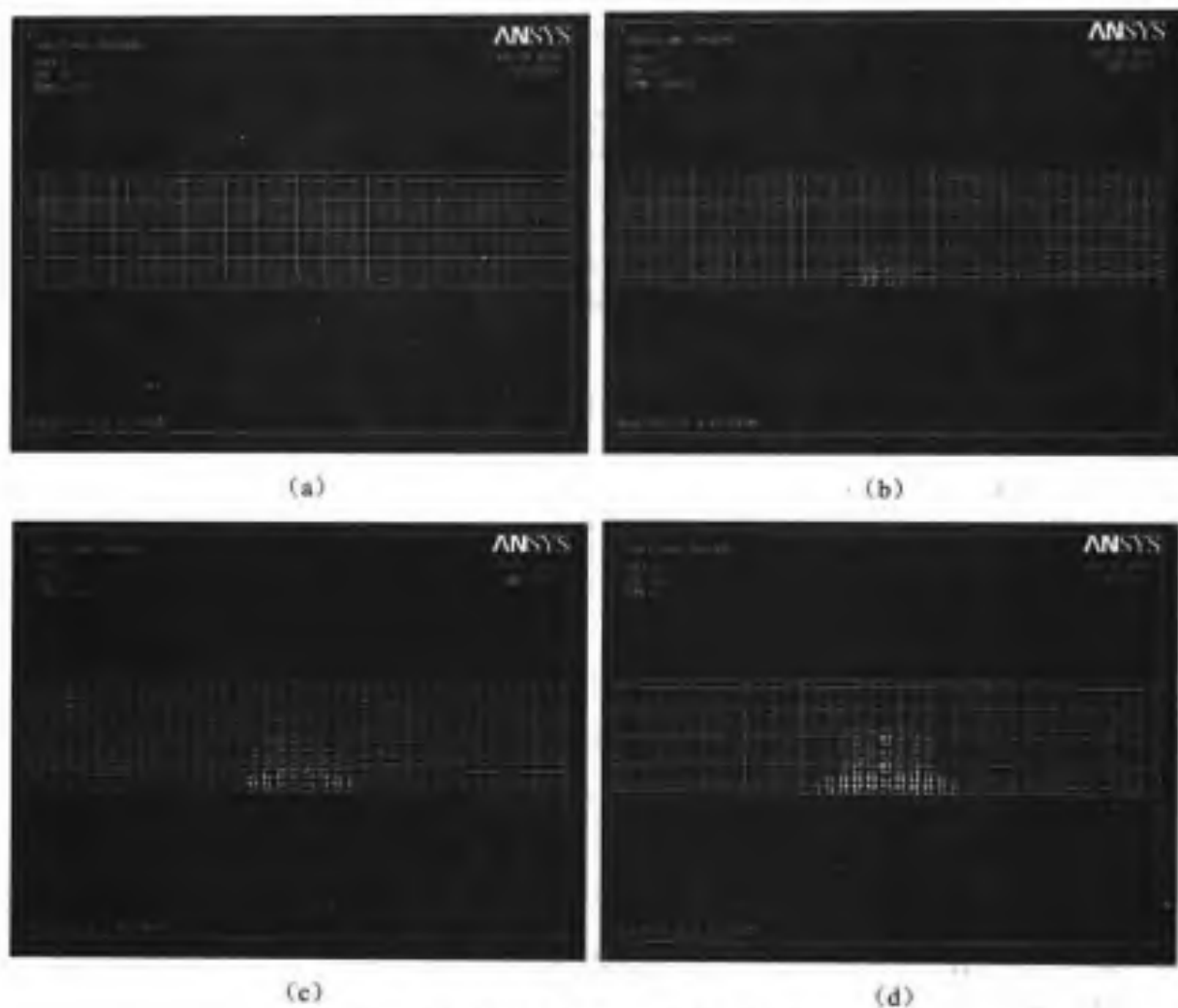


图 9-55 梁底部混凝土裂缝开展的过程

读者还可以在通用后处理器中对结构在变形过程中所关心的各种量（应力、应变等）进行等值线图形以及动画显示，如梁内第一主应力以及 Mises 等效应力的分布图分别如图 9-56 和图 9-57 所示。

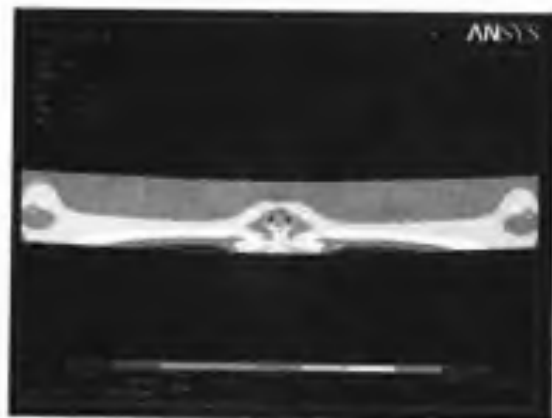


图 9-56 第一主应力分布



图 9-57 Mises 等效应力分布

以上后处理操作结束后，通过菜单项 Main Menu>Finish，退出通用后处理器 POST1。  
如果本节的问题通过批处理形式进行建模和分析，则相应操作的命令流如下：

```
! *****
!           钢筋混凝土梁的弹塑性分析命令流（单位制：SI制）
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME,RC-BEAM           ! 指定工作文件名
/TITLE,ANALYSIS OF A RC-BEAM ! 指定图形标题

! (2) 进入前处理器
/PREP7

! (3) 定义单元类型
ET,1,LINK8                 ! 定义钢筋单元
ET,2,SOLID65               ! 定义混凝土单元

! (4) 定义钢筋截面积
R,1,28.3E-6, ,             ! 箍筋截面积
R,2,113.1E-6, ,           ! 架立筋截面积
R,3,314.1E-6, ,           ! 纵筋截面积

! (5) 为 SOLID65 单元定义一个实参数组
R,4,

! (6) 定义钢筋材料模型及参数
MP,EX,1,2.1E11             ! 线弹性参数
MP,PRXY,1,0.3
TB,BKIN,1,1,2,1           ! 钢筋塑性参数
TBDATA,,2.1E8,0.0

! (7) 定义混凝土材料
MP,EX,2,2.55E10           ! 线弹性参数
MP,PRXY,2,0.3
TB,KINH,2,1,8,            ! 砼的应力应变数据
TBTEMP,0
TBPT,,0.0001,0.936E6
TBPT,,0.0003,2.664E6
TBPT,,0.0006,4.896E6
TBPT,,0.0009,6.696E6
TBPT,,0.0012,8.064E6
TBPT,,0.0016,9.216E6
TBPT,,0.002,9.6E6
TBPT,,0.0033,9.6E6
TB,CONC,2,1,9,            ! 定义砼的破坏参数
TBDATA,,0.3,0.55,1.5e6,-1
```

```

! (8) 建立几何模型
BLOCK,0,0,3,0,0,0,0,4,0,0,-0.2,      ! 建立梁的几何模型
/VIEW,1,1,2,3                          ! 改变视图角度
/REP,FAST                                ! 重新绘图
LPLOT                                    ! 绘制所有线段
/PNUM,LINE,1                            ! 打开线段编号显示开关
/REPLOT

! (9) 划分混凝土网格
VATT,2,4,2                              ! 设置单元属性
! 设置各边的等分数:
LSEL,S,LINE,,4,5,1                     ! 选择轴向线段
LSEL,A,LINE,,2,7,5
LESIZE,ALL,0.05                         ! 设置轴向线段的等分数
LSEL,INVE                                ! 选择横向线段
LESIZE,ALL,0.025                        ! 设置横向线段等分数
LSEL,ALL                                 ! 恢复选择全部的线段
VMESH,ALL                                ! 划分体积网格

! (10) 建立钢筋单元
NSEL,S,LOC,X,0.125,0.175               ! 选择第一圈箍筋所在面的节点
NPLOT                                    ! 绘制节点
/VIEW,1,1                                ! 改变视图方向
/REP,FAST
/PNUM,NODE,1                            ! 打开节点编号
/REPLOT
TYPE,1                                   ! 指定箍筋单元的属性
MAT,1
REAL,1
! 通过循环建立第一圈箍筋:
*DO,I,3349,3354,1                       ! 第一个循环
E,I,I+1
*ENDDO
*DO,I,3355,3446,7                       ! 第二个循环
E,I,I+7
*ENDDO
*DO,I,3452,3447,-1                      ! 第三个循环
E,I+1,I
*ENDDO
*DO,I,3447,3356,-7                      ! 第四个循环
E,I,I-7
*ENDDO
! 复制第一圈箍筋,每隔0.15m布置一圈箍筋:
ESEL,S,TYPE,,1                          ! 选择第一圈箍筋
EGEN,19,315,ALL,,,,,,,,,0.15,0,0,0,0, ! 复制箍筋单元,共19组
ALLSEL,ALL                              ! 恢复选择所有对象

```

```

! 建立纵筋单元:
TYPE, 1 ! 设置纵筋单元的属性
MAT, 1
REAL, 2
*DO,I,1,3145,9130,105 ! 通过循环形成第 1 根纵筋单元
E,I,I+105
*ENDDO
ESEL,R,REAL,,2 ! 选择纵筋单元
EGEN,3,-3,ALL,,,,,,,,,0,0,0.0,-0.075, ! 复制纵筋单元, 共 3 组
ALLSEL,ALL ! 恢复选择所有的对象
! 建立架立筋单元:
TYPE, 1 ! 设置架立筋单元属性
MAT, 1
REAL, 3
*DO,I,1,3237,9222,105 ! 通过循环形成第 1 根架立筋
E,I,I+105
*ENDDO
ESEL,R,REAL,,3 ! 选择所有的架立筋单元
EGEN,2,6,ALL,,,,,,,,,0,0,0.0,0.15, ! 复制架立筋单元, 共 2 组
ALLSEL,ALL ! 恢复选择所有的对象
ESEL,S,TYPE,,1 ! 选择所有的钢筋单元
EPLOT ! 绘制钢筋骨架
/VIEW,1,1,2,3 ! 改变视图方向
/REP

! (11) 施加位移约束
NSEL,S,LOC,Y,0.19,0.21 ! 选择左边的支座节点
NSEL,R,LOC,X,-0.01,0.01
D,ALL,ALL ! 向支座节点施加约束
ALLSEL,ALL ! 恢复选择所有的对象
NSEL,S,LOC,Y,0.19,0.21 ! 选择右边的支座节点
NSEL,R,LOC,X,2.99,3.01
D,ALL,ALL ! 向支座节点施加约束
ALLSEL,ALL ! 恢复选择所有的对象

! (12) 施加载荷
NSEL,S,LOC,Y,0.39,0.41 ! 选择所有受载节点
SF,ALL,PRES, 50000 ! 施加表面均布压力
ALLSEL,ALL ! 恢复选择所有的对象

! (13) 退出前处理器
FINI
! (14) 进入求解器
/SOLU ! 进入求解器

! (15) 求解选项设置:

```

```

ANTYPE,0                ! 选择分析类型
NLGEOM,1                ! 打开大变形开关
NROPT,FULL,,           ! 完全 N-R 方法
EQSLV,SPAR,,0         ! SPAR 求解器
TIME,1.0                ! 载荷步结束时间
AUTOTS,1                ! 打开自动时间步长
NSUBST,100,200,50,1   ! 子步数
KBC,0                   ! 逐级递增加载
CNVTOL,U,,0.03,0,,    ! 设置收敛准则
NEQIT,50                ! 平衡迭代次数
PRED,ON,,ON            ! 打开预测器
OUTRES,ALL,ALL         ! 输出所有子步的结果

! (16) 求解并退出求解器
SOLVE                    ! 求解
FINI                     ! 退出求解器

! (17) 进入通用后处理器并读入最后一个子步的结果
/POST1                  ! 进入通用后处理器
SET,LAST                ! 读入最后一个子步结果

! (18) 后处理操作
/DSCALE,1,100          ! 位移缩放系数
/REPLOT                 ! 重新绘图
PLDISP,2               ! 绘制结构变形图
PLNSOL,U,Y,0,1         ! 绘制挠度等值线
PLCRACK,0,0            ! 绘制混凝土的裂缝图

! (19) 退出通用后处理器
FINISH                  ! 退出通用后处理器

```

## 9.6 工程实例 3: 插销拨拉过程的接触分析

本节以一个插销拨拉过程的分析为例,向读者介绍面-面接触分析的方法。

问题的简单描述如下:

如图 9-58 所示的插销装配在插座中,计算插销拨拉过程中插销和插座体内的应力分布以及接触压力大小。相关几何参数如下:

插销: 半径  $r_1=0.5\text{cm}$ , 长度  $L_1=2.5\text{cm}$ 。

插座: 宽度  $W=4\text{cm}$ , 高度  $H=4\text{cm}$ , 厚度  $=1\text{cm}$ , 插孔半径  $r_2=0.49\text{cm}$ 。

插销和插座材料: 杨氏模量  $E=3.6e7\text{N/cm}^2$ , 泊松比  $=0.3$ 。

由于插孔的半径比插销的半径要小,所以在插销装配



图 9-58 插销装配在插座中




到插座时，插销和插座内都会产生装配预应力。要分析拨拉过程的应力分析，首先要得到预应力的分布，所以本题分两个载荷步求解：第 1 个载荷步计算预应力，第 2 个载荷步计算拨拉过程的应力分布。

### 1. 建立几何模型

#### (1) 建立插座的模型。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions，弹出 Create Block by Dimension 对话框，输入参数  $X1=Y1=-2, X2=Y2=2, Z1=2.5, Z2=3.5$ 。单击 OK 按钮建立一个长方体。

#### (2) 改变视图角度。

单击 ANSYS 图形窗口右侧视图控制面板中的 ISO 视图按钮 ，得到 ISO 视图。

#### (3) 建立代表插孔的圆柱体。

通过选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>By Dimensions，弹出 Create Cylinder by Dimension 对话框，输入参数  $RAD1=0.49, Z1=2.5, Z2=3.5$ 。单击 OK 按钮建立一个圆柱体。

#### (4) 生成插孔。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract> Volumes，弹出拾取对话框，拾取长方体体积 1，单击 OK 按钮，再拾取圆柱体体积 2，单击 OK 按钮，得到带插孔的插座，如图 9-59 所示。

#### (5) 生成代表插销的圆柱体。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>By Dimensions，弹出 Create Cylinder by Dimension 对话框，输入参数  $RAD1=0.5, Z1=2, Z2=4.5$ 。单击 OK 按钮建立一个圆柱体。

#### (6) 打开体积序号显示。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering，弹出 Plot Numbering Control 对话框，选中 Volume numbers 复选框，单击 OK 按钮。得到插销和插座的图形以不同的颜色显示，如图 9-60 所示。

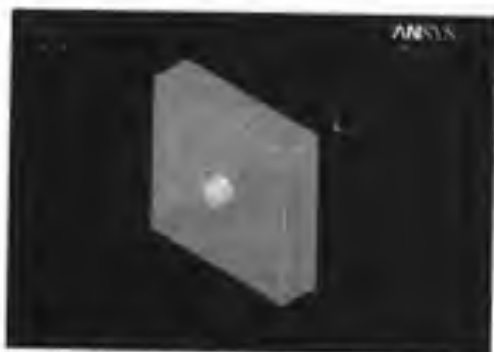


图 9-59 生成插孔



图 9-60 打开体积序号显示


#### (7) 切分模型的 1/4。

由于问题的对称条件，只需要完整插销和插座模型的 1/4 来进行分析。

设置工作平面，以备切分模型。选择菜单项 Utility Menu>Workplane>WP Setting，弹出

WP Setting 对话框，选择单选按钮 Catesian 和 Grid and Triad，单击 OK 按钮。

显示工作平面，选择菜单项 Utility Menu>Workplane>Display Working Plane。

旋转工作平面，选择菜单项 Utility Menu>Workplane>Offset WP by increments，弹出 Offset WP 对话框，将 Degrees 滑块拖到 90 度（最右端），单击  按钮，将工作平面绕 Y 轴正方向旋转 90 度。


切分模型的 1/2，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Volu by wrkplane，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，将模型切分成对称的两部分。

删除模型的 1/2。选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume and Below，弹出拾取对话框，拾取模型的右半部分（包括半个长方体和半个圆柱），单击 OK 按钮，得到如图 9-61 所示的 1/2 模型。



图 9-61 1/2 模型

还原工作平面位置。选择菜单项 Utility Menu>Workplane>Align WP with>Global Catesian。

旋转工作平面。选择菜单项 Utility Menu>Workplane>Offset WP by increments，弹出 Offset WP 对话框，将 Degrees 滑块拖到 90 度（最右端），单击  按钮，将工作平面绕 X 轴正方向旋转 90 度。

切分模型的 1/4。选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Volu by wrkplane，弹出拾取对话框，单击 Pick All 按钮，再将模型切分成对称的两部分。

删除模型的 1/4。选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume and Below，弹出拾取对话框，拾取模型的下半部分（包括一个 1/4 长方体和一个 1/4 圆柱），单击 OK 按钮，得到如图 9-62 所示的 1/4 模型。



图 9-62 1/4 模型

(8) 保存几何模型。

单击工具条中的 SAVE\_DB 按钮, 保存几何模型。

2. 定义单元类型、材料属性和网格划分

(1) 定义单元类型。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/edit/delete, 弹出 Element types 对话框, 单击 Add 按钮, 添加单元类型 Structural>Solid>Brick 8node 185, 单击 OK 按钮。

(2) 定义材料属性。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models, 在弹出的 Define Material Model Behavior 窗口双击 Structural>Linear>Elastic>Isotropic, 在弹出的对话框中, 输入如下的材料属性:

◇ 杨氏模量 EX=36e6;

◇ 泊松比 PRXY=0.3。

(3) 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Meshtool, 打开 MeshTool 对话框。

(4) 设置插销单元网格密度。

在 MeshTool 对话框的 Size Control 域单击 Lines>Set 按钮, 弹出 Element Size of Picked Lines 拾取对话框, 拾取插销前端的水平和垂直直线, 单击 OK 按钮, 弹出 Element Size of Picked Lines 对话框; 输入 NDIV=3, 取消复选框 SIZE,NDIV can be changed, 单击 OK 按钮确定。

(5) 设置插座单元网格密度。

在 MeshTool 对话框的 Size Control 域单击 Lines>Set 按钮, 弹出 Element Size of Picked Lines 拾取对话框, 拾取插座前端的曲线, 单击 OK 按钮, 弹出 Element Size of Picked Lines 对话框, 输入 NDIV=4, 取消复选框 SIZE,NDIV can be changed, 单击 OK 按钮确定。

(6) 设置单元形状和网格划分方法。

如图 9-63 所示, 在 MeshTool 对话框的 Mesh 列表中选择 Volumes 选项, 单击单选按钮 Hex/Wedge 和 Sweep, 选择 Auto Src/Trg 选项。

(7) 单击 Sweep 按钮, 弹出拾取对话框, 单击 Pick All 按钮, 进行网格划分, 得到如图 9-64 所示的单元模型。



图 9-63 设置单元形状和网格划分方法

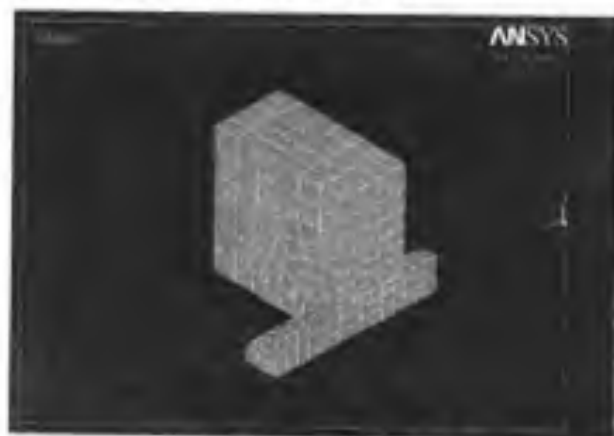


图 9-64 单元模型

(8) 单击 Close 按钮，关闭 MeshTool 对话框。

(9) 选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape，弹出如图 9-65 所示 Size and Shape 对话框，在 Facets/element edge 列表中选择 2 facets/edge 选项，单击 OK 按钮。



图 9-65 Size and Shape 对话框

### 3. 建立接触单元

(1) 选择菜单项 Main Menu>Modeling>Create>Contact pair，弹出 Contact Manager 对话框，如图 9-66 所示。

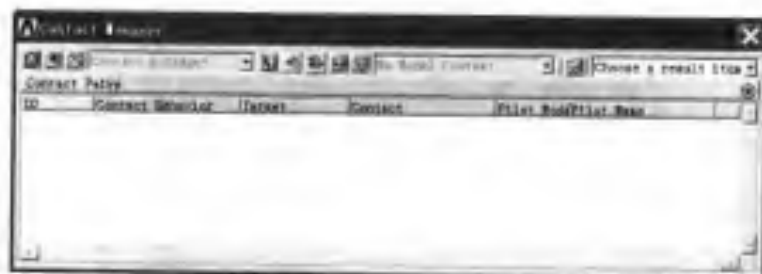


图 9-66 Contact Manager 对话框

(2) 单击最左边的按钮，启动 Contact Wizard（接触向导），如图 9-67 所示。



图 9-67 接触向导

(3) 在 Target Surface 域选择 Areas 选项, 在 Target Type 域选择 Flexible 选项, 单击 Pick Target 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取插座上与插销接触的曲面, 单击 OK 按钮。

(4) 单击 Next 按钮, 接触向导如图 9-68 所示, 要求定义接触面。



图 9-68 定义接触面

(5) 在 Contact Surface 域选择 Areas 选项, 在 Contact element type 域选择 Surface-to-Surface 选项。单击 Pick Contact 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取插销上与插座接触的曲面, 单击 OK 按钮。

(6) 单击 Creat 按钮, 弹出如图 9-69 所示的对话框, 提示接触单元已经生成。单击 Finish 按钮关闭。

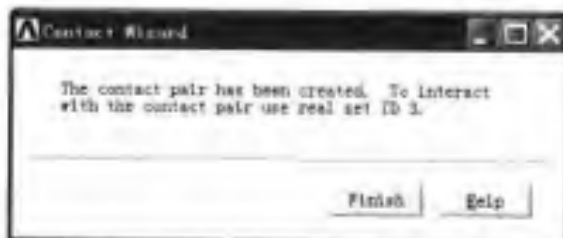


图 9-69 提示接触单元已经生成

(7) 关闭 Contact Manager 对话框。

#### 4. 定义位移约束

(1) 选择菜单项 Utility Menu>Plot>Areas, 重新绘制面积。

(2) 施加对称约束。

选择菜单项 Main menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement> Symmetric B.C.>On Areas, 弹出拾取对话框, 拾取插座和插销被切分出来的 4 个面, 如图 9-70 所示, 单击 OK 按钮确定。

(3) 选择菜单项 Main menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Displacement> On Areas, 弹出拾取对话框, 拾取插座的左侧面, 单击 OK 按钮, 弹出 Apply U, ROT on Areas 对话框, 固定该面的所有自由度。



图 9-70 施加对称约束

### 5. 求解装配预应力

#### (1) 设置求解选项。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type> Sol's Control, 弹出如图 9-71 所示的 solution controls 对话框。

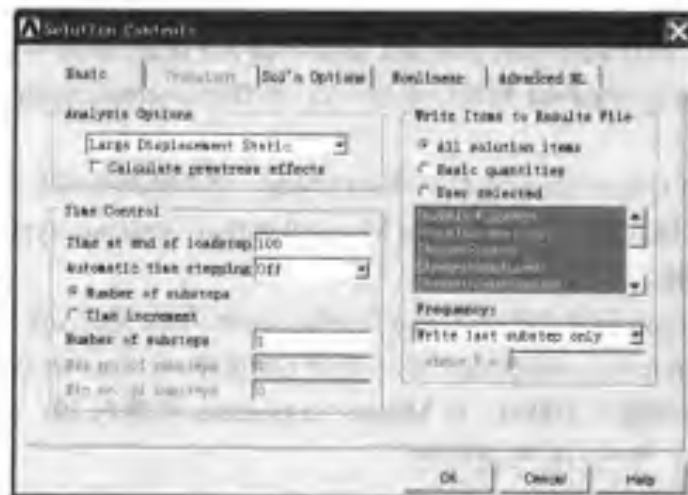


图 9-71 设置求解选项

(2) 在 Analysis Type 列表中选择 Large Displacement Static 选项, 在 Time at end of loadstep 域输入 100, 在 Automatic time stepping 列表中选择 Off 选项, 在 number of substeps 域输入 1, 单击 OK 按钮确定。

#### (3) 求解。

选择菜单项 Main menu>Solution>Solve>Current LS。

#### (4) 绘制装配应力图。

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution, 在弹出的对话框中选择 Stress>von Mises SEQV, 单击 OK 按钮, 得到如图 9-72 所示的 Mises 应力分布。

### 6. 求解拔拉过程

(1) 选择菜单项 Utility Menu>Plot>Areas, 重新绘制面积。



图 9-72 绘制装配应力图

(2) 选择菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 弹出 Select Entities 对话框, 在选择对象列表中选择 Nodes, 在选择方式列表中选择 By Location, 单击单选按钮 Z Coordinates, 在 Min, Max 域输入 Z 坐标为 4.5, 单击 From Full 单选按钮, 最后单击 Apply 按钮确定, 选取位于  $Z=4.5$  处的所有节点。

(3) 选择菜单项 Main menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Displacement> On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 拾取框, 单击 Pick All 按钮, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 在 DOFs to be constrained 列表中单击 UZ, 在 Displacement value 域输入 1.7, 单击 OK 按钮。

(4) 选择菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 重新选择所有单元和节点。

(5) 设置求解选项。选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type> Sol's Control, 弹出 solution controls 对话框。

(6) 在 Analysis Type 列表中选择 Large Displacement Static 选项, 在 Time at end of loadstep 域输入 200, 在 Automatic time stepping 列表中选择 On 选项, 在 number of substeps 域输入 100, 在 Max no. of substeps 域输入 10000, 在 Min no. of substeps 域输入 10, 在 Frequency 列表中选择 Write every substep, 单击 OK 按钮确定。

(7) 求解。选择菜单项 Main menu>Solution>Solve>Current LS。

## 7. 结果后处理

### (1) 扩展模型。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion> Priodic/Ccline Smmetry, 弹出 Priodic/Ccline Smmetry Expansion 对话框, 从中选择 1/4 Dihedral Sym 选项, 单击 OK 按钮, 得到如图 9-73 所示的扩展模型。

(2) 选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>By time/frequency, 弹出 Read Results by time or frequency 对话框, 在 TIME 域输入 120, 单击 OK 按钮, 读入拨拉过程中  $TIME=120$  时刻的计算结果。

(3) 选择插销中与插座接触的单元。选择菜单项 Utility Menu>Select>Entities, 弹出 Select Entities 对话框, 在选择对象列表中选择 Elements, 在选择方式列表中选择 By Element name, 在 Element Name 域输入 174, 单击 From Full 单选按钮, 最后单击 OK 按钮确定, 选择插销中与插座接触的单元。

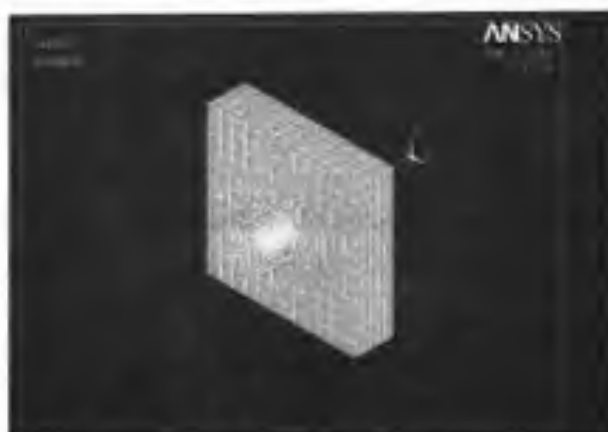


图 9-73 扩展模型

(4) 选择菜单项 Utility Menu>Plot>Elements, 重绘单元, 如图 9-74 所示。



图 9-74 插销中与插座接触的单元

(5) 绘制接触压力。选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution, 在弹出的对话框中选择 Contact>Pressure PRES, 单击 OK 按钮, 得到如图 9-75 所示的接触压力分布。



图 9-75 绘制接触压力

(6) 选择菜单项 Utility Menu>Select>Everything, 重新选择所有单元和节点。



(7) 读入载荷步 2 结果。选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Load Step，弹出 Read Results by Load Step number 对话框，在 LSTEP 域输入 2，单击 OK 按钮，读入载荷步 2 计算结果。

(8) 绘制等效应力分布。

选择菜单项 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solution，在弹出的对话框中选择 Stress>von Mises SEQV，单击 OK 按钮，得到如图 9-76 所示的 Mises 应力分布。

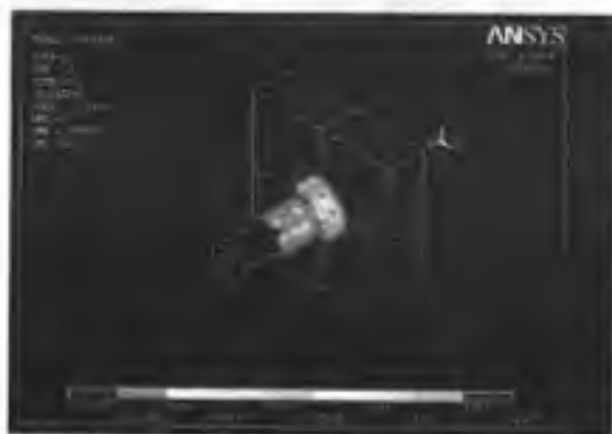


图 9-76 Mises 应力分布

(9) 绘制拨拉过程的应变变化动画。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Over Results，弹出如图 9-77 所示的 Animate Over Results 对话框。

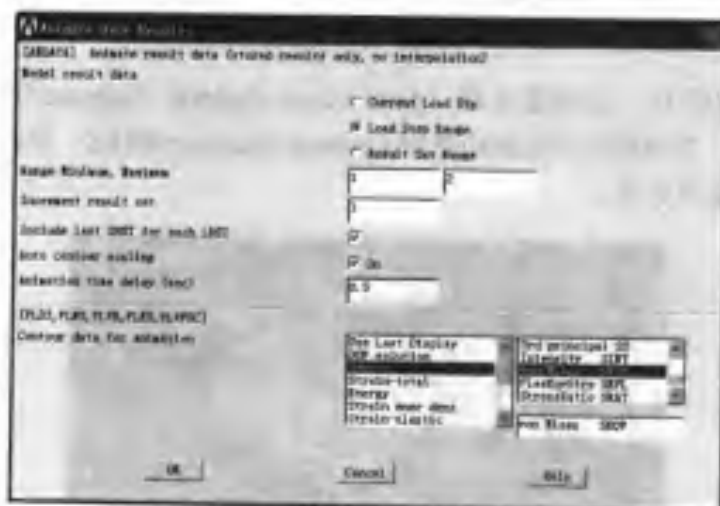


图 9-77 绘制拨拉过程的应变变化动画

在 Model result data 域选择 Load step range 选项，在 range Minimum 域和 Maximum 域分别输入 1 和 2，选择 Include last SBST for each LDST 复选框和 Auto contour Scaling 复选框，在 Contour data for animation 域选择 Stress>von Mises，单击 OK 按钮，得到拨拉过程的应力变化动画。

如果上述建模和分析过程采用批处理操作方式,则相应的 ANSYS 命令流如下:

```
! *****
! *          插销拨拉问题分析
! *****

! (1) 建立几何模型
/FILENAME,bolt          ! 指定工作名称
/title,bolt_pulling analysis ! 指定图形显示标题
/PREP7                  ! 进入前处理程序
BLOCK,-2,2,-2,2,2.5,3.5, ! 建立插座方块
/VIEW,1,1,1,1          ! ISO 视角
/ANG,1
/REP,FAST
CYLIND,0.49, ,2.5,3.5,0,360, ! 插座开孔
VSBV, , ,1, , ,2          ! 插座开孔
CYLIND,0.5, ,2,4.5,0,360, ! 建立插销圆柱
/PNUM,VOLU,1            ! 打开体积序号显示
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.003,0,0,,5 ! 设置工作平面
WPSTYLE,,,,,,,,,1      ! 显示工作平面
wpro,,,90.000000        ! 旋转工作平面
VSBW,ALL                ! 切分模型 1/2
VDELE,4, , ,1          ! 删除 1/2 模型
VDELE,6, , ,1
WPCSYS,-1,0             ! 还原工作平面
wpro,,,90.000000        ! 旋转工作平面
VSBW,ALL                ! 切分 1/4 模型
VDELE,P51X, , ,1       ! 删除 1/4 模型
WPCSYS,-1,0             ! 还原工作平面
WPSTYLE,,,,,,,,,0      ! 关闭工作平面显示

! (2) 定义单元类型、材料模型和网格划分
ET,1,SOLID185           ! 定义单元类型
MPTEMP,,,,,,,,          ! 定义材料模型
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,36e6
MPDATA,PRXY,1,,0.3
LESIZE,4, , ,3, , , ,0 ! 定义线段 4 和 10 的网格密度
LESIZE,10, , ,3, , , ,0
LESIZE,18, , ,4, , , ,0 ! 定义线段 18 的网格密度
VSWEEP,ALL              ! 划分网格
/SHRINK,0                ! 显示大小和形状设定
/ESHAPE,0.0
/EFACET,2
/RATIO,1,1,1
/CFORMAT,32,0

! (3) 定义接触单元
```



```

ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPL0T
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END

```

! (4) 定义位移约束

```

FINISH                                ! 退出前处理程序
APLOT                                  ! 重新绘制面积
/SOLU                                  ! 进入求解模块
FLST,2,4,5,ORDE,4                     ! 拾取面积 3、7、11、14
FITEM,2,3
FITEM,2,7
FITEM,2,11
FITEM,2,14
DA,P51X,SYMM                           ! 在面积 3、7、11、14 上施加对称边界条件
FLST,2,1,5,ORDE,1                     ! 拾取面积 19
FITEM,2,19
DA,P51X,ALL,0                          ! 在面积 19 上固定位移

```

! (5) 求解装配预应力

```

ANTYPE,0                                ! 分析类型
NLGEOM,1                                ! 打开几何非线性特性
NSUBST,1,0,0                            ! 子步设置
AUTOTS,0                                 ! 自动时间步长

```

```

TIME,100                ! 载荷步终止时间
/STATUS,SOLU            ! 求解状态
SOLVE                   ! 求解
FINISH                  ! 退出求解模块
/POST1                  ! 进入通用后处理模块
/EFACET,1              ! 绘制装配预应力图
AVPRIN,0,
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
SAVE                    ! 保存结果

! (6) 求解拔拉过程
APLOT                   ! 重新绘制面积
NSEL,S,LOC,Z,4.5       ! 选取坐标 Z=4.5 处节点
FINISH                  ! 退出通用后处理模块
/SOL                    ! 进入求解模块
ANTYPE, REST           ! 重启分析
D,ALL, ,1.7, , ,UZ, , , ,
ALLSEL,ALL             ! 选取所有节点
NSUBST,100,10000,10   ! 载荷步 2 的子步设置
OUTRES,ERASE          ! 结果输入设置
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1               ! 打开自动时间步长
TIME,200               ! 载荷步 2 终止时间
/STATUS,SOLU            ! 求解状态
SOLVE                   ! 求解
FINISH                  ! 退出求解模块

! (7) 结果后处理
/EXPAND,4,POLAR,HALF,,90 ! 模型扩展
EPLOT                   ! 单元绘制
/POST1                  ! 进入通用后处理模块
SET, , ,1, ,120, ,     ! 读入 t=120 时刻的结果
ESEL,S,ENAME,,174      ! 选择插销中与插座接触的单元
EPLOT                   ! 绘制单元
/EFACET,1              ! 绘制接触压力
AVPRIN,0,
PLNSOL, CONT,PRES, 0,1.0
ALLSEL,ALL             ! 选取所有单元
SET,2, LAST,1,         ! 读入载荷步 2 结果
/EFACET,1              ! 绘制 Mises 应力分布图
AVPRIN,0,
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
PLNS,S,EQV             ! 绘制拔拉过程中应力变化
ANDATA,0.5, ,0,0,1,1,1
FINISH                  ! 退出通用后处理模块
/EXIT,ALL              ! 退出 ANSYS 并保存结果

```

## 第 10 章 结构的稳定性分析方法及 ANSYS 范例

### 📖 本章导读

结构的稳定问题是结构分析和设计过程中必须考虑的重要问题。本章从基本概念出发，系统地介绍了 ANSYS 结构稳定性分析的基本实现方法和操作步骤，且在讲解中给出了一系列相关分析实例的具体操作。

本章包括如下的一些内容：

- ANSYS 结构稳定性分析的基本概念
- 圆柱面屋盖的特征值屈曲分析
- 工字型薄壁梁的弯扭屈曲分析

### 10.1 ANSYS 结构稳定性分析的基本概念

本节向读者介绍结构稳定性问题的基本概念，以及在 ANSYS 中进行结构稳定性分析的一般操作方法。

结构的稳定性问题，是结构分析中最为重要的研究课题之一。近年来，随着各类大跨空间结构的广泛应用，结构的稳定性问题变得尤为突出。1963 年罗马尼亚布加勒斯特的一个跨度为 93.5m 的网壳屋盖在一场大雪后被压垮，其原因就是网壳整体失稳。

目前，稳定性分析（又称屈曲分析）和稳定性验算已经成为各类结构设计中必须考虑的关键性问题。结构的失稳破坏一般可分为如下两种：

#### （1）平衡状态分枝型失稳。

当载荷达到一定数值时，如果结构的平衡状态发生质的变化，则称结构发生了平衡状态分枝型失稳。这种失稳的临界载荷可以通过分枝平衡状态的分析进行计算，分枝平衡状态实际上是一种随遇平衡状态。

#### （2）极值点失稳。

如果当载荷达到一定的数值后，随着变形的发展，结构内、外力之间的平衡不再可能达到，这时即使外力不增加，结构的变形也将不断地增加直至结构破坏。这种失稳形式通常是发生在具有初始缺陷的结构中，如具有初始弯曲的轴心压杆就属于这种问题情况。在这种失稳情况下，结构的平衡形式并没有质的变化，结构失稳的临界载荷可通过载荷-变形曲线的载荷极值点得到，因此这类失稳被称为极值点失稳。

在一般的教科书中，通常将以上两种失稳类型分别称为第一类失稳问题和第二类失稳问题。对第二类失稳问题来说，结构的位移一般已经超出小变形范围，因此一般为几何非线性和材料非线性同时存在的复合非线性问题。

ANSYS 程序提供了两种屈曲分析的方法，即特征值屈曲分析和非线性屈曲分析，下面两节中将结合工程实例对这两种问题的分析方法进行讲解。

## 10.2 圆柱面屋盖的特征值屈曲分析

本节介绍圆柱面壳体结构的特征值屈曲分析，采用本书第 7 章的工程实例——圆柱壳屋面的结构分析模型，模型几何参数以及具体的建模操作过程请参照前面的相关章节，这里不重复叙述。

下面来进行这一结构的特征值屈曲分析，分为三个步骤：首先是设置预应力选项并执行一次静力分析，然后计算屈曲模态，最后扩展屈曲模态。下面分步骤进行讲解。

### 第 1 步：静力分析

由于静力分析是默认的分析类型，因此作静力分析时不需要专门指定分析类型，但是需要通过如下方式设置预应力选项，否则无法进行后面的屈曲分析。

在 GUI 界面中，选择 Main Menu>Solution>Unabridged Menu，打开完整的菜单。选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，选择打开其中的预应力选项，即在这一设置窗口最下面的 SSTIF 以及 PSTRES 命令设置下拉菜单中选择 Prestress ON 选项，如图 10-1 所示。选择 Sparse Direct 求解器，然后单击 OK 退出。

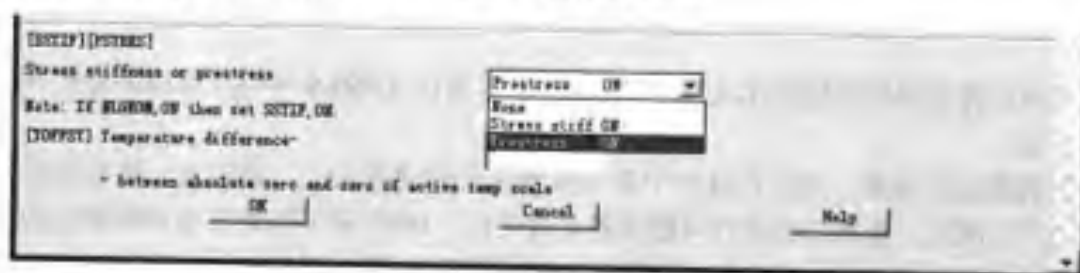


图 10-1 预应力选项打开

完成上述设置后，选择主菜单 Main menu>Solution>Solve>Current LS，程序即开始进行静力分析。在分析结束之后，有信息窗口中提示 Solution is done!，关闭之。

静力分析完成后，在进行屈曲分析之前，首先要向程序声明静力分析已经完成，为此要先选择 Main Menu>Finish 菜单项，暂时退出求解器。

### 第 2 步：特征值屈曲分析与屈曲模态扩展

这一步进行特征值屈曲分析，为此需进行相关的分析设置如下：

选择主菜单 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，指定分析类型为 Eigen Buckling，单击 OK 按钮完成分析类型的设定。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，对分析选项进行设置，选择屈曲模态提取方法为 Block Lanczos 方法，模态提取数填 6，其余采用默认设置即可，如图 10-2 所示。

选择菜单项 Main menu>Solution>Load Step Opts>Expansion Pass>Single Expand>Expand Modes，在弹出的对话框中进行屈曲模态扩展的相关设置，屈曲模态扩展数填 6，选中 Calculate Elem results 复选框，如图 10-3 所示。

设置完相关的分析选项之后，选择菜单项 Main menu>Solution>Solve>Current LS，程序即开始执行特征值屈曲分析。完成求解后，弹出 Solution is done! 消息框，关闭之。

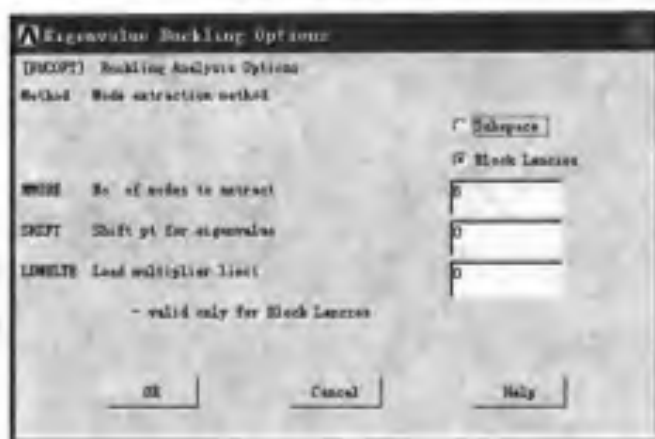


图 10-2 屈曲分析的选项设置



图 10-3 扩展屈曲模态

分析完毕后，同样向程序声明特征值屈曲分析已经完成，即通过 Main Menu>Finish 菜单项，退出求解器。

### 第 3 步：观察特征值屈曲分析结果

首先通过菜单项 Main Menu>General PostProc 进入通用后处理器。

在图形显示结果之前，需先读入结果文件。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，读入第 1 载荷步的结果文件。

下面来观察第一阶屈曲模态。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def+undef edge，单击 OK，即可显示模型的一阶模态振型。

只需要依次读入各载荷步的结果，即可采用同样的方式来观察其他的五阶屈曲模态。图 10-4 (a) 至 (f) 所示为圆柱面屋盖特征值屈曲分析得到的前 6 阶屈曲模态的变形图。

如采用批处理模式，则本节的特征值屈曲分析以及后处理过程的命令流如下：

```

/SOLU                                ! 进入求解器
ANTYPE,0                              ! 指定分析类型为静力分析
EQSLV,SPAR                            ! 选择稀疏矩阵直接求解器
PSTRES,ON                             ! 打开预应力选项
SOLVE                                  ! 执行静力分析
FINISH                                 ! 退出求解器
/SOLU                                  ! 进入求解器

```



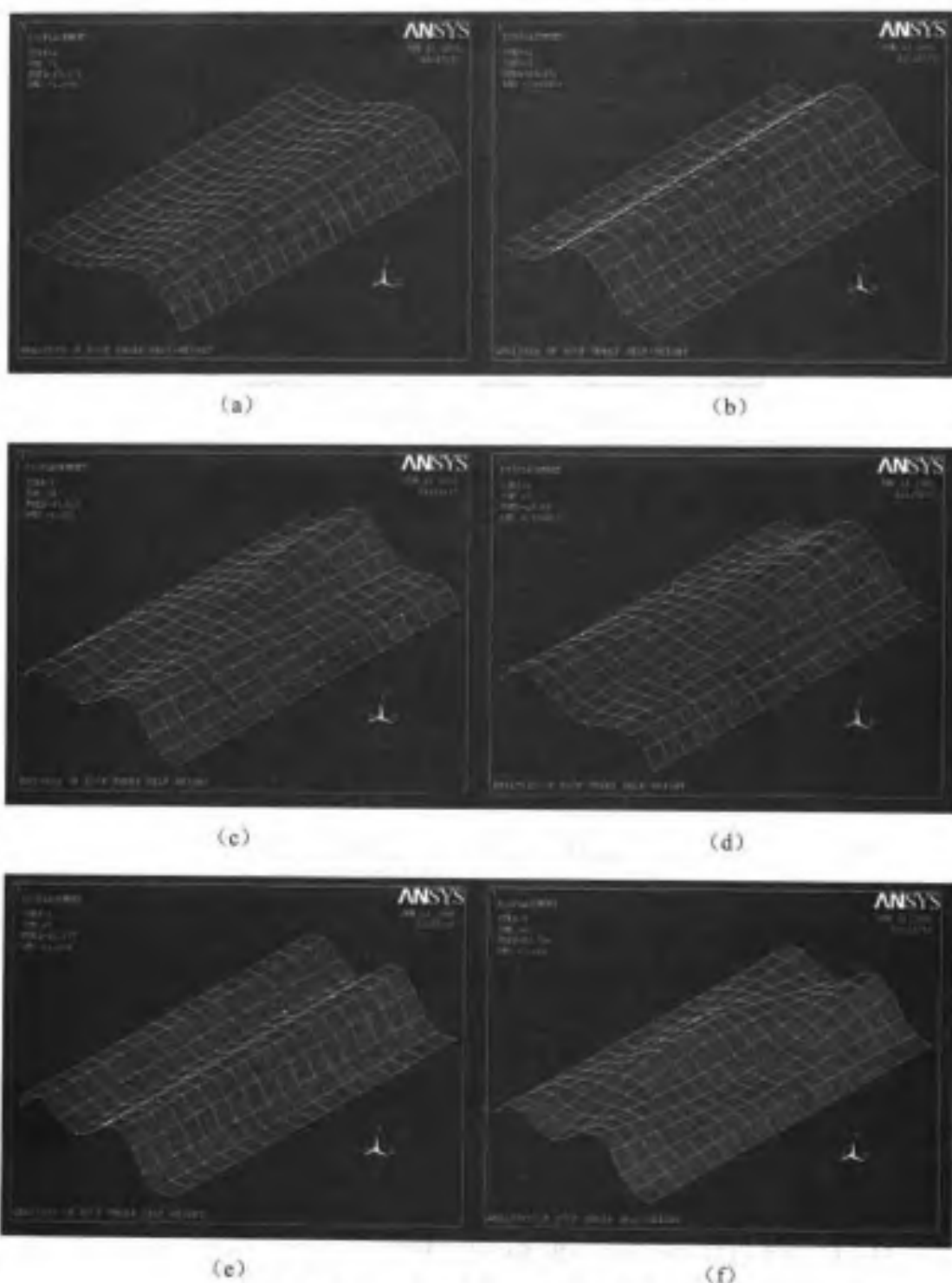


图 10-4 圆柱面屋盖的前 6 阶屈曲模态

```

ANTYPE,1
BUCOPT,LANB,6,0,0
MXPAND,6,0,0,1,0.001,
SOLVE
FINISH

```

```

! 指定分析类型为特征值屈曲分析
! 设置屈曲模态提取方法及模态提取数
! 设置屈曲模态扩展数及扩展算法选项
! 执行特征值屈曲分析
! 退出求解器

```

```

/POST1          ! 进入通用后处理器
SET, FIRST     ! 读入第一荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
SET, NEXT     ! 读入第二荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
SET, NEXT     ! 读入第三荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
SET, NEXT     ! 读入第四荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
SET, NEXT     ! 读入第五荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
SET, NEXT     ! 读入第六荷载步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为显示变形后的形状
FINISH        ! 退出通用后处理器

```

### 10.3 工字梁的弯扭屈曲分析

某等截面的工字形横截面悬臂梁，如图 10-5 所示，在其自由端受到横向载荷  $F$  作用。本节将介绍在 ANSYS 中进行此工字形梁的横向弯扭失稳问题的分析方法，并通过计算确定梁发生失稳时的临界载荷。

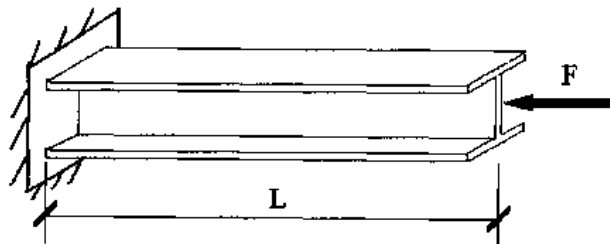


图 10-5 工字梁的弯扭屈曲分析

问题的基本参数：

杨氏弹性模量  $E=2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，泊松比  $\nu=0.2$ ，梁长度为  $2.5 \text{ m}$ ，横截面尺寸见表 10-1 所列。

表 10-1 梁的横截面尺寸（单位：mm）

宽度 B	高度 H	腹板厚 $t_1$	翼缘厚 $t_2$
150	250	15	15

#### 10.3.1 建立分析模型

在本小节中，按照如下的具体步骤来介绍建立模型的整个过程。

##### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 I-BEAM，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示标题为 BUCKLING。

##### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

### 第3步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 10-6 所示。

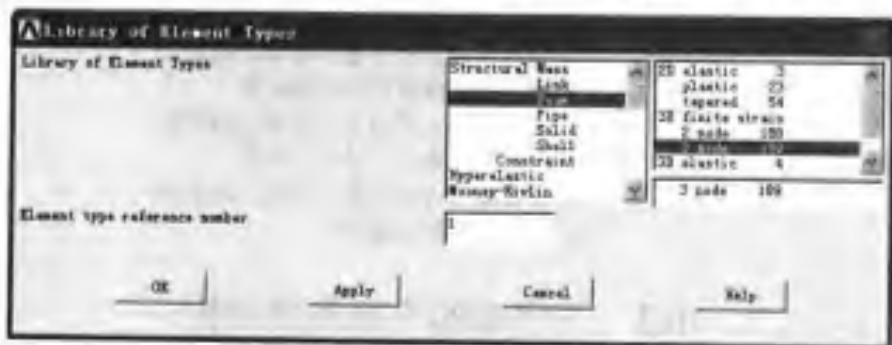


图 10-6 定义单元类型

对于本问题，拟采用三维梁单元 BEAM189，因此在窗口左侧选择 Structural Beam，右侧选择 3D finite strain, 3 node 189，单击 OK 退出。

### 第4步：定义单元截面

为梁单元指定工型横截面的相关参数，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Sections>-Beam-Common Sects，弹出 Beam Tool 对话框，在这对话框中输入截面的各种参数，如图 10-7 所示。

截面 ID 号取程序缺省值 1 即可，Sub-Type 选择 “I” 型截面，下面依次按照图标提示，输入截面的各个几何参数值，截面网格疏密程度 Coarse-Fine 滚动条选择 2。然后单击 Apply 按钮，接受上述截面参数的设置。单击 Preview 按钮，可以观察已经定义的截面形状，如图 10-8 所示。

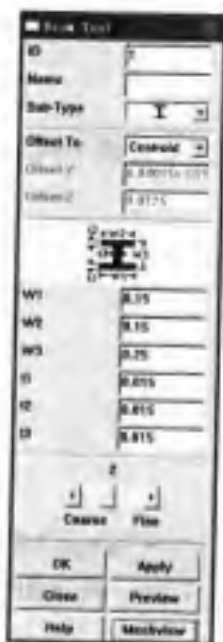


图 10-7 定义梁截面

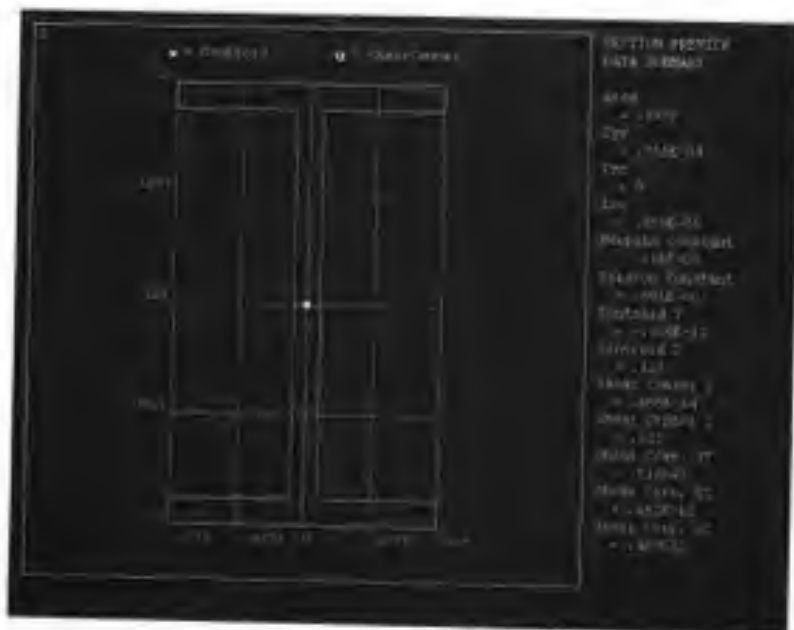


图 10-8 定义的梁截面形状

图 10-8 中的右侧显示了程序自动计算的梁横截面的几何参数, 包括面积、惯性矩、重心以及剪切中心位置等, 这些参数也可通过 Utility Menu>List>Properties>Section Properties 查看, 列表显示的结果见如图 10-9 所示。

```

LIST SECTION ID DATA      1 TO      1 BY      1

SECTION ID NUMBER:      1
SEGN SECTION TYPE:      1 Section
SEGN SECTION NAME ID:
SEGN SECTION DATA SUMMARY:
Area                    - 8.76800E-02
Iyy                     - 8.75522E-04
Ixx                     - 8.71992E-04
Ixy                     - 8.84974E-05
Warping Constant       - 8.11514E-06
Torsion Constant       - 8.51764E-06
Centroid Y             - 8.53211E-17
Centroid Z             - 8.12500E-15
Shear Center Y         - 8.19182E-15
Shear Center Z         - 8.12500E-15
Shear Correction-yy    - 8.53350E-01
Shear Correction-yy    - 8.48578E-13
Shear Correction-xx    - 8.43732E-01

Beam Section is offset to CENROID of cross section

```

图 10-9 列表显示的梁截面参数

单击 Meshview 按钮, 可以显示截面的网格, 如图 10-10 所示:



图 10-10 横截面的网格

定义截面完成后, 单击 OK 按钮退出该对话框。

#### 第 5 步: 定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models, 将出现 Define Material Model Behavior 对话框, 在窗口的右侧, 依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 在出现的对话框中输入材料弹性模量以及泊松比。单击 OK 按钮, 返回 Define Material Model Behavior, 在右侧选择 Density, 双击打开定义密度的对话框, 在其中输入材料的密度 (本题可不定义密度), 单击 OK 按钮退出, 然后关闭 Define Material Model Behavior 返回图形用户界面, 即可完成材料模型的定义。

#### 第 6 步: 建立关键点和直线

从这一步开始建立几何模型，首先建立关键点，选择菜单项 Main menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，定义表 10-2 所列的一些关键点。

表 10-2 关键点的编号与坐标

关键点 ID	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	2.500	0.000	0.000
3	1.250	1.0000	0.000

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line，出现 Create Straight Line picker 窗口，在图形显示区域内用鼠标依次点选 1 号、2 号关键点，单击 OK 按钮，即可在关键点 1 和关键点 2 之间建立一条直线。

#### 第 7 步：网格划分前的设定

对线划分单元之前，需要先指定划分形成的线单元的属性。

通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Lines，出现 Line Attributes 拾取框。在图形显示区域选择刚才定义的直线，单击拾取窗口的 Apply 按钮，随即出现 Line Attributes 对话框，如图 10-11 所示。



图 10-11 “Line Attributes”对话框

缺省时，ANSYS 将材料特性指向 1，单元类型号指向 1，截面特性号也指向 1，接受这些默认设置即可。除了这些选项之外，还需要对线单元的定向关键点进行设置，选中 Pick Orientation Keypoint(s)的复选框，使其为 Yes，单击 OK 按钮。在出现的 Line Attributes 拾取框中，选择关键点 3，单击 OK 按钮完成设置。

接下来，需要对线划分的网格尺寸（分段数）进行设置，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>Manual Size>Lines>All Lines，在 NDIV（No. of Element Divisions）中填写 10，如图 10-12 所示，单击 OK 按钮退出。

#### 第 8 步：对直线进行网格划分

上述设置完成后，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool，打开网格划分工具 MeshTool 窗口。单击 Mesh 按钮，出现 Mesh Line picker 对象拾取框，在图形显示区域中选择要划分网格的线（只有一条），单击对象拾取框的 OK 按钮，完成单元的划分。单击

MeshTool 窗口的 Close 按钮，退出该窗口。

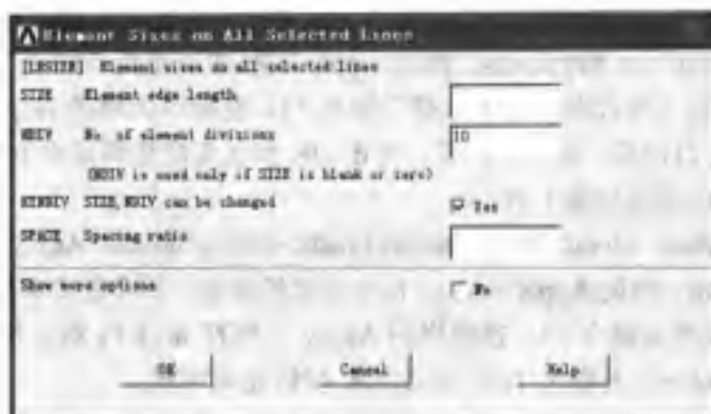


图 10-12 线段等分数设置

下面来观察形成的梁单元的形狀，首先通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Pan Zoom Rotate 调用图形控制窗口，设置视图格式为 Iso，绘图区域将显示如图 10-13 所示的图形。

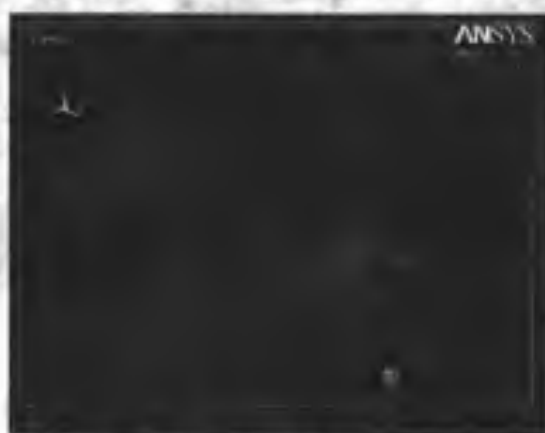


图 10-13 等角视图显示线段

然后通过菜单项 Utility Menu>PlotCtrls >Style>Size and Shape，在弹出的窗口中，将 [/ESHAPE] 一栏选择 On，单击 OK 按钮，即可看到梁单元截面的实际形状，通过单击 Pan Zoom Rotate 显示控制窗口的 Fit 按钮，得到梁的实际形状的显示结果，如图 10-14 所示。

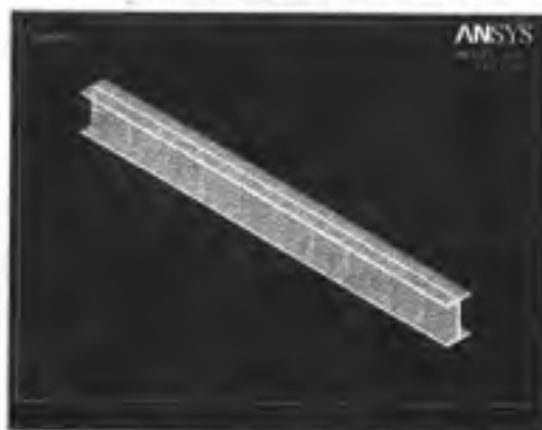


图 10-14 梁的实际形状

### 第9步：施加位移边界条件

梁的左端为固定端，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints，出现 Apply U,ROT on KPs 对象拾取框，直接在文本框中输入 1 并按 enter 键（或者在屏幕上选择关键点 1），在随后弹出的 Apply U,ROT on KPs 对话框中选择约束所有自由度，即 All DOF，单击 OK 按钮完成梁固定端的位移约束。

### 第10步：在自由端施加集中力

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply> Structural> Force/Moment>On Keypoints，出现 Apply F/M on KPs 对象拾取框，直接在文本框中输入 2 并按 enter 键（或者在屏幕上选择关键点 1），在弹出的 Apply U,ROT on KPs 对话框中选择 FX，在集中力的数值文本框（Value）中输入  $-1e6$ ，单击 OK 按钮完成加载。

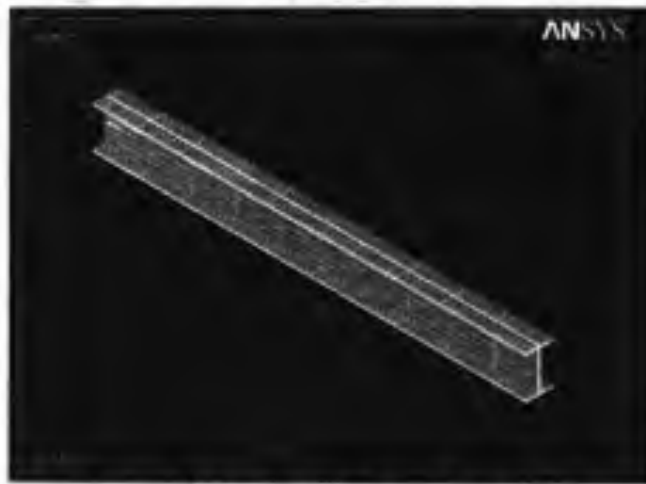


图 10-15 施加边界约束及载荷后的显示结果

注意：上述施加位移约束以及加载的操作，也可退出前处理器而在进入求解器之后进行，相应的菜单项为：

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints

如果建模过程采用批处理方式，则相应的命令流如下：

```

/FILNAME, I-BEAM           ! 指定工作名称
/TITLE, BUCKLING          ! 指定图形显示标题
/PREP7                    ! 进入前处理器
ET,1,BEAM189              ! 定义梁单元类型
! 以下三行用于定义梁的横截面及相关参数
SECTYPE, 1, BEAM, 1, 2
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.15,0.15,0.25,0.015,0.015,0.015,0,0,0
! 以下三行用于定义材料模型的参数
MP,DENS,1, 7.85e3
MP,EX,1, 2.06e11

```

```
MP,NUXY,1,0.2
```

! 以下三行用于定义三个关键点

```
K,1,0.000,0.000,0.000
```

```
K,2,2.500,0.000,0.000
```

```
K,3,1.250,1.000,0.000
```

```
LSTR,1,2
```

! 画直线

```
LATT,1,,1,,3,,1
```

! 指定要划分单元的类型

```
LESIZE,1,,10
```

! 定义线段等分数

```
LMESH,1
```

! 划分线单元

```
/VIEW,1,1,1,1
```

! 改变视图角度

```
/ANG,1
```

```
/REP,FAST
```

```
/ESHAPE,1.0
```

! 显示梁单元实际截面形状

```
DK,1,,,0,ALL,,,,,
```

! 定义位移约束

```
FK,2,FX,-1e6
```

! 定义自由端的载荷

```
FINISH
```

! 退出前处理器

### 10.3.2 特征值屈曲分析与结果显示

建模完成后即可着手进行结构的稳定性分析，首先进行梁的特征值屈曲分析，分为三个步骤：首先是设置预应力选项并执行一次静力分析，然后计算屈曲模态，最后扩展屈曲模态。下面分步骤进行讲解。

#### 第 1 步：静力分析

由于静力分析是默认的分析类型，因此作静力分析时不需要专门指定分析类型，但是需要通过如下方式设置预应力选项，否则无法进行后面的屈曲分析。

在 GUI 界面中，选择 Main Menu>Solution>Unabridged Menu，打开完整的菜单。选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，选择打开其中的预应力选项，即在这一设置窗口最下面的 SSTIF 以及 PSTRES 命令设置下拉菜单中选择 Prestress ON 选项，选择 Sparse Direct 求解器，然后单击 OK 退出。

完成上述设置后，选择主菜单 Main menu>Solution>Solve>Current LS，程序即开始进行静力分析。在分析结束之后，有信息窗口中提示 Solution is done!，关闭之。

静力分析完成后，在进行屈曲分析之前，首先要向程序声明静力分析已经完成。为此只要先选择 Main Menu>Finish 菜单项，暂时退出求解器。

#### 第 2 步：特征值屈曲分析与屈曲模态扩展

这一步进行特征值屈曲分析，为此需进行相关的分析设置如下：

选择主菜单 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，指定分析类型为 Eigen Buckling，单击 OK 按钮完成分析类型的设定。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，对分析选项进行设置，选择屈曲模态提取方法为 Block Lanczos 方法，模态提取数填 6，其余采用默认设置即可，单击 OK 退出。



选择菜单项 Main menu>Solution> Load Step Opts>Expansion Pass>Single Expand> Expand Modes, 在弹出的对话框中进行屈曲模态扩展的相关设置, 屈曲模态扩展数填 6, 选中 Calculate Elem results 复选框, 单击 OK 退出。

设置完相关的分析选项之后, 选择菜单项 Main menu>Solution> Solve> Current LS, 程序即开始执行特征值屈曲分析。完成求解后, 弹出 Solution is done! 消息框, 关闭之。

分析完毕后, 同样向程序声明特征值屈曲分析已经完成, 即: 通过 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

### 第 3 步: 观察特征值屈曲分析结果

首先通过菜单项 Main Menu>General PostProc 进入通用后处理器。

在图形显示结果之前, 需先读入结果文件。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入第 1 载荷步的结果文件。

下面来观察第一阶屈曲模态。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 选择 Def+undef edge, 单击 OK, 即可显示模型的一阶模态振型。

只需要依次读入各载荷步的结果, 即可采用同样的方式来观察其他的五阶屈曲模态。图 10-16 (a) 至 (f) 所示为工字梁特征值屈曲分析得到的前 6 阶屈曲模态的变形图。

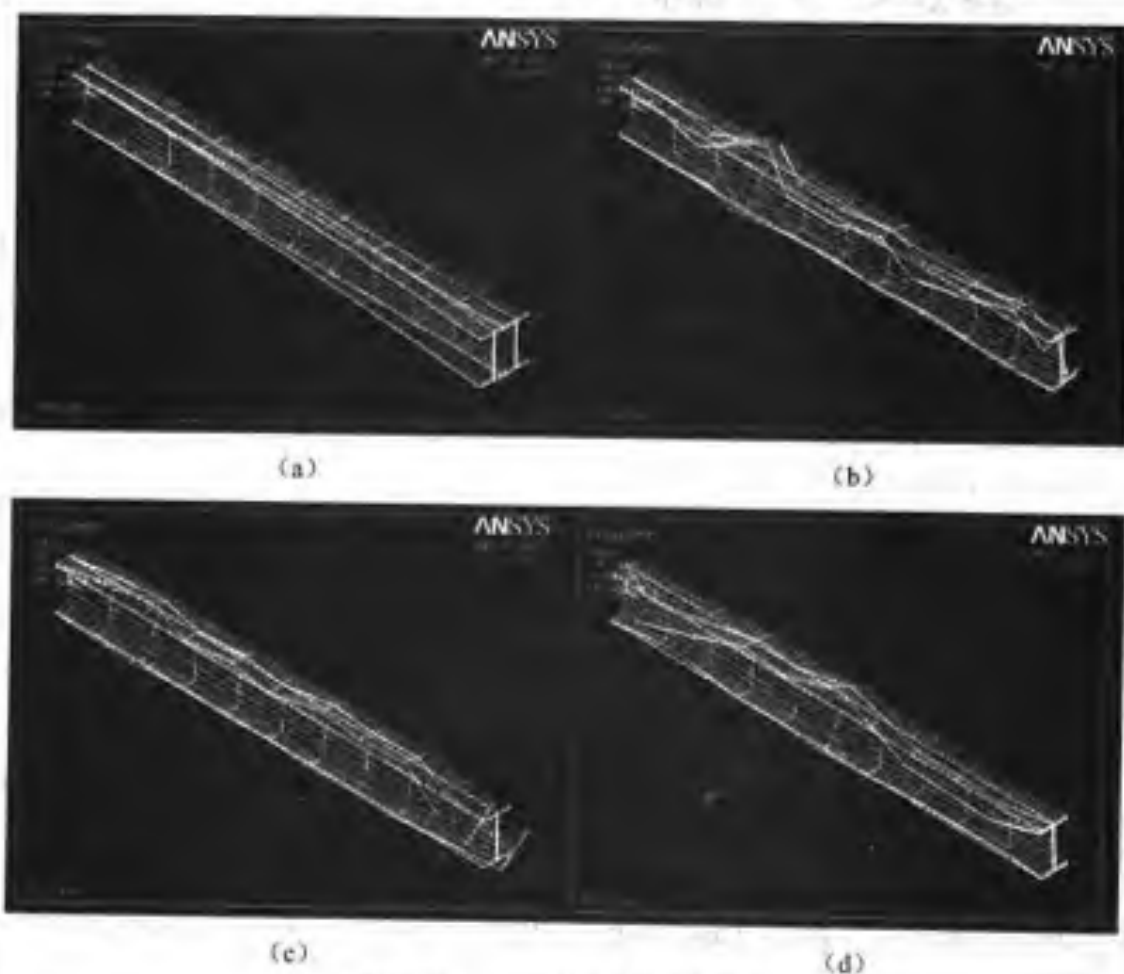


图 10-16 工字梁的前 6 阶屈曲模态

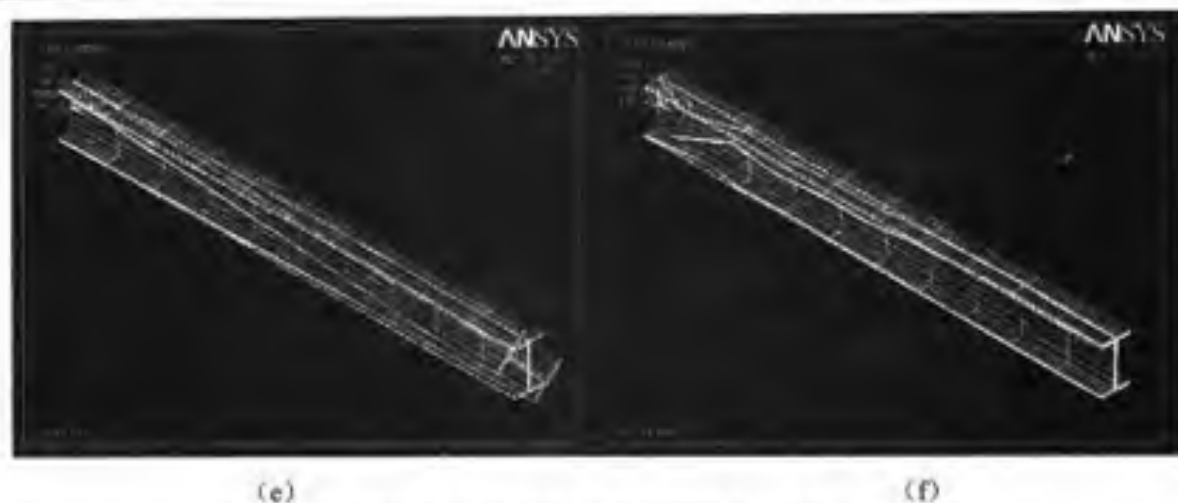


图 10-16 工字梁的前 6 阶屈曲模态 (续图)

如采用批处理模式，则本节的特征值屈曲分析以及后处理过程的命令流如下：

```

/SOLU                                ! 进入求解器
ANTYPE,0                              ! 指定分析类型为静力分析
EQSLV,SPAR                            ! 选择稀疏矩阵直接求解器
PSTRES,ON                             ! 打开预应力选项
SOLVE                                  ! 执行静力分析
FINISH                                  ! 退出求解器
/SOLU                                  ! 进入求解器
ANTYPE,1                              ! 指定分析类型为特征值屈曲分析
BUCOPT,LANB,6,0,0                    ! 设置屈曲模态提取方法及模态提取数
MXPAND,6,0,0,1,0.001,               ! 设置屈曲模态扩展数及扩展算法选项
SOLVE                                  ! 执行特征值屈曲分析
FINISH                                  ! 退出求解器

/POST1                                 ! 进入通用后处理器
SET, FIRST                             ! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                               ! 读入第二载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                               ! 读入第三载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                               ! 读入第四载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                               ! 读入第五载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                               ! 读入第六载荷步的计算结果
PLDISP,2                               ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
FINISH                                  ! 退出通用后处理器

```

### 10.3.3 非线性屈曲分析与结果评价

本节来分析工字梁在存在初始几何缺陷情况下的非线性屈曲问题。

将特征值屈曲分析得到的第一阶屈曲模态各节点的位移特征向量按一定比例缩小，作为梁模型的一种初始几何缺陷。

#### 第 1 步：修正材料模型

由于非线性屈曲伴随着结构的大变形，且可能已经超出弹性变形的范围，因此需要对材料模型进行修正，计及其弹塑性效应。为此，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的左侧，选中材料模型 1；在窗口的右侧，依次双击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening plasticity→Mises plasticity→Bilinear，在出现的对话框中输入材料的屈服应力为 200MPa，切线模量为 0。单击 OK 按钮退出参数设置对话框，之后关闭 Define Material Model Behavior 对话框，返回图形用户界面。

#### 第 2 步：引入结构的初始几何缺陷

首先，引入上节的计算结果，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling> Update Geom，在 Update nodes using results file displacement 对话框中设置几何缺陷的相关参数，如图 10-17 所示。

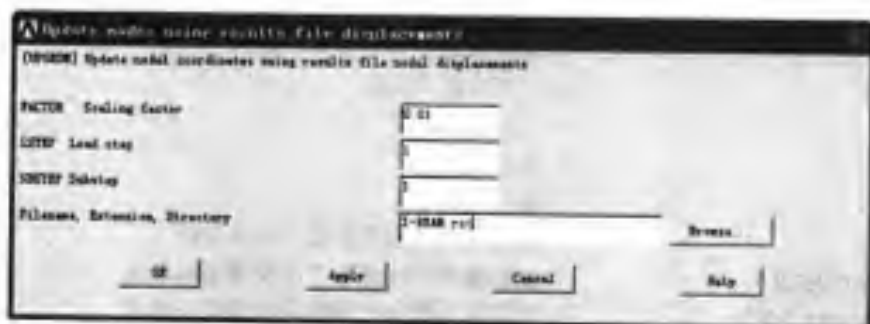


图 10-17 引入几何缺陷

缩放比例因子填 0.01，载荷步和子步均填 1，结果文件选择 I-BEAM.rst，设置完成后，单击 OK 退出。

#### 第 3 步：设置分析类型

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，指定分析类型为 Static，单击 OK 按钮完成分析类型的设定。

#### 第 4 步：设置计算输出的选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File，在弹出的 Controls for Database and Results File Writing 对话框中，选择 All Items 和 All entities 选项，单击 OK 退出。

#### 第 5 步：打开大变形选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，在弹出的 Static or Steady-State Analysis 对话框中，选择打开其中的大变形选项，即在[NLGEM]复选框中选择 On，然后点单击 OK 退出。

#### 第 6 步：设置弧长法选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Arc-Length Opts，设置弧长法 (Arc-length Method) 求解选项，如图 10-18 所示。



图 10-18 弧长法选项

选择打开弧长法，即选择 Arc-length method on/off 复选框，使之处于 On 状态。设定计算的终止控制参数，Lab 域右边的下拉菜单中选择 Displacement lim（即以位移限值来控制），在 VAL 文本框中填写 0.25，NODE 文本框中填写 2（即右端的自由节点），在 DOF 下拉菜单中选择 UX（即以横向挠度为控制标准）。

上述设置完成后，点 OK 按钮退出。

#### 第 7 步：设置分析的子步数

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Substps，在弹出的 Time and Substep Options 对话框指定子步数 NSUBST 为 200，单击 OK 退出。

#### 第 8 步：求解

设置完相关的分析选项之后，选择菜单项 Main menu>Solution>Solve>Current LS，程序即开始执行非线性分析。在非线性求解过程中，出现“时间”不增加反而减少的情况时，即可终止求解。

由于静态分析的“时间”参数与载荷数值成比例关系，因此在程序非线性求解的过程中出现“时间”不增加反而减少的情况，就表示已经达到了结构非线性失稳的极限载荷，这也体现了“极值型失稳”的特点，即载荷达到结构的极限载荷之后就不能再增加，结构的位移则继续增加，直至结构破坏。

由于程序的缺省设置是向结果文件输出最多 1000 个子步，但是实际上载荷下降段并不是我们所关心的，因此可以通过 /CONFIG 命令，设置其 NRES 选项为一个合理的值，如 100，即计算 100 个子步之后程序自动终止。

#### 第 9 步：进入时间历程后处理器

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro，进入时间历程后处理器。

#### 第 10 步：定义时间历程后处理变量 2

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables，在弹出的 Defined Time-History Variables 对话框中，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选中 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮。

随后，屏幕出现的 Define Nodal Data 拾取框。在图形显示窗口，选择节点 2（梁的自由端节点），然后单击 OK 按钮。出现 Define Nodal Data 对话框，如图 10-19 所示。



图 10-19 定义时间历程变量

其中，变量序号以及节点号都设为 2（也是程序的缺省设置，只需加以确认），变量名称取为 DEFLECTION，项目选 Translation UY。设置完成后，单击 OK 按钮退出，返回 Defined Time-History Variables 对话框。

#### 第 11 步：定义时间历程后处理变量 3

单击 Defined Time-History Variables 对话框的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选中 Reaction forces，单击 OK 按钮。随后，屏幕出现的 Define Reaction Force Variable 拾取框。在图形显示窗口，选择节点 1（梁的固定端节点），然后单击 OK 按钮。出现 Define Nodal Data 对话框，确认变量序号为 3 节点号为 1，变量名称取为 REACTIONF，项目选 Struct force FX。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables，在弹出的 Defined Time-History Variables 对话框中，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选中 Reaction forces，单击 OK 按钮。

设置完成后，单击 OK 按钮退出，返回 Defined Time-History Variables 列表中，已可以看到刚才定义的两个时间历程变量，如图 10-20 所示。

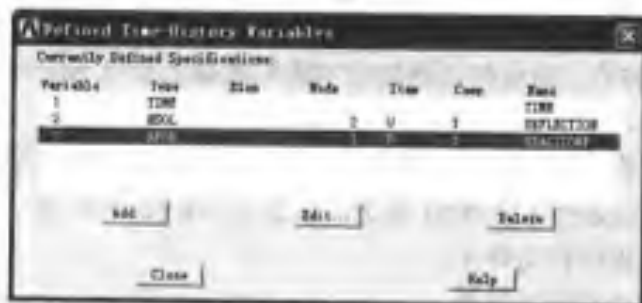


图 10-20 已定义的时间历程变量列表

#### 第 12 步：绘制载荷-位移曲线

选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>Graph 菜单项，定义横坐标（X）变量为侧向位移，在 Graph Settings 对话框中的 XVAR (X-axis variable) 选中 Single variable，Single variable No. 文本框中填 2，单击 OK 按钮退出该对话框。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes, 在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题, 分别为 DEFLECTION 和 REACTIONF, 单击 OK 退出。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables, 弹出对话框中, NVAR1 文本框中指定 3, 单击 OK 按钮, 则可绘制荷载-位移曲线, 如图 10-21 所示。



图 10-21 荷载-位移曲线

从荷载-位移曲线图中可以看出, 工字梁结构的非线性屈曲极限载荷约为 500kN, 也就是图中的极值点对应的纵坐标的数值。

如果上述非线性屈曲的分析过程采用批处理操作方式, 则相应的命令流如下:

```

/CONFIG,NRES,100          ! 设置分析终止条件

/PREP7                    ! 进入前处理器
TB,BISO,1,1,2            ! 修正材料模型
TBTEMP,0
TBDATA,,2.0e8,0,,,,
UPGEOM,0.01,1,1,'I-BEAM','rst','' ! 引入几何缺陷
FINISH                    ! 退出前处理器

/SOL                       ! 进入求解器
ANTYPE,0                 ! 指定分析类型
NLGEOM,1                 ! 打开大变形选项
OUTRES,ALL,ALL           ! 输出所有子步的结果
ARCLN,1,0,0              ! 打开弧长法
ARCTRM,U,0.25,2,UY       ! 弧长法选项设置
NSUBST,200,,1            ! 子步数
SOLVE                     ! 求解
FINISH                    ! 退出求解器

/POST26                   ! 进入时间历程后处理器

```

NSOL,2,2,U,Y,DEFLECTION	! 指定位移变量
RFORCE,3,1,F,X,REACTIONF	! 指定反力变量
/AXLAB,X,DEFLECTION	! 指定绘图横坐标标签
/AXLAB,Y,REACTIONF	! 指定绘图纵坐标标签
XVAR,2	! 指定横坐标表示的变量
PLVAR,3	! 绘载荷-位移曲线
FINISH	! 退出时间历程后处理器

# 第 11 章 ANSYS 结构最优化设计

## 本章导读

当前, 结构最优化设计日益受到工业界的重视。结构最优化设计的目的在于降低制造成本、改善产品外形、提高产品品质。其实质为一个数学优化问题, 即: 确定一个或者多个设计变量的数值, 使得目标函数达到最大值或者最小值 (如结构的总重量最轻), 这些解需要满足一定的约束条件 (如构件中的应力小于许用应力)。本章向读者介绍 ANSYS 优化问题的基本数学表述、相关基本概念和一般的分析方法等。本章最后还提供了一个平板网架结构优化设计的例题。

本章包括如下的一些主题:

- ANSYS 优化设计问题的数学表述与一般流程
- 分析实例: 平板网架结构的优化设计

## 11.1 ANSYS 优化设计问题的数学表述与一般流程

工程结构优化设计, 实际上就是利用数学上的最优化理论, 把问题归结为单个或多个自变量的优化问题。优化的目标函数可以是结构用材料最少或造价最低, 优化的约束条件则是满足所有设计要求, 如结构的反应 (应力、位移) 不超出允许范围等。

结构最优化设计问题的基本数学表述如下:

对于一组选定的设计变量  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ , 试确定其具体的取值, 使得以这些设计变量为自变量的多元目标函数  $f_{obj} = f_{obj}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$  在满足一定的约束条件下, 取得其最大值或者最小值。

以上优化问题中的约束条件包括如下两个方面:

(1) 设计变量取值范围的限制条件。

设计变量的取值要具有实际的意义, 即需要满足一定的合理性范围的限制 (比如杆件的截面积必须大于零), 这些设计变量取值范围的限制条件可表达为如下的不等式组:

$$\alpha_{iL} < \alpha_i < \alpha_{iU} \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

其中,  $N$  为设计变量的总数,  $\alpha_{iL}$  和  $\alpha_{iU}$  分别为第  $i$  个设计变量  $\alpha_i$  合理取值范围的下限以及上限。

(2) 其他约束条件。

设计变量的取值还需要满足以其为自变量的相关状态变量的约束条件, 比如杆件截面的应力不超过材料的许用应力等条件, 这些约束条件可以表达为如下的不等式组:

$$g_{jL} < g_j(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) < g_{jU} \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

其中,  $g_j(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$  称为状态变量, 是以设计变量为自变量的函数,  $g_{jL}$  和  $g_{jU}$  分别为第  $j$  个状态变量取值范围的下限以及上限,  $M$  为约束状态变量的总数。



由上面的数学表述可知,优化问题中涉及到三种变量,这就是 ANSYS 优化设计中的三大变量,即:优化目标变量、设计变量和状态变量,下面逐个加以介绍:

➤ 优化目标函数 (Objective Function)

目标函数是一个以设计变量为自变量的标量函数,在 ANSYS 优化分析中,只能定义一个目标函数。

➤ 设计变量 (Design Variables)

设计变量是优化目标函数和状态函数的自变量。优化的过程就是通过不断改变设计变量的数值来实现的。设计变量的取值范围上下限均可以定义。ANSYS 优化分析中,至多可以定义 60 个设计变量。

➤ 状态变量 (Status Variables)

状态变量是设计变量的函数,状态变量的值必须满足一定的约束条件,因此又被称作约束变量。约束条件可能需要同时满足上下限,也可以是单边的不等式。在 ANSYS 的优化分析中,至多可以定义 100 个状态(约束)变量。

上述三种变量统称为 ANSYS 优化变量,在分析过程中,必须向程序声明哪些是设计变量,哪些是状态变量,哪个是优化目标函数。

在选择优化变量的时候,请注意遵循以下的几点基本原则:

(1) 设计变量通常选择为各种结构的几何参数,且选择尽可能少的设计变量。因为选择过多的设计变量使得收敛于局部最值的可能增加,这与要搜索全局最优的目标发生矛盾,而且随着设计变量的增加,机时的增加也很显著。

(2) 选择足够约束设计状态变量个数。避免使状态变量的上下限取值过于接近,这可能造成无解的现象。

(3) ANSYS 优化程序总是最小化目标函数,如要得到目标函数的最大值,可将该函数的倒数或者在该函数的相反数上加上一个较大的数作为优化的目标函数。在优化分析中,目标函数的取值应保持为正,负值将引起数值问题。为了避免负值的出现,可将一个足够大的数加到目标函数上。

下面,继续介绍 ANSYS 优化分析的几个基本概念:

➤ 优化分析文件

优化分析文件是一个标准的 ANSYS 命令流批处理输入文件,其中包含了一个完整的优化分析过程(前处理、分析以及后处理)。在优化分析文件中,必须要有一个参数化的分析模型(必须参数化!),还要在文件中指出模型中那些参数是何种类型的优化变量。

形成优化分析文件是 ANSYS 优化设计过程中最为关键的环节。ANSYS 优化程序通过优化分析文件自动形成优化循环文件 Jobname.LOOP,并在优化分析中作循环操作。

➤ 设计序列、循环和迭代

一个优化设计序列是指确定一个特定模型的参数集合,这个集合由优化变量以及其他所有的结构模型参数所组成。

一次循环是指一个分析的周期,可以理解为执行一次优化分析文件,最后一次的循环结果输出到文件 Jobname.OPO 中。优化迭代是指得到一个新的设计序列的一次或多次循环的计算过程。

➤ 合理或不合理的设计

一个合理的设计是指满足了所有的约束条件（包括状态约束条件以及自变量取值范围的限制条件）的设计。如果约束条件没有完全被满足，则设计就是不合理的。前面已经讲过，最优化设计是指满足所有的约束条件又使得目标函数取得最值的设计。因此，最优设计在一般情况下都是合理的设计。但是，如果程序经过搜索后发现，对于所有的设计变量的可能取值，所有的设计序列都是不合理的，那么程序将给出最接近于合理的设计，而不考虑目标函数的值。

ANSYS 优化设计可以通过 GUI 界面交互式地完成，也可以通过批处理方法进行。对于复杂的分析任务来说，批处理方式可能更有效率。

一个典型的 ANSYS 优化设计过程通常包括如下的一些环节：

- (1) 分析参数初始化。为分析模型中的相关参数指定初始值。
- (2) 参数化建立模型。在前处理器中建立参数化的分析模型，模型中的参数暂时取上面定义的初始值。建模的过程与一般的结构分析建模没有什么差别。
- (3) 执行一次结构分析的求解。
- (4) 参数化提取结果。
- (5) 指定状态变量和目标函数。
- (6) 进入优化处理器 OPT，设置优化分析参数，并进行优化分析。
- (7) 查看优化设计的结果。

各步骤的具体操作，读者可以参照下面一节的例题进行学习，此处不逐个展开叙述。

## 11.2 分析实例：平板网架结构的优化设计

本节以网架截面大小的优化设计分析为例，向读者介绍在 ANSYS 中进行结构优化设计的方法和步骤。问题的简单描述如下：

在加油站顶棚、机场候机大厅顶棚等大跨度结构中常常采用网架结构。网架结构在工作时对最大应力和最大挠度都有一定的限制要求。在设计网架结构时，必须选择合适的杆件截面，以保证在整个结构消耗钢材最少的情况下满足应力和挠度的限制。现有一个如图 11-1 所示的网架结构，上平面有 36 个节点，间距 1m，下平面有 25 个节点，间距 1m，上下平面相距 0.7m。网架材料参数弹性模量  $2.07 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比 0.3。在工作中网架上平面的边缘节点固定，下平面每个节点承受垂直方向载荷 10kN。已知网架在工作中必须满足如下条件：

下平面中心的节点竖向位移不超过 1cm。

各杆件截面应力小于许用应力  $210 \text{MPa}$ 。

如果要求整个网架结构消耗的材料体积最少，试对网架采用杆件的横截面进行优化设计。

优化设计中必须用参数变量来定义几何模型。优化设计中的变量有 3 种类型：设计变量（待优化设计的几何参数、材料参数等）、状态变量（结构正常工作的约束条件，例如最大许用应力，最大位移等）和目标变量（优化设计的目标量，在优化设计过程中期望其取得最小值的量，例如结构消耗的材料体积、结构的成本等）。用户在进行优化设计时，必须定义这些变量的合适取值范围和收敛准则。

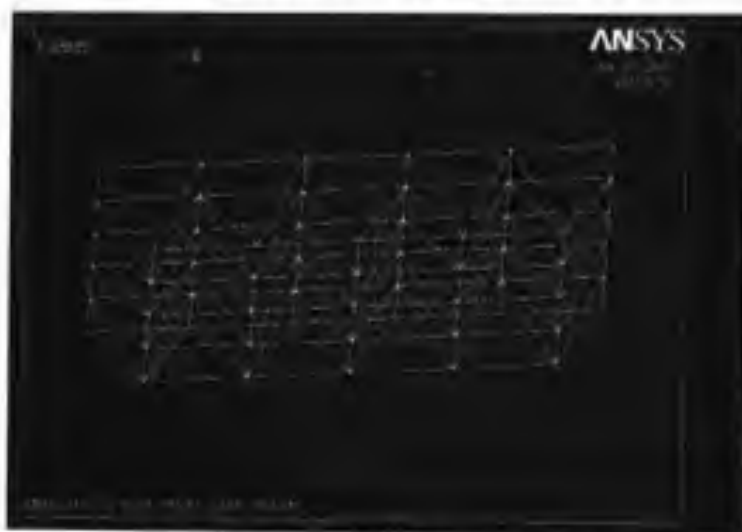


图 11-1 网架截面优化设计

下面按照操作的先后顺序，对建模和分析的步骤进行介绍：

#### 第 1 步：分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过菜单项 Utility Menu>File>Change Jobname，指定分析的工作名称为 RACK。

通过菜单项 Utility Menu>File>Change Title，指定图形显示区域的标题为 ANALYSIS OF RACK UNDER SELF-WEIGHT。

#### 第 2 步：进入前处理器

设置完成后，点取菜单项 Main Menu>Preprocessor 进入前处理器 PREP7 以开始建模和其他的前处理操作。

#### 第 3 步：定义截面积变量 AREA

单击菜单 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters，弹出 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 域输入 AREA=50，单击 Accept 按钮，最后单击 Close 按钮关闭 Scalar Parameters 对话框。

#### 第 4 步：定义单元类型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中，单击 ADD...按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 11-2 所示。

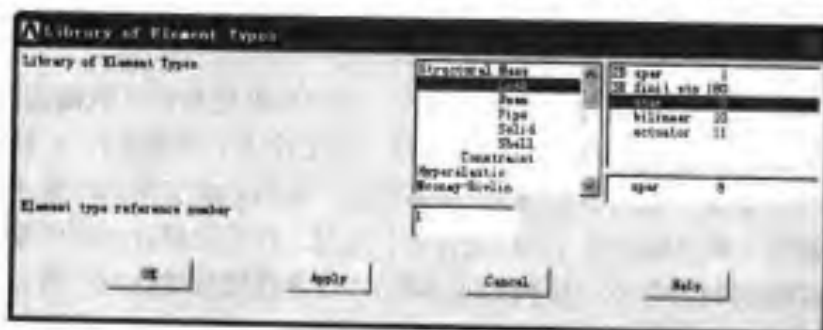


图 11-2 定义单元类型

对于本问题，拟采用三维杆单元 LINK8。因此在窗口左侧选择 Structural Link，右侧选择

3D spar 8, 点 OK 退出。

#### 第 5 步: 定义杆件截面积

为杆单元指定截面积, 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Real Constant, 在 Real Constants 对话框中, 单击 Add...按钮, 在接下来的单元类型和实参数编号两个对话框中, 接受默认值, 直接单击 OK, 最后在图 11-3 所示的对话框中输入杆件单元的面积 50 (单位:  $\text{mm}^2$ )。

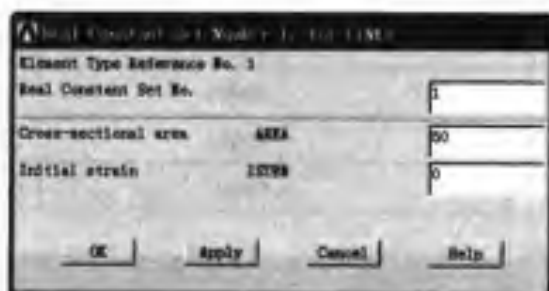


图 11-3 定义实参数

定义完成后, 单击 OK 按钮退出该对话框。

#### 第 6 步: 定义材料模型

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models, 将出现 Define Material Model Behavior 对话框, 在窗口的右侧, 依次双击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic, 在出现的对话框中输入材料弹性模量  $2.07 \times 10^5$  (单位 MPa, 与长度单位 mm 对应) 以及泊松比 0.3, 如图 11-4 所示。

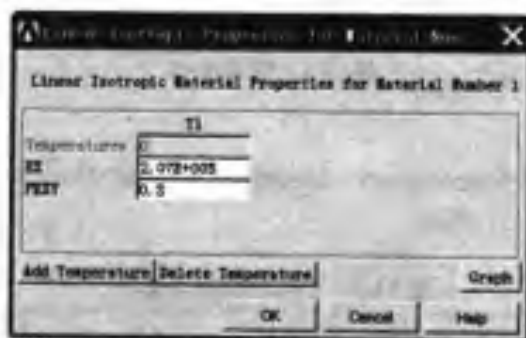


图 11-4 定义材料参数

单击 OK 按钮, 返回到 Define Material Model Behavior 窗口, 关闭之, 返回到图形用户界面。

#### 第 7 步: 建立分析模型

由于本问题的单元分布规则, 因此采用直接法建立有限元结构分析模型。具体建模操作如下:

##### (1) 建立上平面节点。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS, 定义模型的 1~6 号节点, 其编号以及坐标如表 11-1 所列。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy, 弹出拾取对话框, 选取刚才生成的节点 1~6, 单击 OK 按钮, 弹出如图 11-5 所示的 Copy nodes 对话框, 在 Total

number of copies 域输入 6, 在 X-offset in active CS 域输入 1000, Node number increment 域输入 6, 最后单击 OK 按钮, 生成上平面上所有 36 个节点。

表 11-1 节点的编号与坐标

节点 ID	X	Y	Z
1	0.000	0.000	0.000
2	0	1000	0.000
3	0	2000	0.000
4	0	3000	0
5	0	4000	0
6	0	5000	0

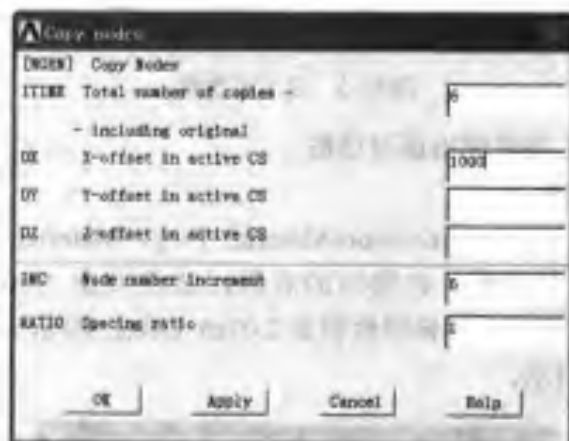


图 11-5 拷贝节点

### (2) 建立下平面节点。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS, 定义模型的 37~41 号以及坐标, 如表 11-2 所列。

表 11-2 节点的编号与坐标

节点 ID	X	Y	Z
37	500	500	-700
38	500	1500	-700
39	500	2500	-700
40	500	3500	-700
41	500	4500	-700

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy, 弹出拾取对话框, 选取刚才生成的节点 37~41 号, 弹出 Copy nodes 对话框, 在 Total number of copies 域输入 5 在 X-offset in active CS 域输入 1000, Node number increment 域输入 5, 最后单击 OK 按钮, 生成上平面上所有 25 个节点。所有节点建立后如图 11-6 所示。



图 11-6 拷贝节点

(3) 建立上弦平面节点间连接杆单元。

建立杆单元之前，需要对单元的属性进行指定，通过菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes，弹出 Element Attributes 对话框，指定单元类型、材料类型以及实常数类型，如图 11-7 所示，单击 OK 按钮退出。

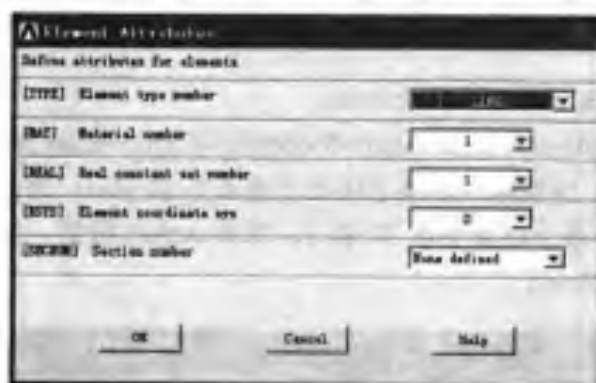


图 11-7 设置单元属性

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，弹出对象拾取框，用鼠标在屏幕上依次点选节点 1 和 2，单击 Apply 按钮，即可形成杆件单元，再用鼠标在屏幕上点选节点 2 和 3，单击 Apply 按钮，等等，如此操作，直到生成如图 11-8 所示的全部单元。



图 11-8 上平面节点间连接杆单元

(4) 建立下弦平面节点间连接杆单元。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes, 弹出对象拾取框, 用鼠标在屏幕上依次点选节点 37 和 38, 单击 Apply 按钮, 即可形成杆件单元, 再用鼠标在屏幕上点选节点 38 和 39, 单击 Apply 按钮, 等等, 如此操作, 直到生成如图 11-9 所示的全部单元。

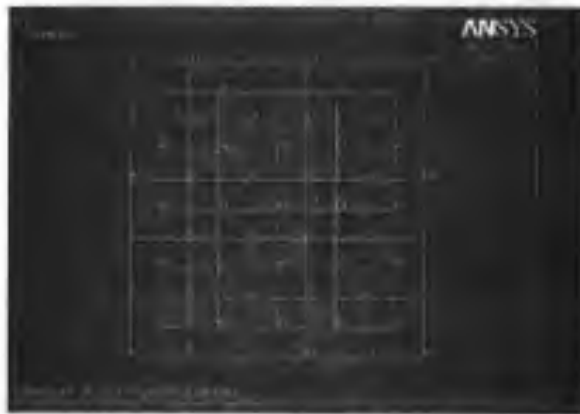


图 11-9 下平面节点间连接杆单元

(5) 建立上下弦平面节点间连接杆单元。

选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes, 弹出对象拾取框, 用鼠标在屏幕上依次点选节点 37 和 1, 单击 Apply 按钮, 即可形成杆件单元, 再用鼠标在屏幕上点选节点 37 和 2, 单击 Apply 按钮, 等等, 如此操作, 直到生成如图 11-10 所示的全部单元。

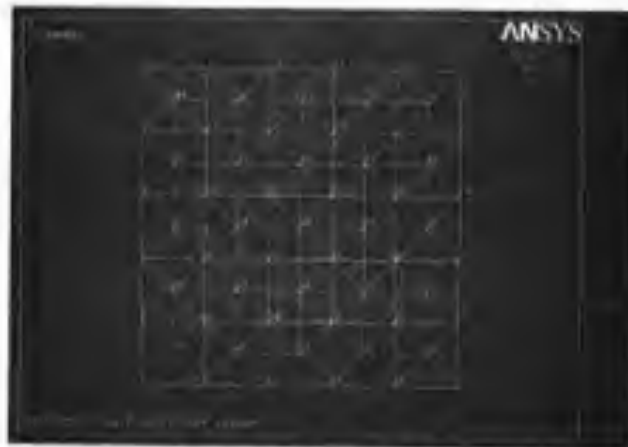


图 11-10 所有连接杆单元

#### 第 8 步: 施加约束

网架上平面的边缘节点固定, 选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对象拾取框, 用鼠标在图形显示区域点选上平面的边缘节点, 单击 Apply 按钮, 弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 在 DOFs to be constrained 中选中 All DOF, 单击 OK 按钮, 得到的约束如图 11-11 所示。



图 11-11 施加约束

### 第 9 步：施加集中力负载

下平面每个节点承受垂直方向载荷 10KN。选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment > On Nodes，弹出 Apply F/M on Nodes 对象拾取框，用鼠标在图形显示区域点选下平面的所有节点，单击 Apply 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Direction of force/mom 中选中 FZ，在 Force/moment value 域输入-10000，如图 11-12 所示，单击 OK 按钮。

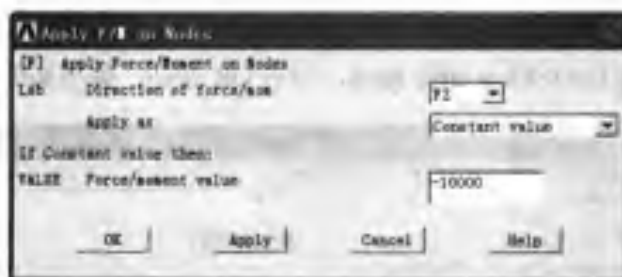


图 11-12 施加载荷

至此，已经完成了建模的全部操作，点 Main Menu>Finish 菜单项，退出前处理器。

### 第 10 步：进入求解器

点 Main Menu>Solution 菜单项，进入求解器。

### 第 11 步：求解选项设置

在求解之前，需要对相关的选项进行设置，设定分析类型。通过菜单项 Main Menu>Solution> Analysis Type>New Analysis，在 New Analysis 对话框中选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮退出。

### 第 12 步：求解

通过菜单项 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，对问题进行求解。在求解结束后，弹出 Solution is done! 信息提示框，关闭之。

点 Main Menu>Finish 菜单项，退出求解器。

### 第 13 步：进入通用后处理器

通过菜单项 Main Menu>General Postproc，进入通用后处理器。

### 第 14 步：定义变量 Volume 存储网架结构消耗材料的体积

(1) 单击菜单 Main Menu>General PostProc>Element Table>Define Table，弹出 Element



Table Data 对话框, 单击 Add 按钮, 弹出如图 11-13 所示对话框。

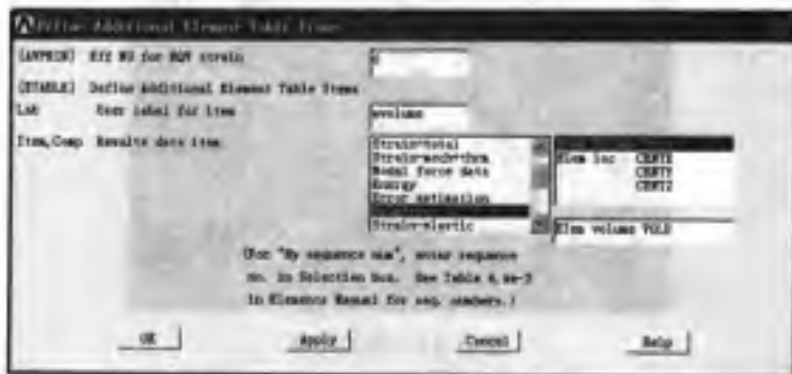


图 11-13 定义单元体积变量

(2) 按照图 11-13 填写对话框, 单击 OK 按钮。注意定义的 EVOLUME 是每个单元的体积列表, 要得到整个梁的总体积, 必须把 EVOLUME 列表的所有值相加。

(3) 单击菜单 Main Menu>General PostProc>Element Table>Sum of each item, 在弹出的对话框中单击 OK 按钮, 这时候将弹出一个窗口, 其中显示 EVOLUME 列表的所有值相加和约是  $1e8\text{mm}^3$ 。

(4) 存储梁的总体积到变量 volume。单击菜单 Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data, 在弹出的对话框中选择 Results Data>Elem table sums, 单击 OK 按钮, 弹出如图 11-14 所示对话框。

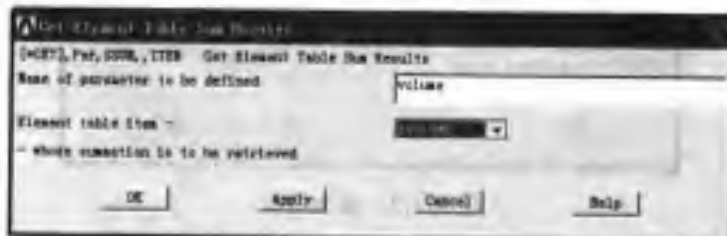


图 11-14 存储杆的总体积到变量 volume

(5) 按照图 11-14 填写对话框, 单击 OK 按钮, 存储网架的总体积到变量 volume。

#### 第 15 步: 定义变量 smaxe 存储网架单元中最大轴向应力

(1) 单击菜单 Main Menu>General PostProc>Element Table>Define Table, 弹出 Element Table Data 对话框, 单击 Add 按钮, 弹出如图 11-15 所示对话框。

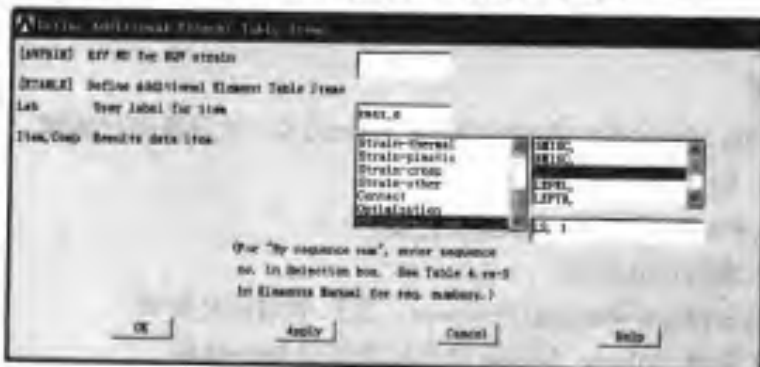


图 11-15 定义每个单元中轴向应力列表

(2) 按照图 11-15 填写对话框, 单击 OK 按钮。

(3) 注意: 现在得到的  $smax_e$  单元表中的数据是按照单元序号排列的, 要得到梁中的最大应力, 必须对  $smax_e$  单元表中的数据按照降幂或者升幂排列。单击菜单 General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems, 弹出如图 11-16 所示对话框。

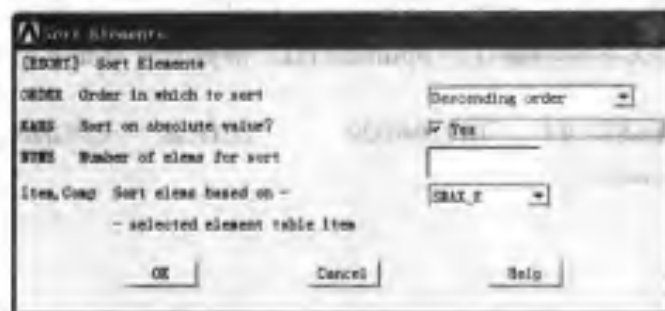


图 11-16 对  $smax_e$  按照降幂排列

(4) 按照图 11-16 填写对话框, 单击 OK 按钮。

(5) 存储网架单元中最大轴向应力到变量  $smaxe$ 。单击菜单 Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data, 在弹出的对话框中选择 Results Data > other operations, 单击 OK 按钮, 弹出如图 11-17 所示的对话框。按照图 11-17 中的设置, 单击 OK 按钮。

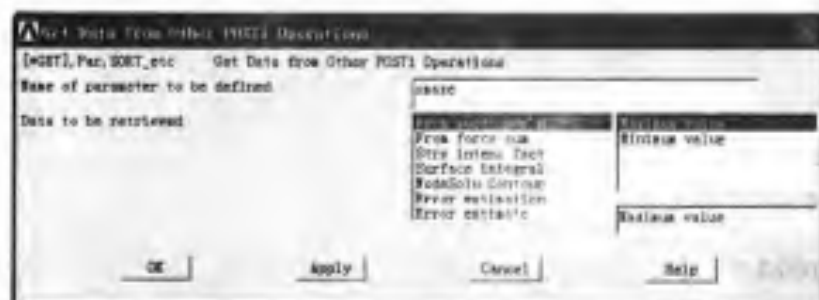


图 11-17 存储单元最大轴向应力到变量  $smaxe$

第 16 步: 定义变量  $dmax$  存储网架下平面中心 49 号节点绕度

(1) 单击菜单 Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data, 在弹出的对话框中选择 Results Data > Nodal Solution, 单击 OK 按钮, 弹出如图 11-18 所示的对话框。按照图中的设置, 单击 OK 按钮。定义变量  $dzmax$  存储网架下平面中心 49 号节点垂直位移 UZ (是一个负值)。



图 11-18 获取变量数据

(2) 单击菜单 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters, 弹出 Scalar Parameters 对话框。在 Selection 域输入 dmax=-dzmax, 单击 Accept 按钮。最后单击 Close 按钮关闭 Scalar Parameters 对话框。

#### 第 17 步: 写命令文件

单击菜单 Utility Menu>File>Write DB Log file, 在弹出的对话框中输入文件名 optimize.txt, 单击 OK 按钮。如果用文本编辑器打开 optimize.txt, 得到的命令如下:

```

/BATCH
!/COM,ANSYS RELEASE 8.1   UP20040329   21:11:26   07/22/2005
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
!/GRA,POWER
!/GST,ON
!/PLO,INFO,3
!/GRO,CURL,ON
!/CPLANE,1
!/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
!/REPLOT,RESIZE
/FILENAME,RACK
/TITLE,ANALYSIS OF RACK UNDER SELF-WEIGHT
*SET,AREA,50
/PREP7
ET,1,LINK8
R,1,Area, ,
MP,EX,1,2.07e5
MP,PRXY,1,0.3
*DO,I,1,6,1
N,I,0.0,(I-1)*1000,0.0
*ENDDO
NGEN,6,6,ALL,,1000,0.0,0.0
! NLIST,ALL, , , ,NODE,NODE,NODE
*DO,I,37,41,1
N,I,500,(I-37)*1000+500,-700
*ENDDO
NGEN,5,5,37,41,1,1000,0.0,0.0
*DO,I,1,31,6
*DO,J,1,5,1
E,I+J-1,I+J
*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,1,30,1
E,I,I+6
*ENDDO
*DO,I,37,57,5
*DO,J,1,4,1
E,I+J-1,I+J

```

```

*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,37,56,1
E,I,I+5
*ENDDO
*DO,I,37,0,57,0,5.0
*DO,J,1,0,5,0,1.0
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J-1
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J+5
E,I+J-1,1.2*I-43.4+J+6
*ENDDO
*ENDDO
! SAVE, RACK,db,
! /COM,ANSYS RELEASE 8.1 UP20040329 21:24:34 07/22/2005
ANTYPE,0
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,5000
NSEL,A,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,5000
D,all, , , , ,ALL, , , , ,
! SAVE, RACK,db,
! /COM,ANSYS RELEASE 8.1 UP20040329 21:27:08 07/22/2005
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,-700
F,all,FZ,-10000
NSEL,ALL
! SAVE, RACK,db,
! /USER, 1
! /VIEW, 1, 0.771315098875E-01, -0.874290488822 , 0.479235715842
! /ANG, 1, -6.89954187250
! /REPLO
! SAVE, RACK,db,
FINISH
/SOLU
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
! PLDISP,0
! /REPLOT
! EPLOT
ETABLE,evolume,VOLU,
SSUM
*GET,volume,SSUM, ,ITEM,EVOLUME
ETABLE,smax_e,LS, 1

```

```
ESORT,ETAB,SMAX_E,0,1,,
```

```
*GET,smaxe,SORT,,MAX
```

```
*GET,dzmax,NODE,49,U,Z
```

```
*set,dmax,-1*dzmax
```

```
! SAVE, RACK,db,
```

```
! SAVE, RACK,db,
```

```
! LGWRITE,'optimize','txt','F:\ansys\rack\','COMMENT
```

第 18 步：退出通用后处理程序，进入优化程序

点 Main Menu>Finish 菜单项，退出通用后处理程序。

点 Main Menu>Design Opt 菜单项，进入优化设计模块。

第 19 步：指定优化命令文件

单击菜单 Main Menu > Design Opt > Analysis File > Assign，在弹出的对话框中选择刚才修改的文件 optimize.txt，单击 OK 按钮。

第 20 步：定义设计变量、状态变量和目标变量

(1) 定义设计变量。单击菜单 Main Menu > Design Opt > Design Variables...，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出如图 11-19 所示的对话框。



图 11-19 定义设计变量

按照图 11-19 填写对话框，在 parameters name 列表中选择 AREA，在 MIN 域输入 20，在 MAX 域输入 200，在 TOLER 域输入 0.01，单击 OK 按钮关闭 Design Variables 对话框。

(2) 定义状态变量。单击菜单 Main Menu > Design Opt > State Variables...，在弹出的对话框中单击 Add 按钮，弹出如图 11-20 (a) 所示的对话框。按照图 11-20 (a) 填写对话框，在 parameter name 列表中选择 smaxe，在 MIN 域输入 200，在 MAX 域输入 210，在 TOLER 域输入 0.01，单击 OK 按钮。

在 State Variables 对话框中再次单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选择变量 dmax，如图 11-20 (b) 所示。按照图 11-20 (b) 填写对话框，在 parameter name 列表中选择 DMAX，在 MIN 域输入 0.1，在 MAX 域输入 1.0，在 TOLER 域输入 0.01，单击 OK 按钮关闭 State Variables 对话框。

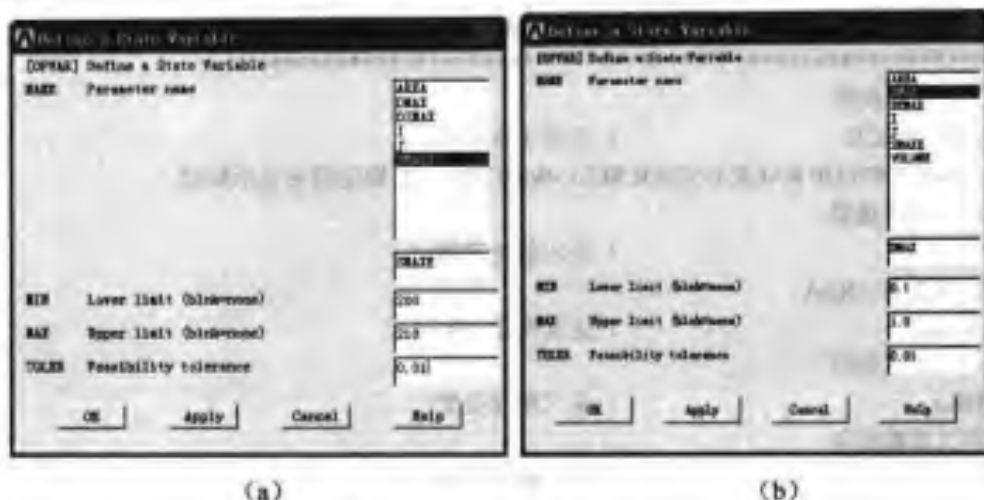


图 11-20 定义状态变量

(3) 定义目标变量。单击菜单 Main Menu > Design Opt > Objective, 在 Parameter Name 列表中选择 VOLUME, 在 TOLER 域输入 2000, 单击 OK 按钮。

#### 第 21 步: 指定优化方法

单击菜单 Main Menu > Design Opt > Method / Tool..., 在弹出的对话框中选择 First Order 选项, 单击 OK 按钮, 弹出如图 11-21 所示的对话框, 在 Maximum iterations 域输入 100, 在 Percent step size 域输入 100, 在 Percent forward diff. 域输入 0.2, 单击 OK 按钮。

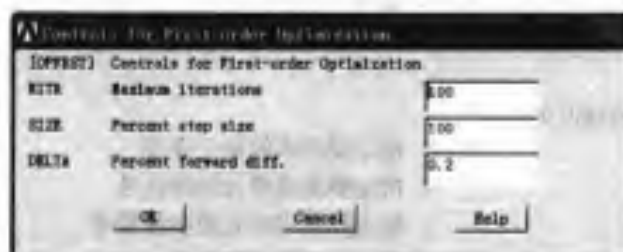


图 11-21 指定优化方法

#### 第 22 步: 优化分析

单击菜单 Main Menu > Design Opt > Run..., 弹出 Begin Execution of Run 对话框, 单击 OK 按钮, 开始优化分析。

#### 第 23 步: 查看优化结果

单击菜单 Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters, 弹出如图 11-22 所示对话框, 从中可以看到 AREA=111.55 时, 梁的体积最小为 22254447mm<sup>3</sup>, 此时最大应力为 209.9MPa < 210MPa, 节点 49 的最大挠度 dz = 6.3mm < 10mm。

如果上述建模和分析过程采用批处理操作方式, 则相应的命令流如下:

```
! .....
```



图 11-22 查看优化结果

```

! *          网架桁架截面优化分析命令流          *
! *****
! (1) 工作环境设置
/FILENAME,RACK          ! 指定工作名称
/TITLE,ANALYSIS OF RACK UNDER SELF-WEIGHT ! 指定图形显示标题
! (2) 进入前处理器
/PREP7          ! 进入前处理器
! (3) 定义变量 AREA
*SET,AREA,50          ! 定义变量 AREA
! (4) 定义单元类型
ET,1,LINK8,          ! 定义单元类型
! (5) 定义横截面积
R,1,Area, ,          ! 定义桁架面积
! (6) 定义材料模型
MP,EX,1,2.07e11          ! 指定弹性模量
MP,PRXY,1,0.3          ! 指定泊松比
! (7) 建立分析模型, 包括节点和单元
*DO,I,1,6,1          ! 建立上平面节点
N,I,0.0,(I-1)*1000,0.0
*ENDDO
NGEN,6,6,ALL,,1000,0.0,0.0
! NLIST,ALL, , , ,NODE,NODE,NODE
*DO,I,37,41,1          ! 建立下平面节点
N,I,500,(I-37)*1000+500,-700
*ENDDO
NGEN,5,5,37,41,1,1000,0.0,0.0
TYPE,1          ! 指定要形成的单元类型
MAT,1          ! 指定要形成单元的材料号
REAL,1          ! 指定要形成单元的实参数号
*DO,I,1,31,6          ! 建立上平面竖直单元
*DO,J,1,5,1
E,I+J-1,I+J
*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,1,30,1          ! 建立上平面水平单元
E,I,I+6
*ENDDO
*DO,I,37,57,5          ! 建立下平面竖直单元
*DO,J,1,4,1
E,I+J-1,I+J
*ENDDO
*ENDDO
*DO,I,37,56,1          ! 建立下平面水平单元
E,I,I+5
*ENDDO
*DO,I,37,0,57,0,5.0          ! 建立上下平面节点之间的斜腹杆单元

```

```

*DO,J,1,0,5,0,1,0
E,I+J-1,1,2*I-43.4+J-1
E,I+J-1,1,2*I-43.4+J
E,I+J-1,1,2*I-43.4+J+5
E,I+J-1,1,2*I-43.4+J+6
*ENDDO
*ENDDO
! (8) 施加位移约束
NSEL,S,LOC,X,0           ! 选择上平面左边缘节点
NSEL,A,LOC,X,5000        ! 选择上平面右边缘节点
NSEL,A,LOC,Y,0           ! 选择上平面下边缘节点
NSEL,A,LOC,Y,5000        ! 选择上平面上边缘节点
D,all,,,,,ALL,,,,,      ! 固定所有自由度
NSEL,ALL                 ! 重新选择所有节点
! (9) 施加集中力负载
NSEL,S,LOC,Z,-700        ! 选择所有下平面节点
F,all,FZ,-10000          ! 施加集中力载荷
NSEL,ALL                 ! 重新选择所有节点
FINISH
! (10) 进入求解器
/SOLU                    ! 进入求解器
! (11) 求解选项设置
ANTYPE,0                 ! 求解选项设置
! (12) 求解
SOLVE                    ! 求解
FINISH                   ! 退出求解模块
! (13) 进入通用后处理器
/POST1                   ! 进入通用后处理器
! (14) 定义变量 Volume 存储网架结构消耗材料的体积
ETABLE,evolume,VOLU,     ! 定义单元体积列表
SSUM                     ! 单元体积列表求和
*GET,volume,SSUM, ,ITEM,EVOLUME ! 定义变量 Volume 存储网架结构消耗材体积
! (15) 定义变量 smaxe 存储网架单元中最大轴向应力
ETABLE,smax_e,LS, 1      ! 定义单元轴向应力列表
ESORT,ETAB,SMAX_E,0,1,, ! 单元轴向应力降幂排序
*GET,smaxe,SORT,,MAX     ! 定义变量 smaxe 存储网架单元中最大轴向应力
! (16) 定义变量 dmax 存储网架下平面中心 49 号节点绕度
*GET,dzmax,NODE,49,U,Z   ! 定义变量 dzmax 存储网架下平面中心 49 号节点位移 UZ
*set,dmax,-1*dzmax       ! 定义变量 dmax 存储网架下平面中心 49 号节点绕度
! (17) 写命令文件
LGWRITE,'optimize','txt','F:\ansys\track\',COMMENT ! 命令文件
! (18) 退出通用后处理程序, 进入优化程序
FINISH                   ! 退出通用后处理模块
/OPT                     ! 进入优化程序
! (19) 指定优化命令文件
OPANL,'optimize','txt','' ! 指定优化命令文件

```



```
! (20) 定义设计变量、状态变量和目标变量
OPVAR,AREA,DV,20,200,0.01,      ! 定义设计变量 AREA
OPVAR,SMAXE,SV,200,210,0.01,    ! 定义状态变量 SMAXE
OPVAR,DMAX,SV,0.1,10,0.01,     ! 定义状态变量 DMAX
OPVAR,VOLUME,OBJ,,20000,        ! 定义目标变量 VOLUME
! (21) 指定优化方法
OPTYPE,FIRS                      ! 指定优化方法
OPFRST,100,100,0.2,            ! 优化方法设定
! (22) 优化分析
OPEXE                            ! 优化分析
! (23) 查看优化结果
*Status                          ! 查看优化结果
```

## 第 12 章 子结构技术简介

### 本章导读

本章针对有限元分析中的子结构技术,简要介绍子结构的概念以及 ANSYS 子结构分析方法的操作过程,最后结合实际例子,加深读者对于子结构技术的理解,培养读者应用于子结构技术处理问题的能力。

本章主要包括以下内容:

- 子结构的概念
- 子结构分析的步骤
- 子结构分析实例: 固支空腹梁

### 12.1 子结构的概念

子结构是将一组单元通过矩阵凝聚的方式生成为一个新单元的过程,这个单一的矩阵单元称为超单元。在 ANSYS 中,超单元可以和其他单元类型一样使用,超单元需要通过结构生成分析产生。

应用子结构进行工程计算的例子很多,在各种空间结构的分析中,比如网架和网壳等,可以选择棱锥体形状的杆件组合作为一个子结构,如图 12-1 所示。这种情形下,理想模型由若干棱锥体超单元和若干其他常用单元组成,相互用铰连接形成完整的结构。这种利用子结构的分析模型可以反映特定空间结构在预制装配和施工细节中的实际受力状态。

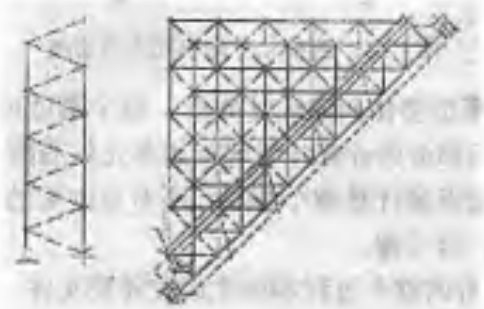


图 12-1 子结构在空间网架中的应用

子结构方法主要是为了节省机时,能够在计算机设备资源有限的情况下求解一些大规模问题,主要表现以下方面:

(1) 在非线形分析中,可以将模型的线性部分作为子结构,避免该部分在非线形迭代过程中反复计算。

(2) 对于有重复几何结构的模型,可以将重复部分作为子结构生成超单元,通过复制生成结构的其他部分,节省大量机时。

(3) 在计算机无法整体计算一个大规模结构问题时,可以将整个结构分为若干子结构,

分别计算子结构，最终实现对整个结构的计算。

## 12.2 子结构分析的步骤

典型的子结构分析过程分为三个步骤：生成部分、使用部分和扩展部分。

生成部分主要是通过定义主自由度将普通有限元凝聚为一个超单元。主自由度用于定义超单元与非超单元（如图 12-2 所示）以及超单元与超单元（如图 12-3 所示）的边界，提取模型的动力特性。

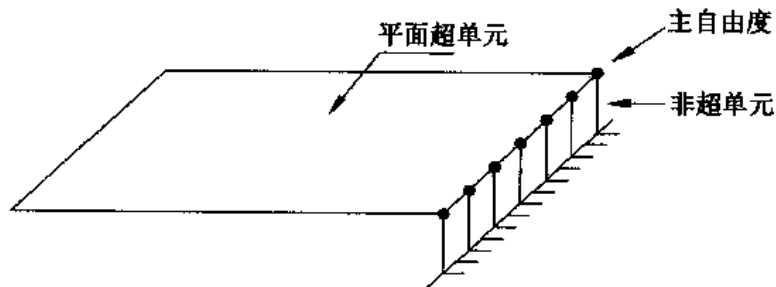


图 12-2 超单元—非超单元主自由度

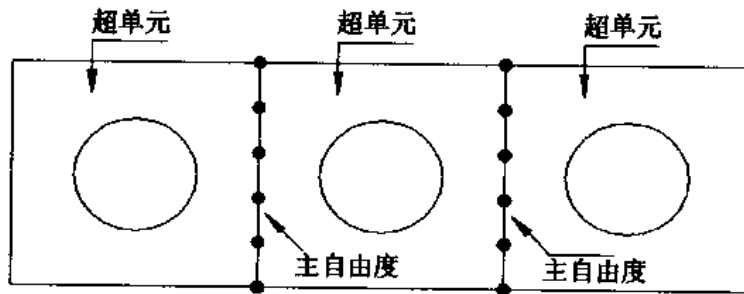


图 12-3 超单元—超单元主自由度

使用部分是将超单元与模型整体相连进行分析。整个模型可以是一个超单元，也可以是超单元与非超单元相连，使用部分的计算结果包括超单元的凝聚解和非超单元的完全解。

扩展部分是由超单元的凝聚解计算整个超单元所有自由度的完整解。如果有多个超单元，每个超单元都需要有单独的扩展过程。

图 12-4 所示为子结构分析的整个过程和所生成的需要文件。

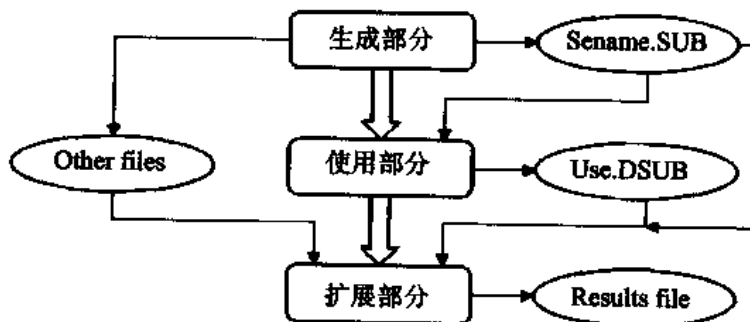


图 12-4 子结构分析流程图

### 12.2.1 生成部分

该部分主要分为建立模型和施加边界条件生成超单元矩阵。

#### 1. 建立模型

该部分在 ANSYS 前处理器 PREP7 完成。和其他分析类型一样，子结构分析的建模过程包括定义单元类型、设置实常数、定义材料属性、建立几何模型和划分网格生成有限元模型等。在子结构分析生成部分的建模过程需要注意以下几点：

(1) 文件名。在子结构分析中，文件名非常重要，有效地使用文件名可以为子结构分析带来很大的方便。一般将生成部分的文件名定义为 GEN，默认文件名为 FILE。

操作命令：/FILNAME

GUI 菜单路径：

Utility Menu>File>Change Jobname

(2) 单元类型。ANSYS 提供的大多数单元都可以用来生成超单元，但是单元必须是线性的。

(3) 材料属性。和其他分析一样，子结构分析定义所需的材料特性，如密度、比热等。同样，由于超单元是线性的，非线性材料属性将被忽略。

(4) 模型生成。生成部分主要生成模型的超单元部分，非超单元部分将在后面的使用部分生成。由于子结构的使用部分需要确定超单元部分和非超单元部分的连接，为了保证连接的正确性，在模型生成时应该保证接触部分节点的一致。

#### 2. 施加边界条件生成超单元矩阵

该部分在 ANSYS 求解器 SOLU 完成。和其他分析一样，需要定义分析类型、设置分析选项、施加载荷、定义载荷步、求解计算。

下面依次介绍上述步骤操作：

(1) 定义分析类型。分析类型选择子结构分析 Substructuring。

操作命令：ANTYPE, SUBST

GUI 菜单路径：

Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis

(2) 设置超单元分析选项。

操作命令：SEOPT

GUI 菜单路径：

Main Menu>Solution>Analysis Options

图 12-5 所示的是子结构分析选项设置对话框，这里对该对话框主要选项进行介绍，读者可以参考 Help 了解其他选项。

#### ➤ Sename

该选项指定超单元矩阵文件名。超单元矩阵在后面的使用部分会用到，方便起见需要指定矩阵文件名，完整的矩阵文件名为 Sename.SUB，默认为 Jobname.SUB。

#### ➤ SEMATR

该选项指定所要生成的矩阵形式，分为仅生成刚度矩阵 (Stiffness)，生成刚度和质量矩阵 (Stiffness+Mass)，生成刚度、质量和阻尼矩阵 (Stiffness+Mass+Damp)。根据不同的分析

需要选择相应的矩阵形式。

#### ➤ SEPR

该选项设置输出超单元矩阵。可以输出超单元矩阵和载荷向量，也可以只输出载荷向量，默认为不输出任何矩阵。

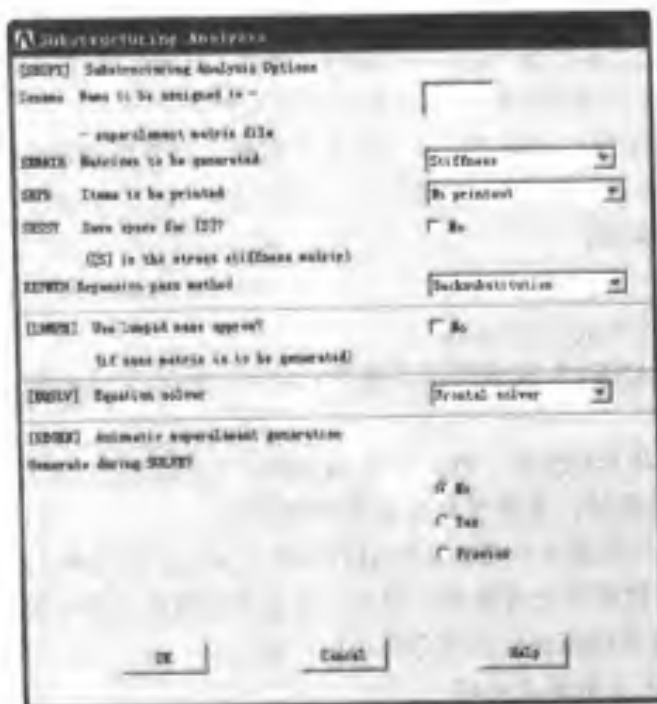


图 12-5 子结构分析选项设置对话框

(3) 定义主自由度。在子结构分析中，主自由度有以下作用：

- 1) 作为超单元和非超单元的边界。应该将超单元与非超单元的连接节点自由度定义为主自由度，如果模型中只有超单元，超单元之间同样需要定义主自由度。
- 2) 如果动力学分析中使用超单元，则主自由度规定了结果的动力特性。
- 3) 如果在使用部分施加位移约束或集中载荷，施加节点自由度应该定义为主自由度。定义主自由度操作命令为 M 命令，其对应的 GUI 菜单项如下：

Main Menu>Solution>Master DOFs>Define

(4) 施加载荷。在生成部分可以施加所有载荷类型，但是需要注意以下两点：

- 1) 程序将生成一个包含所有施加载荷的等效载荷向量，每个载荷步对应一个载荷向量并写入超单元矩阵文件中。
- 2) 位移约束和集中载荷的施加可以放到使用部分，但是这些位置的主自由度必须事先定义好。

(5) 定义载荷步选项。子结构的生成部分只能使用动力选项中的阻尼设置，具体操作可以参考动力学一章的有关内容。

(6) 存储数据库备份文件。存储数据库备份文件是为了在扩展部分使用同样数据库文件的需要。

(7) 求解计算。

### 12.2.2 使用部分

使用部分可以是任何 ANSYS 分析类型, 和普通分析的区别在于分析中的一个或几个单元是前面生成的超单元。这里主要介绍如何将超单元转化为模型的一部分。

该过程主要分为清除数据库指定新的工作文件名、建立模型、施加载荷求解等几个步骤。

#### 1. 清除数据库指定新的工作文件名

使用部分将建立新的模型并且施加新的边界条件, 因此需要清除现有的数据库。

操作命令: /CLEAR

GUI 菜单路径:

Utility Menu>File>Clear&Start New

由于在使用部分和扩展部分会用到生成部分的有关文件, 为了使这些文件不被覆盖, 新定义的文件名不能和使用部分的文件名相同。

操作命令: /FILENAME

GUI 菜单路径:

Utility Menu>File>Change Jobname

#### 2. 建立模型

该部分在 ANSYS 前处理器 PREP7 完成, 主要包括以下步骤:

- (1) 定义 MATRIX50 为一种单元。
- (2) 定义非超单元类型。
- (3) 定义非超单元的实常数和材料属性。
- (4) 定义非超单元的几何形状。

在定义非超单元和超单元的连接部分时, 应该保证接触节点的重合, 主要有三种方法:

- 1) 使用与生成部分相同的节点编号。
- 2) 生成部分和使用部分的接触节点使用相同的节点编号增量。
- 3) 将两部分的接触节点自由度耦合起来。
- (5) 用正确的单元类型定义超单元, 读入超单元矩阵。

选择正确的单元类型, 方法如下:

操作命令: TYPE

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes

读入超单元矩阵, 方法如下:

操作命令: SE

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Superelements>From .SUB File

为了保证接触节点重合, 读入超单元矩阵时需要注意以下几点:

1) 如果模型中不包含非超单元, 或者包含非超单元但接触节点编号一致, 可以用 SE 命令直接读入超单元。

2) 如果模型包含非超单元, 并且接触节点与主自由度节点编号有一个偏移量, 必须用新的节点号生成一个新的超单元矩阵, 读入新的矩阵。

生成新的超单元矩阵，方法如下：

操作命令：SETRAN

GUI 菜单路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Superelements>By CS Transfer

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Superelements>By Geom Offset

3) 如果模型包含非超单元，并且接触节点与主自由度节点无任何关系，为了避免生成部分的主自由度节点覆盖使用部分的模型节点，应该先存储数据库文件，再用 SETRAN 命令结合新的节点偏移量生成新的单元矩阵，最后用 SE 命令读入新的矩阵，并且通过耦合节点将接触节点连接。

耦合接触节点方法如下：

操作命令：CPINTF

GUI 菜单路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Coupling/Ceql>Coincident Nodes

4) 如果要对超单元进行移动、拷贝或镜像操作时，必须用 SETRAN 或 SESYMM 命令(Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>By Reflection)，结合适当的节点偏移量生成新的超单元矩阵，然后用 SE 命令读入新的单元矩阵并采用相同的方法连接节点。

(6) 存储整个模型文件。

### 3. 施加载荷求解

该部分在 ANSYS 求解器 SOLU 中完成，具体步骤如下：

(1) 定义分析类型和分析选项。

(2) 在非超单元部分施加载荷。

(3) 施加超单元载荷向量。在超单元矩阵文件中，每个载荷步对应一个载荷向量，施加超单元载荷向量方法如下：

操作命令：SFE

GUI 菜单路径：

Main Menu>Solution>Loads>Apply>Load Vector>For Superelement

(4) 设置相应的载荷步选项。

(5) 计算求解。计算结果包括非超单元的完整解 (Jobname.RST) 和超单元的凝聚解 (Jobname.DSUB)，通过后面的扩展操作可以由凝聚解扩展得到超单元的完整解。

### 12.2.3 扩展部分

扩展部分是由使用部分得到的超单元凝聚解计算出超单元的完整解，下面具体介绍扩展部分的过程。

(1) 清除数据库。

(2) 将文件名切换到生成部分的文件名。

(3) 读入生成部分的数据文件。

操作命令：RESUME

GUI 菜单路径：

Utility Menu>File>Resume Jobname.db

(4) 激活扩展选项。激活扩展选项包括以下操作:

1) 打开扩展开关。

操作命令: EXPASS

GUI 菜单路径:

Main Menu>Solution>Analysis Type>ExpasionPass

2) 指定需要扩展的超单元。

操作命令: SEEXP

GUI 菜单路径:

Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpasionPass>Single Expand>Expand Superelem

3) 指定需要扩展的使用部分结果。

操作命令: EXPLSOL

GUI 菜单路径:

Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpasionPass>Single Expand>By Load Step

Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpasionPass>Single Expand>By Time/Freq

(5) 设置输出控制。

(6) 扩展求解。

## 12.3 子结构分析实例

### 12.3.1 问题描述

图 12-6 所示的是一根两端固支的空腹梁, 形状和截面尺寸如图所示。下面利用 ANSYS 子结构分析技术计算该空腹固支梁在跨中载荷作用下的变形和应力分布。

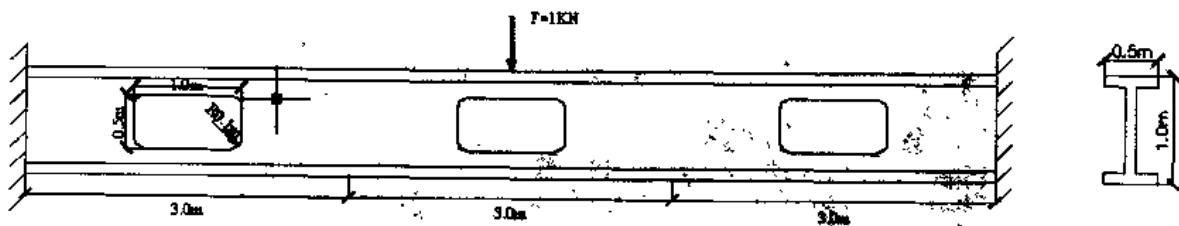


图 12-6 空腹固支梁示意图

### 12.3.2 分析过程

#### 1. 建立有限元模型

由于空腹固支梁的几何外形具有重复性, 因此将整个结构分为 3 个超单元处理, 下面以一个超单元为例, 介绍超单元的生成过程。

建模过程以命令为主, 同时给出相应的 GUI 菜单路径。

第 1 步: 设置模型文件名称

设置模型文件名称为 FULL, 在后续操作中会多次用到该文件。



操作命令如下:

```
/FILNAME, FULL
```

GUI 菜单路径:

Utility Menu>File>Change jobname, 输入 FULL, 单击 OK。

第 2 步: 定义单元类型

选取 SOLID92 作为 1 号单元。

操作命令如下:

```
ET, 1, SOLID92
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 3 步: 定义材料参数

模型材料为钢材, 弹性模量 EX 取  $2.0 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比 PRXY 取 0.3。

操作命令如下:

```
MP, EX, 1, 2.0E11
```

```
MP, NUXY, 1, 0.3
```

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

第 4 步: 创建梁截面

按照图 12-6 给出的截面参数, 在 YOZ 平面建立梁截面。

操作命令如下:

```
K, NPT, X, Y, Z
```

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

由截面关键点生成图 12-7 所示的梁截面。



图 12-7 梁截面

操作命令如下:

A, P1, P2, P3 .....

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Abitratry>Though KPs

第 5 步: 拉伸截面

操作命令如下:

VEXT,ALL,,,3,0,0

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset

第 6 步: 腹板挖孔

(1) 按照图 12-6 所示的尺寸在 XOY 平面创建腹板孔的外线框。

操作命令如下:

K, NPT, X, Y, Z

L, P1, P2

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line

(2) 对线框进行倒角。

操作命令如下:

LFILLT, NL1, NL2, 0.1

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet

(3) 腹板挖孔。

操作命令如下:

AL,25,30,26,31,27,32,28,29

VEXT,11,,,0,0,0.1

VSBV,1,2

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Abitratry>By Lines

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Substruct>Volumes

以上操作完成后, 模型如图 12-8 所示。

第 7 步: 镜像操作生成完整的实体梁

操作命令如下:

VSYMM,Z,ALL

VADD,ALL

GUI 菜单路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Volumes

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Volumes

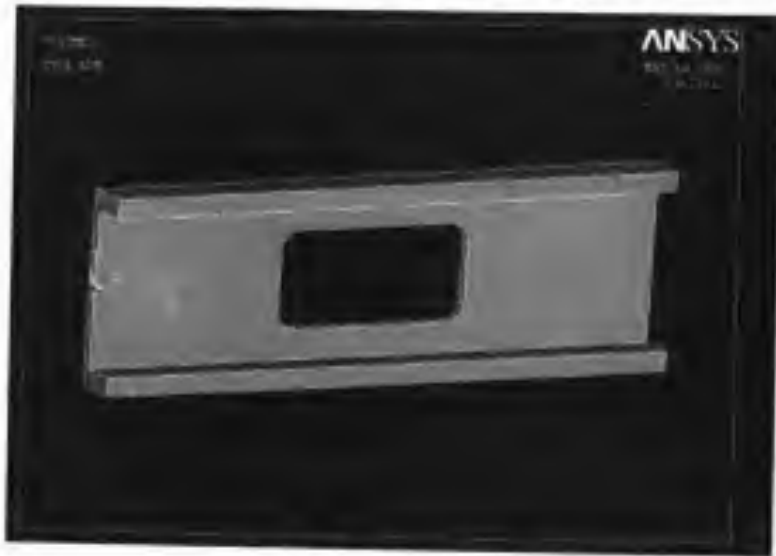


图 12-8 空腹梁腹板

第 8 步：划分网格

采用 SOLID92 单元划分网格，单元尺寸 ESIZE 设置为 0.1。

操作命令如下：

ESIZE,0.1,0,

MSHAPE,1,3D

MSHKEY,0

VMESH,ALL

GUI 菜单路径：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

划分网格后的有限元模型如图 12-9 所示。

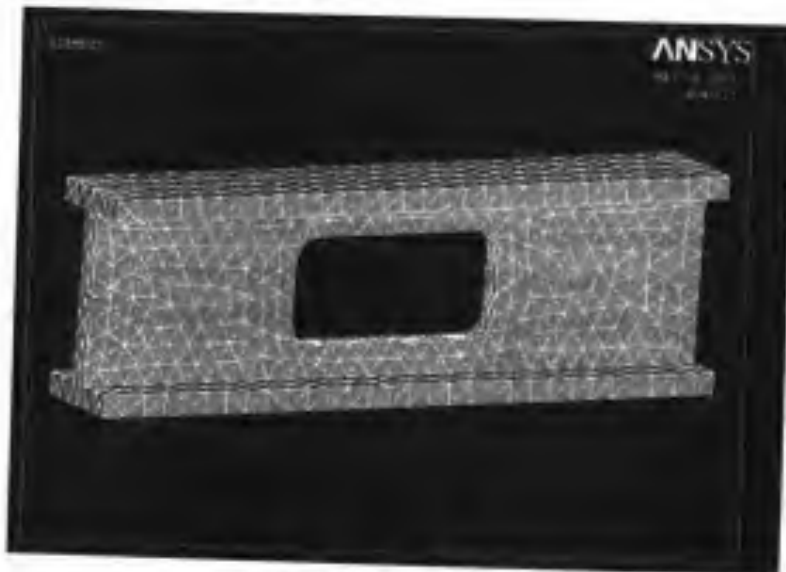


图 12-9 有限元模型

建模的具体命令操作参考本节后面的 APDL 命令文件。单击工具栏的 SAVE\_DB，保存数

数据库文件。

## 2. 生成超单元

第9步：设置超单元生成文件名称

设定第一个超单元的生成文件名为 GEN1。

操作命令如下：

/FILNAME, GEN1

GUI 菜单路径操作：

Utility Menu>File>Change jobname, 输入 GEN1, 单击 OK。

第10步：设置分析类型

进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 设置分析类型为 Substructuring/CMS。

第11步：设置超单元矩阵文件名

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options, 弹出 Substructuring/CMS 对话框，选择 Substructuring, 单击 OK, 弹出 Substructuring Analysis 对话框，在 Sename 栏输入 se1, 单击 OK。

第12步：定义主自由度

选取菜单路径 Utility>Select>Entities, 弹出 Select Entities 拾取框，选择超单元两端截面上的节点。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Master DOFs>User Selected>Define, 弹出 Define Master DOFs 拾取框，单击 Pick ALL, 弹出 Define Master DOFs 对话框，选择 ALL DOF, 单击 OK, 完成主自由度定义，如图 12-10 所示。

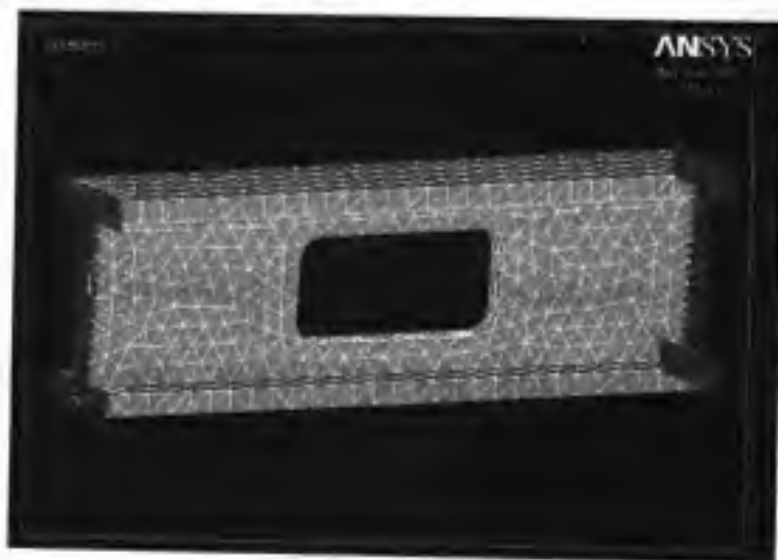


图 12-10 定义主自由度

单击工具栏的 SAVE\_DB, 保存数据文件。

第13步：求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK, 开始求解计算。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close

关闭窗口。

以上是一个超单元的生成过程，采用类似的操作可以生成其他超单元，具体操作参考本节后面的 APDL 命令文件，这里不再介绍。

### 3. 使用超单元求解

在进行使用部分操作前，需要清除数据库。

第 14 步：设置使用部分文件名称

设定使用部分文件名为 USE。

操作命令如下：

```
/FILNAME, USE
```

GUI 菜单路径操作：

Utility Menu>File>Change jobname，输入 USE，单击 OK。

第 15 步：指定超单元类型

进入 ANSYS 前处理器，定义 MATRIX50 作为单元类型。

操作命令如下：

```
ET, 1, MATRIX50
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 16 步：定义超单元，读入超单元矩阵

(1) 选择单元类型。

操作命令如下：

```
TYPE, 1
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes

(2) 读入超单元矩阵 1。

操作命令如下：

```
SE, se1
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Superelements>From .SUB File

(3) 读入超单元矩阵 2。

为了保证超单元接触节点的一致性，需要通过节点偏移生成新的超单元矩阵，详见操作一节的有关说明。

操作命令如下：

```
SETRAN, se2, , 10000, se4
```

```
SE, se4
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Superelements>By Geom Offset

(4) 读入超单元矩阵 3。

操作过程同超单元矩阵 2。

(5) 耦合超单元接触节点。

操作命令如下:

NSEL, S, LOC, X, 3

NSEL, A, LOC, X, 6

CPINTF, ALL, 0.0001

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Coupling/Ceqn>Coincident Nodes

上述操作完成后, 模型如图 12-11 所示。



图 12-11 连接超单元

#### 第 16 步: 施加位移约束

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Utility>Select>Entities, 弹出 Select Entities 拾取框, 选择空腹梁两端截面上的节点。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On nodes, 弹出 Apply U,ROT on Nodes 拾取框, 单击 Pick ALL, 弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框, 选择 ALL DOF, 单击 OK。

#### 第 17 步: 施加载荷

选取菜单路径 Utility>Select>Entities, 弹出 Select Entities 拾取框, 选择跨中上翼缘的节点作为载荷施加节点。

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 拾取框, 单击 Pick ALL, 弹出 Apply F/M on Nodes 对话框, Lab 选择 FY, Value 栏输入 -1000, 单击 OK (如图 12-12 所示)。

#### 第 18 步: 施加超单元载荷向量

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Loads>Apply>Load Vector>For Superelement, 弹出 Apply Superelement Load Vector 对话框, 在 Elem no. of superelement 栏输入 1, Load Vector number 栏输入 1, 单击 Apply。

在 Elem no. of superelement 栏和 Load Vector number 栏输入 2, 单击 Apply。

在 Elem no. of superelement 栏和 Load Vector number 栏输入 3, 单击 Apply。

#### 第 19 步: 计算缩聚解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话

框, 单击 OK, 开始计算缩减解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

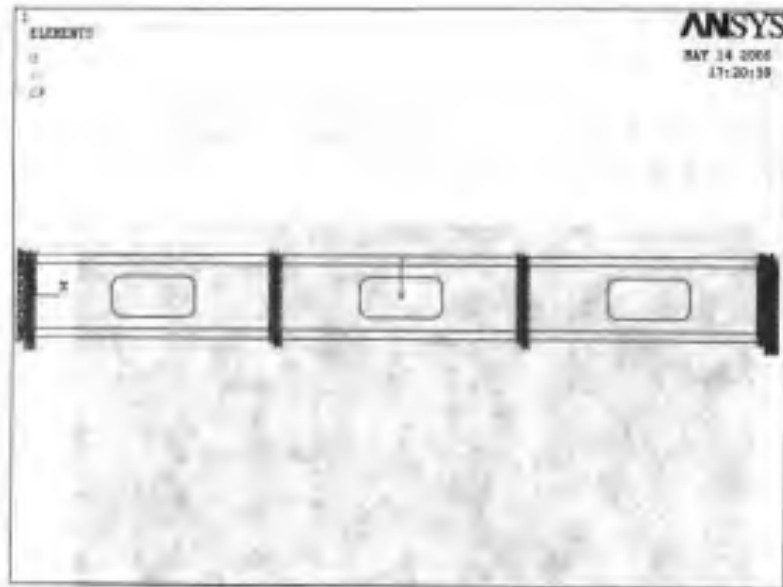


图 12-12 施加载荷

#### 4. 扩展解

扩展操作前需要清除数据库。

第 20 步: 恢复生成超单元部分的数据库文件

选取菜单路径 Utility Menu>File>Change jobname, 输入 GEN1, 单击 OK。

单击工具栏中的 RESUME\_DB, 恢复数据文件。

第 21 步: 打开扩展选项

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>ExpansionPass, 打开扩展选项。

第 22 步: 指定扩展的超单元

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand>Expand Superelem, 弹出 Expand Superelement 对话框, Name of matrix file 栏输入 sc1, Name of DOF solu file 栏输入 USE, 如图 12-13 所示, 单击 OK。

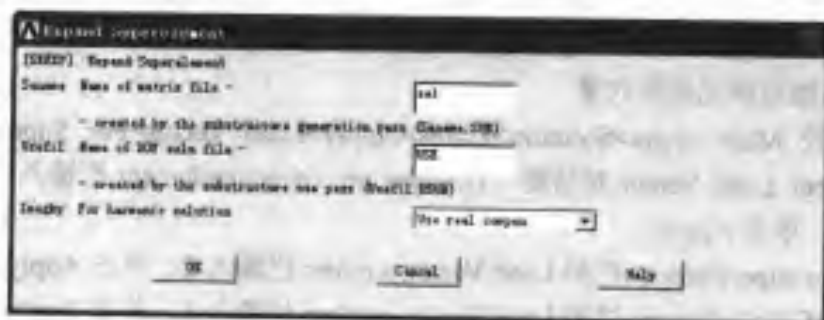


图 12-13 扩展超单元对话框

### 第 23 步：指定扩展解

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand>By Load Step，弹出 Expand Single Solution by Load step 对话框，在 Load Step 栏输入 1，单击 OK。

### 第 24 步：扩展求解指定扩展解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始扩展求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

以上是超单元 1 的扩展过程，超单元 2、3 的扩展过程类似，这里不再介绍。

### 5. 观察结果

扩展操作结束后，可以进入 ANSYS 通用后处理器观察结果。

具体的后处理操作，子结构分析和其他分析类型相同，这里仅给出超单元 1 和超单元 2 的挠度和轴向应力分布图，分别如图 12-14 和图 12-15 所示。

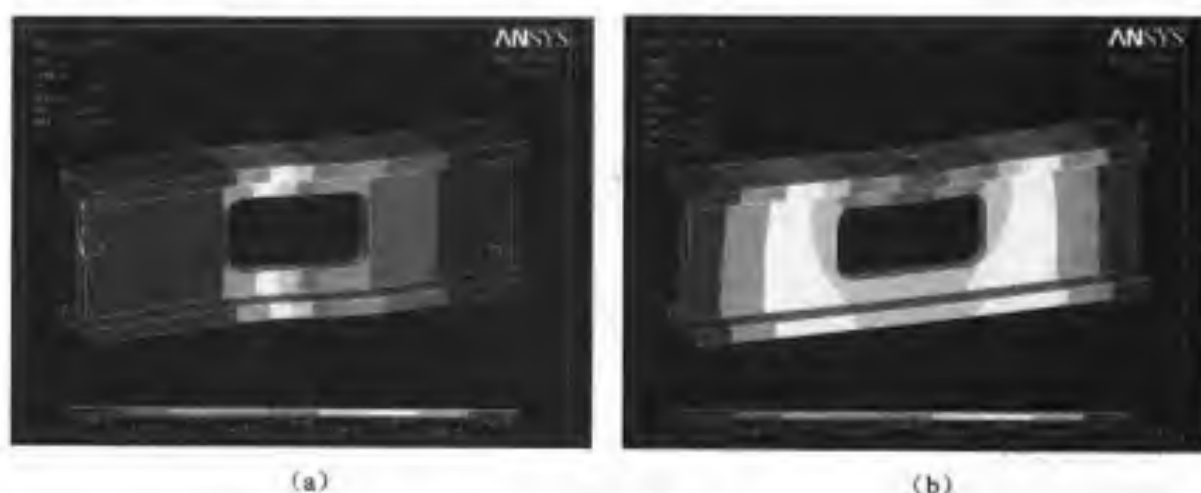


图 12-14 模型挠度分布图



图 12-15 模型轴向应力分布图

本节有关空腹固支梁的子结构分析的所有 APDL 命令流如下：



```

/FILNAME, FULL           ! 设置模型文件名
/PREP7                   ! 进入 ANSYS 前处理器
ET,1,SOLID92            ! 定义单元类型
MP,EX,1,2e11            ! 定义材料
MP,PRXY,1,,3           ! 创建截面关键点
K,1,,0.5,0
K,2,,0.5,0.25
K,3,,0.4,0.25
K,4,,0.4,0.05
K,5,,-0.4,0.05
K,6,,-0.4,0.25
K,7,,-0.5,0.25
K,8,,-0.5,0,
A,1,2,3,4,5,6,7,8      ! 创建梁截面
VEXT,ALL,,,3,0,0       ! 拉伸梁截面
K,,2,0.25               ! 创建腹板开孔关键节点
K,,2,-0.25
K,,1,-0.25
K,,1,0.25
L,17,18                 ! 创建腹板开孔线框
L,18,19
L,19,20
L,20,17
LFILLT,28,25,0.1       ! 腹板开孔倒角
LFILLT,25,26,0.1
LFILLT,26,27,0.1
LFILLT,27,28,0.1
AL,25,30,26,31,27,32,28,29 ! 创建开孔面
VEXT,11,,,0,0,0.1     ! 拉伸开孔面生成开孔部分
VSBV,1,2                ! 减去开孔部分
VSYMM,Z,ALL            ! 镜像操作
VADD,ALL                ! 生成整个空腹梁
ESIZE,0.1,0            ! 设置网格尺寸
MSHAPE,1,3D            ! 划分网格设置
MSHKEY,0
VMESH,ALL               ! 划分网格
SAVE                    ! 保存数据文件
FINISH                  ! 退出 ANSYS 前处理器

! 生成超单元 1
/FILNAME,GEN1          ! 设置生成部分文件名
RESUME,FULL,DB         ! 恢复模型数据文件
/SOL                    ! 进入 ANSYS 求解器
ANTYPE,SUBSTR          ! 设置子结构分析类型
SEOPT,sel              ! 设置超单元矩阵文件名
NSEL,S,LOC,X,0         ! 选择端截面节点

```

```

NSEL,A,LOC,X,3
M,ALL,ALL           ! 定义主自由度
NSEL,ALL           ! 恢复所有节点选择状态
SAVE               ! 保存数据文件
SOLVE             ! 求解
FINISH            ! 退出 ANSYS 求解器

! 生成超单元 2
/FILNAME,GEN2     ! 设置生成部分文件名
RESUME,FULL,DB    ! 恢复模型数据文件
/PREP7            ! 进入 ANSYS 前处理器
VGEN,,ALL,,,3,,,,1 ! 平移模型
FINISH           ! 退出 ANSYS 前处理器
/SOL             ! 进入 ANSYS 求解器
ANTYPE,SUBSTR     ! 设置子结构分析类型
SEOPT,se2        ! 设置超单元矩阵文件名
NSEL,S,LOC,X,3   ! 选择端截面节点
NSEL,A,LOC,X,6
M,ALL,ALL         ! 定义主自由度
NSEL,S,LOC,X,4.5 ! 选择荷载施加节点
NSEL,R,LOC,Y,0.5
NSEL,R,LOC,Z,0
M,ALL,UY         ! 定义主自由度
NSEL,ALL         ! 恢复所有节点选择状态
SAVE             ! 保存数据文件
SOLVE           ! 求解
FINISH          ! 退出 ANSYS 求解器

! 生成超单元 3
/FILNAME,GEN3     ! 设置生成部分文件名
RESUME,FULL,DB    ! 恢复模型数据文件
/PREP7            ! 进入 ANSYS 前处理器
VGEN,,ALL,,,6,,,,1 ! 平移模型
FINISH           ! 退出 ANSYS 前处理器
/SOL             ! 进入 ANSYS 求解器
ANTYPE,SUBSTR     ! 设置子结构分析类型
SEOPT,se3        ! 设置超单元矩阵文件名
NSEL,S,LOC,X,6   ! 选择端截面节点
NSEL,A,LOC,X,9
M,ALL,ALL         ! 定义主自由度
NSEL,ALL         ! 恢复所有节点选择状态
SAVE             ! 保存数据文件
SOLVE           ! 求解
FINISH          ! 退出 ANSYS 求解器

```

! 使用部分

```

/CLEAR                ! 清除数据库
/FILNAME,USE          ! 定义使用部分文件名
/PREP7                ! 进入 ANSYS 求解器
ET,1,MATRIX50        ! 定义单元类型
TYPE,1                ! 指定超单元类型
SE,se1                ! 读入超单元矩阵 se1
SETRAN,se2,,10000,se4,,,,, ! 节点平移生成超单元矩阵 se4
SE,se4                ! 读入超单元矩阵 se4
SETRAN,se3,,20000,se5,,,,, ! 节点平移生成超单元矩阵 se5
SE,se5                ! 读入超单元矩阵 se5
NSEL,S,LOC,X,3        ! 选择超单元连接节点
NSEL,S,LOC,X,6
CPINTF,ALL,0.0001    ! 节点耦合
SAVE                  ! 保存数据文件
FINISH                ! 退出 ANSYS 前处理器
/SOL                  ! 进入 ANSYS 求解器
NSEL,S,LOC,X,0        ! 选择端面节点
NSEL,A,LOC,X,9
D,ALL,ALL             ! 施加位移约束
NSEL,S,LOC,X,4.5      ! 选择施加载荷节点
NSEL,R,LOC,Y,0.5
NSEL,R,LOC,Z,0
F,ALL,FY,-1000        ! 施加集中载荷
NSEL,ALL              ! 恢复所有节点的选择状态
SFE,1,1,SELV,,1,      ! 施加超单元载荷向量
SFE,2,2,SELV,,1,
SFE,3,3,SELV,,1,
SOLVE                 ! 求解
FINISH                ! 退出 ANSYS 求解器

! 扩展超单元 1
/CLEAR                ! 清除数据库
/FILNAME,GEN1         ! 恢复生成部分文件名
RESUME                ! 恢复生成部分数据文件
/SOLU                 ! 进入 ANSYS 求解器
EXPASS,ON             ! 打开扩展开关
SEEXP,se1,USE         ! 指定扩展超单元
EXPSOL,I              ! 指定扩展解
SOLVE                 ! 扩展求解
FINISH                ! 退出 ANSYS 求解器

! 扩展超单元 2
/FILNAME,GEN2         ! 恢复生成部分文件名
RESUME                ! 恢复生成部分数据文件
/SOLU                 ! 进入 ANSYS 求解器
EXPASS,ON             ! 打开扩展开关
SEEXP,se4,USE         ! 指定扩展超单元

```

---

EXPSOL,1	! 指定扩展解
SOLVE	! 扩展求解
FINISH	! 退出 ANSYS 求解器
! 扩展超单元 3	
/FILNAME,GEN3	! 恢复生成部分文件名
RESUME	! 恢复生成部分数据文件
/SOLU	! 进入 ANSYS 求解器
EXPASS,ON	! 打开扩展开关
SEEXP,se5,USE	! 指定扩展超单元
EXPSOL,1	! 指定扩展解
SOLVE	! 扩展求解
FINISH	! 退出 ANSYS 求解器

## 第 3 篇 工程范例精选

---

### 本篇学习导引

通过前面两篇的学习,相信读者已经基本掌握了 ANSYS 结构有限元分析的一般原理和实现方法,并且已初步具备了利用 ANSYS 软件独立完成一些简单结构分析的能力。

为了帮助读者进一步提高 ANSYS 结构分析的综合应用水平,在各自专业领域内尽快上手解决一些复杂问题,本篇特地精选了三类很有代表性的工程结构,即塔架结构、高层建筑结构以及大跨度空间结构,对其在 ANSYS 中进行分析的一般过程、需注意的问题进行了有针对性的讲解,各章配有的工程实例(海洋导管架平台结构、框架剪力墙高层建筑结构、球面网壳结构的分析)向读者演示具体的分析方法,每一个例题都有详细的建模步骤、各种分析的具体过程以及对于分析结果的评价等。

读者可以有选择性地练习其中感兴趣的例题,作为有限元课程学习的一个上机大作业。相信读者一定会在动手操作的过程中更快地提高软件的应用水平,同时还能掌握一系列颇有价值的操作技巧和分析方法。

## 第 13 章 框架—剪力墙结构的分析

### □ 本章导读

本章首先对框架—剪力墙的结构形式与特点做一简要介绍。结合一个框架—剪力墙的具体例子,通过 GUI 菜单操作和 APDL 命令流的方式,详细说明了 ANSYS 建立框架—剪力墙有限元模型的全过程。针对高层结构在实际工程中的各种载荷形式,采用相应的 ANSYS 分析类型分别进行计算,目的是希望通过该实例培养读者运用 ANSYS 进行土木工程结构的分析和计算能力。

本章主要包括以下内容:

- 框架—剪力墙结构简介
- 框架—剪力结构的模型建立
- 重力载荷作用下的结构响应
- 风载荷作用下的结构响应
- 结构模态分析
- 地震作用下的结构响应

### 13.1 框架—剪力墙结构简介

本节对框架—剪力墙的结构特点以及相关知识进行介绍,引入本章所要分析的框架—剪力墙结构对象。

#### 13.1.1 框架—剪力墙基础知识

对于高层建筑,结构形式一般分为框架结构、剪力墙结构、框架—剪力墙结构和筒体结构等四种。其中筒体结构主要用于超高层建筑,在一般的高层结构中,前三种结构形式应用比较普遍。

框架结构是指以钢筋混凝土浇捣成承重梁柱,再用预制的加气混凝土、膨胀珍珠岩、浮石、蛭石等轻质板材作为隔墙。框架结构的特点是能为建筑提供灵活的使用空间,但抗震性能差,适合大规模工业化施工,效率较高,工程质量较好。

剪力墙结构是用钢筋混凝土墙板来代替框架结构中的梁柱,能承担各类载荷引起的竖向作用力和水平作用力。钢筋混凝土墙板的刚度很大,空间整体性好。建筑结构室内不外露梁、柱楞角,便于室内布置,方便使用。剪力墙结构形式是高层住宅采用最为广泛的一种结构形式。

框架—剪力墙结构也称框剪结构,这种结构是在框架结构中布置一定数量的剪力墙,构成灵活自由的使用空间,满足不同建筑功能的要求,同样又有足够的剪力墙,有相当大的刚度。框剪结构的受力特点,是由框架和剪力墙两种不同的抗侧力结构组成的新的受力形式,所以它的框架不同于纯框架结构中的框架,剪力墙也不同于纯剪力墙结构中的剪力墙。因为,在下部楼层,剪力墙的位移较小,它拉着框架按照弯曲型曲线变形,剪力墙承受大部分水平力,上部

楼层则相反，剪力墙位移越来越大，有外侧的趋势，而框架则有内收的趋势，框架拉剪力墙按剪切型曲线变形，框架除了负担外载荷产生的水平力外，还负担了把剪力墙拉回来的附加水平力，剪力墙不但不承受载荷产生的水平力，还因为给框架一个附加水平力而承受负剪力，所以，上部楼层即使外载荷产生的楼层剪力很小，框架中也会出现相当大的剪力。

### 13.1.2 分析对象介绍

本章建模和分析对象的结构形式属于框架—剪力墙。图 13-1~图 13-4 所示为该结构的平面图、立面图和剖面图。

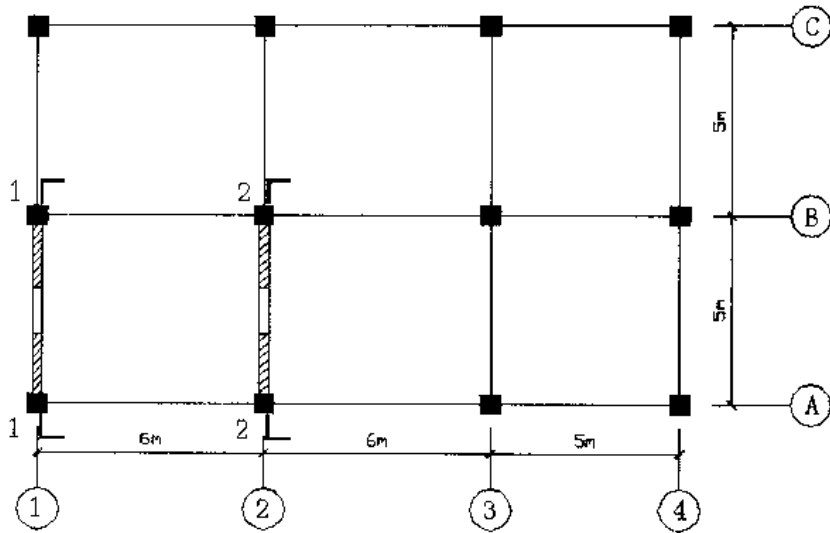


图 13-1 结构平面图

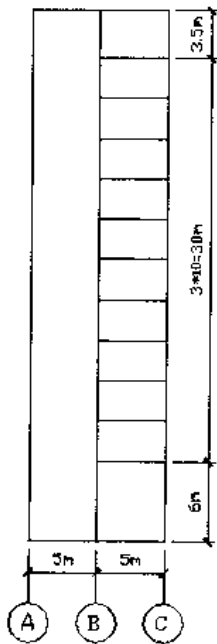


图 13-2 结构平面图

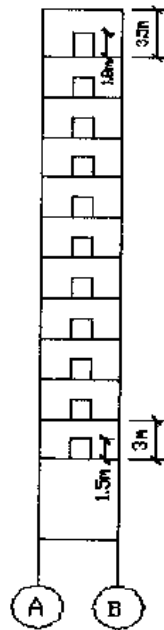


图 13-3 1-1 剖面图

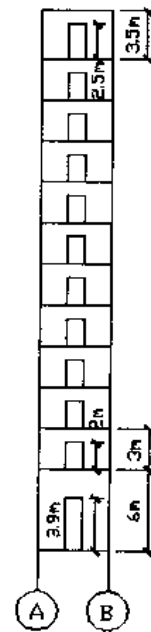


图 13-4 2-2 剖面图

由以上建筑图可以看出,分析对象是一个 12 层的框架—剪力墙结构,主要承重部件是 3 排 4 列共计 12 根立柱、每层的 15 根梁和 2 幅剪力墙。2~11 层结构形式相同,底层和顶层的层高不同于中间各层,建模时需要注意。

## 13.2 框架—剪力墙结构的模型建立

本节以第一节中介绍的框架—剪力墙结构为对象,按照结构特点分析、单元类型选择、材料参数设定、建立几何模型、划分网格的顺序,详细介绍 ANSYS 建立框架—剪力墙结构有限元模型的过程。建模过程中,采用 APDL 命令和 GUI 菜单相结合的方式,目的是使读者具体体会两种建模方式各自的特点。

### 13.2.1 结构建模的总体规划

本节的目标是建立图 13-5 所示的模型。

在开始建模之前,首先来分析一下该框架—剪力墙结构的特点,同时对 ANSYS 建模过程进行一些必要的规划。

#### 1. 结构组成特点

框架—剪力墙结构由空间梁柱框架、竖向剪力墙和水平楼板组成。

空间梁柱框架分为竖直方向立柱和水平方向楼板梁,构成整体结构的骨架。水平方向楼板梁用于支撑楼板,同时沿水平方向传递荷载给立柱。立柱主要用于承受结构的竖向荷载。

剪力墙除了承受竖向荷载外,主要用于增加结构侧向刚度,同时承受结构的水平荷载。

楼板承受每层的竖向荷载,并将其传递给楼板梁,同时增加结构的刚度和整体性。

由于高层结构的桩基础埋置较深,结构在地面的侧移和转动不大,因此在模型底端可以通过固支来模拟结构的底部基础。

由于使用方面的需要,结构底层的层高比其余各层要大,这在建模过程需要注意。

#### 2. 单元类型选择和计算参数设定

整个模型采用两种单元类型:BEAM4 和 SHELL63。梁柱框架中的梁和立柱均采用 BEAM4 单元,剪力墙和楼板采用 SHELL63 单元。

BEAM4 单元参数包括截面的高度、宽度、面积和截面惯性矩,截面形式选用矩形。

(1) 立柱。底层立柱截面采用  $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ ,其余各层采用  $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ 。

(2) 梁。梁截面采用统一形式  $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。

SHELL63 单元参数包括单元节点处的厚度,这里采用等厚度。

(1) 剪力墙。剪力墙厚度取  $250\text{mm}$ 。

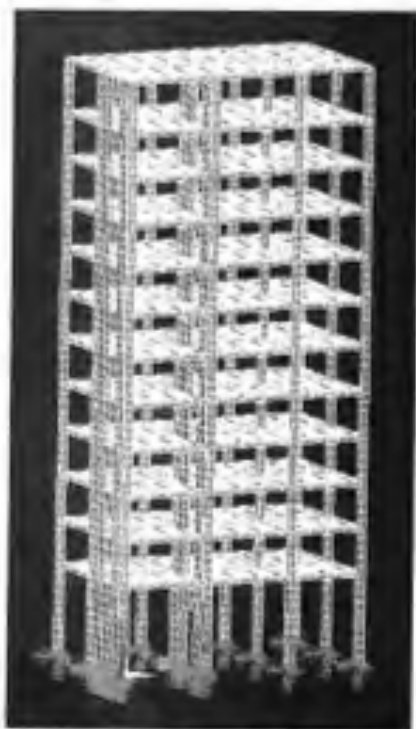


图 13-5 框架—剪力墙有限元模型



(2) 楼板。楼板厚度取 100mm。

整个模型采用同一种混凝土材料，弹性模量  $EX=3.0 \times 10^{10} \text{Pa}$ ，泊松比  $PRXY=0.2$ ，密度  $DENS=2500 \text{kg/m}^3$ 。

### 3. 建模和分析过程总体规划

结构的建模步骤主要分为几何模型的建立和划分网格建立有限元模型。

(1) 建立几何模型。按照设计书中的具体坐标建立关键点，连接关键点生成线，从而建立框架—剪力墙的梁柱框架。在梁柱框架的基础上，竖直方向建立剪力墙平面，水平方向建立楼板平面，完成几何模型。

(2) 建立有限元模型。对几何模型进行网格划分，形成计算分析的有限单元模型。

#### 13.2.2 几何模型的建立

下面结合 GUI 菜单操作和 APDL 命令，对建立几何模型各步骤及其注意事项进行介绍，同时给出一些关键步骤以及程序执行结果等。建模过程中，所有数据输入统一采用国际制单位。

第 1 步：设置分析工作名称和图形标题

设定工作文件名称为 FRAME-SHEAR WALL，图形标题为 FRAME-SHEAR WALL。

操作命令如下：

```
/FILENAME, FRAME-SHEAR WALL
```

```
/TITLE, FRAME-SHEAR WALL
```

GUI 菜单路径操作：

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change jobname，输入 FRAME-SHEAR WALL，单击 OK。

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change Title，输入 FRAME-SHEAR WALL，单击 OK。

第 2 步：定义单元类型

选取 BEAM4 作为 1 号单元，SHELL63 作为 2 号单元。

操作命令如下：

```
ET, 1, BEAM4
```

```
ET, 2, SHELL63
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 3 步：定义单元实常数

定义 5 个实常数，其中 1、2、3 针对 BEAM4 单元，4、5 针对 SHELL63 单元。具体的参数详见章后附录中的单元实常数表。

操作命令如下：

```
R, 1, 0.25, 0.0052, 0.0052, 0.5, 0.5
```

```
R, 2, 0.2025, 0.0034, 0.0034, 0.45, 0.45
```

```
R, 3, 0.06, 0.0002, 0.00045, 0.3, 0.2
```

```
R, 4, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25
```

```
R, 5, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

## 第 4 步：定义材料参数

整个模型采用同一种材料属性，弹性模量 EX 取  $3.0 \times 10^{10}$  Pa，波松比 PRXY 取 0.2，密度 DENS 取  $2500 \text{ kg/m}^3$ 。

操作命令如下：

```
MP, EX, 1, 3.0E10
```

```
MP, NUXY, 1, 0.2
```

```
MP, DENS, 1, 2500
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Modals

## 第 5 步：建立几何模型

框架—剪力墙结构由梁柱框架、剪力墙和楼板组成，梁柱框架通过线条表示，剪力墙和楼板由平面模拟。框架—剪力墙结构的几何模型主要分为三个步骤，即创建关键点、连线构成梁柱框架以及生成剪力墙和甲板平面。

下面将按照上述三个步骤介绍框架—剪力墙结构几何模型的创建过程。

(1) 创建关键点。创建关键点是建立几何模型的基础，根据结构说明书对关键点进行编号，按照编号顺序依次建立关键点。

操作命令如下：

```
K, NPT, X, Y, Z
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

由于结构在高度方向具有规律性，建议采用 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 创建关键点。采用循环语句的前提是关键编号具有规律性，对于该结构，每层关键点数不超过 20，因此沿着高度方向，随着层数的增加，每隔 20 循环编号一次，每层关键点编号遵循相同的规律，如图 13-6 所示。

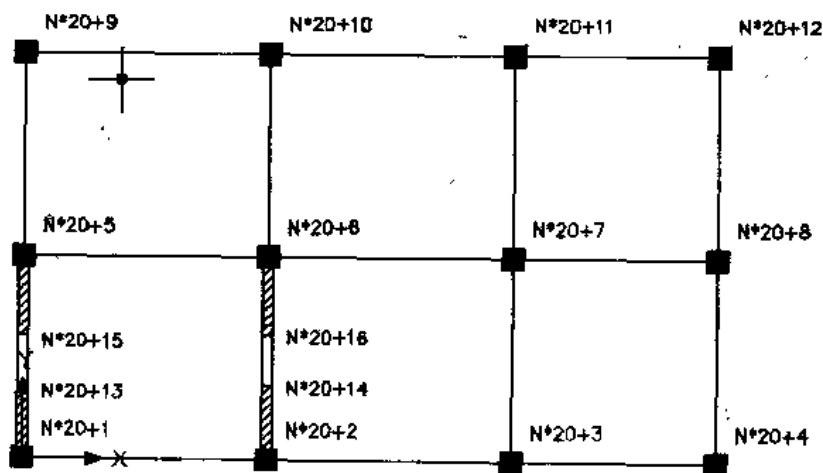


图 13-6 层面关键点编号

剪力墙存有开孔，在开孔处需要创建关键点确定开孔的位置和大小。注意两根剪力墙的开孔高度是不同的，同一根剪力墙底层、中间层和顶层的开孔高度也是不同的，这在建模时应

该特别注意。

本章附录中的 APDL 命令流文件 frame-shear wall.txt 将提供详细的关键点创建过程，所有关键点创建完成后如图 13-7 所示。

(2) 连线构成梁柱框架。在创建关键点的基础上连线，生成梁柱框架。连线时建议按照“水平—豎直”的顺序，由下向上进行。

操作命令如下：

L, P1, P2

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line

与创建关键点相似，在进行连线时，可以利用结构在高度方向的规律性，采用 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 进行连线。本章附录中的 APDL 命令流文件 frame-shear wall.txt 将提供详细的连线过程，所有连线创建完成后如图 13-8 所示。

(3) 建立剪力墙和楼板平面。楼板平面几何形状比较规则，每层楼板由 6 个矩形平面组成。剪力墙平面由于开孔，几何形状不规则，外侧剪力墙由 11 个凹八边形和 1 个矩形组成，内侧剪力墙由 12 个凹八边形组成。

操作命令如下：

A, P1, P2, P3, P4, …… , PN

注意：在由关键点创建平面时，组成关键点应该按照顺时针或逆时针的顺序排列，平面的法线方向由关键点的排列顺序按照右手法则确定。

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Area>Arbitrary>Through Kps

与创建关键点和连线类似，同样可以利用结构在高度方向上的规律性，采用 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 建立平面。本章附录中的 APDL 命令流文件 frame-shear wall.txt 将提供详细的平面创建过程。剪力墙和楼板平面创建完成后如图 13-9 所示。



图 13-7 模型关键点



图 13-8 梁柱线框架



图 13-9 剪力墙-楼板平面

至此, 整个框架—剪力墙结构的几何模型创建完毕, 在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE\_DB, 保存模型到数据文件。

### 13.2.3 划分网格

划分网格是 ANSYS 有限元建模过程中最为关键的一步, 网格划分的好坏将直接影响到计算和分析结果。

在第 2 步的单元类型定义中, 定义了 BEAM4、SHELL63 两种单元, 分别用来划分梁柱框架、剪力墙和楼板, 下面分别就这两种单元的网格划分进行讨论。

#### 1. 梁柱框架 (BEAM4)

BEAM4 用来划分梁柱框架, 所有 BEAM4 单元采用 1 号材料属性。

(1) 立柱。底层立柱, 单元截面为 500mm×500mm, 选取 1 号实常数, 线段的网格划分数 NDIV 设为 10; 底层以外的其他各层, 单元截面为 450mm×450mm, 选取 2 号实常数, 线段的网格划分数 NDIV 设为 5。

操作命令如下:

```
LSEL, ALL, ,, VMIN, VMAX
```

```
LATT, 1, 1, 1
```

```
LSIZE, ALL, ,, 10
```

```
LMESH, ALL
```

```
LSEL, ALL, ,, VMIN, VMAX
```

```
LATT, 1, 2, 1
```

```
LSIZE, ALL, ,, 5
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines

(2) 梁。所有梁采用同一截面 200mm×300mm, 选取 3 号实参数, 线段的网格划分数 NDIV 设为 8。

操的命令如下:

```
LSEL, ALL, ,, VMIN, VMAX
```

```
LATT, 1, 3, 1
```

```
LSIZE, ALL, ,, 8
```

```
LMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines

与几何建模类似，同样可以利用结构在高度方向的规律性，采用 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 对梁柱框架划分网格。

## 2. 剪力墙和楼板 (SHELL63)

SHELL63 用来划分剪力墙和楼板，所有 SHELL63 单元采用 1 号材料属性。

(1) 剪力墙。剪力墙的厚度取 250mm，选取 4 号实常数，网格划分尺寸由平面的各条边的划分数决定。由于剪力墙的边由梁柱组成，采用默认梁柱的设置，在开孔处，侧边的网格划分数 NDIV 设为 3，顶边的网格划分数 NDIV 设为 2，剪力墙平面和楼板的交线网格划分数 NDIV 设为 8。网格尺寸设定后，进行划分网格。

操作命令如下：

```
ASEL, S, , , ALL
```

```
AATT, 1, 4, 2
```

```
AMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes >Picked Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl >ManualSize>Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas

(2) 楼板。楼板的厚度取 100mm，选取 5 号实常数，网格划分尺寸与剪力墙类似，由平面的各条边的划分数决定。对于边界是梁柱的，采用梁柱的默认设置，和剪力墙的交线处，以划分剪力墙的设置作为默认设置。网格尺寸设定后，进行划分网格。

操作命令如下：

```
ASEL, S, , , ALL
```

```
AATT, 1, 5, 2
```

```
AMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes >Picked Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl >ManualSize>Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas

与梁柱的网格划分类似，可以利用结构在高度方向的规律性，采用 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 对剪力墙和楼板划分网格。划分网格完毕后，框架—剪力墙结构的有限元模型创建完成。

为了便于观察，选取 GUI 菜单操作路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape，弹出 Size and Shape 对话框，打开 Display of element shapes on real constant descriptions 选项，模型将以实际形状显示，如图 13-10 所示。

操作命令：

/ESHAPE,1,0

在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE\_DB，保存模型到数据文件。

整个模型的网格划分详细步骤参考本章附录中的 APDL 命令流文件 frame-shear wall.txt。

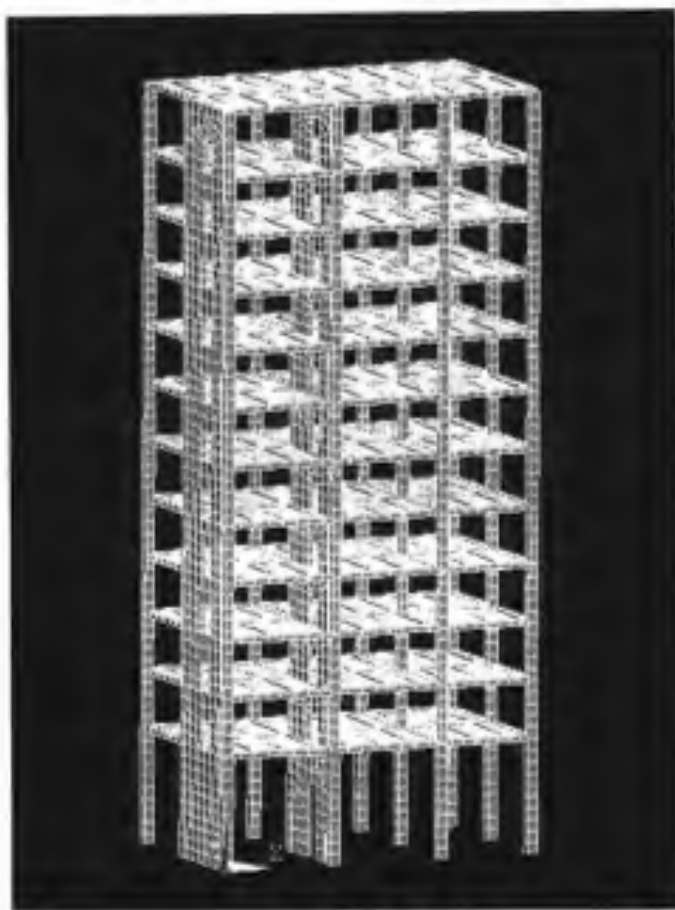


图 13-10 有限元模型

### 13.3 重力载荷作用下的结构响应

对于建筑结构，自身重量是最直接也是首先需要考虑的载荷形式。本节的内容就是计算结构在自重作用下的位移分布和应力分布。

#### 13.3.1 计算重力载荷作用下的结构响应

自重属于静载荷，因此分析类型采用静力分析。

第 1 步：设置分析类型

进入 ANSYS 求解器，选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，弹出 New Analysis 对话框，选择 Static，单击 OK，确定分析类型为静力分析。

第 2 步：施加位移约束

取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，弹出 Apply U, ROT on Node 拾取框，在图形窗口拾取结构底端的所有节点（包括剪力墙下端

和立柱下端), 单击 OK。随后弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框, 在 Lab2 栏选择 All DOF, 在 VALUE 栏输入 0, 单击 OK 关闭对话框。

设定位移约束后结构模型的底端如图 13-11 所示。

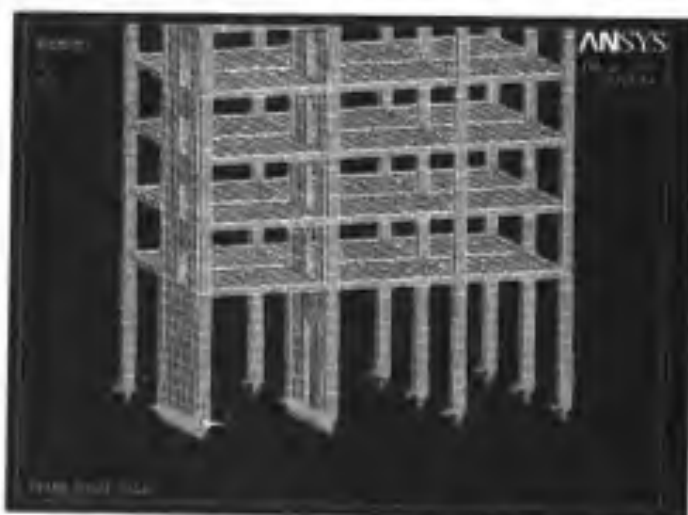


图 13-11 位移约束

#### 第 3 步: 施加重力加速度

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity, 弹出 Apply Acceleration 对话框, 如图 13-12 所示, 在 Global Cartesian Z-comp 栏输入 9.8, 单击 OK。

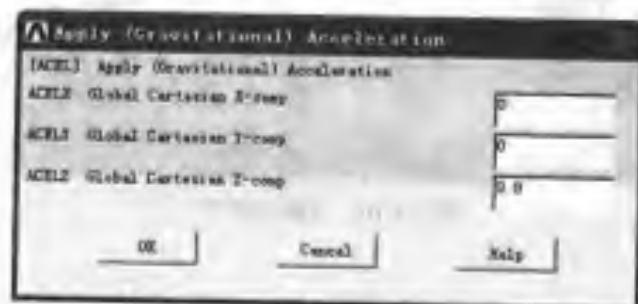


图 13-12 施加重力加速度

#### 第 4 步: 求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始求解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退出求解器。

### 13.3.2 观察变形位移和应力分布

进入通用后处理器 POST1 观察结果。

#### 第 5 步: 读入结果文件

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入结果文件。

#### 第 6 步: 显示竖向变形位移

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu, 弹出

Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 DOF Solution 和 Translation UZ，单击 OK，图形窗口将显示结构竖向位移 UZ 的分布，如图 13-13 所示。

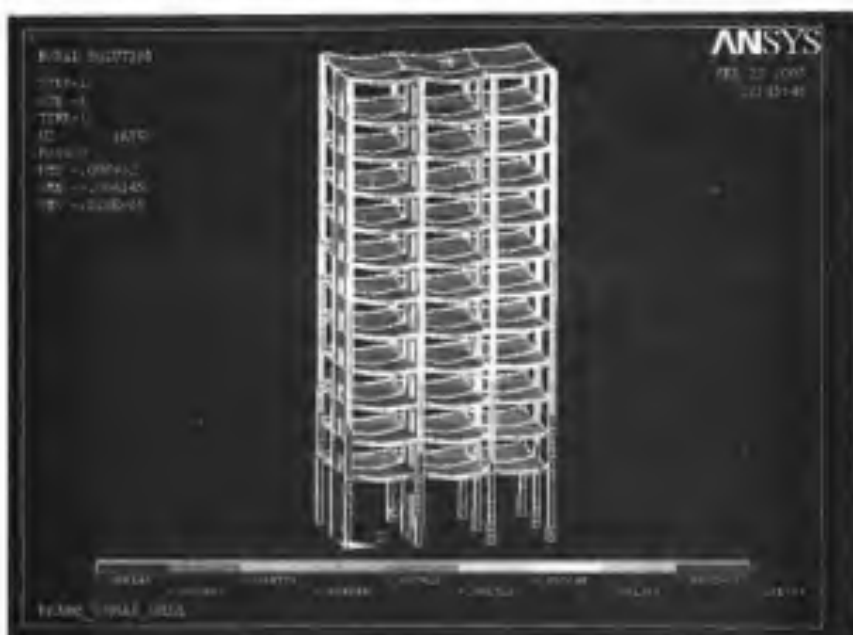


图 13-13 模型的竖向位移 UZ 分布

#### 第 7 步：显示等效应力分布

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 Stress 和 von Mises，单击 OK，图形窗口将显示结构等效应力的分布，如图 13-14 所示。

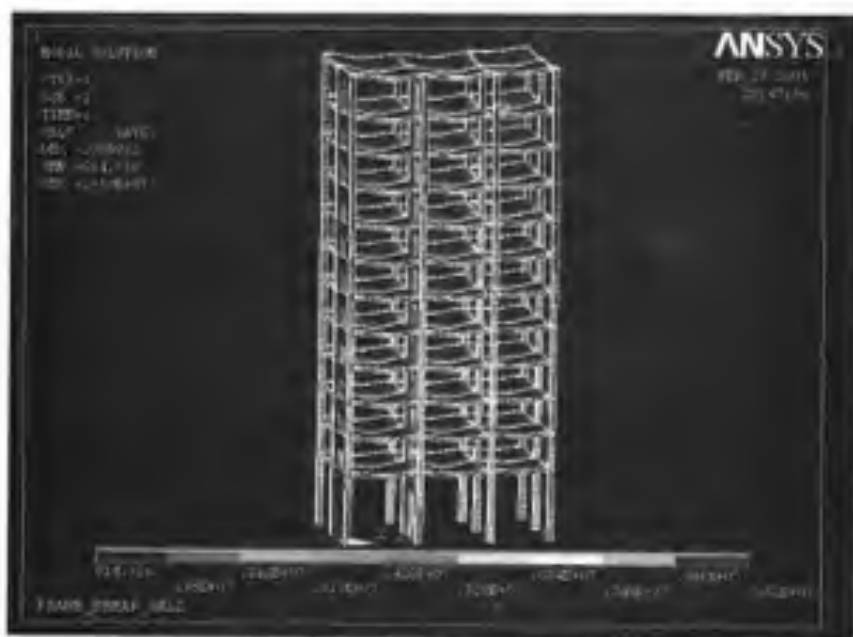


图 13-14 模型的等效应力分布

以上所有操作对应的 APDL 命令流如下：



```

! 计算重力载荷作用下的结构响应
/SOL                ! 进入求解器
ANTYPE,STATIC      ! 设置分析类型为静力分析
NSEL,S,LOC,Z,0     ! 选取模型底端节点
D,ALL,ALL          ! 施加位移约束
ALLSEL,ALL         ! 重新选取所有节点
ACEL,0,0,9.8       ! 施加重力加速度
SOLVE              ! 求解
FINISH             ! 退出求解器

! 后处理观察结构位移和应力的分布
/POST1             ! 进入通用后处理器
SET,FIRST          ! 读入计算结果
PLNSOL,U,Z,0,1    ! 显示竖向位移 UZ 分布
PLNSOL,S,EQV,0,1  ! 显示 Mises 等效应力分布
FINISH            ! 退出后处理器

```

## 13.4 风载荷作用下的结构响应

风载荷是高层建筑主要侧向载荷之一，本节的主要内容包括对风载荷的有关知识进行简要介绍，计算框架—剪力墙结构在风载荷作用下的结构响应。

### 13.4.1 风载荷简介

空气在压强差的作用下发生流动形成风，风的强度通常由风压表示，风速和风压的关系通过流体力学中的伯努利方程可以表示为：

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} v^2 \quad (\text{kN/m}^2)$$

式中：

$\rho$ ——空气密度 ( $\text{t/m}^3$ )；

$v$ ——风速 ( $\text{m/s}$ )。

在标准大气压下， $\frac{1}{2} \frac{\gamma}{g}$  约为  $\frac{1}{1630}$ ，各地气压情况不同，数值也不同，在我国有关风压的

规范中，统一取为  $\frac{1}{1600}$ 。

实际计算中，风压是随着高度和建筑物的外形而变化的。一般首先取基本风压  $w_0$  作为标准，乘以相应的高度变化系数  $\mu_z$  和体形系数  $\mu_s$ ，得出实际风压：

$$w = w_0 \mu_z \mu_s$$

在本节计算中，风速  $v = 20 \text{m/s}$ ，基本风压  $w_0 = 0.25 \text{kN/m}^2$ ，简化起见体形系数  $\mu_s = 1.0$ ，各层的高度变化系数  $\mu_z$  按照有关规范计算如表 13-1 所示。

表 13-1 风压高度变化系数 $\mu_z$ 

高度 z (m)	$\mu_z$	高度 z (m)	$\mu_z$
6	0.84	24	1.31
9	0.96	27	1.37
12	1.06	30	1.42
15	1.41	33	1.46
18	1.21	36	1.50
21	1.26	39.5	1.56

风荷载具有方向性, 本节分别在结构的 Y 方向和 X 方向施加风荷载, 详细介绍了 ANSYS 计算风荷载的处理方法。

风荷载属于表面载荷, 简化起见, 在后面的计算中将风荷载等效地施加在结构外表面的梁柱汇交处, 具体数值见表 13-2 所列。

表 13-2 等效风荷载

高度 z (m)	等效风荷载 (KN)						
	轴线 1	轴线 2	轴线 3	轴线 4	轴线 4	轴线 4	轴线 4
6	3.78	7.56	6.93	3.15	3.15	6.30	3.15
9	2.16	4.32	3.96	1.80	1.80	3.60	1.80
12	2.39	4.78	4.38	1.99	1.99	3.98	1.99
15	2.57	5.14	4.71	2.14	2.14	4.28	2.14
18	2.72	5.44	4.99	2.27	2.27	4.54	2.27
21	2.84	5.68	5.21	2.37	2.37	4.74	2.37
24	2.95	5.90	5.41	2.46	2.46	4.92	2.46
27	3.17	6.34	5.81	2.64	2.64	5.28	2.64
30	3.20	6.40	5.87	2.67	2.67	5.34	2.67
33	3.29	6.58	6.03	2.74	2.74	5.48	2.74
36	3.38	6.76	6.20	2.82	2.82	5.64	2.82
39.5	3.51	7.02	6.44	2.93	2.93	5.86	2.93

#### 13.4.2 计算风荷载作用下的结构响应

在高层建筑结构的抗风分析中, 风荷载作为静荷载处理, 因此分析类型采用静力分析。

第 1 步: 设置分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 弹出 New Analysis 对话框, 选择 Static, 单击 OK, 确定分析类型为静力分析。

第 2 步: 施加风荷载

选取菜单路径 Main Menu>Solutiou>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints, 按照表 13-2 中等效风荷载数值, 依次施加在结构外表面的梁柱汇交关键点上。这

里建议采用\*DIM 命令对结构的每条轴线定义一个载荷数组，利用关键点编号的规律性，通过循环语句 DO-ENDDO 完成载荷地施加，具体操作可以参考本节后面的命令流。

载荷施加完毕后如图 13-15 所示。

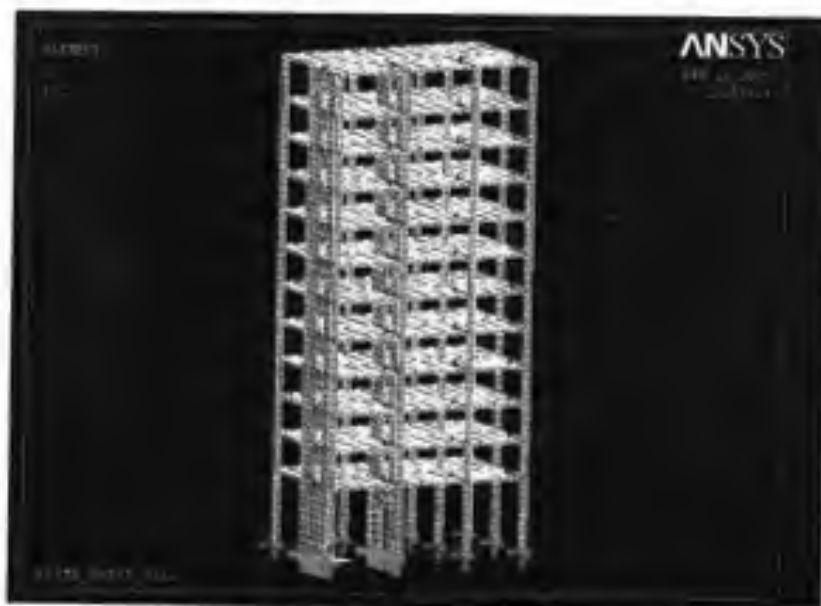


图 13-15 风载荷施加示意图

### 第 3 步：求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

重复上述步骤，计算结构在 X 方向风载荷作用下的响应。

求解完毕后退求解器。

### 13.4.3 观察变形位移和应力分布

进入通用后处理器 POST1 观察结果。

#### 第 5 步：读入 Y 方向载荷的结果

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，读入结果文件。

#### 第 6 步：显示 Y 方向位移

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 DOF Solution 和 Translation UY，单击 OK，图形窗口将显示结构侧向位移 UY 的分布，如图 13-16 所示。

#### 第 7 步：显示主应力分布

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 Stress 和 S1，单击 OK，图形窗口将显示结构的第一主应力的分布，如图 13-17 所示。

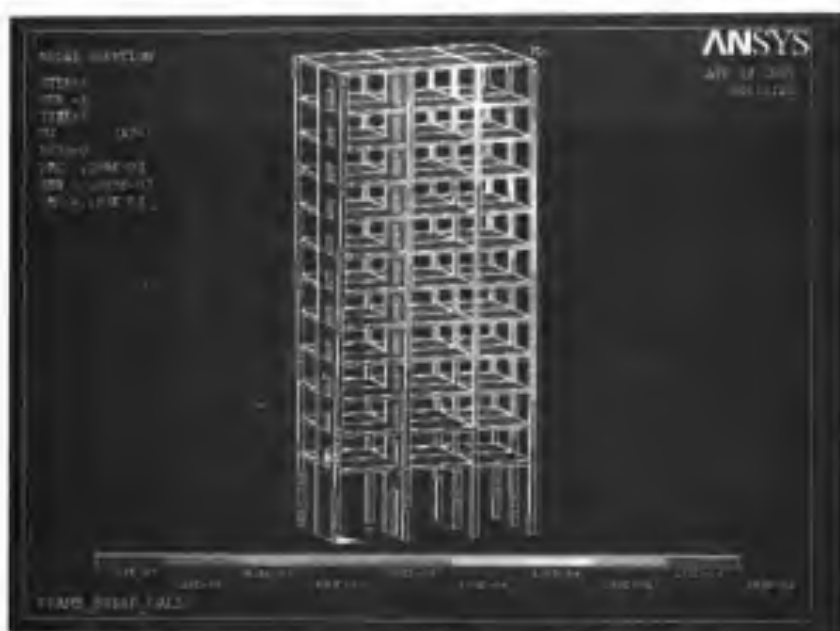


图 13-16 侧向位移 UY 分布图

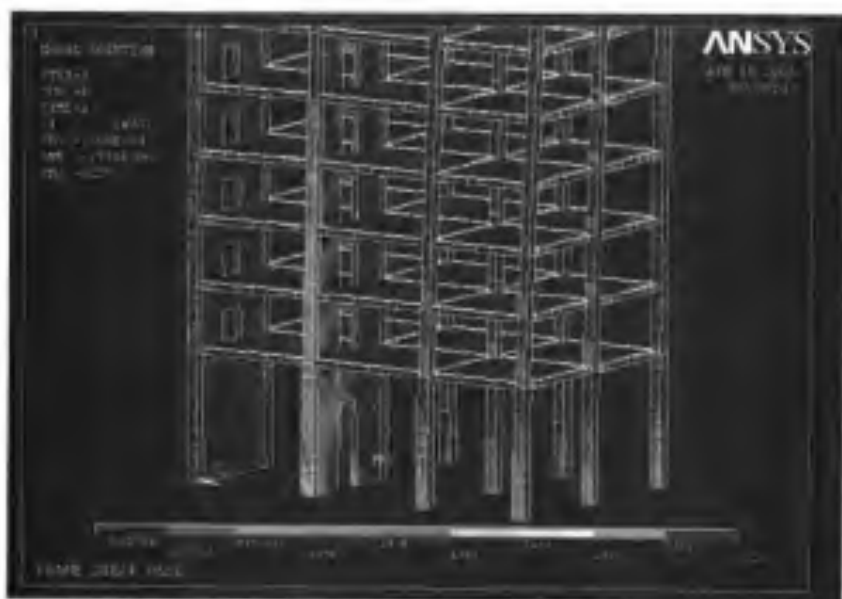


图 13-17 第一主应力分布图

第 8 步：读入 X 方向载荷的结果

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set，读入结果文件。

第 9 步：显示 X 方向位移

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 DOF Solution 和 Translation UX，单击 OK，图形窗口将显示结构侧向位移 UX 的分布，如图 13-18 所示。

第 10 步：显示主应力分布

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，弹出

Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Contour Nodal Solution Data 栏依次选择 Stress 和 S1，单击 OK，图形窗口将显示结构的第一主应力的分布，如图 13-19 所示。

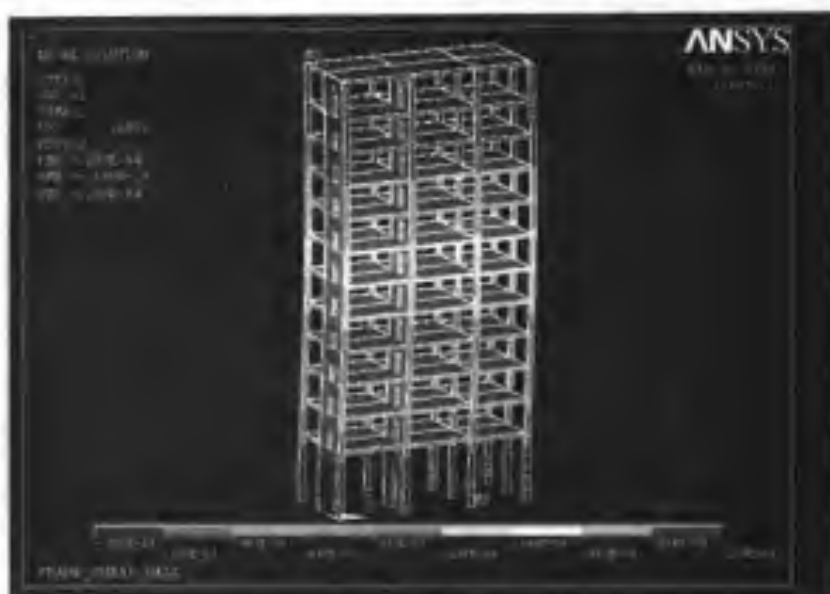


图 13-18 侧向位移 UX 分布图

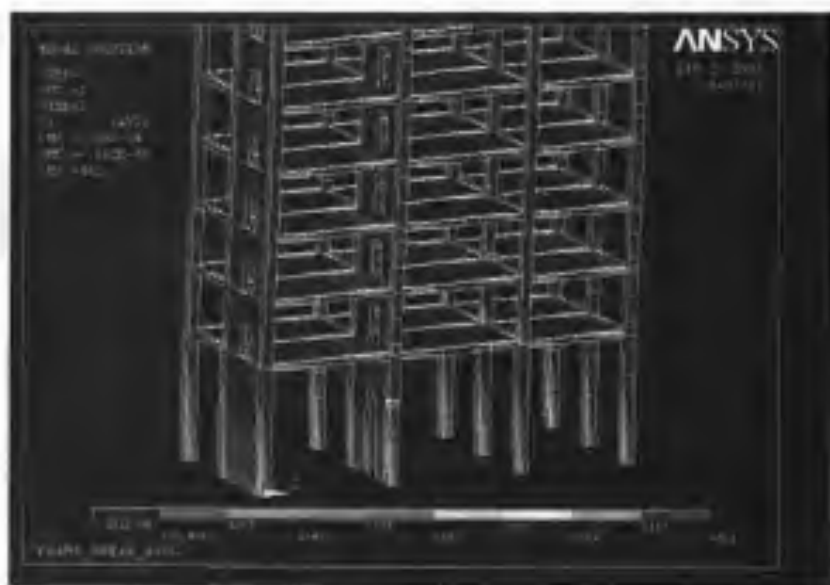


图 13-19 第一主应力分布图

以上所有操作对应的 APDL 命令流如下：

! 施加风载荷计算结构响应

/SOLU

! 进入求解器

ANTYPE,STATIC

! 设置分析类型为静力分析

\*DIM,LOAD\_1,ARRAY,12

! 定义载荷数组 1

LOAD\_1(1)=3.78,2.16,2.39,2.57,2.72,2.84,2.95,3.17,3.20,3.29,3.39,3.51

\*DIM,LOAD\_2,ARRAY,12

! 定义载荷数组 2

LOAD\_2(1)=7.56,4.32,4.78,5.14,5.44,5.68,5.90,6.34,6.40,6.58,6.76,7.02

```

*DIM,LOAD_3,ARRAY,12          ! 定义载荷数组 3
LOAD_3(1)=6.93,3.96,4.38,4.71,4.99,5.21,5.41,5.81,5.87,6.03,6.20,6.44
*DIM,LOAD_4,ARRAY,12          ! 定义载荷数组 4
LOAD_4(1)=3.15,1.80,1.99,2.14,2.27,2.37,2.46,2.64,2.67,2.74,2.82,2.93
*DIM,LOAD_A,ARRAY,12          ! 定义载荷数组 A
LOAD_A(1)=3.15,1.80,1.99,2.14,2.27,2.37,2.46,2.64,2.67,2.74,2.82,2.93
*DIM,LOAD_B,ARRAY,12          ! 定义载荷数组 B
LOAD_B(1)=6.30,3.60,3.98,4.28,4.54,4.74,4.92,5.28,5.34,5.48,5.64,5.86
*DIM,LOAD_C,ARRAY,12          ! 定义载荷数组 C
LOAD_C(1)=3.15,1.80,1.99,2.14,2.27,2.37,2.46,2.64,2.67,2.74,2.82,2.93
*DO,II,1,12                    ! 轴线 1 施加载荷
    FK,1+20*II,FY,LOAD_1(II)
*ENDDO
*DO,II,1,12                    ! 轴线 2 施加载荷
    FK,2+20*II,FY,LOAD_2(II)
*ENDDO
*DO,II,1,12                    ! 轴线 3 施加载荷
    FK,3+20*II,FY,LOAD_3(II)
*ENDDO
*DO,II,1,12                    ! 轴线 4 施加载荷
    FK,4+20*II,FY,LOAD_4(II)
*ENDDO
SOLVE                          ! 求解

FKDELE,ALL,ALL                ! 删除 Y 方向风载荷
*DO,II,1,12                    ! 轴线 A 施加载荷
    FK,1+20*II,FX,LOAD_A(II)
*ENDDO
*DO,II,1,12                    ! 轴线 B 施加载荷
    FK,5+20*II,FX,LOAD_B(II)
*ENDDO
*DO,II,1,12                    ! 轴线 C 施加载荷
    FK,9+20*II,FX,LOAD_C(II)
*ENDDO
SOLVE                          ! 求解
FINISH                          ! 退出求解器

! 后处理观察结构位移和应力的分布
/POST1                          ! 进入通用后处理器
SET,FIRST                       ! 读入 Y 方向载荷计算结果
PLNSOL,U,Y,0,1                 ! 显示侧向位移 UY 分布
PLNSOL,S,S1,0,1               ! 显示主应力 S1 分布
SET,NEXT                        ! 读入 X 方向载荷计算结果
PLNSOL,U,X,0,1                 ! 显示侧向位移 UX 分布
PLNSOL,S,S1,0,1               ! 显示主应力 S1 分布
FINISH                          ! 退出后处理器

```

## 13.5 结构模态分析

固有频率和模态阵型是结构的重要动力特性，本节通过对框架—剪力墙结构进行模态分析，计算出该结构的前六阶固有频率以及对应的模态振型。

### 13.5.1 计算模态解

#### 第1步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器，选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，弹出 New Analysis 对话框，选择 Modal，单击 OK，确定分析类型为模态分析。

#### 第2步：设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Modal Analysis 对话框，模态提取方法 Mode extraction method 选择 Block Lanczos，模态提取数 No. of modes to extract 取 6，单击 OK。随后弹出 Block Lanczos Method 对话框，接受默认设置，单击 OK。

#### 第3步：计算模态解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。求解完毕后退出现求解器。

### 13.5.2 结果观察与分析

#### 第4步：观察模型固有频率

进入通用后处理器 POST1，观察模型固有频率。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary，弹出 Results Summary 列表（如图 13-20 所示），模型的前六阶固有频率汇总于此。



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	DOBSTEP	CUMULATIVE
1	0.42719	1	1	1
2	0.78395	1	2	2
3	1.3492	1	3	3
4	1.4169	1	4	4
5	2.4700	1	5	5
6	2.4992	1	6	6

图 13-20 模型前六阶固有频率

#### 第5步：观察振型

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，读入第 1 载荷步的结果文件。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 接受默认选项, 单击 OK, 图形窗口将显示结构模型的一阶模态振型, 如图 13-21 所示。

重复上述操作, 可以观察结构模型其他各阶模态振型。

图 13-21~图 13-26 分别显示的是框架剪力墙结构的前六阶模态阵型。

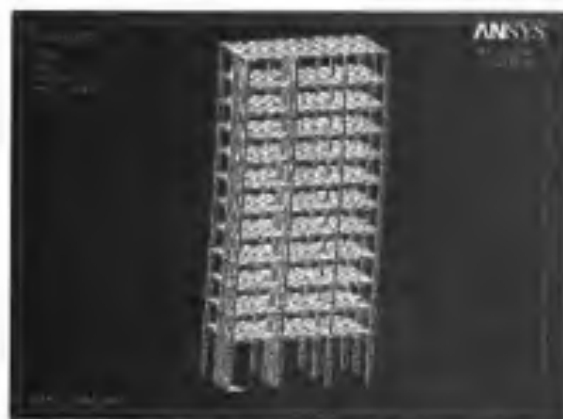


图 13-21 第一阶模态

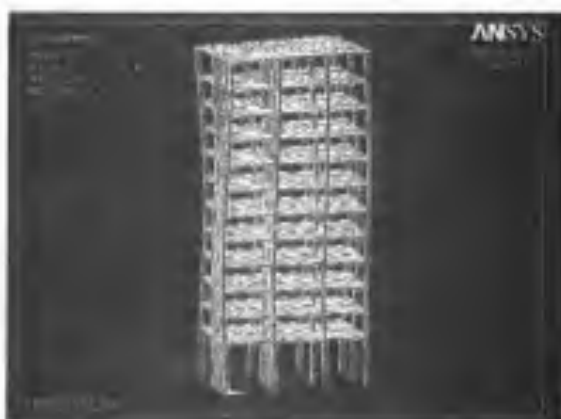


图 13-22 第二阶模态

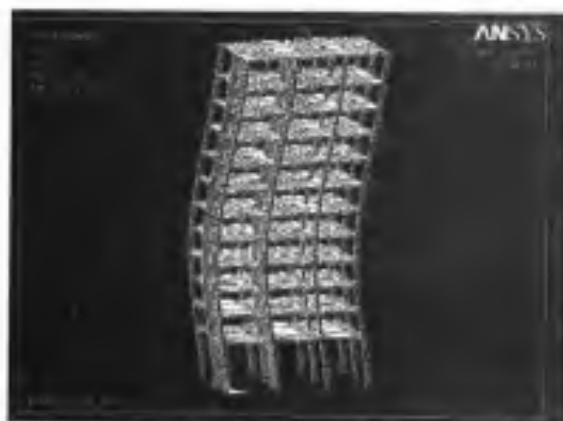


图 13-23 第三阶模态

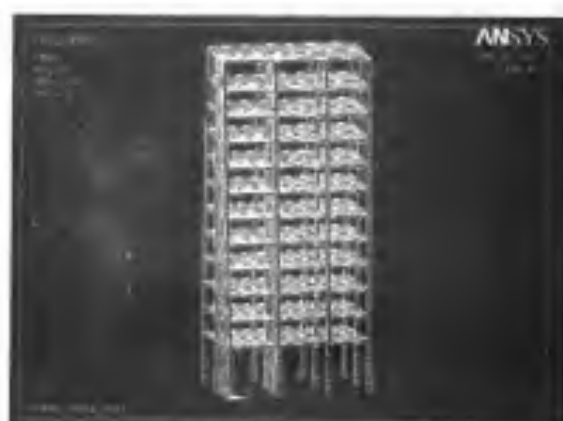


图 13-24 第四阶模态



图 13-25 第五阶模态

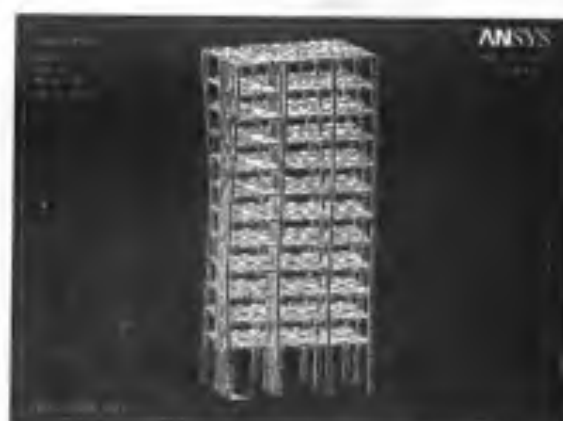


图 13-26 第六阶模态



从结构的前六阶模态振型可以看出, 由于剪力墙沿着 Y 方向分布, 使得结构 Y 方向的刚度比较大, 因此模型前六阶模态阵型主要是按照 X 方向的弯曲和 Z 方向的扭转交替出现。

本节模态分析所有操作对应的 APDL 命令流如下:

! 求解选项设置与求解计算

```

/SOL                ! 进入求解器
ANTYPE,MODAL        ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,6       ! 采用 Block Lanczos 模态提取法, 提取数为 6
MODOPT,LANB,6,0,0, ,OFF ! 采用默认设置
SOLVE               ! 求解
FINISH              ! 退出求解器

```

! 后处理观察结果

```

/POST1              ! 进入通用后处理器
SET, LIST           ! 列表显示模型的固有频率
SET, FIRST          ! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT           ! 读入第二载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT           ! 读入第三载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT           ! 读入第四载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT           ! 读入第五载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT           ! 读入第六载荷步的计算结果
PLDISP,0            ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
FINISH              ! 退出通用后处理器

```

## 13.6 地震作用下的结构响应

本节的主要内容包括对地震的有关知识进行简要介绍, 计算框架—剪力墙结构在三向地震荷载作用下的结构响应。

### 13.6.1 地震荷载简介

地震是一种常见而又危害极大的自然现象。在临近地震中心的地方, 地面先是上下震动, 然后开始水平震动, 随着地震中心距离的增大, 两种震动逐渐减弱, 而且上下震动不如水平震动明显。

地震是高层建筑结构的主要荷载形式之一, 水平作用是最主要的, 但还需要考虑竖向作用, 本节主要分析计算框架—剪力墙结构在三向地震荷载作用下的结构响应。

地震历时一定的时间, 简化起见, 本节选用的地震数据截自真实地震荷载记录中的一段, 总历时三秒钟, 具体数据参考本章后的附录。

### 13.6.2 计算地震作用瞬态解

在有限元分析中, 地震荷载以加速度的形式作用于结构, 随时间而变化, 通常采用 ANSYS

中的瞬态分析来模拟计算地震对建筑结构的作用。

#### 第1步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为瞬态分析 Transient，分析方法选择 Full。

#### 第2步：设置荷载步选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，弹出 Solution Controls 对话框，荷载步的结束时间设为 0.02，荷载子步数设为 1，其他选项采用默认设置。

#### 第3步：施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity，弹出 Apply Acceleration 对话框，按照附录中的地震数据，分别输入第 1 时刻点（0.02s）对应的加速度在 X、Y、Z 方向的分量，如图 13-27 所示。

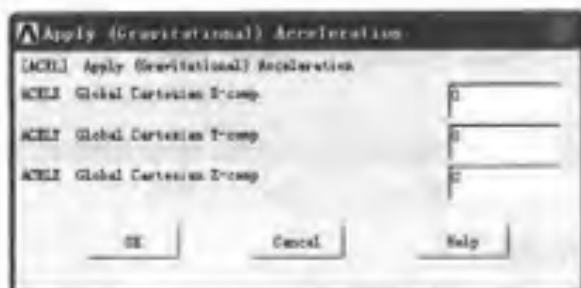


图 13-27 施加地震加速度

#### 第4步：求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始求解该荷载步。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

按照附录中的地震加速度，每 0.02s 作为一个荷载步，重复上述操作，直至整个荷载历程施加并求解结束。

这里建议将三向地震荷载的时间点和荷载数值写入时间文件 TIME.TXT 和荷载文件 AC\_X.TXT，AC\_Y.TXT 和 AC\_Z.TXT，采用 \*DIM 命令对地震荷载的时间点和荷载数值分别定义数组 TIME，AC\_X，AC\_Y 和 AC\_Z，通过 \*VREAD 语句将时间文件和荷载文件的数据读入上述数组，最后采用循环语句 DO-ENDDO 完成整个历程的荷载施加，具体操作详见本节的 APDL 命令流。

### 13.6.3 观察地震作用结构响应

进入时间历程后处理器 POST26，观察结构顶部四个角点处的位移响应。

#### 第5步：定义位移变量

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro，弹出 Time History Variables 对话框，单击左上方的 Add Data 键，出现 Add Time-History Variable 对话框，依次点击 Nodal Solution>DOF Solution>X-Component of displacement，变量名取为 UX\_1，单击 OK，弹出 Node for Data 拾取窗口，在图形窗口拾取结构顶部角点处节点 733，单击 Apply。

重复上述操作，依次选择其余三个角点处节点 773、748、788，分别取名 UX\_2, UX\_3, UX\_4。

和定义 X 方向位移变量类似，选取相同节点，依次定义 Y 方向和 Z 方向的位移变量 UY\_1, UY\_2, UY\_3, UY\_4 和 UZ\_1, UZ\_2, UZ\_3, UZ\_4。

位移变量定义完毕后，Time History Variables 对话框如图 13-28 所示。



图 13-28 变量定义对话框

#### 第 6 步：显示位移变化曲线

在 Time History Variables 对话框中的变量列表中同时选择 UX\_1, UX\_2, UX\_3 和 UX\_4，单击 Graph Data 键，图形窗口将显示 X 方向位移随时间的变化曲线，如图 13-29 所示。

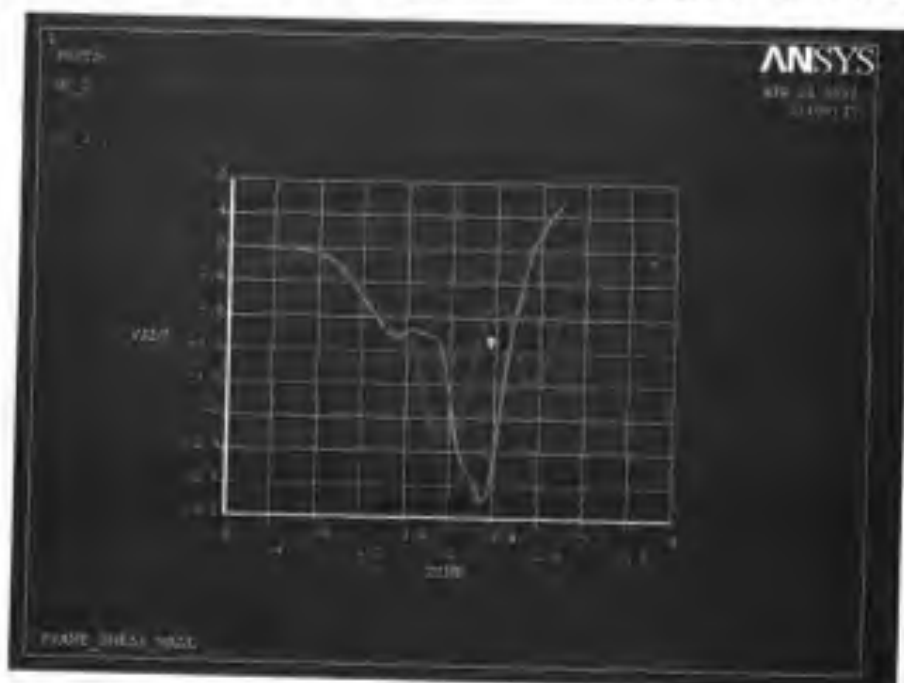


图 13-29 UX—Time 变化曲线

在 Time History Variables 对话框中的变量列表中同时选择 UY\_1, UY\_2, UY\_3 和 UY\_4，单击 Graph Data 键，图形窗口将显示 Y 方向位移随时间的变化曲线，如图 13-30 所示。

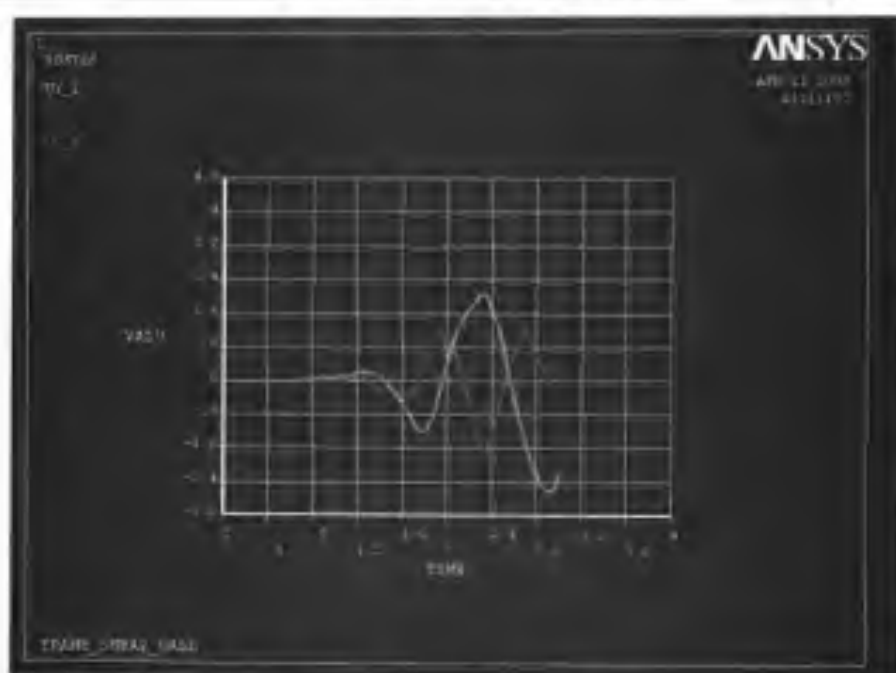


图 13-30 UY-Time 变化曲线

在 Time History Variables 对话框中的变量列表中同时选择 UZ\_1, UZ\_2, UZ\_3 和 UZ\_4, 单击 Graph Data 键, 图形窗口将显示数值方向位移随时间的变化曲线, 如图 13-31 所示。

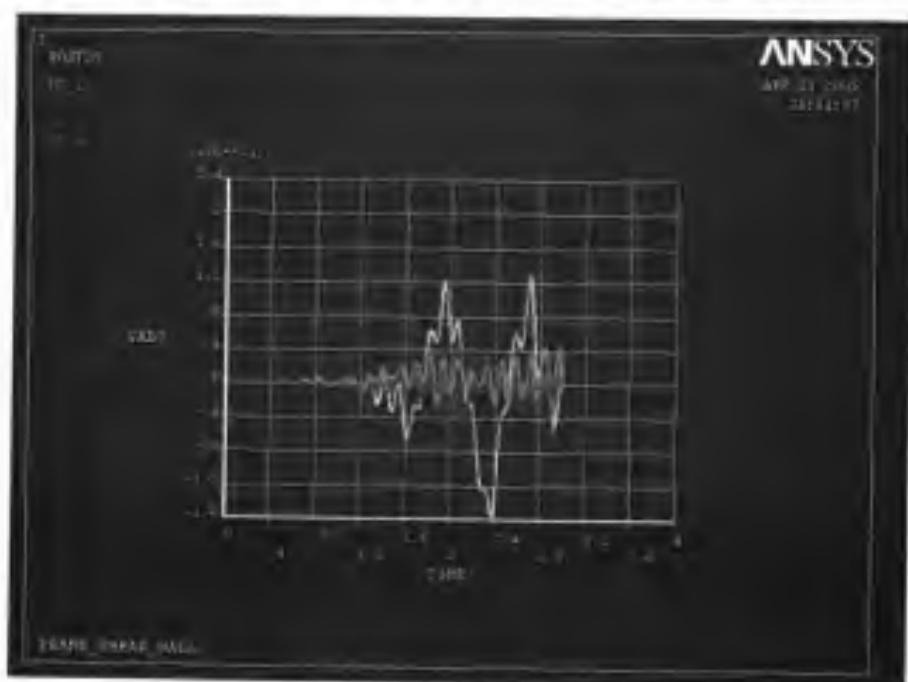


图 13-31 UZ-Time 变化曲线

本节所有操作对应的 APDL 命令流如下:

```

NT=150           ! 定义时间点数目
*DIM,TIME,,NT   ! 定义时间数组
*DIM,AC_X,,NT   ! 定义地震加速度数组

```

```

*DIM,AC_Y,,NT
*DIM,AC_Z,,NT
! 从数据文件读入数据
*VREAD,TIME,TIME,TXT,,IJK,NT
(F6.2)
*VREAD,AC_X,AC_X,TXT,
(F6.2)
*VREAD,AC_Y,AC_Y,TXT,
(F6.2)
*VREAD,AC_Z,AC_Z,TXT,
(F6.2)

! 分析选项设置与求解
/SOLU                                ! 进入求解器
ANTYPE,TRANS                          ! 定义分析类型
NSUBST,1,,1                          ! 定义载荷子步数
*DO,II,1,NT
ACEL,AC_X(II),AC_Y(II),AC_Z(II)      ! 施加加速度载荷
TIME,TIME(II)                        ! 设置时间点
SOLVE                                  ! 求解
*ENDDO

! 后处理观察结构位移响应
/POST26                                ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,733,U,X,UX_1                  ! 定义 X 方向位移变量
NSOL,3,773,U,X,UX_2
NSOL,4,748,U,X,UX_3
NSOL,5,788,U,X,UX_4
NSOL,6,733,U,Y,UY_1                  ! 定义 Y 方向位移变量
NSOL,7,748,U,Y,UY_2
NSOL,8,773,U,Y,UY_3
NSOL,9,788,U,Y,UY_4
NSOL,10,733,U,Z,UZ_1                 ! 定义 Z 方向位移变量
NSOL,11,748,U,Z,UZ_2
NSOL,12,773,U,Z,UZ_3
NSOL,13,788,U,Z,UZ_4
PLVAR,2,3,4,5,                        ! 显示 X 方向位移—时间曲线
PLVAR,6,7,8,9,                        ! 显示 Y 方向位移—时间曲线
PLVAR,10,11,12,13,                   ! 显示 Z 方向位移—时间曲线
FINISH                                 ! 退出时间历程后处理器

```

## 13.7 单元实常数表

实常数编号	单元类型	单元参数				
		截面积 A (m <sup>2</sup> )	I <sub>z</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	高度 h (m)	宽度 b (m)
1	BEAM4	0.2500	0.0052	0.0052	0.50	0.50
2	BEAM4	0.2025	0.0034	0.0034	0.45	0.45
3	BEAM4	0.0600	0.0002	0.00045	0.30	0.20
4	SHELL63	厚度 I (m)	厚度 J (m)	厚度 K (m)	厚度 L (m)	
		0.25	0.25	0.25	0.25	
5	SHELL63	0.10	0.10	0.10	0.10	

## 13.8 模型建立命令流文件

## frame-shear wall.txt

```

/FILENAME,FRAME_SHEAR_WALL      ! 设置分析工作名称
/TITLE, FRAME_SHEAR_WALL        ! 设置图形标题

/PREP7                          ! 进入前处理器
ET,1,BEAM4                      ! 定义单元类型
ET,2,SHELL63

R,1,0.25,0.0052,0.0052,0.5,0.5  ! 定义实常数
R,2,0.2025,0.0034,0.0034,0.45,0.45
R,3,0.06,0.0002,0.00045,0.3,0.2
R,4,0.25,0.25,0.25,0.25
R,5,0.1,0.1,0.1,0.1

MP,EX,1,3.0E10                  ! 定义材料参数
MP,NUXY,1,0.2
MP,DENS,1,2500

! 创建底层关键点
*DO,II,1,1
  K, 1+(II-1)*20, 0, 0, (II-1)*6
  K, 2+(II-1)*20, 6, 0, (II-1)*6
  K, 3+(II-1)*20, 12, 0, (II-1)*6
  K, 4+(II-1)*20, 17, 0, (II-1)*6
  K, 5+(II-1)*20, 0, 5, (II-1)*6
  K, 6+(II-1)*20, 6, 5, (II-1)*6
  K, 7+(II-1)*20, 12, 5, (II-1)*6
  K, 8+(II-1)*20, 17, 5, (II-1)*6
  K, 9+(II-1)*20, 0, 10, (II-1)*6

```

```

K, 10+(II-1)*20, 6, 10, (II-1)*6
K, 11+(II-1)*20, 12, 10, (II-1)*6
K, 12+(II-1)*20, 17, 10, (II-1)*6
K, 14+(II-1)*20, 6, 1.875, (II-1)*6
K, 16+(II-1)*20, 6, 3.125, (II-1)*6
K, 18+(II-1)*20, 6, 1.875, 3.9
K, 20+(II-1)*20, 6, 3.125, 3.9

```

\*ENDDO

! 创建 2~11 层关键点

\*DO,II,1,10

```

K, 1+II*20, 0, 0, (II-1)*3+6
K, 2+II*20, 6, 0, (II-1)*3+6
K, 3+II*20, 12, 0, (II-1)*3+6
K, 4+II*20, 17, 0, (II-1)*3+6
K, 5+II*20, 0, 5, (II-1)*3+6
K, 6+II*20, 6, 5, (II-1)*3+6
K, 7+II*20, 12, 5, (II-1)*3+6
K, 8+II*20, 17, 5, (II-1)*3+6
K, 9+II*20, 0, 10, (II-1)*3+6
K, 10+II*20, 6, 10, (II-1)*3+6
K, 11+II*20, 12, 10, (II-1)*3+6
K, 12+II*20, 17, 10, (II-1)*3+6
K, 13+II*20, 0, 1.875, (II-1)*3+6
K, 14+II*20, 6, 1.875, (II-1)*3+6
K, 15+II*20, 0, 3.125, (II-1)*3+6
K, 16+II*20, 6, 3.125, (II-1)*3+6
K, 17+II*20, 0, 1.875, (II-1)*3+6+1.5
K, 18+II*20, 6, 1.875, (II-1)*3+6+2
K, 19+II*20, 0, 3.125, (II-1)*3+6+1.5
K, 20+II*20, 6, 3.125, (II-1)*3+6+2

```

\*ENDDO

! 创建 12 层关键点

\*DO,II,11,11

```

K, 1+II*20, 0, 0, (II-1)*3+6
K, 2+II*20, 6, 0, (II-1)*3+6
K, 3+II*20, 12, 0, (II-1)*3+6
K, 4+II*20, 17, 0, (II-1)*3+6
K, 5+II*20, 0, 5, (II-1)*3+6
K, 6+II*20, 6, 5, (II-1)*3+6
K, 7+II*20, 12, 5, (II-1)*3+6
K, 8+II*20, 17, 5, (II-1)*3+6
K, 9+II*20, 0, 10, (II-1)*3+6
K, 10+II*20, 6, 10, (II-1)*3+6
K, 11+II*20, 12, 10, (II-1)*3+6

```

K,	12+II*20,	17,	10,	(II-1)*3+6
K,	13+II*20,	0,	1.875,	(II-1)*3+6
K,	14+II*20,	6,	1.875,	(II-1)*3+6
K,	15+II*20,	0,	3.125,	(II-1)*3+6
K,	16+II*20,	6,	3.125,	(II-1)*3+6
K,	17+II*20,	0,	1.875,	(II-1)*3+6+1.8
K,	18+II*20,	6,	1.875,	(II-1)*3+6+2.5
K,	19+II*20,	0,	3.125,	(II-1)*3+6+1.8
K,	20+II*20,	6,	3.125,	(II-1)*3+6+2.5

\*ENDDO

! 创建顶层关键点

\*DO,II,12,12

K,	1+II*20,	0,	0,	39.5
K,	2+II*20,	6,	0,	39.5
K,	3+II*20,	12,	0,	39.5
K,	4+II*20,	17,	0,	39.5
K,	5+II*20,	0,	5,	39.5
K,	6+II*20,	6,	5,	39.5
K,	7+II*20,	12,	5,	39.5
K,	8+II*20,	17,	5,	39.5
K,	9+II*20,	0,	10,	39.5
K,	10+II*20,	6,	10,	39.5
K,	11+II*20,	12,	10,	39.5
K,	12+II*20,	17,	10,	39.5

\*ENDDO

! 创建各层梁格

\*DO,II,2,13

L,	(II-1)*20+1,	(II-1)*20+2
L,	(II-1)*20+2,	(II-1)*20+3
L,	(II-1)*20+3,	(II-1)*20+4
L,	(II-1)*20+5,	(II-1)*20+6
L,	(II-1)*20+6,	(II-1)*20+7
L,	(II-1)*20+7,	(II-1)*20+8
L,	(II-1)*20+9,	(II-1)*20+10
L,	(II-1)*20+10,	(II-1)*20+11
L,	(II-1)*20+11,	(II-1)*20+12
L,	(II-1)*20+5,	(II-1)*20+9
L,	(II-1)*20+6,	(II-1)*20+10
L,	(II-1)*20+3,	(II-1)*20+7
L,	(II-1)*20+7,	(II-1)*20+11
L,	(II-1)*20+4,	(II-1)*20+8
L,	(II-1)*20+8,	(II-1)*20+12

\*ENDDO



! 创建立柱

```
*DO,II,1,12
  L, (II-1)*20+1, II*20+1
  L, (II-1)*20+2, II*20+2
  L, (II-1)*20+3, II*20+3
  L, (II-1)*20+4, II*20+4
  L, (II-1)*20+5, II*20+5
  L, (II-1)*20+6, II*20+6
  L, (II-1)*20+7, II*20+7
  L, (II-1)*20+8, II*20+8
  L, (II-1)*20+9, II*20+9
  L, (II-1)*20+10, II*20+10
  L, (II-1)*20+11, II*20+11
  L, (II-1)*20+12, II*20+12
*ENDDO
```

! 创建底层剪力墙开孔边框

```
*DO,II,1,1
  L, (II-1)*20+14, (II-1)*20+18
  L, (II-1)*20+16, (II-1)*20+20
*ENDDO
```

! 创建其他层剪力墙开孔边框

```
*DO,II,2,12
  L, (II-1)*20+13, (II-1)*20+17
  L, (II-1)*20+15, (II-1)*20+19
  L, (II-1)*20+14, (II-1)*20+18
  L, (II-1)*20+16, (II-1)*20+20
*ENDDO
```

A, 1, 21, 25, 5

! 创建底层外侧剪力墙

\*DO,II,2,12

! 创建 2~12 层外侧剪力墙

```
A, (II-1)*20+1, II*20+1, II*20+5, (II-1)*20+5, (II-1)*20+15, (II-1)*20+19, (II-1)*20+17, (II-1)*20+13
*ENDDO
```

\*DO,II,1,12

! 创建内侧剪力墙

```
A, (II-1)*20+2, II*20+2, II*20+6, (II-1)*20+6, (II-1)*20+16, (II-1)*20+20, (II-1)*20+18, (II-1)*20+14
*ENDDO
```

! 创建楼板平面

```
*DO,II,1,12
  A, II*20+1, II*20+2, II*20+6, II*20+5
  A, II*20+2, II*20+3, II*20+7, II*20+6
  A, II*20+3, II*20+4, II*20+8, II*20+7
  A, II*20+5, II*20+6, II*20+10, II*20+9
```

```

A, II*20+6, II*20+7, II*20+11, II*20+10
A, II*20+7, II*20+8, II*20+12, II*20+11
*ENDDO

! 划分网格
LSEL,S,,,181,192           ! 选择底层立柱
LATT,1,1,1                 ! 设置底层立柱网格划分属性
LESIZE,ALL,,,10           ! 设置底层立柱网格划分数 NDIV 为 10
LMESH,ALL                  ! 底层立柱划分网格

LSEL,S,,,192,324           ! 选择 2~12 层立柱
LATT,1,2,1                 ! 设置 2~12 层立柱网格划分属性
LESIZE,ALL,,,5            ! 设置 2~12 层立柱网格划分数 NDIV 为 5
LMESH,ALL                  ! 2~12 层立柱划分网格

LSEL,S,,,1,180             ! 选择各层梁格
LATT,1,3,1                 ! 设置梁格的网格划分属性
LESIZE,ALL,,,8            ! 设置梁格的网格划分数 NDIV 为 8
LMESH,ALL                  ! 各层梁格划分网格

!剪力墙网格划分
LSEL,S,,,372               ! 选择外侧剪力墙底端
LSEL,A,,,413               ! 选择内侧剪力墙底端
LSEL,A,,,461               ! 选择内侧剪力墙顶端
LESIZE,ALL,,,8            ! 设置网格划分数 NDIV 为 8

LSEL,S,,,418               ! 选择内侧剪力墙底端
LSEL,A,,,420               ! 选择内侧剪力墙顶端
LESIZE,ALL,,,3            ! 设置网格划分数 NDIV 为 3

LSEL,S,,,325               ! 选择内侧剪力墙底端内侧
LSEL,A,,,326               ! 选择内侧剪力墙顶端内侧
LESIZE,ALL,,,6            ! 设置网格划分数 NDIV 为 6

! 选择剪力墙开孔顶端
LSEL,S,,,375
LSEL,A,,,379
LSEL,A,,,383
LSEL,A,,,387
LSEL,A,,,391
LSEL,A,,,395
LSEL,A,,,399
LSEL,A,,,403
LSEL,A,,,407
LSEL,A,,,411
LSEL,A,,,415

```

```

LSEL,A,,,419
LSEL,A,,,423
LSEL,A,,,427
LSEL,A,,,431
LSEL,A,,,435
LSEL,A,,,439
LSEL,A,,,443
LSEL,A,,,447
LSEL,A,,,451
LSEL,A,,,455
LSEL,A,,,459
LSEL,A,,,463
LESIZE,ALL,,,2           ! 设置网格划分数 NDIV 为 2

ASEL,S,,,1,24           ! 选择剪力墙
AATT,1,4,2              ! 设置剪力墙的网格划分属性
AMESH,ALL               ! 剪力墙划分网格

ASEL,S,,,25,96         ! 选择各层楼板
AATT,1,5,2              ! 设置楼板的网格划分属性
AMESH,ALL               ! 楼板划分网格

/ESHape,1.0
FINISH

```

### 13.9 地震加速度数组

TIME (s)	AC_X (m/s <sup>2</sup> )	AC_Y (m/s <sup>2</sup> )	AC_Z (m/s <sup>2</sup> )
0.02	0	0	0
0.04	0	0	0
0.06	0	0	-0.03
0.08	0	-0.03	-0.06
0.1	-0.03	-0.03	-0.21
0.12	-0.03	-0.03	-0.33
0.14	-0.03	0	-0.36
0.16	0	0.03	-0.42
0.18	-0.03	0.03	-0.36
0.2	-0.03	0.03	-0.18
0.22	0	0.03	-0.18
0.24	0	0.03	-0.15
0.26	0.03	0.03	-0.12
0.28	0.09	0.03	-0.36

0.3	0.12	0.03	-1.02
0.32	0.21	0	-1.5
0.34	0.36	0	-1.08
0.36	0.39	-0.03	-0.9
0.38	0.36	-0.06	-1.17
0.4	0.45	-0.21	-0.45
0.42	0.27	-0.33	0.75
0.44	0.18	-0.36	0.72
0.46	0.39	-0.42	-0.33
0.48	0.48	-0.36	-1.97
0.5	0.51	-0.18	-2.87
0.52	1.05	-0.18	-1.73
0.54	1.67	-0.15	-0.33
0.56	1.41	-0.12	-0.9
0.58	0.6	-0.36	-0.42
0.6	0.57	-1.02	3.26
0.62	0.36	-1.5	3.53
0.64	-0.57	-1.08	-2
0.66	0.06	-0.9	-6.34
0.68	0.78	-1.17	-5.65
0.7	1.47	-0.45	-3.59
0.72	4.54	0.75	-4.07
0.74	5.59	0.72	-2.51
0.76	1.52	-0.33	0.21
0.78	-1.05	-1.97	-0.48
0.8	0.27	-2.87	-4.51
0.82	-1.2	-1.73	-9.27
0.84	-4.87	-0.33	-5.65
0.86	-1.08	-0.9	2.54
0.88	8.25	-0.42	4.69
0.9	12.14	3.26	4.46
0.92	12.02	3.53	9.24
0.94	11.78	-2	13.66
0.96	10.02	-6.34	8.22
0.98	5.41	-5.65	6.64
1	0.48	-3.59	4.01

---

1.02	-1.94	-4.07	-6.49
1.04	0.03	-2.51	-11.03
1.06	5.89	0.21	0.45
1.08	5.83	-0.48	14.89
1.1	-0.03	-4.51	2.21
1.12	6.85	-9.27	-8.01
1.14	16.56	-5.65	4.43
1.16	9.12	2.54	15.88
1.18	-2.09	4.69	24.4
1.2	-10.7	4.46	36.6
1.22	-16.74	9.24	38.27
1.24	-7.39	13.66	20.12
1.26	2.15	8.22	3.59
1.28	-11.27	6.64	-1.79
1.3	-17.13	4.01	0.03
1.32	12.11	-6.49	14.77
1.34	48.05	-11.03	3.41
1.36	43.35	0.45	-40.04
1.38	9.69	14.89	-49.6
1.4	-3.41	2.21	-36
1.42	-5.32	-8.01	-21.95
1.44	-24.43	4.43	-9.6
1.46	-29.72	15.88	-0.87
1.48	-2.42	24.4	0.39
1.5	10.73	36.6	-20.6
1.52	-1.08	38.27	-31.28
1.54	-11	20.12	-24.85
1.56	2.33	3.59	-13.99
1.58	42.97	-1.79	3.68
1.6	72.09	0.03	10.97
1.62	51.73	14.77	-2.09
1.64	21.62	3.41	-16.71
1.66	14.53	-40.04	-16.33
1.68	4.93	-49.6	-12.71
1.7	-11.84	-36	-9.9
1.72	-7.21	-21.95	-4.51

---

1.74	7.06	-9.6	-4.04
1.76	2.06	-0.87	-5.8
1.78	-2.36	0.39	-13.51
1.8	7.77	-20.6	-26.64
1.82	-2.36	-31.28	-20.6
1.84	-13.6	-24.85	24.1
1.86	1.91	-13.99	65.27
1.88	11.06	3.68	44.7
1.9	8.19	10.97	0.87
1.92	16.44	-2.09	-14.83
1.94	12.98	-16.71	7.33
1.96	-0.48	-16.33	30.41
1.98	0.99	-12.71	13.4
2	0.63	-9.9	-11.96
2.02	-13.6	-4.51	-24.01
2.04	-14.41	-4.04	-28.38
2.06	-6.07	-5.8	-14.02
2.08	-20.96	-13.51	-10.61
2.1	-34.47	-26.64	-5.35
2.12	-3.29	-20.6	13.45
2.14	41.44	24.1	18.3
2.16	48.83	65.27	27.93
2.18	34.18	44.7	33.04
2.2	26.16	0.87	31.48
2.22	27.87	-14.83	39.98
2.24	25.8	7.33	8.58
2.26	14.53	30.41	-23.41
2.28	-17.46	13.4	-38.84
2.3	-52.18	-11.96	-26.1
2.32	-25.39	-24.01	26.88
2.34	33.85	-28.38	21.02
2.36	49.84	-14.02	9.3
2.38	24.76	-10.61	15.4
2.4	0.3	-5.35	13.69
2.42	-23.68	13.45	25.3
2.44	-38.99	18.3	7.33

---

2.46	-24.88	27.93	-17.34
2.48	-2.36	33.04	-23.62
2.5	11.72	31.48	-20.81
2.52	9.54	39.98	-12.62
2.54	-6.64	8.58	-28.46
2.56	-2.93	-23.41	-28.46
2.58	45.75	-38.84	-15.58
2.6	69.94	-26.1	-15.04
2.62	51.31	26.88	6.52
2.64	15.19	21.02	22.37
2.66	-28.85	9.3	21.62
2.68	-42.94	15.4	15.94
2.7	-17.46	13.69	-0.75
2.72	-10.14	25.3	-4.43
2.74	-32.59	7.33	15.94
2.76	-30.05	-17.34	25.06
2.78	3.11	-23.62	18.21
2.8	36.87	-20.81	16.71
2.82	48.62	-12.62	16.59
2.84	39.44	-28.46	-9.42
2.86	8.31	-28.46	-24.7
2.88	-13.1	-15.58	-2.81
2.9	-11.33	-15.04	36.45
2.92	-6.34	6.52	28.85
2.94	-8.52	22.37	-22.07
2.96	-32.17	21.62	-40.51
2.98	-88	15.94	-13.66

## 第 14 章 海洋石油平台结构的动力分析

### 本章导读

本章以导管架平台为对象, 简要介绍海洋平台的结构特点, 采用 GUI 菜单操作和 APDL 命令流相结合的方式, 详细介绍了 ANSYS 建立海洋平台有限元模型的全过程, 针对海洋平台的各种环境载荷, 采用相应的 ANSYS 分析类型分别进行计算, 目的是希望通过具体实例, 加深读者对 ANSYS 动力分析的理解, 培养读者的应用能力。

本章主要包括以下内容:

- 海洋平台结构简介
- 平台结构的模型建立
- 海洋平台模态分析
- 海洋平台谐响应分析
- 冰载荷作用下海洋平台结构动力响应
- 波浪载荷作用下海洋平台随机振动分析

### 14.1 海洋平台结构简介

本节从海洋平台的发展历史和结构特点介绍海洋平台的相关知识, 希望在后续分析之前, 能够使读者对海洋平台结构有全面的了解。

#### 14.1.1 海洋平台的发展历史及应用背景

地球上 71% 的表面被海洋覆盖。对于人类来讲, 海洋是一个巨大的财富, 尤其是伴随着工业的发展, 人们对能源的需求量与日俱增, 陆地上有限的能源已逐渐不能满足人类的需求。因此, 开发海洋资源已成为人们的当务之急。

1896 年, 美国人以线桥连陆方式在加利福尼亚距海岸 200 多米处打出了第一口海上油井, 它标志着海上石油工业的诞生。到了 20 世纪 40 年代建造成功第一台专门用于海上石油钻探开采的平台, 工作深度只有 7 米。这项技术进一步使海上石油工业出现突飞猛进的发展。到 1979 年全世界近海共有 7000 余座固定式海洋石油钻探生产平台。

第二次世界大战后, 海洋石油钻探开采技术突飞猛进, 可开发深度越来越大, 并能在各种复杂的海况下开采石油。

20 世纪 50 年代以后, 研制成功各种移动式钻井平台, 克服了固定式平台不能重复使用的缺点, 并大大增加了工作深度。移动式海洋石油钻井设备拥有自己的浮力结构, 可以有拖船拖着移动, 有的还拥有自



图 14-1 不同深度的海洋平台



己的动力设备,可以自航。固定式平台固定在海底,工作深度受限。移动式平台使用锚缆定位和动态定位,工作深度可达 200 米以上,但是稳定性较差。为了向深水石油开发进军,各国竞相研究稳定又廉价的深水平台。张力腿平台用绷紧的钢索系留,工作水深可达 600~900m。

进入 20 世纪 70 年代,海上石油平台的数量猛增,特别是半潜式平台。1965 年还只有 70 台,截至 1976 年浮动石油平台已超过 350 台,遍布世界各个沿海区域。

随着石油平台数量的增加,海洋石油产量随之增加。到 20 世纪 80 年代中期,海洋石油产量已占世界石油产量的三分之一。截至目前,海洋石油产量在世界石油总产量中的百分比还在增加。

此外,随着海洋开发事业的迅速发展,海洋平台得到广泛应用,如海上石油钻井、海上施工、生活、地质勘测、海底管道铺设、海上起重、海上打桩、机场、海上工厂等都可以采用海洋平台。

#### 14.1.2 海洋石油平台的结构特点

海洋平台是高出海面的一种海洋工程结构。前已述及,海洋平台按结构类型分为固定式平台和移动式平台。

固定式平台又可以分为导管架型、塔型和重力型等各种结构形式。图 14-2 所示是导管架平台一些工程实例。移动式平台则包括自升式、半潜式、浮船式和张力腿式等结构形式。



图 14-2 导管架平台的工程实例

由于海洋平台工作环境是在近海海面上,受到风浪等载荷作用,因此对其安全性和可靠性的分析和评价是确保其在服役年限内正常使用的重要环节。

本章的目标就是通过一个 ANSYS 导管架平台的分析实例,使读者能够了解和学习固定式导管架海洋平台及类似结构的建模和有限元分析方法。

### 14.2 平台结构的模型建立

本节以导管架平台为对象,按照结构特点分析、单元类型选择、材料参数设定、建立几何模型、划分有限元网格的顺序,详细介绍 ANSYS 建立海洋平台有限元模型的过程。建模过

程中,采用 APDL 命令和 GUI 菜单相结合的方式,目的是使读者具体地体会这两种建模方式各自的特点。

### 14.2.1 结构建模的总体规划

本节的目标是建立图 14-3 所示的海洋平台模型。

在开始建模之前,首先来分析一下导管架平台的结构特点,同时对 ANSYS 建模和分析过程进行一些必要的规划。

#### 1. 结构组成特点

导管架平台属于固定式平台,由上层平台结构和下部导管架结构组成,导管架底端通过桩基础固定。

上层平台结构包括支撑框架和甲板,主要提供生产和生活的场地,其外形为矩形。

下部导管架由一系列钢管焊接而成,主体是 6 根主导管,其间用细管件作为撑杆,组成空间塔架结构,桩基础通过主导管插入海底土层。

桩基础在海底土层不可能实现完全固支,为了更好地模拟真实情况,计算时在海底土层以下 3m 处采用铰接。

#### 2. 单元类型选择和计算参数设定

整个模型采用三种单元类型:PIPE16, BEAM4, SHELL63。下部导管架和上部甲板框架的主要竖向支撑构件采用 PIPE16 单元,甲板平面的框架梁采用 BEAM4 单元,水平甲板采用 SHELL63 单元。PIPE16 单元截面由外径和厚度确定;BEAM4 单元截面形式选用矩形,单元参数包括截面的高度、宽度、面积和截面惯性矩;SHELL63 单元参数包括四节点处的厚度。所有单元参数详见附录 1 单元参数表。

整个模型采用同一种钢材,弹性模量  $EX=2.0 \times 10^{11} \text{Pa}$ ,泊松比  $PRXY=0.3$ ,密度  $DENS=7800 \text{kg/m}^3$ 。

#### 3. 建模总体规划

结构的建模步骤主要分为几何模型的建立和划分网格建立有限元模型。

(1) 建立几何模型。按照设计书中的具体坐标建立关键点,连接关键点生成线,从而建立平台结构基本框架,创建甲板平面,完成几何模型的建立。

(2) 建立有限元模型。对几何模型进行网格划分,形成计算分析的有限单元模型。

### 14.2.2 几何模型的建立

本节主要以命令方式进行介绍,同时也给出相应 GUI 操作的菜单路径,建模过程中,所有数据输入统一采用国际单位制单位。

下面对建立几何模型各步骤及其注意事项进行具体介绍,同时给出一些关键步骤和程序执行结果。

#### 第 1 步:设置分析工作名称和图形标题

设定工作文件名称为 PLATFORM,图形标题为 PLATFORM-STUDY。



图 14-3 海洋平台有限元模型

操作命令如下:

```
/FILNAME, PLATFORM
/TITLE, PLATFORM-STUDY
```

GUI 菜单操作路径:

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change jobname, 输入 PLATFORM, 单击 OK。

选取菜单途径 Utility Menu>File>Change Title, 输入 PLATFORM-STUDY, 单击 OK。

第 2 步: 定义单元类型

选取 PIPE16 作为 1 号单元, BEAM4 作为 2 号单元, SHELL63 作为 3 号单元。

操作命令如下:

```
ET, 1, PIPE16
ET, 2, BEAM4
ET, 3, SHELL63
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

第 3 步: 定义单元实常数

定义 6 组实常数, 其中实常数 1~4 针对 PIPE16 单元, 实常数 5 针对 BEAM4 单元, 实常数 6 针对 SHELL63 单元, 具体的参数详见章后附录 1 单元实常数表。

操作命令如下:

```
R, 1, 1.2, 0.03
R, 2, 0.8, 0.02
R, 3, 0.5, 0.02
R, 4, 0.3, 0.15
R, 5, 0.06, 0.0002, 0.00045, 0.3, 0.2
R, 6, 0.02, 0.02, 0.02, 0.02
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

第 4 步: 定义材料参数

整个模型采用同一种钢材: 弹性模量 EX 取  $2.0 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比 PRXY 取 0.3, 密度 DENS 取  $7800 \text{ kg/m}^3$ 。

操作命令如下:

```
MP, EX, 1, 2.0E11
MP, NUXY, 1, 0.3
MP, DENS, 1, 7800
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Modals

建立海洋平台的几何模型主要分为三个步骤, 即创建关键点、连线构成结构框架和生成甲板平面。

下面将按照上述三个步骤介绍海洋平台几何模型的创建过程。

第 5 步: 创建关键点

根据结构说明书对关键点进行编号，按照编号顺序依次建立关键点。

操作命令如下：

K, NPT, X, Y, Z

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS

完整的关键点创建过程详见附录中的 APDL 命令流文件 platform.txt，关键点创建完成后如图 14-4 所示。

第 6 步：连线构成结构框架

连接关键点生成平台结构的杆系框架，连线时建议按照“平面—侧面—立面”的顺序由下向上进行。

操作命令如下：

L, P1, P2

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line

完整的连线过程详见本章附录中的 APDL 命令流文件 platform.txt，结构的线框架如图 14-5 所示。



图 14-4 模型关键点



图 14-5 几何线框模型

第 7 步：生成甲板平面

每层甲板平面由 16 个矩形平面组成，矩形位置和尺寸由甲板关键点坐标确定。

操作命令如下：

A, P1, P2, P3, P4

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Area>Arbitrary>Through Kps

注意：在由关键点创建平面时，组成关键点应该按照顺时针或逆时针的顺序排列，平面的法线方向由关键点的排列顺序按照右手法则确定。

完整的平面创建过程详见本章附录中的 APDL 命令流文件 platform.txt，甲板平面创建完成后如图 14-6 所示。



图 14-6 甲板平面

生成甲板平面后，海洋平台的几何模型创建完毕，在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE\_DB，保存模型到数据文件。

### 14.2.3 划分网格

划分网格是 ANSYS 有限元建模过程中最为关键的一步，网格划分的好坏将直接影响到分析和计算结果。

在第 2 步的单元类型定义中，定义了 PIPE16、BEAM4 和 SHELL63 三种单元类型，分别用来划分导管架、甲板平面梁框架和甲板，下面按照这三种单元的顺序对结构模型划分网格生成有限元模型。

#### 第 8 步：导管架网格划分

PIPE16 用来划分导管架结构。所有 PIPE16 单元采用 1 号材料属性，单元截面由外直径和壁厚确定，不同规格的杆件需要结合相应的实常数，所有被划分线段的网格划分数 NDIV 设为 1，操作的命令如下：

```
LSEL, ALL, , , VMIN, VMAX
```

```
LATT, 1, REAL, 1
```

```
LSIZE, ALL, , , 1
```

```
LMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径：

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines

该步骤中,不同截面尺寸的杆件需要分别划分网格,另外,平台上部的竖向撑杆采用与导管架相类似的方法进行网格划分。

第 9 步:甲板平面梁网格划分

BEAM4 单元用来划分甲板梁。所有 BEAM4 单元采用 1 号材料属性,5 号实常数,线段网格划分数 NDIV 设为 3。

操作的命令如下:

```
LSEL, ALL, , , VMIN, VMAX
```

```
LATT, 1, REAL, 2
```

```
LSIZE, ALL, , , 3
```

```
LMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines

第 10 步:甲板平面网格划分

SHELL63 单元用来划分甲板平面。所有 SHELL63 单元采用 1 号材料属性,6 号实常数。由于上一步划分 BEAM4 单元时已经设定了线段的网格尺寸,默认情况下程序将在 BEAM4 单元的基础上对 SHELL63 单元划分网格,不必再单独设定平面网格尺寸。

操作命令如下:

```
ASEL, S, , , ALL
```

```
AATT, 1, 6, 3
```

```
AMESH, ALL
```

GUI 菜单操作路径:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool

或

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes >Picked Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls >ManualSize>Areas

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas

至此,海洋平台结构的有限元模型创建完毕。

为了便于观察,选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape,弹出 Size and Shape 对话框,打开 Display of element shapes on real constant descriptions 选项,模型将以实际形状显示,如图 14-7 所示。



图 14-7 海洋平台有限元模型

在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE\_DB，保存模型到数据文件。

模型网格划分的完整操作参考本章后面内容中的 APDL 命令流文件 platform.txt。

### 14.3 海洋平台模态分析

模态分析用于确定结构的固有频率和振型，是其他动力分析的基础。本节主要通过菜单操作方式对已经创建好的海洋平台有限元模型进行模态分析，计算结构前六阶模态的固有频率及其对应的振型。

#### 14.3.1 计算模态解

##### 第 1 步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器，选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，弹出 New Analysis 对话框，选择 Modal，单击 OK，确定分析类型为模态分析。

##### 第 2 步：设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Modal Analysis 对话框，模态提取方法 Mode extraction method 选择 Block Lanczos，模态提取数 No. of modes to extract 取 6，单击 OK。随后弹出 Block Lanczos Method 对话框，接受默认设置，单击 OK。

##### 第 3 步：施加位移约束

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，弹出 Apply U, ROT on Node 拾取框，在图形窗口拾取需要约束的 6 个导管架底端节点，单击 OK。随后弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框，选择 All DOF，在 VALUE 栏输入 0，单击 OK 关闭对话框。

施加位移约束后的导管架底端如图 14-8 所示。

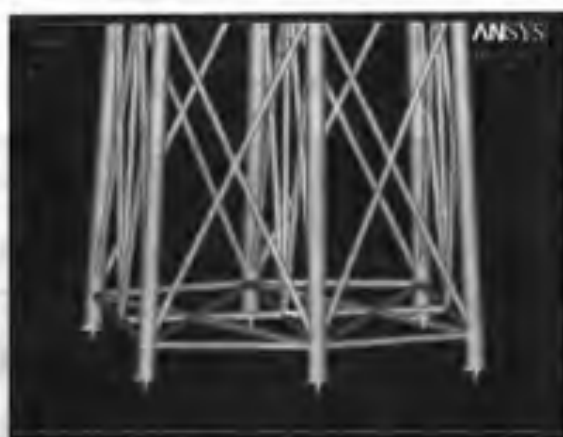


图 14-8 位移约束

**第 4 步：模态分析求解**

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS, 弹出 Solve Current Load Step 对话框, 单击 OK, 开始求解。求解完毕后, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。求解完毕后退求解器。

SET	FREQ/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1.1426	1	1	1
2	1.1718	1	2	2
3	1.8769	1	3	3
4	3.0838	1	4	4
5	3.4181	1	5	5
6	4.2816	1	6	6

图 14-9 模型前六阶固有频率

**14.3.2 结果观察与分析**

进入通用后处理器 POST1, 观察结构的固有频率和模态振型。

**第 5 步：观察固有频率**

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary, 弹出 Results Summary 列表, 如图 14-9 所示), 模型的前六阶固有频率汇总于此。

**第 6 步：观察模态振型**

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入载荷子步 1 的结果。

选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 接受默认选项, 单击 OK, 图形窗口将显示结构模型的一阶模态振型, 如图 14-10 所示。

重复上述操作, 可以观察结构模型其他各阶模态振型。



图 14-10~图 14-15 分别显示了海洋平台模型的前六阶模态阵型，从中可以看出，海洋平台结构的模态振型遵循 X 方向弯曲、Y 方向弯曲和 Z 方向扭转的规律交替出现。



图 14-10 一阶模态



图 14-11 二阶模态



图 14-12 三阶模态



图 14-13 四阶模态



图 14-14 五阶模态



图 14-15 六阶模态

本节模态分析所有操作对应的 APDL 命令流如下：

! 求解选项设置与求解计算

/SOL

! 进入求解器

```

ANTYPE,MODAL          ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,6         ! 采用 Block Lanczos 模态提取法, 提取数为 6
MODOPT,LANB,6,0,0,OFF ! 采用默认设置
D,31,ALL              ! 约束节点 31 所有自由度
D,32,ALL              ! 约束节点 32 所有自由度
D,33,ALL              ! 约束节点 33 所有自由度
D,34,ALL              ! 约束节点 34 所有自由度
D,35,ALL              ! 约束节点 35 所有自由度
D,36,ALL              ! 约束节点 35 所有自由度
SOLVE                 ! 求解
FINISH                ! 退出求解器

! 后处理观察结果
/POST1                ! 进入通用后处理器
SET, LIST              ! 列表显示模型的固有频率
SET, FIRST             ! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT              ! 读入第二载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT              ! 读入第三载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT              ! 读入第四载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT              ! 读入第五载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
SET, NEXT              ! 读入第六载荷步的计算结果
PLDISP,0              ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
FINISH                ! 退出通用后处理器

```

## 14.4 海洋平台谐响应分析

谐响应分析用于确定结构在随时间按照正弦规律变化的载荷作用下的稳态响应, 目的是计算结构响应随频率的变化曲线。本节是在海洋平台模态分析的基础上, 计算结构在前六阶固有频率的范围内, 承受单位简谐载荷的位移响应曲线。

### 14.4.1 计算谐响应解

#### 第 1 步: 设定分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 弹出 New Analysis 对话框, 选择 Harmonic, 单击 OK, 确定分析类型为谐响应分析。

#### 第 2 步: 设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options, 弹出 Harmonic Analysis 对话框, 求解方法 Solution method 选择 Full, 输出形式 DOF printout format 选择 Real+imaginary, 如图 14-16 所示, 单击 OK。随后弹出 Full Harmonic Analysis 对话框, 接受

默认设置，单击 OK。

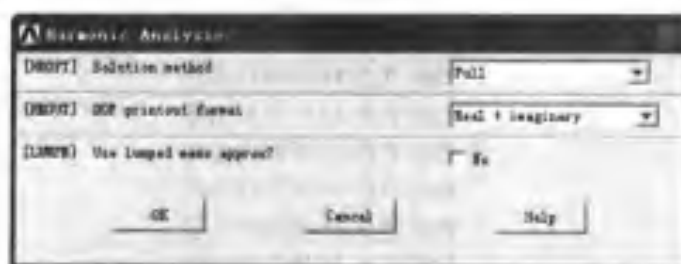


图 14-16 谐响应分析选项设置

### 第 3 步：载荷步选项设置

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequency>Freq and Substeps，弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，频率范围 Harmonic freq range 设定为 0~5Hz，载荷子步数 Number of substeps 取 20，载荷形式 Stepped or ramped b.c 选择 Ramped，如图 14-17 所示，单击 OK。

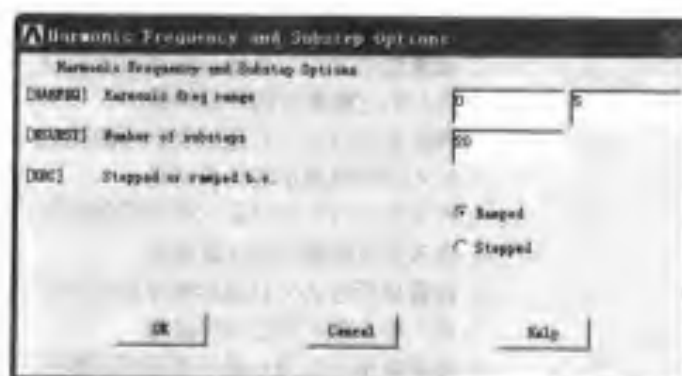


图 14-17 载荷步选项设置

### 第 4 步：施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取框，在图形窗口拾取节点 5 和 25，单击 OK，弹出 Apply A/M on Nodes 对话框，载荷方向 Direction of force/mom 选择 FY，载荷实部 Real part of force/mom 输入 1，载荷虚部 Imag part of force/mom 输入 0，单击 OK。如图 14-18 所示。

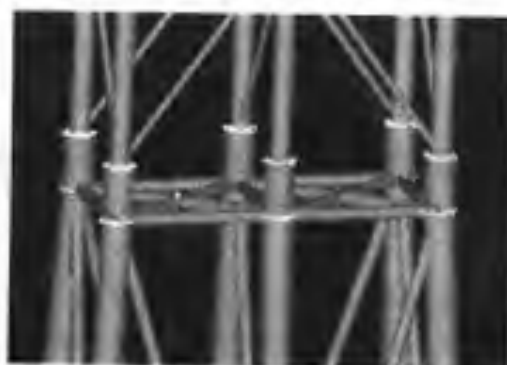


图 14-18 施加载荷示意图

#### 第 5 步：谱响应求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始谱响应求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退出求解器。

#### 14.4.2 结果观察与分析

进入时间历程后处理器 POPST26，观察位移频响曲线。

#### 第 6 步：定义位移变量

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro，进入时间历程后处理器，弹出 Time History Variables 对话框，单击右上方的 Add Data 键，弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次单击 Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement，变量名取为 UY，单击 OK，弹出 Node for Data 拾取框，在图形窗口拾取节点 73，如图 14-19 所示，单击 OK 确定。

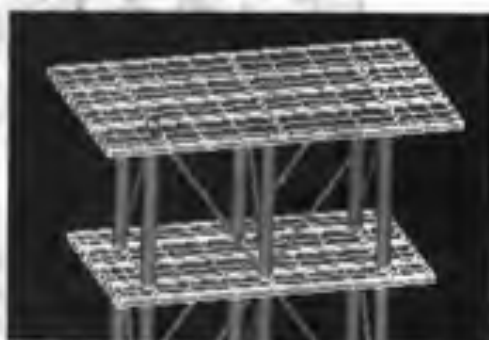


图 14-19 定义节点变量

#### 第 7 步：设定坐标轴标志符

选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes，弹出 Axes Modification for Graph Plots 对话框，在 X-axis lable 输入 Frequency，在 Y-axis lable 输入 UY，单击 OK 确定。

#### 第 8 步：显示变量变化曲线

在 Time History Variables 对话框选择变量 UY，单击右上方的 Graph Data 键，图形窗口显示变量 UY 随频率的变化曲线，如图 14-20 所示。

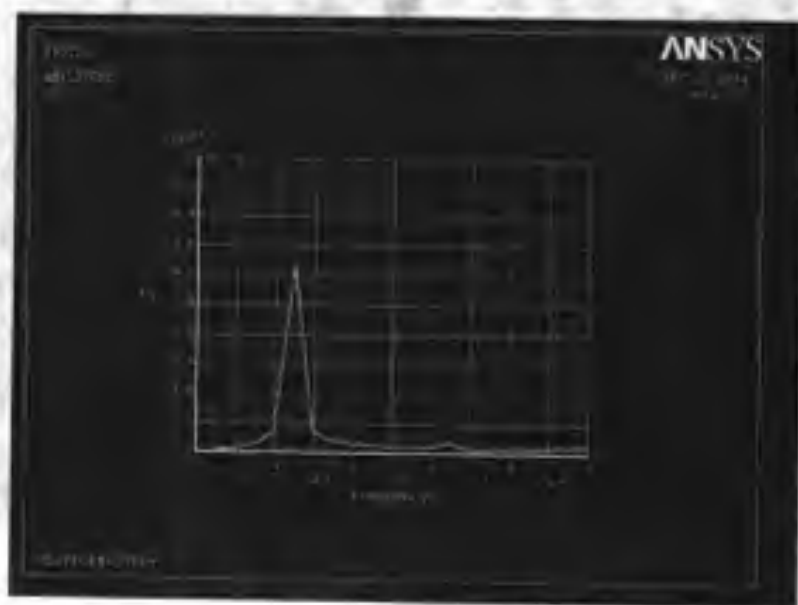


图 14-20 UY-Frequency 变化曲线

由结构动力学知道，当外载荷的激振频率与结构的固有频率接近时会引起结构共振，位移响应最大。通过图 14-20 可以看出，变量曲线出现峰值所对应的频率与模型的一阶固有频率（1.2218Hz）和四阶固有频率（3.2959 Hz）一致，载荷作用于 Y 方向，而一阶模态和四阶模态都是 Y 方向的弯曲变形模态，很好地验证了结构的共振效应。

同样，按照上述操作可以验证平台结构在 X 方向弯曲和 Z 方向扭转具有类似的规律，有兴趣的读者可以自己试试，这里仅给出最后的响应曲线，分别如图 14-21 和图 14-22 所示。

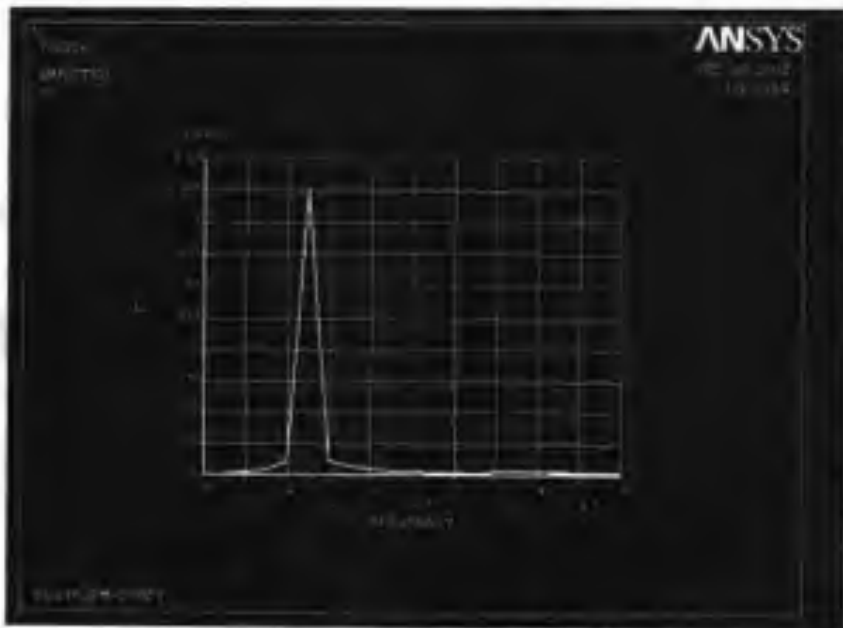


图 14-21 UX-Frequency 变化曲线

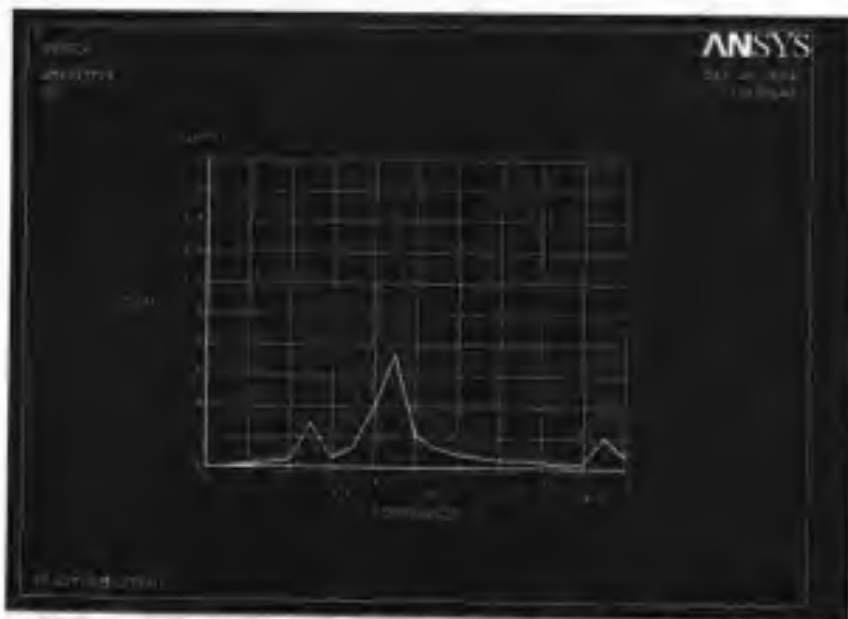


图 14-22 扭矩作用下的 UX、UY-Frequency 变化曲线

本节谐响应分析所有操作对应的 APDL 命令流如下：

```

! 分析选项设置与求解
/SOL                ! 进入求解器
ANTYPE,HARMONIC    ! 定义分析类型为谐响应分析
HROPT,FULL         ! 选择完全法求解
PSTRES,0           ! 关闭预应力选项
HARFRQ,0,5,        ! 设定频率范围为 0~5Hz
NSUBST,20,         ! 载荷子步数设为 20
KBC,RAMPED         ! 载荷类型设为 ramped 型
F,5,FY,1,0         ! 施加载荷
F,25,FY,1,0
SOLVE              ! 求解
FINISH             ! 退出求解器

! 后处理观察位移频响曲线
/POST26            ! 进入时间—历程后处理器
NSOL,2,73,U,Y,UY  ! 定义位移变量
/AXLAB,X,Frequency ! 设置图形显示坐标符
/AXLAB,Y,UY
PLVAR,2            ! 显示变量随频率的变化曲线
FINISH            ! 退出时间—历程后处理器

```

## 14.5 冰载荷作用下海洋平台结构响应

本节通过计算海洋平台在冰载荷作用下的结构响应，介绍 ANSYS 瞬态分析的具体操作过程。

在高纬度地区，冰载荷是海洋平台的一种重要的载荷形式。由于浮冰撞击平台结构在很短的时间内完成，具有明显的瞬时效应，因此采用 ANSYS 的瞬态分析，计算海洋平台在冰载荷作用下的结构响应。

图 14-23 是冰载荷简化时程曲线。

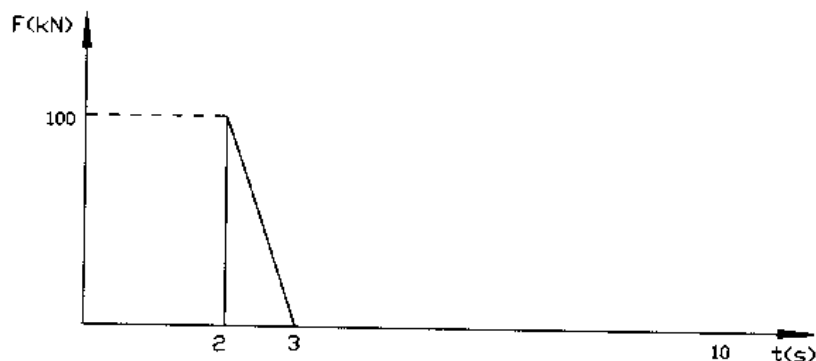


图 14-23 冰载荷简化模型

### 14.5.1 获得瞬态分析解

第 1 步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 弹出 New Analysis 对话框, 选择 Transient, 确定分析类型为瞬态分析, 分析方法选择 Full。

根据图 14-23 所示的海冰载荷的简化模型, 通过 4 个载荷步完成冰载荷的作用过程。

载荷步 1:

第 2 步: 设置载荷步选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 如图 14-24 所示选择 Basic 标签, 在 Time at end of loadstep 栏输入 1.9, number of substeps 栏输入 10, Frequency 下拉列表选择 Write every Nth substep, 选择 Transient 标签, 在 Full Transient Options 栏选择 Ramped loading, Mass matrix multiplier 栏和 Stiffness matrix multiplier 栏输入 0.05。其他选项接受默认设置, 单击 OK, 关闭 Solution Controls 窗口。

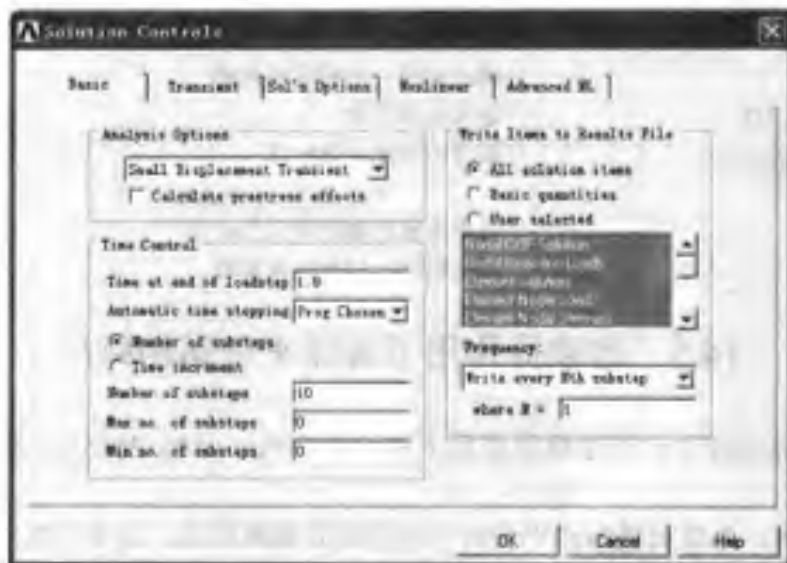


图 14-24 瞬态分析求解设置

第 3 步: 施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口, 在图形窗口拾取节点 5 和 25, 弹出 Apply F/M on Nodes 窗口, Direction of force/mom 栏选择 FY, Force/moment value 栏输入 0, 单击 OK。

第 4 步: 写入载荷步文件

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write Load Step File 对话框, 在 load step file number n 栏输入 1, 单击 OK。

载荷步 2:

第 5 步: 设置载荷步选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 选择 Basic 标签, 在 Time at end of loadstep 栏输入 2.0, 其他选项接受默认设置, 单击 OK, 关闭 Solution Controls 窗口。

第 6 步: 施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define loads>Apply>Structural>Force/Moment>On

Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口, 在图形窗口拾取节点 5 和 25, 弹出 Apply F/M on Nodes 窗口, Direction of force/mom 栏选择 FY, Force/moment value 栏输入  $1e5$ , 单击 OK。

第 7 步: 写入载荷步文件

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write Load Step File 对话框, 在 load step file number n 栏输入 2, 单击 OK。

载荷步 3:

第 8 步: 设置载荷步选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 选择 Basic 标签, 在 Time at end of loadstep 栏输入 3.0, 其他选项接受默认设置, 单击 OK, 关闭 Solution Controls 窗口。

第 9 步: 施加载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes, 弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口, 在图形窗口拾取节点 5 和 25, 弹出 Apply F/M on Nodes 窗口, Direction of force/mom 栏选择 FY, Force/moment value 栏输入 0, 单击 OK。

第 10 步: 写入载荷步文件

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write Load Step File 对话框, 在 load step file number n 栏输入 3, 单击 OK。

载荷步 4:

第 11 步: 设置载荷步选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>sol'n Controls, 弹出 Solution Controls 对话框, 选择 Basic 标签, 在 Time at end of loadstep 栏输入 10, number of substeps 栏输入 50, 其他选项接受默认设置, 单击 OK, 关闭 Solution Controls 窗口。

第 12 步: 写入载荷步文件

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write Load Step File 对话框, 在 load step file number n 栏输入 4, 单击 OK。

至此, 所有载荷步设置完毕。

第 13 步: 求解载荷步

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>From LS Files, 弹出 Solve Load Step Files 对话框, 在 Starting LS file number 栏输入 1, 在 Ending LS file number 栏输入 4, 单击 OK, 开始求解计算。求解结束时, 在 Note 窗口显示 Solution is done!, 单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退出求解器。

### 14.5.2 观察结果

进入时间历程后处理器 POPST26, 观察位移随时间的响应曲线。

第 14 步: 定义位移变量

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro, 弹出 Time History Variables 对话框, 单击左上方的 Add Data 键, 出现 Add Time-History Variable 对话框, 依次单击 Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement, 变量名取为 UY, 单击 OK, 弹出 Node for Data 拾取窗口, 在图形窗口拾取节点 73, 单击 OK。



第 15 步：设定坐标轴标志符

改变图形显示变量标志符，选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes，在 X-axis label 和 Y-axis label 分别输入 Time 和 UY，单击 OK 确定。

第 16 步：显示位移响应曲线

在 Time History Variables 对话框选择变量 UY，单击右上方的 Graph Data 键，显示变量 UY 随频率的变化曲线，如图 14-25 所示。

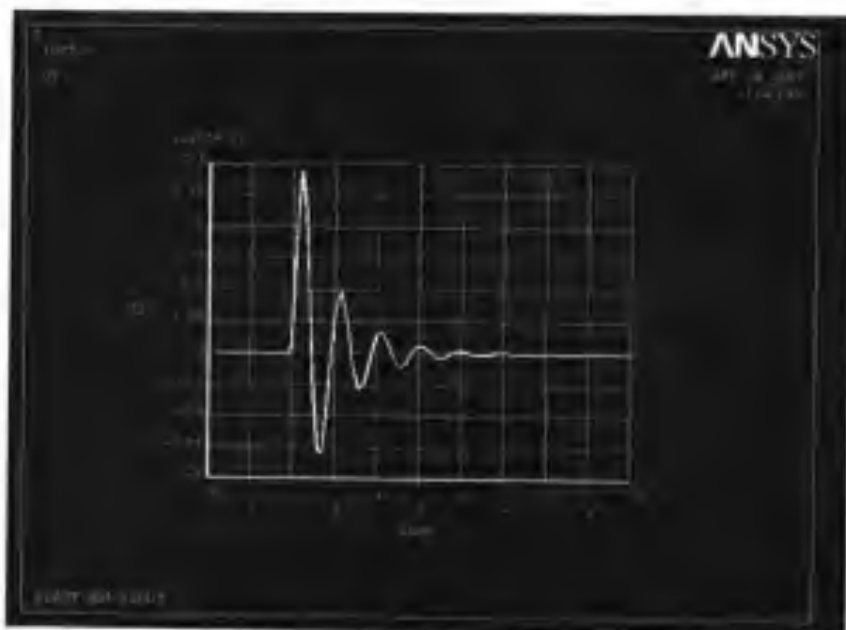


图 14-25 UY-Time 变化曲线

重复上述所有操作，在平台结构的 X 方向施加相同的海冰载荷，可以得出结构 X 方向的结构响应，具体操作这里不再重复，仅给出最终的结果响应曲线，如图 14-26 所示。



图 14-26 UX-Time 变化曲线

本节瞬态分析所有操作对应的 APDL 命令流如下:

```

! 分析选项设置与求解
/SOL                                ! 进入 ANSYS 求解器
ANTYPE,TRANSIENT                    ! 设置分析类型
TRNOPT,FULL                          ! 选择求解方法
! 载荷步 1
NSUBST,10,0,0                       ! 设置载荷步 1 载荷子步数
TIME,1.9                             ! 设置载荷步 1 截止时间
ALPHAD,0.05                          ! 设置质量阻尼
BETAD,0.05                            ! 设置刚度阻尼
OUTRES,ALL,1                         ! 输出控制
F,5,FY,0                              ! 施加载荷
F,25,FY,0
LSWRITE,1,                            ! 将载荷步 1 写入载荷步文件
! 载荷步 2
TIME,2.0                             ! 设置载荷步 2 截止时间
F,5,FY,1e5                            ! 施加载荷
F,25,FY,1e5
LSWRITE,2,                            ! 将载荷步 2 写入载荷步文件
! 载荷步 3
TIME,3.0                             ! 设置载荷步 3 截止时间
F,5,FY,0                              ! 施加载荷
F,25,FY,0
LSWRITE,3,                            ! 将载荷步 3 写入载荷步文件
! 载荷步 4
TIME,10                              ! 设置载荷步 4 截止时间
NSUBST,50,0,0                       ! 设置载荷步 4 的载荷子步数
LSWRITE,4,                            ! 将载荷步 4 写入载荷步文件
LSSOLVE,1,4,1                       ! 求解载荷步
FINISH                                ! 退出 ANSYS 求解器

! 后处理观察位移—时间变化曲线
/POST26                              ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,73,U,Y,UY                    ! 定义节点位移变量
/AXLAB,X,Time                        ! 设置图形坐标轴标志
/AXLAB,Y,UY
PLVAR,2,                              ! 显示位移变化曲线
FINISH                                ! 退出时间历程后处理器

```

## 14.6 波浪载荷作用下海洋平台随机分析

海洋平台长期在海面上施工作业, 下部结构的支撑导管架浸于海水之中, 对于这种特殊工作环境, 波浪载荷对结构的影响非常重要。本节简要介绍波浪载荷的相关知识, 通过计算海洋平台在波浪载荷作用下的结构响应介绍 ANSYS 随机谱分析的操作过程。

### 14.6.1 波浪载荷简介

波浪力由拖曳力  $F_D$  和惯性力  $F_I$  组成，通常采用 Morison 公式计算作用在导管架主导管单位长度的总水平力：

$$f(t) = f_I(t) + f_D(t) = \phi_M \dot{u} + \phi_D u |u|$$

对于直径为  $D$  的圆形杆件：

$$\phi_M = C_M \rho \pi D^2 / 4$$

$$\phi_D = C_D \rho \pi D^2 / 2$$

式中：

$u$ —水质点的水平速度

$\dot{u}$ —水质点的水平加速度

$\rho$ —海水密度；

$D$ —主导管的外直径

$C_M$ 、 $C_D$ —分别为惯性力系数和拖曳力系数。

由于水质点的水平速度  $u$  和水平加速度  $\dot{u}$  沿着海水深度变化，所以沿着海水深度对  $f(t)$  积分得到波浪对单个主导管的总作用力，即：

$$F(t) = F_I(t) + F_D(t) = \int f_I(t) dh + \int f_D(t) dh$$

由于波浪的随机性，采用 ANSYS 谱分析中的功率谱密度 (PSD) 分析方法计算平台结构在波浪载荷作用下的结构响应。

下面介绍海洋平台在表 14-1 所示的波浪载荷作用下的谱分析过程。

表 14-1 波浪力谱

F (Hz)	S <sub>FF</sub>	F (Hz)	S <sub>FF</sub>
0.0000	0	0.1911	0.503e10
0.0318	0.167	0.2229	0.174e10
0.0478	0.868	0.2548	0.074e10
0.0640	0.02e10	0.3185	0.034e10
0.0796	0.124e10	0.4777	0.019e10
0.0955	2.319e10	0.7962	0.008e10
0.1146	2.553e10	1.5924	0.006e10
0.1274	1.660e10	5.0000	0.006e10
0.1592	0.890e10		

### 14.6.2 获得谱解

第 1 步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis, 弹出 New Analysis 对话框, 选择 Spectrum, 确定分析类型为谱分析。

#### 第 2 步: 设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options, 弹出 Spectrum Analysis 对话框, 谱类型 Style of spectrum 选择 PSD, 在 No. of modes for solu. 处输入 6, 单击 OK。

#### 第 3 步: 定义激励谱类型

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Settings, 进入 Settings for PSD Analysis 对话框, 选择 type of response spct 为 displacement, 单击 OK。

#### 第 4 步: 定义激励谱

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>PSD vs Freq, 弹出 Table for PSD vs Frequency 对话框, 接受默认选项, 单击 OK, 关闭 Table for PSD vs Frequency 对话框, 同时弹出 PSD vs Frequency 对话框, FREQ1、FREQ2...FREQ17 和 PSD1、PSD2...PSD17 按照表 14-1 依次输入频率点及其对应的谱值, 如图 14-27 所示, 单击 OK, 关闭 PSD vs Frequency 对话框。

Frequency	PSD Value
FREQ1, FREQ1	0.0001 0.0000
FREQ2, FREQ2	0.0002 0.0000
FREQ3, FREQ3	0.0470 0.0000
FREQ4, FREQ4	0.0840 0.00+10
FREQ5, FREQ5	0.0790 0.124+00
FREQ6, FREQ6	0.0000 0.318+10
FREQ7, FREQ7	0.1148 0.550+10
FREQ8, FREQ8	0.1274 1.000+10
FREQ9, FREQ9	0.1590 0.090+10
FREQ10, FREQ10	0.0911 0.500+10
FREQ11, FREQ11	0.0209 0.174+10
FREQ12, FREQ12	0.0540 0.074+10
FREQ13, FREQ13	0.3185 0.034+10
FREQ14, FREQ14	0.4777 0.018+00
FREQ15, FREQ15	0.1962 0.009+00
FREQ16, FREQ16	1.0004 0.006+10
FREQ17, FREQ17	0.0000 0.000+10
FREQ18, FREQ18	

图 14-27 波浪力谱

注意: 频率必须按照递增的顺序输入, 且起始频率不能为 0, 谱值不能为 0。

可以图像显示定义的激励谱, 选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Graph PSD Tables, 弹出 Graph PSD Tables 对话框, 在 1st PSD table number 处输入 1, 单击 OK, 图形窗口将显示波浪力谱曲线, 如图 14-28 所示。

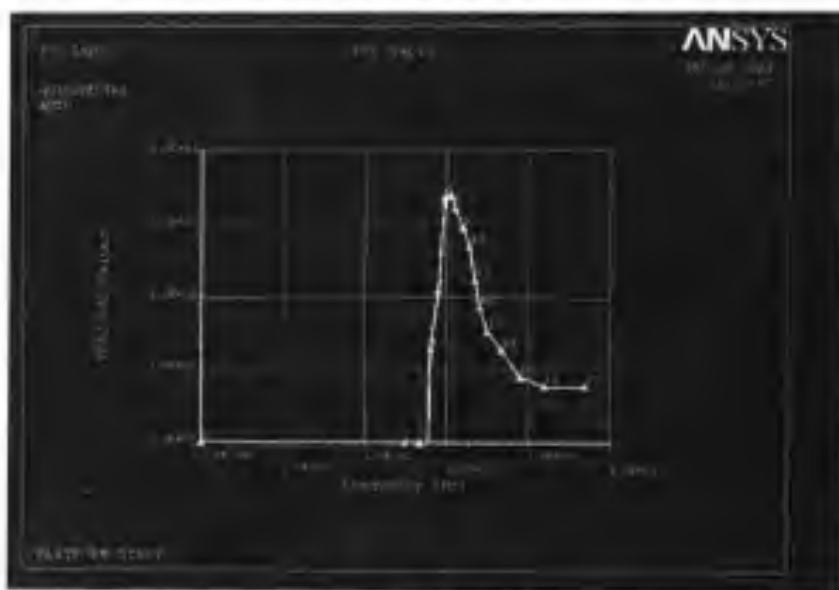


图 14-28 波浪力谱

#### 第 5 步：施加 PSD 激励载荷

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Spectrum>Node PSD excit>On Nodes，弹出 Apply Nodal PSD 拾取窗口，在图形窗口中拾取节点 5 和 25，单击 OK，弹出 Apply Nodal PSD 对话框，在 Excitation direction 滚动窗口选择 Nodal Y，单击 OK。

#### 第 6 步：计算 PSD 激励缩放系数

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Calculate PF，弹出 Calculate Participation Factors 对话框，在 Base or nodal excitation 栏选择 Nodal excitation，单击 OK，计算 PSD 激励缩放系数。

#### 第 7 步：设置计算选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Calc controls，弹出 PSD Calculation Controls 对话框，三个滚动窗口均指定为 Absolute，如图 14-29 所示，单击 OK。

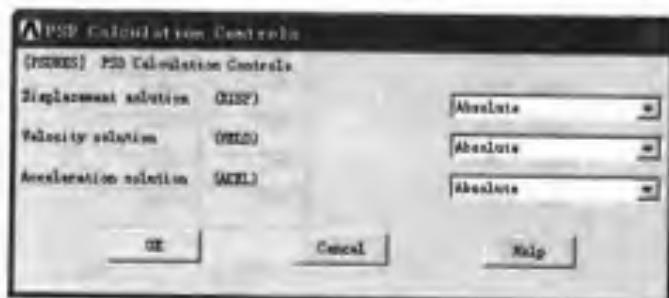


图 14-29 计算选项设置

#### 第 8 步：谱分析求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始谱分析求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退求解器。

### 14.6.3 合并模态

#### 第 9 步：设定分析类型

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，弹出 New Analysis 对话框，选择 Spectrum，单击 OK，确定分析类型为谱分析。

#### 第 10 步：选择模态合并方法

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Spectrum>PSD>Mode Combine，弹出 Mode Combination Method 对话框，在 significant threshold 处输入 0.001，在 Combined mode 处输入 6，单击 OK。

#### 第 11 步：合并求解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始合并求解。求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

求解完毕后退出求解器。

### 14.6.4 计算响应的功率谱密度

进入时间历程后处理器 POPST26，观察位移随频率的响应曲线。

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro，弹出 Spectrum Usage 对话框，如图 14-30 所示，选择 Create response power spectral density (PSD)，单击 OK，弹出 Time History Variables 对话框。

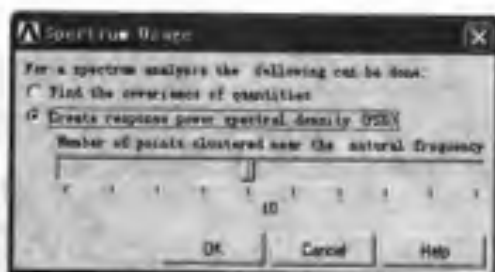


图 14-30 谱分析后处理功能选择

#### 第 12 步：存储频率向量

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Store Data，弹出 Store Data from the Result File 对话框，在 Resolution for freq vector 栏输入 1，单击 OK。

#### 第 13 步：定义位移变量

单击 Time History Variables 对话框右上方的 Add Data 键，出现 Add Time-History Variable 对话框，依次点击 Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement，变量名取为 UY，单击 OK，弹出 Node for Data 拾取窗口，在图形窗口拾取节点 73，单击 OK。

#### 第 14 步：计算相应 PSD 并将其保存为变量

选取菜单路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Calc Resp PSD，弹出 Calculate Response PSD 对话框，在 Reference number of resulting variables 输入 3，在 Reference no. of variables to be operated 处输入 2 和空值，Type of PSD 选择 Displacement，Ref w.r.t. which resp PSD is calculated

选择 Absolute value, User-specified label 输入 S-UY, 如图 14-31 所示, 单击 OK。

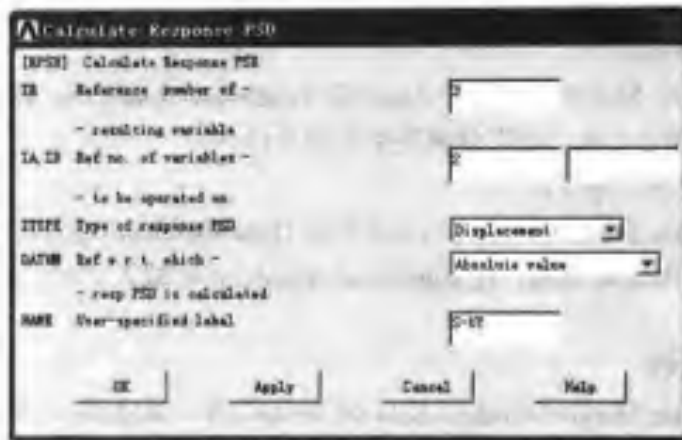


图 14-31 计算响应谱

第 15 步: 设定坐标轴标志符

改变图形显示变量标志符, 选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes, 在 X-axis lable 和 Y-axis lable 分别输入 Frequency 和 S-UY, 单击 OK 确定。

第 16 步: 显示 PSD 相应曲线

选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes, 在 X-axis lable 和 Y-axis lable 分别输入 Frequency 和 S-UY, 单击 OK 确定。

在 Time History Variables 对话框选择变量 S-UY, 单击右上方的 Graph Data 键, 显示变量 UY 随频率的变化曲线, 如图 14-32 所示。

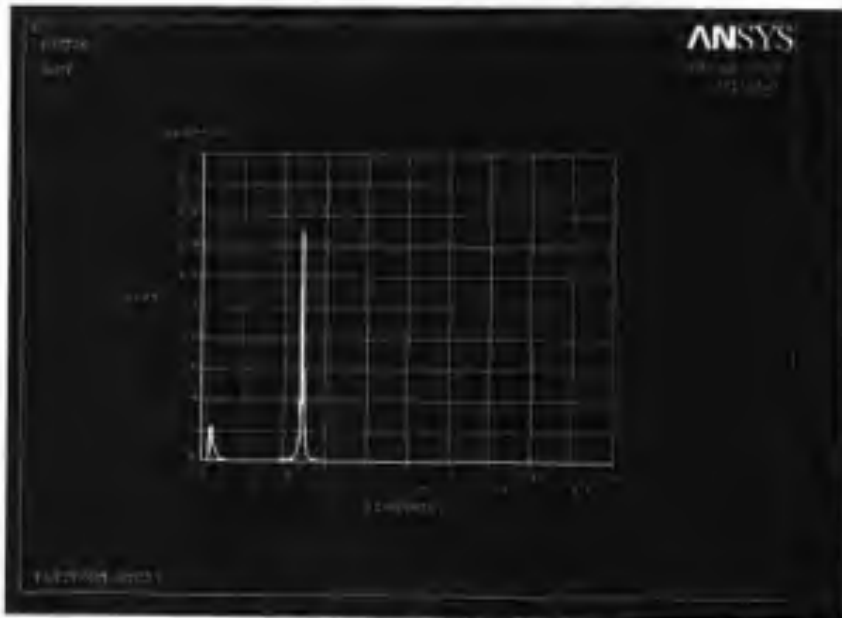


图 14-32 S-UY—Frequency 变化曲线

功率谱密度曲线出现两个峰值, 结合波浪谱曲线以及模型的固有频率, 可以看出: 第一个峰值产生的原因是因为波浪谱在该频率处出现极大值; 第二个峰值是因为该峰值频率与模型

的固有频率一致，当外载荷频率处于固有频率附近时引起结构共振，响应出现极大值。

本节随机谱分析所有操作对应的 APDL 命令流如下：

! 谱分析求解选项设置

```

/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,SPECTRUM                    ! 定义分析类型为谱分析
SPOPT,PSD,6,0
PSDUNIT,1,FORC,386.4,
PSDFRQ,1,,0.0001,0.0318,0.0478,0.064,0.0796
PSDFRQ,1,,0.0955,0.1146,0.1274,0.1592,0.1911
PSDFRQ,1,,0.2229,0.2548,0.3185,0.4777,0.7962
PSDFRQ,1,,1.5924,5,,
PSDVAL,1,0.001,0.167,0.868,0.02e10,0.124e10
PSDVAL,1,2.319e10,2.533e10,1.66e10,0.89e10,0.503e10
PSDVAL,1,0.129e10,0.074e10,0.034e10,0.019e10,0.008e10
PSDVAL,1,0.006e10,0.006e10,,
F,5,FY,1,                            ! 在节点 5 施加激励谱 1
F,25,FY,1,                            ! 在节点 25 施加激励谱 1
PFACT,1,NODE,
PSDRES,DISP,ABS
PSDRES,VELO,ABS
PSDRES,ACEL,ABS
SOLVE                                ! 求解
FINISH                                ! 退出求解器
/SOLUTION
! 模态合并
/SOL                                ! 进入求解器
ANTYPE,SPECTRUM
PSDCOM,0.001,6,
SOLVE                                ! 求解
FINISH                                ! 退出求解器

```

! 后处理观察位移响应

```

/POST26                              ! 进入时间历程后处理器
STORE,PSD,1
NSOL,2,73,U,Y,UY                    ! 定义节点 73 的位移 UY 为 2 号变量
RPSD,3,2,,1,1,S-UY                ! 计算 2 号变量 UY 的功率谱并定义为 3 号变量
/AXLAB,X,Frequency                 ! 设置 X 坐标变量名为 Frequency
/AXLAB,Y,S-UY                       ! 设置 Y 坐标变量名为 S-UY
PLVAR,3,                              ! 画出 UY 的功率谱密度响应曲线
FINISH                                ! 退出时间历程后处理器

```



## 14.7 单元实常数表

实常数编号	单元类型	单元参数				
		外径 OD (m)		壁厚 Thickness (m)		
1	PIPE16	1.2		0.03		
2	PIPE16	0.8		0.02		
3	PIPE16	0.5		0.02		
4	PIPE16	0.3		0.15		
5	BEAM4	截面积 A (m <sup>2</sup> )	I <sub>z</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	高度 h (m)	宽度 b (m)
		0.06	0.0002	0.00045	0.3	0.2
6	SHELL63	厚度 I (m)	厚度 J (m)	厚度 K (m)	厚度 L (m)	
		0.02	0.02	0.02	0.02	

## 14.8 模型建立命令流文件

platform.txt

```

FINISH
/CLEAR
/FILENAME,PLATFORM           ! 设置分析工作名
/TITLE, PLATFORM-STUDY      ! 设置图形标题

/PREP7                        ! 进入前处理器
ET,1,PIPE16                  ! 定义单元类型
ET,2,BEAM4
ET,3,SHELL63

R,1,1.2,0.03                 ! 定义实常数
R,2,0.8,0.02
R,3,0.5,0.02
R,4,0.3,0.02
R,5,0.02,0.0002,0.00045,0.3,0.2
R,6,0.02,0.02,0.02,0.02

MP,EX,1,2.0E11               ! 定义材料参数
MP,NUXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800

! 创建导管架的关键点
K,1,-10,-7.5,0
K,2,0,-9.5,0
K,3,10,-7.5,0

```

K,4,10,7.5,0  
K,5,0,9.5,0  
K,6,-10,7.5,0  
K,7,-10,0,0  
K,8,-5.588,0,0  
K,9,0,0,0  
K,10,5.588,0,0  
K,11,10,0,0  
K,12,-9.454,-3.438,10.91  
K,13,-9.454,3.438,10.91  
K,14,0,-4.313,11.01  
K,15,0,4.313,11.01  
K,16,9.454,-3.438,10.91  
K,17,9.454,3.438,10.91  
K,18,-4.75,-7.75,10.53  
K,19,4.75,-7.75,10.53  
K,20,-4.75,7.75,10.53  
K,32,4.75,7.75,10.53  
K,21,-9,-6.25,20  
K,22,0,-7.75,20  
K,23,9,-6.25,20  
K,24,9,6.25,20  
K,25,0,7.75,20  
K,26,-9,6.25,20  
K,27,-9,0,20  
K,28,-4.982,0,20  
K,29,0,0,20  
K,30,4.982,0,20  
K,31,9,0,20  
K,41,-8,-5,40  
K,42,0,-6,40  
K,43,8,-5,40  
K,44,8,5,40  
K,45,0,6,40  
K,46,-8,5,40  
K,47,-8,0,40  
K,48,-4.364,0,40  
K,49,0,0,40  
K,50,4.364,0,40  
K,51,8,0,40  
K,61,-7,-3.75,60  
K,62,0,-4.25,60  
K,63,7,-3.75,60  
K,64,7,3.75,60  
K,65,0,4.25,60  
K,66,-7,3.75,60

K,68,-3.720,0,60  
K,70,3.720,0,60  
K,81,-6,-2.5,80  
K,82,0,-2.5,80  
K,83,6,-2.5,80  
K,84,6,2.5,80  
K,85,0,2.5,80  
K,86,-6,2.5,80  
K,88,-3,0,80  
K,90,3,0,80

! 创建基础约束关键点

K,71,-10.1,-7.625,-2  
K,72,0,-9.675,-2  
K,73,10.1,-7.625,-2  
K,74,10.1,7.625,-2  
K,75,0,9.675,-2  
K,76,-10.1,7.625,-2

! 创建导管架—甲板连接处的关键点

K,91,-6,-2.5,82  
K,92,0,-2.5,82  
K,93,6,-2.5,82  
K,94,6,2.5,82  
K,95,0,2.5,82  
K,96,-6,2.5,82

! 创建下层甲板关键点

K,101,-6,-2.5,90  
K,102,0,-2.5,90  
K,103,6,-2.5,90  
K,104,6,2.5,90  
K,105,0,2.5,90  
K,106,-6,2.5,90  
K,107,-8,-4.5,90  
K,108,-6,-4.5,90  
K,109,0,-4.5,90  
K,110,6,-4.5,90  
K,111,8,-4.5,90  
K,112,-8,0,90  
K,113,-6,0,90  
K,114,0,0,90  
K,115,6,0,90  
K,116,8,0,90  
K,117,-8,-2.5,90

K,118,8,-2.5,90  
K,119,-8,2.5,90  
K,120,8,2.5,90  
K,121,-8,4.5,90  
K,122,-6,4.5,90  
K,123,0,4.5,90  
K,124,6,4.5,90  
K,125,8,4.5,90

! 创建上层甲板关键点

K,151,-6,-2.5,98  
K,152,0,-2.5,98  
K,153,6,-2.5,98  
K,154,6,2.5,98  
K,155,0,2.5,98  
K,156,-6,2.5,98  
K,157,-9,-5.5,98  
K,158,-6,-5.5,98  
K,159,0,-5.5,98  
K,160,6,-5.5,98  
K,161,9,-5.5,98  
K,162,-9,0,98  
K,163,-6,0,98  
K,164,0,0,98  
K,165,6,0,98  
K,166,9,0,98  
K,167,-9,-2.5,98  
K,168,9,-2.5,98  
K,169,-9,2.5,98  
K,170,9,2.5,98  
K,171,-9,5.5,98  
K,172,-6,5.5,98  
K,173,0,5.5,98  
K,174,6,5.5,98  
K,175,9,5.5,98

! 导管架一层水平面杆件连线

L,1,2  
L,2,3  
L,3,11  
L,11,4  
L,4,5  
L,5,6  
L,6,7  
L,7,1

L,9,2  
L,9,5  
L,8,1  
L,8,2  
L,8,9  
L,8,5  
L,8,6  
L,8,7  
L,10,2  
L,10,3  
L,10,11  
L,10,4  
L,10,5  
L,10,9

! 导管架二层水平面杆件连线

L,21,22  
L,22,23  
L,23,31  
L,31,24  
L,24,25  
L,25,26  
L,26,27  
L,27,21  
L,29,22  
L,29,25  
L,28,21  
L,28,22  
L,28,29  
L,28,25  
L,28,26  
L,28,27  
L,30,22  
L,30,23  
L,30,31  
L,30,24  
L,30,25  
L,30,29

! 导管架三层水平面杆件连线

L,41,42  
L,42,43  
L,43,51  
L,51,44  
L,44,45

L,45,46  
L,46,47  
L,47,41  
L,49,42  
L,49,45  
L,48,41  
L,48,42  
L,48,49  
L,48,45  
L,48,46  
L,50,42  
L,50,43  
L,50,44  
L,50,45  
L,50,49

! 导管架四层水平面杆件连线

L,61,62  
L,62,63  
L,63,64  
L,64,65  
L,65,66  
L,66,61  
L,62,65  
L,68,61  
L,68,62  
L,68,65  
L,68,66  
L,70,62  
L,70,63  
L,70,64  
L,70,65

! 导管架五层水平面杆件连线

L,81,82  
L,82,83  
L,83,84  
L,84,85  
L,85,86  
L,86,81  
L,82,85  
L,88,81  
L,88,82  
L,88,85

L,88,86  
L,90,82  
L,90,83  
L,90,84  
L,90,85

! 导管架左侧面杆件连线

L,1,21  
L,21,41  
L,41,61  
L,61,81  
L,6,26  
L,26,46  
L,46,66  
L,66,86  
L,13,6  
L,13,7  
L,13,27  
L,13,26  
L,12,7  
L,12,1  
L,12,21  
L,12,27  
L,7,27  
L,27,47  
L,26,47  
L,21,47  
L,47,66  
L,47,61  
L,61,86

! 导管架纵向中间面杆件连线

L,2,22  
L,22,42  
L,42,62  
L,62,82  
L,5,25  
L,25,45  
L,45,65  
L,65,85  
L,15,5  
L,15,9  
L,15,29  
L,15,25

L,9,29  
L,14,9  
L,14,2  
L,14,22  
L,14,29  
L,29,49  
L,25,49  
L,22,49  
L,49,65  
L,49,62  
L,62,85

! 导管架右侧面杆件连线

L,3,23  
L,23,43  
L,43,63  
L,63,83  
L,4,24  
L,24,44  
L,44,64  
L,64,84  
L,17,4  
L,17,11  
L,17,31  
L,17,24  
L,11,31  
L,16,11  
L,16,3  
L,16,23  
L,16,31  
L,31,51  
L,24,51  
L,23,51  
L,51,64  
L,51,63  
L,63,84

! 导管架前立面杆件连线

L,18,1  
L,18,2  
L,18,22  
L,18,21  
L,19,2  
L,19,3



L,19,23  
L,19,22  
L,21,42  
L,23,42  
L,42,61  
L,42,63  
L,62,81  
L,62,83

! 导管架后立面杆件连线

L,20,6  
L,20,5  
L,20,25  
L,20,26  
L,32,5  
L,32,4  
L,32,24  
L,32,25  
L,26,45  
L,24,45  
L,45,66  
L,45,64  
L,65,86  
L,65,84

! 导管架底端桩基础连线

L,1,71  
L,2,72  
L,3,73  
L,4,74  
L,5,75  
L,6,76

! 导管架—甲板连接处连线

L,81,91  
L,82,92  
L,83,93  
L,84,94  
L,85,95  
L,86,96

! 下层甲板梁格连线

L,101,102  
L,102,103  
L,103,115  
L,115,104

L,104,105  
L,105,106  
L,106,113  
L,113,101  
L,107,108  
L,108,109  
L,109,110  
L,110,111  
L,112,113  
L,113,114  
L,114,115  
L,115,116  
L,117,101  
L,103,118  
L,119,106  
L,104,120  
L,121,122  
L,122,123  
L,123,124  
L,124,125  
L,107,117  
L,117,112  
L,112,119  
L,119,121  
L,108,101  
L,106,122  
L,109,102  
L,102,114  
L,114,105  
L,105,123  
L,110,103  
L,104,124  
L,111,118  
L,118,116  
L,116,120  
L,120,125

! 上层甲板梁格连线

L,151,152  
L,152,153  
L,153,165  
L,165,154  
L,154,155  
L,155,156  
L,156,163  
L,163,151

L,157,158  
L,158,159  
L,159,160  
L,160,161  
L,162,163  
L,163,164  
L,164,165  
L,165,166  
L,167,151  
L,153,168  
L,169,156  
L,154,170  
L,171,172  
L,172,173  
L,173,174  
L,174,175  
L,157,167  
L,167,162  
L,162,169  
L,169,171  
L,158,151  
L,156,172  
L,159,152  
L,152,164  
L,164,155  
L,155,173  
L,160,153  
L,154,174  
L,161,168  
L,168,166  
L,166,170  
L,170,175

! 甲板撑杆连线

L,91,101  
L,101,151  
L,92,102  
L,102,152  
L,93,103  
L,103,153  
L,94,104  
L,104,154  
L,95,105  
L,105,155  
L,96,106  
L,106,156

L,91,102  
L,102,93  
L,94,105  
L,105,96  
L,91,106  
L,95,102  
L,93,104  
L,151,102  
L,102,153  
L,154,105  
L,105,156  
L,106,151  
L,104,153  
L,102,155

! 生成下层甲板平面

A,107,108,101,117  
A,108,109,102,101  
A,109,110,103,102  
A,110,111,118,103  
A,117,101,113,112  
A,101,102,114,113  
A,102,103,115,114  
A,103,118,116,115  
A,112,113,106,119  
A,113,114,105,106  
A,114,115,104,105  
A,115,116,120,104  
A,119,106,122,121  
A,106,105,123,122  
A,105,104,124,123  
A,104,120,125,124

! 生成上层甲板平面

A,157,158,151,167  
A,158,159,152,151  
A,159,160,153,152  
A,160,161,168,153  
A,167,151,163,162  
A,151,152,164,163  
A,152,153,165,164  
A,153,168,166,165  
A,162,163,156,169  
A,163,164,155,156  
A,164,165,154,155  
A,165,166,170,154

```
A,169,156,172,171
A,156,155,173,172
A,155,154,174,173
A,154,170,175,174
```

```
!框架网格划分
```

```
LSEL,S,,,95,102          ! 选择导管架的竖向主导管
LSEL,A,,,118,125
LSEL,A,,,141,148
LSEL,A,,,192,203
LATT,1,1,1              ! 设置导管架主导管的网格划分属性
LESIZE,ALL,,,1         ! 设置导管架主导管的网格划分数 NDIV 为 1
LMESH,ALL               ! 导管架主导网格划分
```

```
LSEL,S,,,1,94           ! 选择导管架的撑杆
LSEL,A,,,103,117
LSEL,A,,,126,140
LSEL,A,,,149,191
LATT,1,3,1             ! 设置导管架撑杆的网格划分属性
LESIZE,ALL,,,1         ! 设置导管架撑杆的网格划分数 NDIV 为 1
LMESH,ALL              ! 导管架撑杆网格划分
```

```
LSEL,S,,,284,295       ! 选择甲板部分的主导管
LATT,1,2,1             ! 设置甲板部分主导管的网格划分属性
LESIZE,ALL,,,1         ! 设置甲板部分主导管网格划分数 NDIV 为 1
LMESH,ALL              ! 甲板部分的主导管网格划分
```

```
LSEL,S,,,296,319       ! 选择甲板部分的撑杆
LATT,1,4,1             ! 设置甲板部分撑杆的网格划分属性
LESIZE,ALL,,,1         ! 设置甲板部分撑杆的网格划分数 NDIV 为 1
LMESH,ALL              ! 甲板部分的撑杆网格划分
```

```
LSEL,S,,,192,283       ! 选择甲板梁格线段
LATT,1,5,2,,,1         ! 设置甲板梁格网格划分属性
LESIZE,ALL,,,3         ! 设置网格划分数 NDIV 为 3
LMESH,ALL              ! 甲板梁格网格划分
```

```
ASEL,A,,,ALL           ! 选择甲板平面
AATT,1,6,3              ! 设置甲板平面网格划分属性
AMESH,ALL              ! 甲板平面网格划分
```

```
/ESHAPE,1.0
FINISH
```

## 第 15 章 大跨空间结构的建模与分析

### □ 本章导读

本章以一个球面网壳结构的 ANSYS 建模和分析为主线, 对大跨度空间结构的应用背景、结构特点、建模以及各种相关分析的全过程进行了系统和有针对性地介绍。

在分析实例的建模阶段以命令流操作方式为主进行讲解, 同时结合结构特点, 在一些模型的创建过程中使用了 APDL 的循环操作功能, 以提高建模效率。在结构分析部分, 系统地介绍了球面网壳结构的静、动力分析以及稳定性分析的操作全过程。

本章包括如下一些主题:

- 大跨空间结构的 ANSYS 建模与分析概述
- 施威德勒型单层球面网壳建模详解
- 网壳结构的固有振型计算
- 球面网壳的特征屈曲分析
- 考虑初始缺陷的非线性稳定分析

### 15.1 大跨空间结构的 ANSYS 建模与分析概述

大跨度结构近年来得到日益广泛的应用, 被用作各种公共建筑的屋盖、雨棚等, 其结构形式多为空间桁架杆件体系或空间梁系组成的网架或网壳, 结构材料一般为钢材。

图 15-1 所示为一些空间结构的实例。



图 15-1 空间结构的工程实例

各类空间结构之所以得到迅速的发展和广泛应用, 是由于其具有如下的优点:

- (1) 结构组成灵活, 建筑造型美观, 规律性和节奏感强。
- (2) 结构受力合理, 抗震性能优异, 设计计算简便, 精确计算有现成的空间桁架位移法程序, 施工图绘制简单。

(3) 加工制作机械化程度高, 有利于工业化、定型化及商品化。

利用 ANSYS, 可以方便地实现各种空间结构的建模以及静力、动力以及稳定性分析, 其

一般操作过程和前面两篇所讲的基本结构分析问题没有太大的差别,所用到的结构单元也多为轴力杆单元或梁单元,关于这些单元的特性请参考本书第一篇的相关内容。

由于本书在第一篇杆系结构分析的章节中,已经介绍过一个典型的空间平板网架结构的问题,因此本章的重点放在网壳结构的建模以及分析上,介绍 Schwedler 型单层球面网壳结构的建模以及各类分析。对于柱面网壳以及其他曲面网壳,其基本操作完全类似。

图 15-2 所示是在 ANSYS 中建立的一些单层球面网壳模型。图 (a) 至图 (f) 的结构形式依次为肋环型、Schwedler 型、短程线型、凯威特型、联方型以及三向网格型。

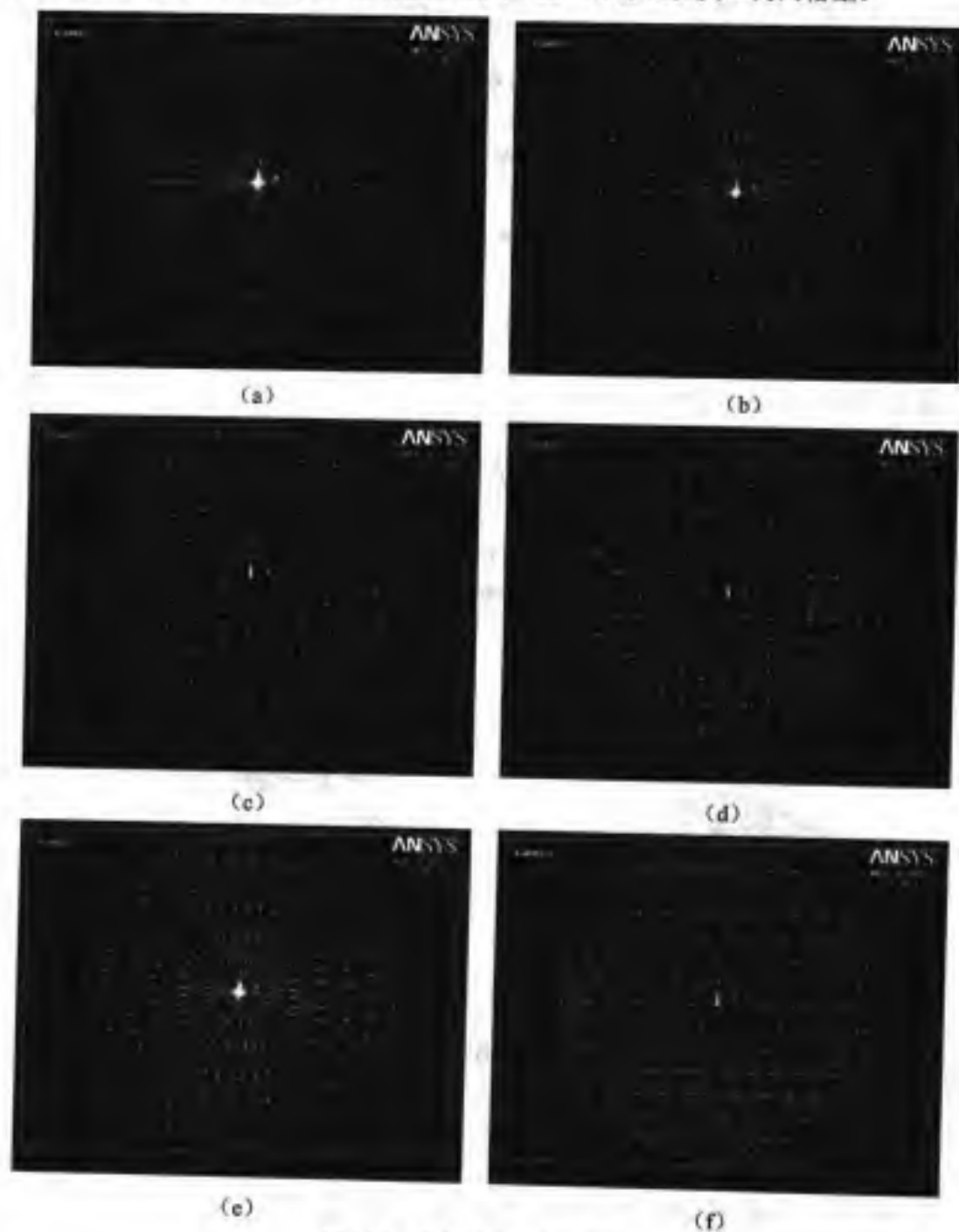


图 15-2 单层球面网壳的模型

在本章后面几节中,将以 Schwedler 型单层球面网壳的 ANSYS 分析为例,对网壳结构的静力、动力、稳定性分析的方法进行系统的介绍。

## 15.2 一个施威德勒型球面网壳的建模过程详解

这一节将以一个施威德勒型球面网壳为例,介绍在 ANSYS 环境中实现网壳结构建模的操作过程。图 15-3 所示就是本节要建立的结构模型。

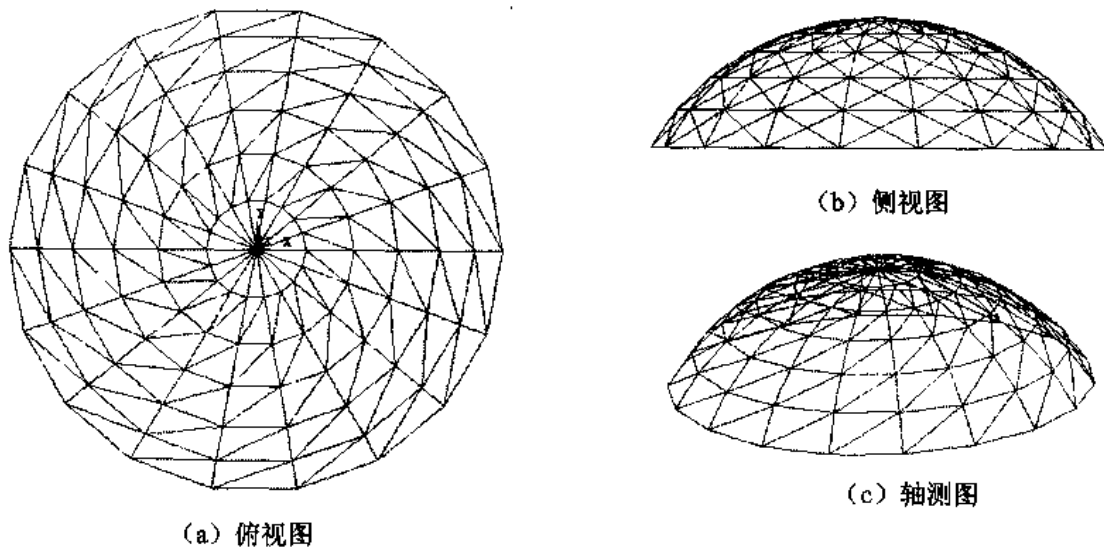


图 15-3 施威德勒型网壳实例

这是一个球面半径 20.0m, 跨度约 35m, 矢跨比 1:3.5 的单层球面网壳。网壳结构的所有杆件均采用  $\Phi 114.0 \times 4.0$  的 Q235 钢管。建模过程中所有数据单位统一为 N-mm 制, 请读者注意各物理量单位的统一。

下面开始建模, 其详细步骤为:

### 第 1 步: 分析环境设置

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面, 指定分析的工作名称为 Schwedler, 指定图形显示标题为 Analysis of Spherical reticulated-shell。

`/FILNAME, Schwedler` ! 指定工作名称

`/TITLE, Analysis of Spherical reticulated-shell` ! 图形显示标题

进入前处理器 PREP7 以开始建模等前处理操作。

`/PREP7` ! 进入前处理器

### 第 2 步: 定义单元类型

所有杆件均采用三维梁单元 BEAM4, 通过如下命令指定模型中所用的单元类型。

`ET,1,BEAM4` ! 定义网壳杆件单元类型

### 第 3 步: 定义单元截面实常数

为所有的杆件单元指定截面几何参数,  $\Phi 114.0 \times 4.0$  钢管的截面积、惯性矩查型钢表。

`R,1,1382,2093500,2093500,114,114,,` ! 定义 114×4 钢管杆件截面参数



RMORE, ,4187000, , , , ,

注意：上面所有实参数的意义，请参考 ANSYS 的单元手册 ANSYS Element Reference 中关于 BEAM4 单元的说明。如果不习惯查阅单元手册，建议直接采用 GUI 操作来进行设置。结合在线帮助 HELP，不难完成图 15-4 所示对话框的操作。

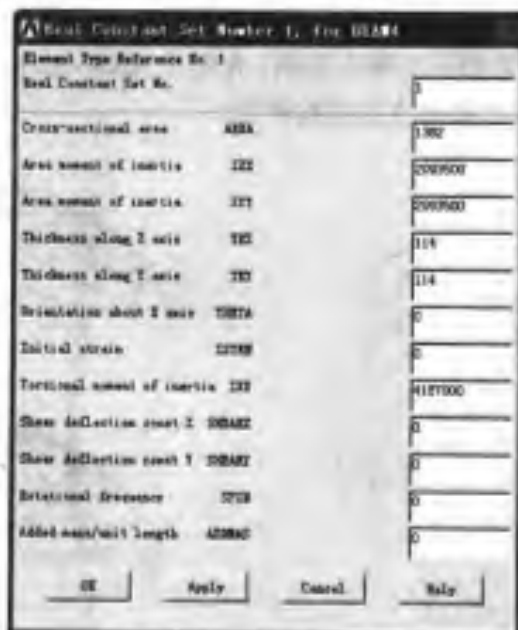


图 15-4 BEAM4 单元实参数设置

#### 第 4 步：定义材料模型

依次输入钢材的密度、弹性模量以及泊松比，如按线弹性材料进行分析，定义材料模型的命令流为：

```
MP,DENS,1, 7.85e-6
```

```
MP,EX,1, 2.06e5
```

```
MP,NUXY,1, 0.3
```

#### 第 5 步：定义局部坐标系

为了建模过程的方便，先定义一个原点在网壳球面球心处（在总体坐标的原点）的局部球坐标系，同时对球坐标系的角度单值性条件（奇异点位置）进行选择：

```
LOCAL,11,2,0,0,0 ! 定义局部球坐标系
```

```
CSCIR,11,1 ! 选择球坐标系的奇异点位置
```

关于 CSCIR 命令，其一般格式为：

```
CSCIR, KCN, KTHET, KPFI
```

KCN——局部坐标系统的编号，大于 10；

KTHET

Theta 方向的奇异点位置：

0 -- 奇异点位于  $\pm 180^\circ$ ，

1 -- 奇异点位于  $0^\circ$  ( $360^\circ$ )；

KPFI

Phi 方向的奇异点位置:

0 — 奇异点位于  $\pm 180^\circ$ ,

1 — 奇异点位于  $0^\circ$  ( $360^\circ$ );

此命令的缺省值为奇异点位于  $\pm 180^\circ$ , 相应的 GUI 菜单操作路径为: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Move Singularity 随后弹出如图 15-5 所示的对话框, 在其中即可进行相关的设置。

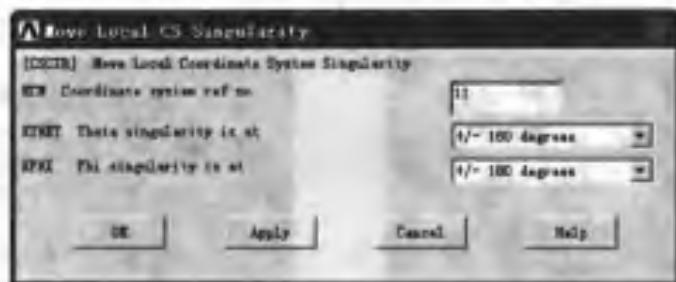


图 15-5 球坐标奇异点位置的设置

第 6 步: 建立所有的节点

从这一步开始建立结构分析的有限单元模型, 建模过程采用直接法, 即首先建立节点, 然后通过节点建立所有的单元。为了提高建模效率, 采用了循环控制语句。

先来建立支座周边节点, 共 18 个, 采用建立 1、10、18 号三个节点然后在中间填充节点的方式定义:

```
N,1,20,0,30      ! 定义 1 号节点
N,10,20,180,30   ! 定义 10 号节点
N,18,20,340,30  ! 定义 18 号节点
FILL,1,10        ! 在节点 1 和节点 10 之间插入 8 个等距节点
FILL,10,18       ! 在节点 10 和节点 18 之间插入 7 个等距节点
```

支座周边节点如图 15-6 所示。

注意: 如果前面的球坐标系奇异点设定采用缺省值 (即不进行设置), 将得到如图 15-7 所示的错误结果。



图 15-6 支座周边节点



图 15-7 奇异点位置错误设置的结果

建立各层环向节点, 包括底环共 6 层 (每层 18 个), 利用 NGEN 命令进行节点复制, 注

意在局部球坐标系下各层环的坐标增量:

```
NGEN,6,18,1,18,1,0,0,10
```

建立拱顶节点, 只有一个点:

```
N,109,20,0,90
```

执行这一步骤之后, 所有的节点定义完毕, 出现如图 15-8 所示的结果。

第 7 步: 通过节点建立单元

这一步通过连接节点形成单元, 首先形成所有的环向单元, 如图 15-9 所示。



图 15-8 网壳模型节点



图 15-9 形成环向单元

上述操作可通过如下的循环命令流实现:

```
*DO,I,1,91, 18
```

```
E, I,I+1
```

! 连接两起始节点形成第一个环向单元

```
EGEN,17,1,I,I,1
```

! 通过单元复制连接相邻的节点

```
E,I+17, I
```

! 连接最后两个编号不连续的节点

```
*ENDDO
```

我们可通过类似的方法, 形成所有径向的杆件单元, 如图 15-10 所示。



图 15-10 形成所有的径向单元

形成径向杆件单元的命令流如下:

```
E,1, 19
```

! 形成第一个径向杆件

```
EGEN,5,18,109,109,1
```

! 通过单元复制形成不同经度位置的径向杆件

```
EGEN,18,1,109,113,1
```

! 形成最后一组径向杆件

```

*DO,I,1,108,1      ! 循环开始
E,I,109            ! 连接拱顶节点与最上层环向节点的单元
*ENDDO            ! 循环结束

```

注意：到这里为止，实际上已经建立了一个肋环型的单层球面网壳结构。

在上述基础上，通过与前面类似的循环形成所有的斜杆单元，即可完成施威德勒型球面网壳的结构建模，如图 15-11 所示。



图 15-11 形成所有的斜向单元

```

*Do,I,1,73,18      ! 循环开始
E,I,I+19          ! 形成斜杆件
*ENDDO            ! 循环结束
EGEN,17,1,217,221,1 ! 单元复制
*DO,I,18,90,18    ! 循环开始
E,I,I+1          ! 形成斜杆件
*ENDDO            ! 循环结束

```

至此，已经建立了施威德勒型网壳的所有节点和单元。

第 8 步：施加位移边界条件

在加载和进行各种分析的求解之前，必须定义支座节点处的位移边界条件。本问题中所有周边支座节点均采用固定铰支座，即固定支座各节点的线位移，相应命令流如下：

```

CSYS,0
NSEL,S,LOC,Z,9.9,10.1
D,ALL,,,,,ux,uy,uz,,

```

定义了边界条件后如图 15-12 所示（侧视图）。

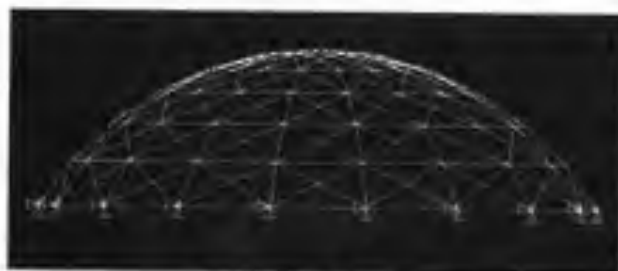


图 15-12 固定支座位移

至此，我们已经完成了施威德勒型单层球面网壳的结构建模过程，实际上也向读者介绍了肋环型单层球面网壳的典型建模方法。

### 15.3 网壳结构的固有振动特型分析

本节将对前面一节建立的球面网壳结构进行固有振动特性的分析，也就是计算这个网壳结构的自振频率以及与其相对应的振动模式。关于模态分析的基本步骤，在前面一些章节中已经多次涉及到，如果采用 GUI 方式则按照如下的步骤进行即可：

#### 第 1 步：设定分析类型

进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，弹出 New Analysis 对话框，选择 Modal（模态分析），单击 OK。

#### 第 2 步：设置分析选项

选取菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，弹出 Modal Analysis 对话框，模态提取方法 Mode extraction method 选择 Block Lanczos，模态提取数 No. of modes to extract 取 6，单击 OK。随后弹出 Block Lanczos Method 对话框，接受默认设置，单击 OK。

#### 第 3 步：计算模态解

选择菜单路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK，开始求解。

求解完毕后，在 Note 窗口显示 Solution is done!，单击 Close 关闭窗口。

#### 第 4 步：提取固有频率列表

进入通用后处理器 POST1，观察模型固有频率。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary，弹出 Results Summary 列表，如图 15-13 所示，模型的前六阶固有频率汇总于此。

```

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

```

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.33091	1	1	1
2	0.33906	1	2	1
3	0.33906	1	3	1
4	0.36553	1	4	1
5	0.36553	1	5	1
6	0.40146	1	6	1

图 15-13 网壳的前六阶固有频率

#### 第 5 步：观察网壳振型

读入结果文件。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set，读入第 1 载荷步的结果文件。

观察振动模态。选取菜单路径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape，弹出 Animate Mode Shape 对话框，采用默认设置，单击 OK，即可显示模型的一阶模态振型。其他五阶模态的振型可以采用同样的方式进行观察。

图 15-14 (a)~图 15-14 (f) 分别显示了施威德勒型球面网壳的前六阶振动模态对应的振型动画显示的截图：

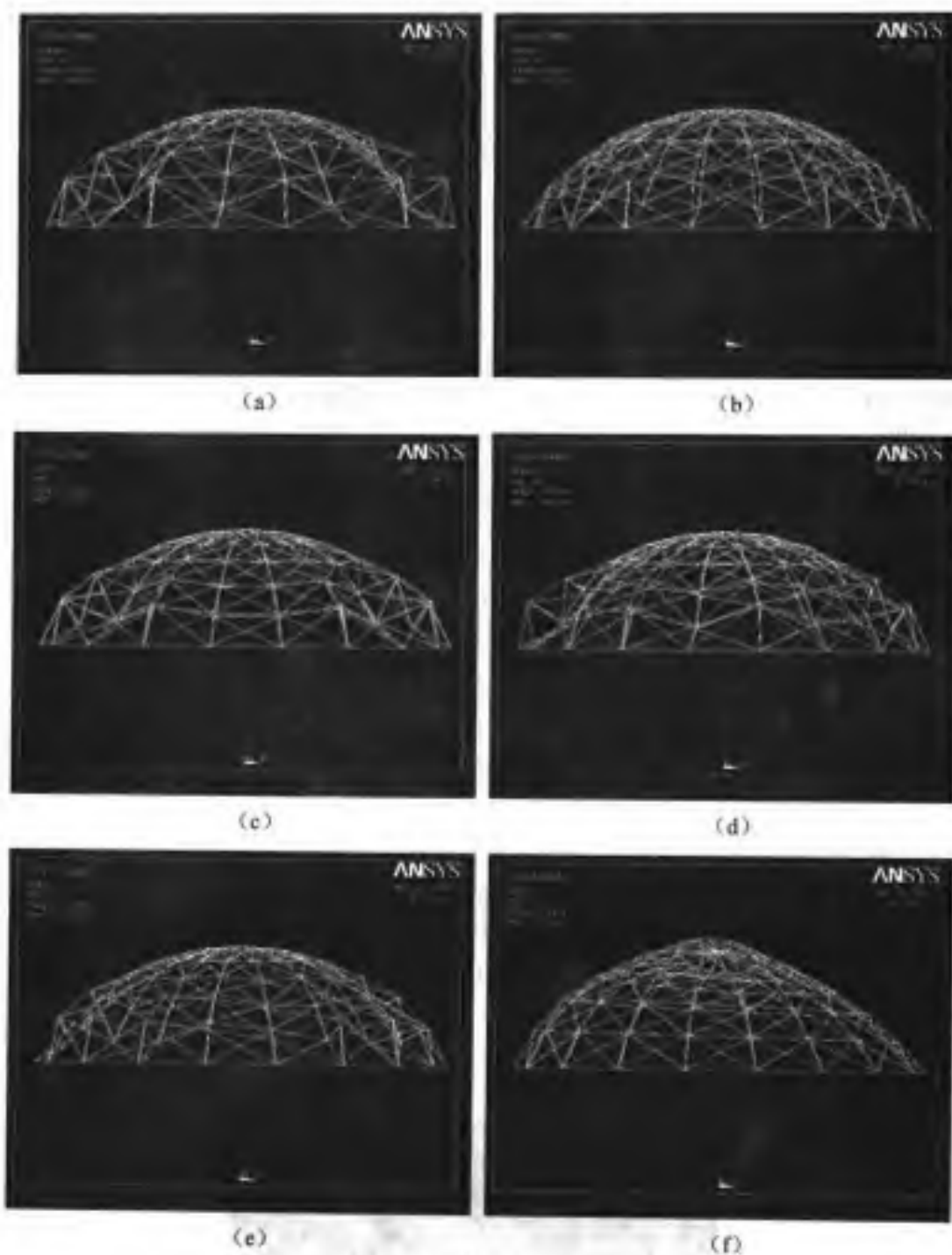


图 15-14 网壳的前六阶振动模态

如果采用批处理方式，则以上各步操作对应的命令流如下：

/SOL	! 进入求解器
ANTYPE,MODAL	! 设置分析类型为模态分析
MODOPT,LANB,6	! 采用 Block Lanczos 模态提取法，提取 6 阶模态
MODOPT,LANB,6,0,0, ,OFF	! 采用默认设置
SOLVE	! 求解
FINISH	! 退出求解器

```

/POST1          ! 进入通用后处理器
SET, LIST      ! 列表显示模型的固有频率
SET, FIRST     ! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 1
SET, NEXT     ! 读入第二载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 2
SET, NEXT     ! 读入第三载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 3
SET, NEXT     ! 读入第四载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 4
SET, NEXT     ! 读入第五载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 5
SET, NEXT     ! 读入第六载荷步的计算结果
PLDISP,0      ! 设置显示方式为只显示变形后的模型
ANMODE,10,0.5, ,0 ! 动画显示振动模态 6
FINISH        ! 退出通用后处理器

```

## 15.4 网壳的特征值屈曲分析

本节对前面的球面网壳结构进行线性稳定性分析，计算满跨均布恒载  $1.0\text{kN/m}^2$  作用下的网壳整体稳定性，这一分析也就是 ANSYS 中的屈曲特征值分析。

首先在模型上加载。将均布恒载换算为集中力后，向所有节点施加  $9.3\text{kN}$  的竖向集中力，可以通过 GUI 方式进行加载，也可采用如下的操作命令进行加载：

```

NSEL,ALL
F, ALL,FZ, -9300.00

```

施加载荷之后如图 15-15 所示。



图 15-15 恒载施加后的图形显示结果

屈曲分析分为三个步骤，首先是设置预应力选项并执行一次静力分析，然后计算屈曲模态，最后扩展屈曲模态。

#### 第 1 步：静力分析

由于静力分析是默认的分析类型，因此作静力分析时不需要专门指定分析类型，但是需要通过如下方式设置预应力选项，否则无法进行后面的屈曲分析。

在 GUI 界面中，选择 Main Menu>Solution>Unabridged Menu，打开完整的菜单。选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，选择打开其中的预应力选项，即在这一设置窗口最下面的 SSTIF 以及 PSTRES 命令设置下拉菜单中选择 Prestress ON 选项，如图 15-16 所示，单击 OK 按钮，退出该对话框。

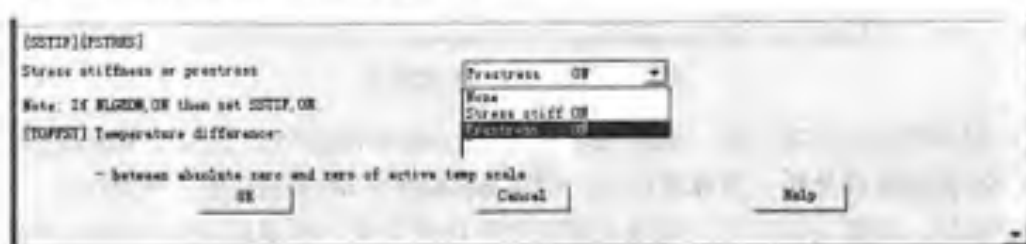


图 15-16 预应力选项打开

完成上述设置后，选择主菜单 Main menu>Solution>Solve>Current LS，程序即开始进行静力分析。在分析结束之后，有信息窗口中提示 Solution is done!，关闭之。

静力分析完成后，在进行屈曲分析之前，首先要向程序声明静力分析已经完成，为此首先要选择 Main Menu>Finish 菜单项，暂时退出求解器。

#### 第 2 步：特征值屈曲分析

这一步进行特征值屈曲分析，为此首先进行相关的分析设置如下：

选择主菜单 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择分析类型为 Eigen Buckling，单击 OK 按钮完成分析类型的设定。

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，对分析选项进行设置，选择屈曲模态提取方法为 Block Lanczos，模态提取数填 9，其余采用默认设置即可，如图 15-17 所示。

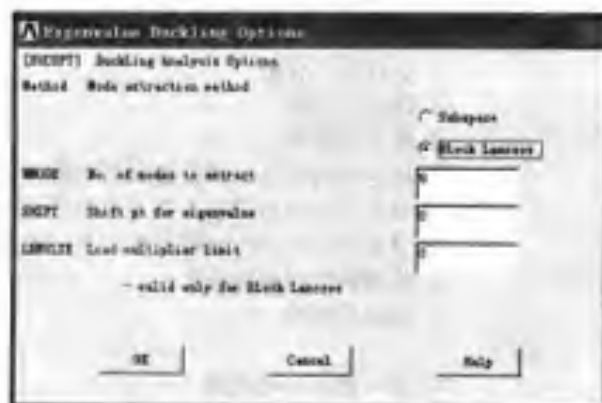


图 15-17 屈曲分析的选项设置



选择主菜单 Main menu>Solution> Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand> Expand Modes, 在弹出的对话框中进行模式扩展的相关设置, 如图 15-18 所示。

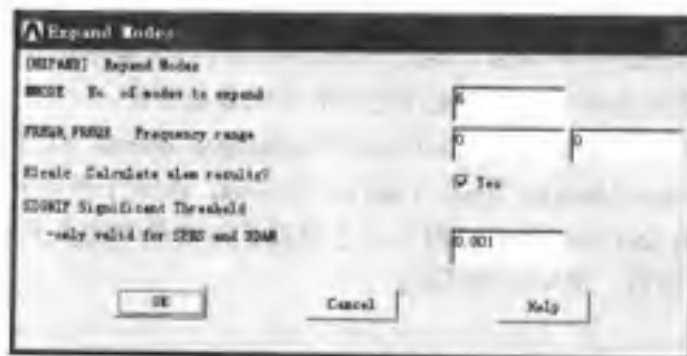


图 15-18 模式扩展参数设置

设置完相关的分析选项之后, 选择菜单项 Main menu>Solution> Solve> Current LS, 程序即开始执行特征值屈曲分析。完成求解后, 弹出 Solution is done! 消息框, 关闭之。

分析完毕后, 同样向程序声明特征值屈曲分析已经完成, 即通过 Main Menu>Finish 菜单项, 退出求解器。

### 第 3 步: 观察分析结果

首先通过菜单项 Main Menu>General PostProc 进入通用后处理器。

在图形显示结果之前, 需首先读入结果文件。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set, 读入第 1 载荷步的结果文件。

下面来观察第一阶屈曲模态。选取菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape, 弹出 Plot Deformed Shape 对话框, 选择 Def Shape Only, 单击 OK, 即可显示模型的第一阶屈曲模态。

只需要依次读入各载荷步的结果, 即可采用同样的操作来观察其他的各阶屈曲模态, 如图 15-19 (a) 至 (f) 所示分别为前 6 阶屈曲模态的变形图。

如采用批处理模式, 则本节的特征值屈曲分析以及后处理过程的命令流如下:

```

/SOLU                                ! 进入求解器
ANTYPE,0                              ! 指定分析类型为静力分析
EQSLV,SPAR                            ! 选择稀疏矩阵直接求解器
PSTRES,ON                             ! 打开预应力选项
SOLVE                                 ! 执行静力分析
FINISH                                 ! 退出求解器
/SOLU                                  ! 进入求解器
ANTYPE,1                              ! 指定分析类型为特征值屈曲分析
BUCOPT,LANB,6,0,0                    ! 设置屈曲模态提取方法及模态提取数
MXPAND,6,0,0,1,0.001,               ! 设置屈曲模态扩展数及扩展算法选项
SOLVE                                 ! 执行特征值屈曲分析
FINISH                                 ! 退出求解器

/POST1                                ! 进入通用后处理器
SET, FIRST                            ! 读入第一载荷步的计算结果
PLDISP,2                              ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT                              ! 读入第二载荷步的计算结果

```

```

PLDISP,2           ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT          ! 读入第三荷载步的计算结果
PLDISP,2           ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT          ! 读入第四荷载步的计算结果
PLDISP,2           ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT          ! 读入第五荷载步的计算结果
PLDISP,2           ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
SET, NEXT          ! 读入第六荷载步的计算结果
PLDISP,2           ! 设置显示方式为显示变形前后的轮廓线
FINISH             ! 退出通用后处理器

```

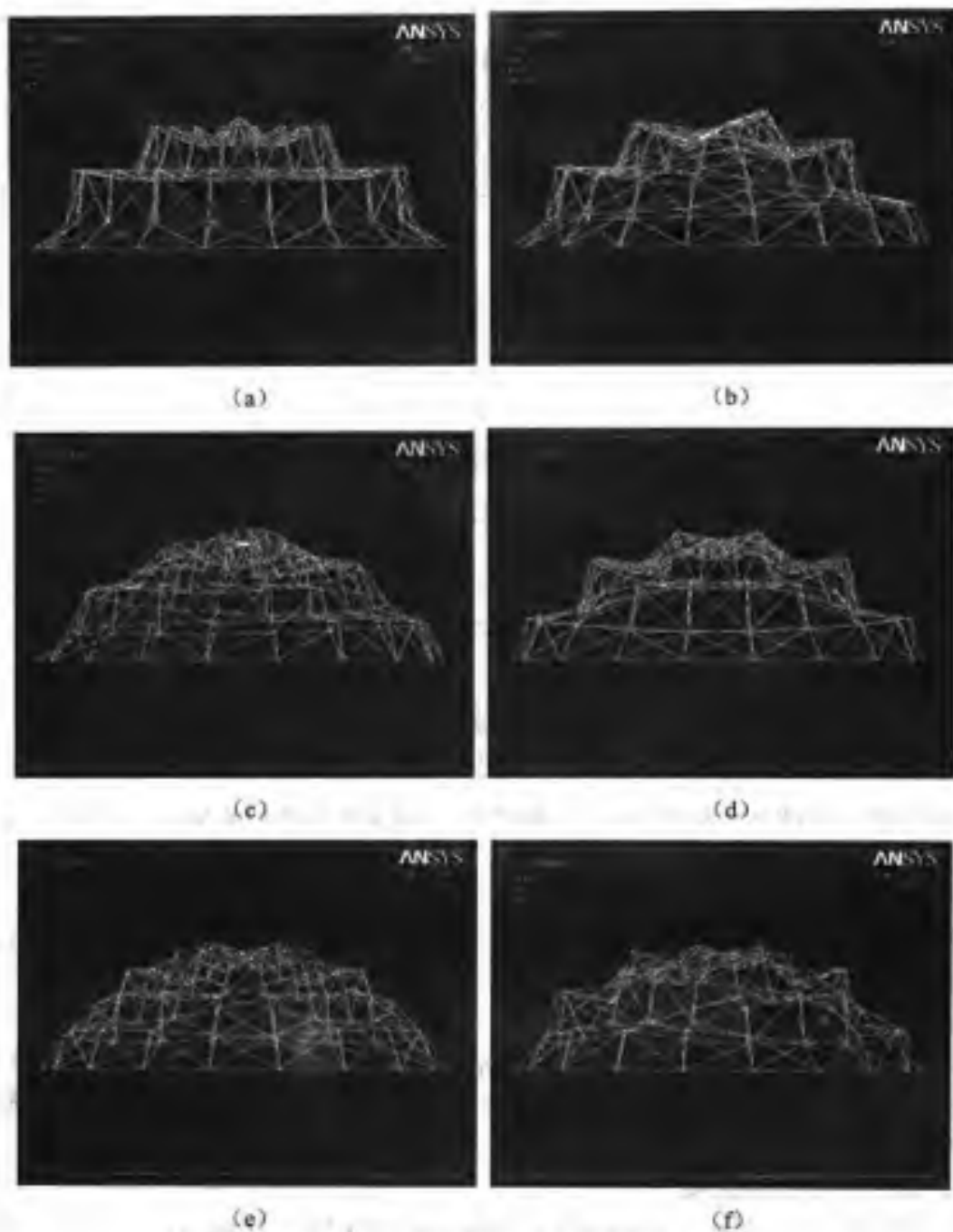


图 15-19 网壳结构的前 6 阶屈曲模态

## 15.5 考虑初始缺陷的非线性屈曲分析

本节来分析网壳结构在存在初始几何缺陷情况下的非线性屈曲问题。

将特征值屈曲分析得到的第一阶屈曲模态各节点的位移特征向量按一定比例缩小，作为网壳结构模型的一种初始几何缺陷。

### 第 1 步：修正材料模型

由于非线性屈曲伴随着结构的大变形，且可能已经超出弹性变形的范围，因此需要对材料模型进行修正，计及其弹塑性效应。为此，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，将出现 Define Material Model Behavior 对话框，在窗口的左侧，选中材料模型 1；在窗口的右侧，依次双击 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Isotropic Hardening plasticity→Mises plasticity→Bilinear，在出现的对话框中输入材料的屈服应力为 200MPa，切线模量为 0。单击 OK 按钮退出参数设置对话框，之后关闭 Define Material Model Behavior 对话框，返回图形用户界面。

### 第 2 步：引入结构的初始几何缺陷

首先，引入上节的计算结果，选择菜单项 Main Menu>Preprocessor>Modeling> Update Geom，在 Update nodes using results file displacement 对话框中设置几何缺陷的相关参数，如图 15-20 所示。



图 15-20 引入几何缺陷

缩放比例因子填 0.01，载荷步和子步均填 1，结果文件选择 I-BEAM.rst，设置完成后，点 OK 退出。

### 第 3 步：设置分析类型

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，指定分析类型为 Static，单击 OK 按钮完成分析类型的设定。

### 第 4 步：设置计算输出的选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Output Ctrl>DB/Results File，在弹出的 Controls for Database and Results File Writing 对话框中，选择 All Items 和 All entities 选项，单击 OK 退出。

### 第 5 步：打开大变形选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，在弹出的 Static or

Steady-State Analysis 对话框中,选择打开其中的大变形选项,即在[NLGEM]复选框中选择 On,然后点 OK 退出。

#### 第 6 步: 设置弧长法选项

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Arc-Length Opts, 设置弧长法(arc-length method) 求解选项, 如图 15-21 所示。

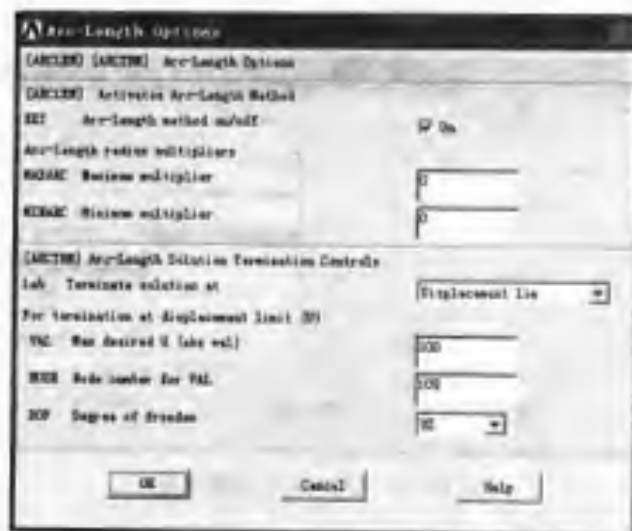


图 15-21 弧长法选项

选择打开弧长法,选择 Arc-length method on/off 复选框,使之处于 On 状态。设定计算的终止控制参数,Lab 域右边的下拉菜单中选择 Displacement lim(即以位移限值来控制),在 VAL 文本框中填写 100, NODE 文本框中填写 109(即顶节点),在 DOF 下拉菜单中选择 UZ(即以竖向挠度为控制标准)。

上述设置完成后,单击 OK 按钮退出。

#### 第 7 步: 设置分析的子步数

选择菜单项 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time and Substps, 在弹出的 Time and Substep Options 对话框指定子步数 NSUBST 为 200, 单击 OK 退出。

#### 第 8 步: 求解

设置完相关的分析选项之后,选择菜单项 Main menu>Solution>Solve>Current LS, 程序即开始执行非线性分析。在非线性求解过程中,如果出现“时间”不增加反而减少的情况时,即可终止求解。由于静态分析的“时间”参数与载荷数值成比例关系,因此在程序非线性求解的过程中出现“时间”不增加反而减少的情况,就表示已经达到了结构非线性失稳的极限载荷,这也体现了“极值型失稳”的特点,即载荷达到结构的极限载荷之后就不能再增加,结构的位移则继续增加,直至结构破坏。

本问题在求解中没有出现不收敛的情况,说明施加的载荷未达到结构的极限载荷。

#### 第 9 步: 进入时间历程后处理器

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro, 进入时间历程后处理器。

#### 第 10 步: 定义时间历程后处理变量 2

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables, 在弹出的 Defined Time-History

Variables 对话框中, 单击 Add 按钮, 出现 Add Time-History Variables 对话框, 选中 Nodal DOF Result, 单击 OK 按钮。

随后, 屏幕出现的 Define Nodal Data 拾取框, 在图形显示窗口, 选择节点 109 (顶节点), 然后点 OK 按钮, 出现 Define Nodal Data 对话框, 如图 15-22 所示。其中, 变量序号以及节点号都设为 2 (也是程序的缺省设置, 只需加以确认), 变量名称取为 DEFLECTION, 项目选 Translation UY。设置完成后, 单击 OK 按钮退出, 返回 Defined Time-History Variables 对话框。

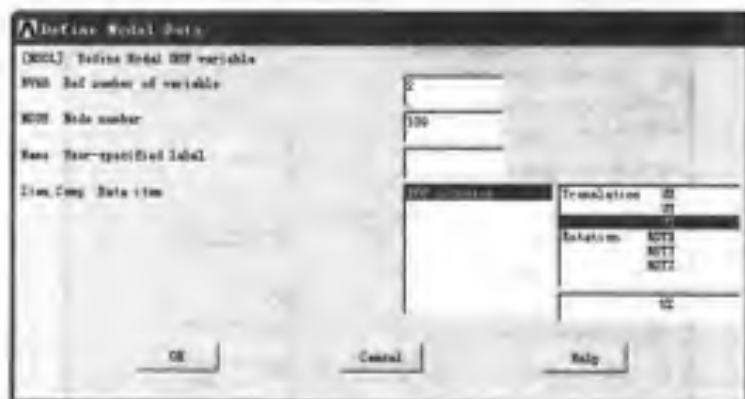


图 15-22 定义时间历程变量

#### 第 11 步: 定义时间历程后处理变量 3

点 Defined Time-History Variables 对话框的 Add 按钮, 出现 Add Time-History Variables 对话框, 选中 Reaction forces, 单击 OK 按钮。随后, 屏幕出现的 Define Reaction Force Variable 拾取框, 在图形显示窗口, 选择节点 1 (梁的固定端节点), 然后单击 OK 按钮, 出现 Define Nodal Data 对话框, 确认变量序号为 3 节点号为 1, 变量名称取为 REACTIONF, 项目选 Struct force FX。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables, 在弹出的 Defined Time-History Variables 对话框中, 单击 Add 按钮, 出现 Add Time-History Variables 对话框, 选中 Reaction forces, 单击 OK 按钮。

设置完成后, 单击 OK 按钮退出, 返回 Defined Time-History Variables 列表中, 已可以看到刚才定义的两个时间历程变量。

#### 第 12 步: 绘制载荷-位移曲线

选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>Graph 菜单项, 定义横坐标 (X) 变量为侧向位移, 在 Graph Settings 对话框中的 XVAR (X-axis variable) 选中 Single variable, Single variable No. 文本框中填 2, 单击 OK 按钮退出该对话框。

选择菜单项 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes, 在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题, 分别为 DEFLECTION 和 REACTIONF, 单击 OK 退出。

选择菜单项 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables, 弹出对话框中, NVAR1 文本框中指定 3, 单击 OK 按钮, 则可绘制载荷-位移曲线如图 15-23 所示。

从载荷-位移曲线图中可以看出, 网壳结构还基本上处于线弹性工作阶段, 施加的载荷并没有达到其非线性失稳的极限载荷。

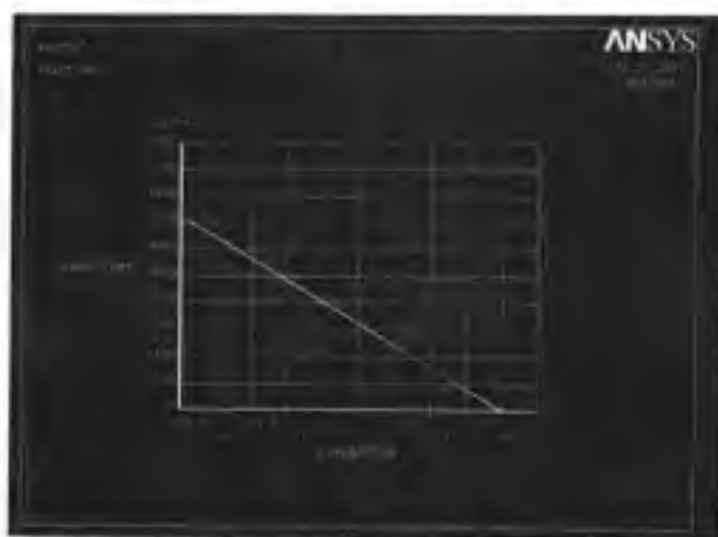


图 15-23 载荷-位移曲线

如果上述分析过程采用批处理操作方式，则相应的命令流如下：

```

/CONFIG,NRES,100          ! 设置分析终止条件

/PREP7                    ! 进入前处理器
TB,BISO,1,1,2,           ! 修正材料模型
TBTEMP,0
TBDATA,,2.0e8,0,,,
UPGEOM,0.01,1,1,'I-BEAM','rst','' ! 引入几何缺陷
FINISH                    ! 退出前处理器

/SOL                       ! 进入求解器
ANTYPE,0                  ! 指定分析类型
NLGEOM,1                  ! 打开大变形选项
OUTRES,ALL,ALL,          ! 输出所有子步的结果
ARCLN,1,0,0,             ! 打开弧长法
ARCTRM,U,100,109,UZ     ! 弧长法选项设置
NSUBST,200,,1           ! 子步数
SOLVE                     ! 求解
FINISH                    ! 退出求解器
/POST26                   ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,109,U,Z,DEFLECTION ! 指定位移变量
RFORCE,3,1,F,Z,REACTIONF ! 指定反力变量
/AXLAB,X,DEFLECTION      ! 指定绘图横坐标标签
/AXLAB,Y,REACTIONF      ! 指定绘图纵坐标标签
XVAR,2                    ! 指定横坐标表示的变量
PLVAR,3                   ! 绘载荷-位移曲线
FINISH                    ! 退出时间历程后处理器

```

## 附录 A 部分结构单元的形函数

### A.1 一维单元

(1) 对于平面杆单元 LINK1, 其位移分量为:

$$u = \sum_{i=1}^2 u_i N_i = \frac{1}{2}(u_i(1-\xi) + u_j(1+\xi))$$

$$v = \sum_{i=1}^2 v_i N_i = \frac{1}{2}(v_i(1-\xi) + v_j(1+\xi))$$

(2) 对于空间杆单元 LINK8, 位移分量  $u$  和  $v$  同上, 另一个位移分量为:

$$w = \sum_{i=1}^2 w_i N_i = \frac{1}{2}(w_i(1-\xi) + w_j(1+\xi))$$

(3) 对于梁单元 BEAM3, 承受弯矩, 存在沿着坐标 X 轴和 Y 轴方向的平动自由度和绕着 Z 轴的旋转自由度, 其位移分量为:

$$u = \frac{1}{2}(u_i(1-\xi) + u_j(1+\xi))$$

$$v = \frac{1}{2}\left(v_i\left(1 - \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right) + v_j\left(1 + \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right)\right) + \frac{l}{8}(\theta_{zi}(1 - \xi^2)(1 - \xi) + \theta_{zj}(1 - \xi^2)(1 + \xi))$$

(4) 梁单元 BEAM4, 沿着局部坐标 X 轴, Y 轴和 Z 轴方向的平动自由度和绕着 X 轴, Y 轴和 Z 轴的旋转自由度, 其位移分量为:

$$u = \frac{1}{2}(u_i(1-\xi) + u_j(1+\xi))$$

$$v = \frac{1}{2}\left(v_i\left(1 - \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right) + v_j\left(1 + \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right)\right) + \frac{l}{8}(\theta_{zi}(1 - \xi^2)(1 - \xi) + \theta_{zj}(1 - \xi^2)(1 + \xi))$$

$$w = \frac{1}{2}\left(w_i\left(1 - \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right) + w_j\left(1 + \frac{\xi}{2}(3 - \xi^2)\right)\right) - \frac{l}{8}(\theta_{yi}(1 - \xi^2)(1 - \xi) - \theta_{yj}(1 - \xi^2)(1 + \xi))$$

$$\theta_x = \frac{1}{2}(\theta_{xi}(1-\xi) + \theta_{xj}(1+\xi))$$

### A.2 二维单元

(1) PLANE42 线性单元, 形函数以及位移表达式:

$$N_i = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta), \quad N_j = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)$$

$$N_k = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta), \quad N_l = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$$

$$u = \sum_{i=1}^4 u_i N_i = \frac{1}{4}(u_i(1-\xi)(1-\eta) + u_j(1+\xi)(1-\eta) + u_l(1+\xi)(1+\eta) + u_k(1-\xi)(1+\eta))$$

$$v = \sum_{i=1}^4 v_i N_i = \frac{1}{4}(v_i(1-\xi)(1-\eta) + v_j(1+\xi)(1-\eta) + v_l(1+\xi)(1+\eta) + v_k(1-\xi)(1+\eta))$$

(2) 线性三角形单元 (PLANE42 的退化元)

形函数采用面积坐标:

$$N_i = L_i, \quad N_j = L_j, \quad N_k = L_k$$

其位移分量为:

$$u = \sum_{i=1}^3 u_i N_i = u_i L_i + u_j L_j + u_k L_k$$

$$v = \sum_{i=1}^3 v_i N_i = v_i L_i + v_j L_j + v_k L_k$$

$$w = \sum_{i=1}^3 w_i N_i = w_i L_i + w_j L_j + w_k L_k$$

(3) 二次三角形单元 PLANE2

形函数为:

$$N_i = (2L_i - 1)L_i, \quad N_j = (2L_j - 1)L_j, \quad N_k = (2L_k - 1)L_k$$

$$N_l = 4L_i L_j, \quad N_m = 4L_j L_k, \quad N_n = 4L_k L_i$$

其位移分量为:

$$u = \sum_{i=1}^6 u_i N_i, \quad v = \sum_{i=1}^6 v_i N_i, \quad w = \sum_{i=1}^6 w_i N_i$$

### A.3 三维单元

(1) 8 节点砖块元 SOLID45 的形函数为:

$$N_i = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta), \quad N_j = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_k = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta), \quad N_l = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_m = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta), \quad N_n = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$N_o = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta), \quad N_p = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)$$

其位移分量为:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^8 N_i v_i, \quad w = \sum_{i=1}^8 N_i w_i$$

(2) SOLID45 退化的四面体元。

节点 k 和 l 重合, 节点 n, o, p 和 m 重合, 此时的形函数:



$$N_i^* = N_i = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_j^* = N_j = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_k^* = N_k + N_l = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta) + \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) = \frac{1}{4}(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_m^* = N_m + N_n + N_o + N_p$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) + \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) + \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \\ &\quad + \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) = \frac{1}{2}(1+\zeta) \end{aligned}$$

(3) SOLID45 退化的金字塔五面体元。

节点  $n$ ,  $o$ ,  $p$  和  $m$  重合, 此时的形函数:

$$N_i^* = N_i = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta), \quad N_j^* = N_j = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_k^* = N_k = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta), \quad N_l^* = N_l = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_m^* = N_m + N_n + N_o + N_p = \frac{1}{2}(1+\zeta)$$

## 附录 B ANSYS 结构分析常用命令参考

表 B-1: 进程 (SESSION) 命令

/EXIT	停止运行并将控制权交回系统
/FILNAME	改变工程文件名称
HELP	以图形方式显示 ANSYS 命令和单元类型的帮助信息
/INPUT	将输入切换到命令行文件输入
/OUTPUT	将文本输出内容重定向到文件或者屏幕
FINISH	从处理模块中退出
/OPT	进入最优化设计模块
/POST1	进入一般结果后处理模块
/POST26	进入时间历程后处理模块
/PREP7	进入建立模型前处理模块
/SOLU	进入求解处理模块

表 B-2: 数据库 (DATABASE) 命令

/CLEAR	清除数据库中的所有数据
RESUME	从数据库中重新读入数据
SAVE	保存所有数据信息到数据库
/TITLE	定义主标题
/UNITS	用使用的单位标注数据库
ALLSEL	选择所有实体
ASLL	选择包含已选线的面
ASEL	选择面作为一个子集
ASLV	选择包含已选体的面
ESEL	选择单元面作为一个子集
ESLA	选择包含已选面的单元
ESLL	选择包含已选线的面单元
ESLN	选择包含已选节点的单元
ESLV	选择包含已选体的单元
KSEL	选择关键点或者硬点作为一个子集
KSSL	选择与已选线相连的关键点
KSLN	选择与已选节点相连的关键点
LSEL	选择线作为一个子集

续表

LSLA	选择包含已选面的线
LSLK	选择包含已选关键点的线
NSEL	选择节点作为一个子集
NSLA	选择与已选面相连的节点
NSLE	选择与已选单元相连的节点
NSLK	选择与已选关键点相连的节点
NSLL	选择与已选线相连的节点
NSLV	选择与已选体相连的节点
PARTSEL	在显式动态分析中选择一个子集
VSEL	选择体作为一个子集
VSLA	选择包含已选面的体
CM	将几何体组合成一个部件
CMDELE	删除一个部件, 或者部件组合体的定义
CMEDIT	编辑部件定义
CMGRP	将部件组合成部件组合体
CMLIST	列出包含在部件或者组合体中的实体对象
CMPLLOT	绘制包含在部件或者组合体中的实体对象
CMSEL	选择部件和组合体作为一个子集
KWPAVE	移动工作面原点到关键点的平均位置处
KWPLAN	过三个关键点定义工作面
LWPLAN	以某一条线为法线定义工作面
NWPAVE	移动工作面原点到节点的平均位置
NWPLAN	过三个节点定义工作面
WPAVE	移动工作面原点到指定点的平均位置
WPCSYS	按照某个坐标系定义工作面的位置
WPLANE	定义工作面来方便拾取操作
WPOFFS	移动工作面
WPROTA	旋转工作面
WPSTYL	控制工作面的显示和显示风格
CLOCAL	相对于当前激活的坐标系定义局部坐标系
CS	用三个节点位置定义局部坐标系
CSCIR	定义非笛卡尔局部坐标系的原点
CSDELE	删除局部坐标系
CSKP	过三个关键点位置定义局部坐标系
CSLIST	列出坐标系

续表

CSWPLA	过工作面原点定义局部坐标系
CSYS	激活以前定义过的坐标系
LOCAL	用位置和方位定义局部坐标系
FITEM	在拾取操作 (GUI) 时, 识别被选中的对象
FLST	在拾取操作 (GUI) 时, 指定所需要的数据

表 B-3: 图形 (GRAPHICS) 命令

DSYS	给几何体和绘图激活一个显示坐标系
ERASE	立即擦除屏幕
JPEG	提供 JPEG 文件输出给 ANSYS 显示
TIFF	提供 TIFF 文件格式的图形输出, 给 ANSYS 显示
/ANGLE	围绕坐标轴旋转显示图形
/DIST	制定观察距离和视图的放大倍数
/VIEW	定义显示的观察方向、视点
/SHRINK	为增强显示效果, 收缩单元、线、面和体
/EDGE	只显示对象的“边缘”
/ESHAPE	按照实常数确定的形状显示单元
/NUMBER	指定是否显示数字、颜色或者两者都显示

表 B-4: 参数化设计语言 (APDL) 命令

*AFUN	指定参数表达式中角度函数的单位
*ASK	提示用户输入一个参数值
*DEL	删除一个参数 (GUI)
*DIM	定义一个数组参数和它的维数
*GET	查询一个值并将其保存到一个变量
/INQUIRE	将系统信息保存到一个参数
PARRES	从文件中读入参数
*SET	将参数写入文件
*STATUS	列出当前参数和缩写
*TREAD	从外部文件中读入数据, 并保存到数组参数
*VFILL	填充数组参数
*VGET	查询值, 并存入数组参数
*VREAD	读出数据, 并生成一个数组参数矢量或者矩阵
*CFCLOS	关闭“命令”文件
*CFOPEN	打开一个“命令”文件
*CFWRITE	将 ANSYS 命令 (或者类型的字符串) 写入到一个“命令”文件

续表

*CREATE	打开（建立）一个宏文件
*END	关闭宏文件
*MSG	利用 ANSYS 的信息输出窗口输出提示信息
/PMACRO	指定要写入进程日志文件的宏的内容
/PSEARCH	指定查找“未知命令”的宏文件的目录途径
/TEE	在执行该命令的同时，将命令写入到指定文件
*ULIB	识别一个宏文件
*USE	执行一个宏文件
*ABBR	定义一个缩写
ABBRES	从一个编码文件中读入缩写
ABBNAV	将当前的缩写保存到一个编码文件
/UCMD	给用户自定义命令起一个名字
*MFOURI	计算一个傅氏级数的系数，或者求值
*MFUN	复制或者转置一个数组参数的矩阵
*MOPE	对数组参数矩阵执行矩阵操作
*MWRITE	将矩阵按照格式次序保存到一个文件
*TOPER	操作表格参数
*VABS	给数组参数应用绝对值函数
*VCOL	指定在矩阵操作中列的维数
*VCUM	允许数组参数结果和已有结果相加
*VEDIT	允许数值型数组参数在图形中被编辑和修改
*VFACT	给数组参数应用一个标量乘子
*VFUN	给数组参数一个元素执行函数操作
*VITRP	对一个表插值来形成数组参数
*VLEN	指定数组参数操作时的行数
*VMASK	指定将一个数组参数作为矢量来处理
*VOPER	操作两组数组参数
*VPLOT	对数组参数的两列（矢量）绘图
*VPUT	将数组参数值重新装载到 ANSYS 数据库
*VSCFUN	确定数组参数的属性
*VSTAT	列出数组参数的说明信息
*VWRITE	按格式序列将数据写出到一个文件
*CYCLE	命令 do-loop 循环中的返回命令
*DO	定义 do-loop 循环体的开始
*ELSE	判断语句 if-then-else 的中间分支点

续表

*ELSEIF	分割一个中间的 if-then-else 块
*ENDDO	结束一个 do-loop 循环, 并开始循环操作
*ENDIF	结束一个 if-then-else 语句
*EXIT	退出 do-loop 循环
*GO	在要读入的文件中产生一个指定的输入行
*IF	条件命令
*REPEAT	重复前面的命令
/WAIT	在读入下一个命令之前, 产生一个暂停

表 B-5: 前处理 (PREP7) 命令

AFLIST	列出当前数据库中的数据
CDREAD	将一个实体模型文件和数据信息读入到数据库
CDWRITE	将几何和载荷数据库信息输出到一个文件
CHECK	检查当前数据库中数据的完整性
CNCHECK	列出接触对的初始状态
FC	提供失效准则信息和激活一个温度相关的应力和应变极限的输入数据表
FCHECK	检查所有材料的应变和应力输入准则
FCDELE	删除前面已经定义的材料失效准则数据
FCLIST	列出已经输入的失效准则
IGESOUT	按 IGES5.1 格式, 将实体模型数据写出到文件
NOOFFSET	通过偏移指定数据项, 阻止 CDREAD 命令的执行
NUMCMP	压缩已经定义条目的编号
NUMMRG	合并重合点或者已经定义的等效数据
NUMOFF	给已经定义的对象增加一个偏移量
NUMSTR	给自动编号的对象指定起始号码
/PREP7	进入建立模型前处理器
DOF	给当前自由度增加自由度
ET	从单元库中定义单元类型
ETCHG	改变单元类型为它们相应的类型
ETDELE	删除单元类型
ETLIST	列出已经定义的单元类型
KEYOPT	设置单元选项
NSVR	定义用户编程单元选项的变量个数
R	定义单元实常数
RDELE	删除实常数
RLIST	列出实常数

续表

TMODIF	修改实常数
RMORE	增加实常数
*EVAL	对超弹性常数求值
*MOONEY	从实验数据中, 计算 Mooney-Rivlin 超弹性常数
MP	定义线性材料属性
MPAMOD	修改热膨胀的温度相关的系数
MPCHG	改变单元材料个数
MPCOPY	利用材料参考号, 复制材料模型数据
MPDATA	定义与温度表相联系的属性数据
MPDELE	删除线性材料属性
MPDRES	将已有的材料数据与温度表联系起来
/MPLIB	设置默认的材料库读写路径
MPLIST	列出线性材料属性
MPLOT	绘制线性材料属性随温度变化的曲线
MPREAD	从包含材料属性的文件读入材料数据
MPTEMP	给材料属性定义一个温度表
MPTGEN	通过生成操作给温度表增加一个温度值
MPTRES	重新读入前面已经定义的温度表
MPWRITE	将数据库中的线性材料属性保存到一博文件 (如果 Lib 选项没有指定), 或者将数据库中的线性和非线性材料属性 (如果指定了 Lib 选项) 都保存到文件
TBFT	对材料数据执行曲线拟合操作
UIMP	定义材料属性 (GUI)
TB	激活一个数据表
TBCOPY	将一种材料的数据表复制到另一种材料
TBDATA	给数据表定义数据
TADELE	删除前面已经定义的数据表
TBLIST	列出数据表
TBMODIF	修改数据表中的数据 (GUI)
TBPLOT	图形显示数据表
TBPT	在应力-应变或者 B-H 曲线上, 定义一个点
TBTEMP	给数据表定义一个温度
BLC4	通过指定角点, 建立一个矩形区域或者方块体
BLC5	用中心点和角点, 建立一个矩形区域或者方块体
BLOCK	在工作面坐标系, 建立一个方块体
CON4	在工作面的任意位置, 建立圆锥体
CONE	在工作面的原点处, 建立圆锥体

续表

CYL4	在工作面的任意位置，建立柱面或者圆柱体
CYL5	用两个端点，建立柱面或者圆柱体
CYLIND	在工作面的原点处，建立圆柱体
PCIRC	在工作面的原点处，建立柱面
POLY	基于工作面坐标轴，建立多面体面
PRI2	用顶点建立多面体面或者棱柱体 (GUI)
PRISM	基于工作面坐标轴，建立棱柱体
PTXY	定义坐标轴，用于构建多边形或者棱柱体
RECTNG	在工作面的任意位置，建立一个矩形区域
RPOLY	在工作面的原点处，建立一个规则的多边形面
RPR4	在工作面的任意位置，建立不规则的多边形面或者棱柱体
RPRISM	在工作面的原点处，建立一个规则的棱柱体
SPH4	在工作面的任意位置，建立球体
SPH5	利用直径的两个端点，建立球体
SPHERE	在工作面的原点处，建立球体
TORUS	建立原环体
K	定义关键点
KBETW	在已经存在的两个关键点之间，建立一个关键点
KCENTER	在已经定义的三个位置的圆弧中心，建立关键点
KDELE	删除没有执行网格划分的关键点
KDIST	计算并显示两个关键点之间的距离
KFILL	在两个关键点之间，填充生成关键点
KGEN	用一种关键点模式，生成关键点
KL	在已有的线上的指定位置，生成关键点
KLIST	列出已经定义的关键点或者 hard points
KMODIF	修改已有的关键点
KMOVE	计算，并将关键点移动到交点位置
KNODE	在已有的节点位置，定义关键点
KPLOT	图形显示被选中的关键点
KPSCALE	从关键点模式中，生成按比例的一系列（带网格的）的关键点
KSCALE	按照给定的关键点模式，生成按比例的一系列的关键点
KSUM	计算，并打印被选中的关键点的几何统计信息
KSYMM	对称生成一系列关键点
KTRAN	将关键点模式，传输到另一个坐标系
SOURCE	对未定义的节点或者关键点，定义默认的位置



续表

HPRCREATE	定义硬点
HPTDELETE	删除选中的硬点
BSPLIN	过一组关键点, 定义多义线 (SPLINE)
CIRCLE	定义圆
GSUM	计算, 打印几何信息
L	在两个关键点之间, 定义线
L2ANG	生成与两个已有的线成一定夹角的线
L2TAN	生成与两条线相切的线
LANG	生成和一条线成一定角度的直线
LARC	定义圆弧
LAREA	在一个面上的两个关键点之间, 生成最短线
LCOMB	将非常接近的线合并为一条线
LDELE	删除没有网格划分的线
LDIV	将一条线分割成两条或者更多条线
LDRAG	将一个关键点沿着路径扫描, 生成线
LEXTND	沿着斜率方向, 延伸某条线
LFILLT	在两条相交线的交点附近, 生成倒圆线
LGEN	按照已有线的模式, 生成另一些线
LLIST	列出已经定义的线
L PLOT	图形显示被选中的线
LREVERSE	颠倒一条线的法向方向, 不用管连接情况或者网格划分状态
LROTAT	将关键点绕某一条轴旋转, 生成圆弧线
LSSCALE	按照线的模式, 生成成比例的一系列线
LSTR	不考虑当前激活的坐标系, 定义直线
LSUM	计算并显示被选中的线的几何统计信息
LSYMM	利用已有线的模式, 对称生成线
LTAN	在已有线的端点, 生成与原有线相切的直线
LTRAN	将线的模式传递到另一个坐标系
SPLINE	过一系列关键点, 生成多段的多义线
SSLN	选择并显示模型中的小线段
A	通过连接关键点, 定义面
AATT	将单元属性和选中的、未划分网格的面联系起来
ADELE	删除未划分网格的面
ADGL	列出参数退化的面上的关键点
ADRAG	通过将一条线沿着路径拖动, 生成扫描面

续表

AFILLT	在两个相交面的相交位置生成倒圆曲面
AGEN	按已有面的模式，生成另一些面
AL	用前面已经定义的线，围绕生成面
ALIST	列出已经定义的面
ANORM	重新定义面的法线方向
AOFFST	通过偏移一个给定的面，生成面
APLOT	图形显示选中的面
AREVERSE	颠倒一个面的法向方向，不用管连接情况或者网格划分状态
AROTAT	将线围绕一条轴回转，生成柱面
ARSCALE	将一个面缩放，生成一系列成比例的面
ARSYM	将一个面按照对称复制方法，生成面
ASKIN	通过一条线将一个面通过“拧”操作，生成一个面
ASUB	用已经存在面的形状，生成一个面
ASUM	计算并打印被选中的面的几何统计信息
ATRAN	将面的模式传递给另一个坐标系
GSUM	计算并打印几何实体
SPLOT	图形显示被选中的面和他们下面的小面
EXTOPT	设置从面单元生成体单元的拉伸操作的相关控制选项
GSUM	计算并打印几何实体信息
V	通过关键点定义体
VA	用面围成体的方法生成体
VDELE	删除未划分网格的体
VDGL	列出参数退化的体上的关键点
VDRAG	通过将面沿着一个路径拖动的方法，生成体
VEXT	通过拉伸一个面生成体
VGEN	按一个体模式生成另一个体
VLIST	列出已经定义的体
VLSCALE	按一个体模式生成成比例的体
VOFFST	偏移给定面，偏移生成体
VPLOT	图形显示被选中的体
VROTAT	通过将面绕一个轴回转，生成柱体
VSUM	计算并打印被选中的体的几何统计信息
VSYMM	通过体模式的对称复制，生成体
VTRAN	将体的模式传给另一个坐标系
AADD	将多个面相加，组成一个面

续表

AGLUE	通过“粘贴”操作生成新的面
AINA	确定多个面的交 (Intersection)
AINP	确定两个面的交 (Intersection)
AINV	确定一个面和一个体的交 (Intersection)
AOVLAP	叠合 (Overlap) 面
APTIN	分区组合 (Partitions) 面
ASBA	面相减
ASBL	从面中减去线
ASBV	从体中减去面
ASBW	用工作面隔开面 (减去工作面)
BOPTN	指定布尔操作选项
BTOL	指定布尔操作的容差
LCSL	在线的交点位置处截开线
LGLUE	通过“粘合”操作生成线
LINA	确定线和面的交 (Intersection)
LINL	确定多条线的公共相交 (Intersection) 部分
LINP	确定两条线的公共相交部分
LINV	确定线和体的公共相交部分
LOVLAP	叠合 (Overlap) 线
LPTIN	分区组合 (Partitions) 线
LSBA	从线上减去面 (截开线)
LSBL	从线上减去线
LSBV	从线上减去体
LSBW	从线上减去工作面 (截开线)
VADD	体相加, 组成一个体
VGLUE	通过“粘合”生成新体
VINP	确定两个体的交
VINV	确定体的交
VOVLAP	叠合 (Overlaps) 体
VPTIN	分区组合 (Partitions) 体
VSBA	从体中减去面
SVBV	从体中减去体
SVBW	从体中减去工作面 (用工作面截开体)
ACCAT	将多个面连接起来, 准备划分映射网格
ACLEAR	删除与被选中得面相连接得节点和面单元

续表

AESIZE	指定面单元划分的单元尺寸
AMAP	按照指定面的角点, 生成 2D 映射网格
AMESH	在面内生成节点和面单元
AREFINE	在指定面周围加密网格
CHKMSH	检查前面网格划分的面和体
CLRMSHLN	清除网格
CPCYC	耦合循环对称模型的两个侧面, 使载荷在每个侧面上相同
DESIZE	控制默认的单元尺寸
EORIENT	定位固体单元的法线
EREFINE	在指定单元附近加密网格
ESIZE	指定默认线的剖分段数
ESYS	设置单元坐标系属性指针
FVMESH	由分离外部面单元 (小面) 方法, 生成节点和四面体单元
GSGDATA	给一般的平面应力单元选项指定参考点和几何纤维方向
IMESH	沿着线或者面, 生成节点和内部单元
KATT	将属性与选中的、未划分网格的关键点联系起来
KCLEAR	删除与关键点相连接的节点和点单元
KESIZE	指定距离关键点最近的单元的边长
KMESH	在关键点附近, 生成节点和点单元
KREFINE	在指定的关键点周围, 加密网格
KSCON	指定扭曲 (skewed) 面网格附近的关键点
LATT	将属性与选中的、未划分网格的线联系起来
LCCAT	将多条线连接成一条线, 用于映射网格
LCLEAR	删除与选中线相连接的节点和线单元
LESIZE	指定未划分网格的线的划分格数和间隔比例
LMESH	沿着线生成节点和线单元
LREFINE	在指定线的周围, 加密网格
MAT	设置单元材料属性指针
MCHECK	检查网络连接
MODMSH	控制实体模型和有限元 (FE) 模型之间的关系
MOPT	指定单元网格划分选项
MSHAPE	对于支持多种形状的单元, 指定网格划分的单元形状
MSHCOPY	在符合节点单元模式的两个不同的线组 (2D) 或者面组 (3D) 中, 简化网格的生成
MSHKEY	指定在单元网格划分时, 是否使用网格划分或者映射网格
MSHMID	指定单元的中间节点

续表

MSIIPATTERN	指定用于映射三角形网格的模式
NREFINE	在指定节点位置加密网格
PSMESH	将原来连续的梁、壳体、平面单元或者实体单元组分割成两个不连接的单元组，然后用预应力单元 PRETS179 连接
REAL	设置单元实常数属性指针
RTHICK	对壳体单元，定义在节点位置的厚度
SHPP	控制单元形状检查
SMRTSIZE	给自动（智能的）单元尺寸指定网格划分参数
TCHG	将 20 节点的四面体单元退化为它们的 10 节点非退化单元
TIMP	改善没有和体连接的四面体单元的质量
TYPE	设置单元类型属性指针
VATT	给选中的、未划分网格的体赋单元属性
VCLEAR	删除与选中的体相连的节点和体单元
VIMP	改善与被选中的体相连的四面体单元的质量
VMESH	对体生成的节点和体单元
VSWEEP	对未划分网格的体，用从相邻面扫过体方法填充生成网格
CENTER	用两个或者 3 个节点的曲率中心位置，定义节点
FILL	在两个节点之间，填充节点
MOVE	计算并移动节点到交点的位置
N	定义节点
NANG	用方向余弦旋转节点的坐标系
NDELE	删除节点
NDIST	计算并显示两个节点之间的距离
NGEN	用已有的节点模式，生成另外一下节点
NKPT	在关键点位置定义节点
NLIST	列出节点
NMODIF	修改已有的节点
NPLOT	图形显示节点
NREAD	从文件中读入节点
NROTAT	将节点的坐标系旋转到活动坐标系
NRRANG	指定要从节点文件中读入节点的编号范围
NSCALE	按照节点模式，生成成比例的一系列节点
NSMOOTH	在被选中的单元中间，光滑节点
NSYM	生成一组对称位置的节点
NWRITE	将节点信息写入到文件
QUAD	从三个节点上，生成节点的二次曲线

续表

SOURCE	给未定义的节点或关键点定义默认位置
TRANSFER	将节点的模式传递给另一个坐标系
E	通过节点连接, 定义单元
EDELE	从模型中删除选中的单元
EGEN	将已有的单元模式, 生成单元
EINTF	在重合节点中间, 定义两节点单元
ELIST	列出单元
EMID	增加或者一曲中间节点
EMODIF	修改前面已经定义过的单元
EMORE	给刚才定义过的单元增加更多节点
EMTGEN	生成一 TRANS126 单元
EN	用单元编号和节点连接, 定义单元
ENGEN	用已有的单元模式, 生成单元
ENORM	重新定位壳单元法线
ENSYM	通过对称复制, 生成单元
EORIENT	重新定位实体单元法线
EPLOT	显示单元
EREAD	从一个文件中读入单元
ERRANG	指定要从文件读入的单元的范围
ESURF	在已有单元的自由表面上, 生成单元
ESYM	按照一个模式, 用对称复制的方法, 生成单元
ESYS	设置单元坐标系属性指针
EWRITE	将单元信息保存到文件
GCGEN	生成 2D 或者 3D 接触单元
LAYLIST	对层合单元, 列出实参数和材料属性
LAYPLOT	对层合单元, 图形显示叠层布置次序
MAT	设置单元材料属性指针
REAL	设置单元实参数属性指针
TSHAP	给目标分片单元, 定义简单的 2D 和 3D 几何表面
TYPE	设置单元类型属性指针
UPGEOM	从前面分析中增加位移, 并将几何信息更新到变形设置中
CP	定义 (或者修改) 一组耦合自由度
CPDELE	删除耦合自由度
CPINTF	在图形界面上, 定义耦合自由度
CPLGEN	从已有的某一个耦合自由度中, 生成耦合节点

续表

CPLIST	列出耦合自由度
CPNGEN	定义、修改、或者添加一组耦合自由度
CPSGEN	从已有的耦合自由度中，生成耦合节点
CE	定义相关自由度的约束方程
CECYC	给循环对称分析，生成约束方程
CEDELE	删除约束方程
CEINTF	在图形界面上，生成约束方程
CELIST	列出约束方程
CERIG	定义一个刚性区域
CESGEN	从已有组生成一组约束方程
RBE3	将主节点上的力和力矩分配到从属节点，考虑从属节点的几何位置和权重
PRSSOL	打印 BEAM188 和 BEAM189 截面结果
SDELETE	从 ANSYS 数据库中删除横截面定义
SECDATA	描述梁截面的几何形状
/SECLIB	给 SECREAD 命令设置默认的截面库路径
SECNUM	设置单元截面属性指针
SECOFFSET	定义梁横截面的截面偏移量
SECPLOT	绘制梁截面的几何形状
SECREAD	读入一个用户自定义的梁截面库或者用户自定义的梁截面网格
SECTYPE	将截面类型信息和截面 ID 编号联系起来
SECWRITE	建立一个包含用户网格截面信息的 ASCII 文件
SLIST	汇总当前所有已经定义的截面的截面属性信息

表 B-6: 求解 (SOLUTION) 命令

ADAMS	执行求解并将变形体信息保存到模态文件
ADAPT	自适应网格和求解一个模型
ANTYPE	指定分析类型和启动状态
BCS 选项	给设稀疏矩阵求解器设置内存设置
CHECK	检查当前数据库项目的完整性
CMATRIX	执行静电场求解，并计算多个导体自己和相互的电容
CNCHECK	列出接触对的初始状态
CUTCONTROL	在非线性求解时，控制时间步长
CYCOPT	给循环对称分析指定协调索引求解
EMATWRITE	强制将单元矩阵写入到文件
EQSLV	指定方程求解器类型
ERESX	指定积分点结果的插值

续表

ESCHECK	对选中的单元组执行单元形状检查
ESSOLV	执行静电-结果耦合分析
EXPASS	指定分析的展开项
FSRS	给流体-结构耦合分析指定时间或者载荷步次数
FSSOLV	执行静电-结构耦合分析
HFEIGOPT	指定高频电磁模态分析选项
HFSCAT	指定高频散射分析
HFPCSWP	计算在某个频率范围内的传输线或者波导的传播常数
LMATRIX	计算有 N 圈系统的微分感应系数矩阵和某一圈线圈的总通量
LUMPM	指定集中质量矩阵的计算公式
MONITOR	在非线形求解监控文件中, 控制 3 个变量区域的内容
MSAVE	给 PCG 求解器设置节约内存功能
OPNCONTROL	给自动时间步长间隔设置决策参数
PRECISION	给 PCG 求解器 (目前只对 PCG 求解器有效) 指定机器精度
PSOLVE	执行部分求解的指挥程序
RATE	指定是否在载荷步求解中使用蠕变率效果
SEEXP	给子结构展开 pass, 指定选项
SEOPT	指定子结构分析选项
SOLCONTROL	指定是否使用优化的非线性求解默认值和某些增强的内部求解算法
/SOLU	进入求解器
SOLVE	开始求解
SPSWP	在频率范围计算 S-parameters 并将其保存到文件
TOFFST	指定从绝对零度的温度偏移量
ARCLEN	激活弧长方法
ARCTRM	控制弧长求解是否终止
BUCOPT	指定屈曲分析选项
CNVTOL	设置非线性分析的收敛值
CRPLIM	给自动时间步长指定蠕变准则
/GST	打开或者关闭图形求解跟踪 GST (Graphical Solution Tracking)
LNSRCH	激活用于牛顿-拉普森 (Newton-Raphson) 求解方法的搜索线
MXPAND	指定模态或者屈曲分析中要展开的模态个数
NCNV	设置停止分析的热键
NEQIT	在非线形分析中, 指定最大平衡循环叠代次数
NLGEOM	在静态或者全瞬态分析中, 包括大变形效果
NROPT	在静态或者全瞬态分析中, 指定牛顿-拉普森选项



续表

NRRES	对指定平衡循环次数, 将牛顿-拉普森的残余信息保存到文件
PRED	激活非线性分析的预报器
PSTRES	指定是否考虑预应力效果
SSTIF	在非线性分析中, 激活应力强度效果
SUBOPT	指定子空间循环特征值提取的选项
ALPHAD	定义用于阻尼的质量矩阵乘子
BETAD	定义用于阻尼的刚度矩阵乘子
DMPRAT	设置常数阻尼比
HARFRQ	定义谐波相应分析的频率范围
HREXP	指定谐波分析展开 pass 的相位角
HROPT	指定谐波分析选项
HROUT	指定谐波分析的输出选项
LVSCALE	缩放振型叠加分析的载荷矢量
MDAMP	定义阻尼比为模态的函数
MODOPT	指定模态分析选项
MXPAND	指定模态或者屈曲分析中要展开的模态个数
RIGID	指定模型中的已知的刚体模型 (如果有的话)
SUBOPT	指定子空间循环特征值提取的选项
TIMINT	打开瞬态效果开关
TINTP	定义瞬态积分参数
TRNOPT	指定瞬态分析选项
ADDAM	给船体结构的激波阻力分析指定加速度谱的计算常数
COVAL	定义 PSD 余谱值
CQC	指定完全二次模态组合方法
DSUM	指定二次求和的模态组合方法
FREQ	给 SV-FREQ 表定义频率点
GRP	指定成组模态组合方法
NRLSUM	指定海军研究实验室 (NRL) 求和的模态组合方法
PFACT	计算 PSD 或者多点反应谱表的参与系数
PSDCOM	指定功率谱密度-模态组合方法
PSDFRQ	给 PSD 的输入谱-频率表和多点谱的分析定义频率点
PSDGRAPH	图形显示输入 PSD 曲线
PSDRES	在 PSD 分析中, 控制写入到结果文件的求解输出
PSDSPL	在 PSD 分析中, 定义部分相关激励
PSDUNIT	定义 PSD 类型或者多点反应谱

续表

PSDVAL	定义 PSD 或者多点反应谱
PSDWAV	在 PSD 分析中, 定义一个波动激励
QDVAL	定义 PSD 四方谱值
ROCK	定义摆动反应谱
SED	给单点反应谱定义激励方向
SPOPT	选择谱类型和其他谱选项
SRSS	指定平方和的平方根的模态组合方法
SV	定义与频率点相关的谱值
SVTYP	定义单点反应谱的类型
VDDAM	给船体结构的激波阻力分析指定速度谱计算常数
AUTOTS	指定是否适用自动时间步长或者载荷步
CECMOD	修改求解过程中的约束方程的常数项解
DELTIM	指定用于当前载荷步的时间步长大小
EXPSOL	指定用于降维分析的展开项的解
HMAGSOLV	指定 2D 或者轴对称谐波磁场求解选项, 并开始求解
KBC	指定在一个载荷步中使用逐步加载或者随机加载
KUSE	指定是否重用三角形矩阵
MAGOPT	给 3D 静磁场分析指定选项
MAGSOLV	指定磁场求解选项, 并开始求解
MODE	给当前载荷步指定谐波载荷项
NSUBST	给当前载荷步指定载荷子步数
NUMEXP	指定用于降维分析展开项的解
TIME	给载荷步设定时间
TREF	给热应变计算定义参考温度
TSRES	定义改变时间步长策略的关键时间点数组
UPCOORD	按照当前位移, 修改当前组节点的坐标系
USRCAL	允许用户程序被激活或者被禁用
DA	定义某个面上的对称或者反对称 DOF 约束
DADELE	删除某个面上的 DOF 约束
DALIST	列出某个面上的 DOF 约束
DK	定义某个关键点上的 DOF 约束
DKDELE	删除某个关键点上的 DOF 约束
DKLIST	列出某个关键点上的 DOF 约束
DL	定义某条线上的对称或者反对称 DOF 约束
DLDELE	删除某条线上的 DOF 约束

续表

DLLIST	列出某条线上的 DOF 约束
DTRAN	将实体模型上的 DOF 约束传输给有限元模型
FK	定义关键点上的载荷力
FKDELE	删除关键点上的力
FKLIST	列出关键点上的力
FTRAN	将实体模型上的力传输给有限元模型
SFA	指定被选中面上的表面力
SFADELE	删除被选中面上的表面力
SFALIST	列出被选中面上的表面力
SFL	指定某个面的线上的表面力
SFLDELE	从线上删除表面力
SFLLIST	列出线上的表面力
SFTRAN	将实体模型上的表面力传输给有限元模型
BFA	定义某个面上的体积力载荷
BFADELE	删除某个面上的体积力载荷
BFALIST	列出某个面上的体积力载荷
BFK	定义某个关键点上的体积力载荷
BFKDELE	删除某个关键点上的体积力载荷
BFKLIST	列出某个关键点上的体积力载荷
BFL	定义某条线上的体积力载荷
BFLDELE	删除某条线上的体积力载荷
BFLLIST	列出某条线上的体积力载荷
BFTRAN	将实体模型上的体积载荷力传输给有限元模型
BFV	定义某个体上的体积力载荷
BFVDELE	删除某个体上的体积力载荷
BFVLIST	列出某个体上的体积力载荷
ACEL	指定结构的线性加速度
CGLOC	指定加速度坐标系的原点位置
CGOMGA	指定整体的旋转速度
CMDOMEGA	指定单元部件围绕用户自定义转动轴的转动加速度
CMOMEGA	指定单元部件围绕用户自定义转动轴的转动速度
DCGOMG	指定坐标系的转动加速度
DOMEGA	指定结构的转动加速度
IRLF	指定不计算转动惯量影响
OMEGA	指定结构的转动速度

续表

LSCLEAR	从数据库中清除载荷和载荷步选项
LSDELE	删除载荷步文件
LSREAD	将载荷和载荷步选项数据读入到数据库
LSSOLVE	读入和求解多个载荷步
LSWRITE	将载荷和载荷步选项数据保存到文件
D	定义节点上的 DOF 约束
DCUM	指定被累计的 DOF 约束值
DDELE	删除自由度约束
DLIST	列出 DOF 约束
DSCALE	缩放 DOF 约束值
DSYM	指定节点上的对称或者反对称 DOF 约束
GSBDATA	对一般平面应变单元选项, 指定约束或者在端点施加载荷
GSLIST	对一般平面应变情况, 列出输入数据或者求解
LDREAD	从结果文件中读入结果, 并将其作为载荷
F	指定节点上的载荷力
FCUM	指定要累计计算的载荷力
FDELE	删除节点上的载荷力
FLIST	列出节点上的载荷力
FSCALE	缩放数据库中的载荷值
SF	指定节点上的表面力
SFBEAM	指定梁单元上的表面力
SFCUM	指定要累计计算的表面力
SFDELE	删除表面力
SFE	指定单元上的表面力
SFEDELE	删除单元上的表面力
SFELIST	列出单元上的表面力
SFFUN	指定变化的表面力
SFGRAD	指定表面力的变化梯度(斜率)
SFLIST	列出表面力
SFSCALE	缩放单元上的表面力
BF	定义节点的体积力载荷
BFCUM	指定要累计计算的节点的体积载荷力
BFDELE	删除节点的体积载荷力
BFE	定义单元体积力载荷
BFECUM	指定是否忽略随后的单元体积力载荷

续表

BFDELE	删除单元体积力载荷
BFELIST	列出单元体积力载荷
BFESCAL	缩放单元体积力载荷
BFLIST	列出单元上的体积载荷力
BFSCAL	缩放单元上的体积载荷力
BFUNIF	给所有节点施加均匀分布的体积力载荷
LDREAD	从结果文件中读入结果，并将其作为载荷
RIMPORT	从显示动态来分析结果中的输入初始应力
TUNIF	给所有节点施加均匀分布的温度载荷

表 B-7: 一般后处理 (POST1) 命令

/POST1	进入数据库结果后处理器
SET	定义从结果文件中读入的数据
PLDISP	图形显示变形后的结构
PLESOL	用不连续单元等高线，图形显示求解结果
PINSOL	用连续等高线，图形显示求解结果
PLVECT	以矢量方式，图形显示求解结果
ETABLE	为后续处理定义单元表
PLETAB	显示单元表项目
ANDATA	生成某个结果数据范围内的一系列等高线动画
ANMODE	生成模态的动画序列

续表

BFDELE	删除单元体积力载荷
BFELIST	列出单元体积力载荷
BFESCAL	缩放单元体积力载荷
BFLIST	列出单元上的体积载荷力
BFSCAL	缩放单元上的体积载荷力
BFUNIF	给所有节点施加均匀分布的体积力载荷
LDREAD	从结果文件中读入结果，并将其作为载荷
RIMPORT	从显示动态来分析结果中的输入初始应力
TUNIF	给所有节点施加均匀分布的温度载荷

表 B-7: 一般后处理 (POST1) 命令

/POST1	进入数据库结果后处理器
SET	定义从结果文件中读入的数据
PLDISP	图形显示变形后的结构
PLESOL	用不连续单元等高线，图形显示求解结果
PINSOL	用连续等高线，图形显示求解结果
PLVECT	以矢量方式，图形显示求解结果
ETABLE	为后续处理定义单元表
PLETAB	显示单元表项目
ANDATA	生成某个结果数据范围内的一系列等高线动画
ANMODE	生成模态的动画序列