

目 录

第 1 章 初识 ANSYS	1
1.1 ANSYS 简介.....	1
1.2 初识 ANSYS.....	2
1.3 实例操作.....	3
1.3.1 建立 ANSYS 实体模型.....	3
1.3.2 网格划分.....	4
1.3.3 模型操作.....	6
1.3.4 ANSYS 帮助系统.....	8
1.3.5 退出 ANSYS	8
第 2 章 有限单元法基础	11
2.1 有限单元法的基本概念.....	11
2.2 结构动力学分析的有限元法.....	11
2.2.1 引言	11
2.2.2 固有振动特性.....	15
2.2.3 动力响应特性.....	18
2.3 温度场的有限元法.....	23
2.3.1 温度场问题的基本方程.....	23
2.3.2 稳态温度场的有限元法.....	25
2.3.3 瞬态温度场的有限元法.....	29
第 3 章 ANSYS 建模	31
3.1 模型生成概述.....	31
3.1.1 什么是模型生成.....	31
3.1.2 ANSYS 中建模的典型步骤.....	31
3.1.3 实体建模和直接生成的比较.....	32
3.1.4 从 CAD 系统中输入的实体模型	33
3.2 规划分析方案.....	33
3.2.1 规划的重要性.....	33
3.2.2 确定分析目标.....	33
3.2.3 选择模型类型（二维、三维等）.....	33
3.2.4 线性单元和高次单元的选择.....	34
3.2.5 不同单元连接的限制.....	37
3.2.6 找到利用对称性的办法.....	37

3.2.7	决定包含多少细节.....	39
3.2.8	确定合适的网格密度.....	39
3.3	坐标系.....	39
3.3.1	坐标系的类型.....	39
3.3.2	总体和局部坐标系.....	40
3.3.3	显示坐标系.....	43
3.3.4	节点坐标系.....	44
3.3.5	单元坐标系.....	45
3.3.6	结果坐标系.....	45
3.4	利用工作平面.....	46
3.4.1	什么是工作平面.....	46
3.4.2	生成一个工作平面.....	46
3.4.3	增强的工作平面.....	48
3.5	实体造型.....	51
3.5.1	实体造型操作概述.....	51
3.5.2	用自底向上的方法建模.....	54
3.5.3	用自顶向下的方法建模: 体素.....	54
3.5.4	用布尔运算雕塑实体模型.....	59
3.5.5	布尔运算之后的更新.....	70
3.5.6	移动和拷贝实体模型.....	71
3.5.7	实体模型图元的缩放.....	72
3.5.8	实体模型加载.....	73
3.5.9	质量和惯量的计算.....	75
3.6	输入实体模型.....	76
3.6.1	从 IGES 文件中输入实体模型.....	76
3.6.2	用 IGES 文件进行工作.....	76
第 4 章	ANSYS 网格划分及修改模型.....	93
4.1	如何对实体模型进行网格划分.....	93
4.2	定义单元属性.....	94
4.2.1	生成单元属性表.....	94
4.2.2	在划分网格之前分配单元属性.....	95
4.3	网格划分控制.....	96
4.3.1	ANSYS 网格划分工具.....	96
4.3.2	单元形状.....	97
4.3.3	选择自由或映射网格划分.....	98
4.3.4	控制边中节点的位置.....	99
4.3.5	自由网格划分中单元的 SmartSizing.....	99
4.3.6	对映射网格划分的缺省单元尺寸.....	101

4.3.7	局部网格划分控制.....	102
4.3.8	网格划分控制.....	104
4.3.9	生成过渡的棱锥单元.....	108
4.3.10	将退化的四面体单元转化为非退化形式.....	109
4.3.11	对层进行网格划分.....	111
4.3.12	通过 GUI 设置层网格划分控制.....	111
4.4	自由网格和映射网格划分控制.....	112
4.4.1	自由网格划分.....	113
4.4.2	映射网格划分.....	114
4.5	实体模型的网格划分.....	121
4.5.1	用 xMESH 命令生成网格.....	121
4.5.2	生成带有方向节点的梁单元网格.....	122
4.5.3	由面生成体网格.....	126
4.5.4	用 xMESH 命令的注意事项.....	126
4.5.5	通过扫掠生成体网格.....	126
4.5.6	中断网格划分操作.....	132
4.5.7	单元形状检查.....	132
4.6	改变网格.....	138
4.6.1	对模型重新划分网格.....	138
4.6.2	利用网格 Accept/Reject 提示.....	139
4.6.3	清除网格.....	139
4.6.4	细化局部网格.....	139
4.6.5	改进网格（只针对四面体单元网格）.....	139
4.7	一些提示和注意事项.....	141
4.7.1	注意事项.....	141
4.7.2	进一步的提示.....	142
4.8	修改模型.....	142
4.8.1	简介.....	142
4.8.2	细化局部网格.....	143
4.8.3	节点和单元的移动与拷贝.....	149
4.8.4	记录单元面和方向.....	151
4.8.5	已划分网格模型的修改：消除和删除.....	154
4.8.6	理解实体模型的相互对照检查.....	157
4.9	网格直接生成.....	158
4.9.1	什么是直接生成.....	158
4.9.2	节点.....	159
4.9.3	从已有节点生成另外的节点.....	159
4.9.4	移动节点.....	160
4.9.5	单元.....	162

4.10	管路模型.....	167
4.10.1	管路命令简介.....	167
4.10.2	管路命令能做的工作.....	167
4.10.3	用管路命令建立管路系统模型.....	167
4.10.4	输入示例.....	170
4.11	编号控制和单元重排序.....	171
4.11.1	编号控制.....	171
4.11.2	单元重排序.....	175
4.12	耦合和约束方程.....	176
4.12.1	概述.....	176
4.12.2	什么是耦合.....	176
4.12.3	如何生成耦合自由度集.....	176
4.12.4	耦合的其他条件.....	177
4.12.5	什么是约束方程.....	177
4.12.6	如何生成约束方程.....	178
4.12.7	约束方程的其他注意事项.....	180
4.13	模型的合并和归档.....	181
4.13.1	合并模型.....	181
4.13.2	模型归档.....	181
4.14	ANSYS 与其他程序的接口.....	183
4.14.1	什么是接口软件.....	183
4.14.2	与计算机辅助设计 (CAD) 程序的接口.....	183
4.14.3	与其他有限元分析 (FEA) 程序的接口.....	183
4.14.4	其他接口.....	183
第 5 章	结构静力分析.....	185
5.1	结构分析概述.....	185
5.2	结构线性静力分析.....	186
5.3	结构非线性静力分析.....	186
5.4	静力分析实例(一).....	200
5.4.1	问题描述.....	200
5.4.2	计算铣削力.....	201
5.4.3	GUI 方式分析过程.....	202
5.5	静力分析实例(二).....	208
5.5.1	问题描述.....	208
5.5.2	GUI 方式分析过程.....	209
5.5.3	结果分析.....	211
第 6 章	ANSYS 动力学分析.....	213
6.1	模态分析.....	213

6.1.1	模态分析简介.....	213
6.1.2	建模	213
6.1.3	加载及求解.....	213
6.1.4	扩展模态.....	216
6.1.5	观察结果.....	217
6.2	模态分析实例（一）.....	218
6.2.1	引言	218
6.2.2	三维有限元的基本理论.....	219
6.2.3	结构材料性能参数.....	222
6.2.4	结构的建模和分网.....	222
6.2.5	加载及求解.....	227
6.2.6	临界转速分析.....	232
6.3	模态分析实例（二）.....	233
6.3.1	引言	233
6.3.2	模态分析.....	234
6.4	谐响应分析.....	239
6.4.1	谐响应分析的三种求解方法.....	239
6.4.2	谐响应分析的步骤.....	240
6.5	谐响应分析实例.....	245
6.5.1	引言	245
6.5.2	激振力的确定.....	246
6.5.3	响应特性分析.....	247
6.5.4	加工精度分析.....	252
6.6	基础件的动力学分析.....	253
6.6.1	引言	253
6.6.2	动力学分析.....	253
6.6.3	结果分析.....	260
第7章	ANSYS 热力学分析.....	263
7.1	热分析的基础知识.....	263
7.1.1	符号与单位.....	263
7.1.2	传热学经典理论回顾.....	263
7.1.3	热传递的方式.....	264
7.2	稳态热分析.....	266
7.2.1	稳态传热的定义.....	266
7.2.2	热分析的单元.....	266
7.2.3	ANSYS 稳态热分析的基本过程.....	266
7.3	瞬态热分析.....	270
7.3.1	瞬态传热分析的定义.....	270

7.3.2	瞬态热分析中的单元及命令.....	271
7.3.3	ANSYS 瞬态热分析的主要步骤.....	271
7.3.4	建模.....	271
7.3.5	加载求解.....	271
7.3.6	后处理.....	274
7.3.7	相变问题.....	274
7.4	热力学分析实例.....	275
7.4.1	引言.....	275
7.4.2	建立有限元模型.....	276
7.4.3	求取热力学系数.....	277
7.4.4	加载并求解.....	277
7.4.5	计算结果分析与改进措施.....	279
7.5	热辐射.....	280
7.5.1	什么是热辐射.....	280
7.5.2	分析热辐射问题.....	280
7.5.3	使用 LINK31——辐射线单元.....	280
7.5.4	使用表面效应单元.....	280
7.5.5	使用 AUX12——辐射矩阵生成器.....	280
第 8 章	ANSYS 高级分析技术.....	283
8.1	优化设计.....	283
8.1.1	基本概念.....	283
8.1.2	优化设计的步骤.....	284
8.1.3	优化设计的关键点.....	293
8.1.4	优化分析的示例 (GUI 方法).....	303
8.2	拓扑优化.....	315
8.2.1	什么是拓扑优化.....	315
8.2.2	如何做拓扑优化.....	315
8.2.3	拓扑优化示例.....	319
8.3	单元的生和死.....	321
8.3.1	何为单元的生和死.....	321
8.3.2	单元生死是如何工作的.....	322
8.3.3	如何使用单元生死特性.....	322
8.3.4	单元生死应用实例 (命令行格式).....	326

第 1 章

初识 ANSYS

1.1 ANSYS 简介

ANSYS 软件是大型通用有限元分析软件。有限元法是一种采用电子计算机求解结构静、动态力学特性等问题的数值解法。由于有限元法具有精度高、适应性强以及计算格式规范统一等优点，故在短短 50 多年间已广泛应用于机械、宇航航空、汽车、船舶、土木、核工程及海洋工程等诸多领域，已成为现代机械产品设计中的一种重要工具。特别是随着电子计算机技术的发展和软、硬件环境的不断完善以及高档计算机和计算机工作站的逐步普及，为 ANSYS 的推广应用创造了更为良好的条件，并展示出更为广阔的应用前景。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单，包括：结构分析、电磁分析、流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、参数设计语言等功能。

尽管 ANSYS 程序功能强大，但它友好的图形用户界面（GUI）使其易学易用。通过 GUI 可以方便地交互访问程序的各种功能、命令、用户手册和参考材料，可以一步一步地完成整个分析，因而使 ANSYS 易于使用。

ANSYS 按功能作用可分为：一个前处理器、一个求解器、两个后处理器、几个辅助处理器等。前处理器用于生成有限元模型；求解器用于施加载荷及边界条件，完成求解计算；后处理器用于获取求解结果，以便对模型做出评价。

而且 ANSYS 提供了数据接口程序，使得在其他 3D 软件中建立的模型很方便地导入 ANSYS 中。

在本书中将主要介绍 ANSYS 软件在机械方面的应用，即介绍静力学分析、动力学分析和热力学分析。利用 ANSYS 程序，机械工程师可以构造出机械产品、零部件或系统的计算机模型，对它们施加载荷或其他设计条件，可以得出相应的动静特性，对产品进行优化设计，以降低生产成本。

ANSYS 程序可以运行于 Windows 98、Windows NT、Windows 2000 和 UNIX 操作系统下的 PC 机、工作站。下面介绍的 ANSYS 程序都是运行于操作系统为 Windows 2000 的 PC 机上。

1.2 初识 ANSYS

从开始菜单下启动 ANSYS，如图 1-1，依次选择“开始→程序→ANSYS5.6→Interactive”菜单选项，出现如图 1-2 所示的对话框。

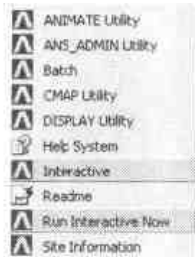


图 1-1 ANSYS 启动菜单

图 1-2 所示的对话框中“Product selection”项让您选择 ANSYS 产品；“Working directory”项让您选择 ANSYS 的工作目录；“Graphic device name”项让您选择显卡，如果您配置了 3D 显卡，则选择“3D”；“Initial jobname”项让您设定初始工作文件名，缺省为上次运行的工作文件名；“Memory requested (megabytes)”项让您设定 ANSYS 工作空间及数据库大小。

单击“Run”按钮即可运行 ANSYS。当然您也可以从图 1-1 所示的菜单中单击“Run Interactive Now”，将读取上一次的设置，直接运行 ANSYS。

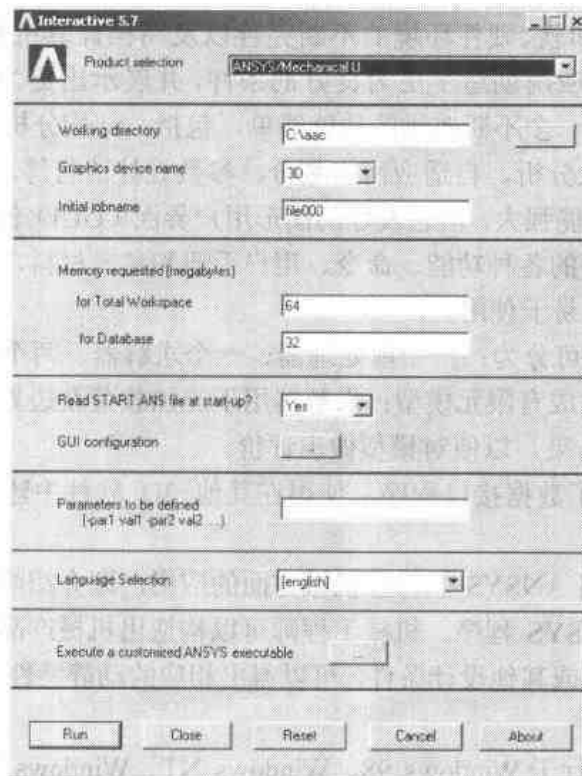


图 1-2 ANSYS 定制对话框

运行 ANSYS 后将出现应用菜单、输入、工具条、主菜单、图形和输出六个窗口，如图 1-3 所示。各个窗口的功能为：

- (1) 应用菜单窗口的主要功能是文件管理、显示控制和参数设置等;
- (2) 输入窗口的主要功能是输入各种命令;
- (3) 工具条窗口的主要功能是将常用的命令制成工具条, 方便调用;
- (4) 主菜单窗口的主要功能是 ANSYS 前处理、求解和后处理等;
- (5) 图形窗口的主要功能是显示由 ANSYS 创建的图形;
- (6) 输出窗口的主要功能是显示软件文本的输出。

下面您就可以建立有限元模型了。应用菜单

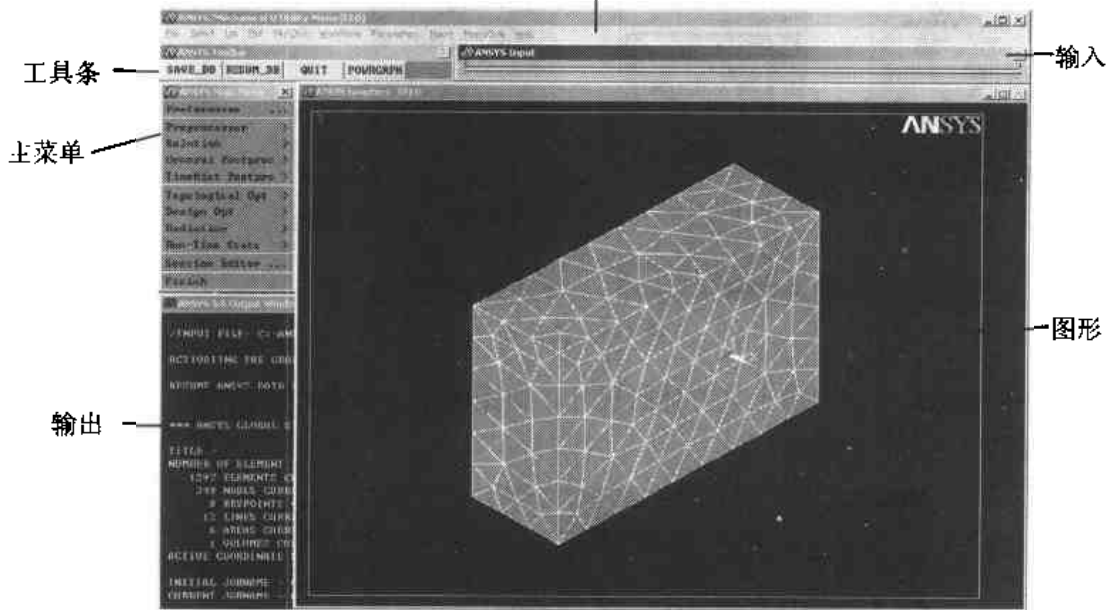


图 1-3 ANSYS 界面

1.3 实例操作

下面将建立一个 ANSYS 实体模型: $0.1\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的立方体, 并对它进行网格划分。通过这个实例, 让您对 ANSYS 的建模、网格划分和模型操作有一个初步的认识。

1.3.1 建立 ANSYS 实体模型

选择主菜单中的“Preferences”菜单选项, 将弹出如图 1-4 所示的对话框。在图中的“Structural”项前面打上勾, 它将只显示 Structural 的相关菜单, 否则将显示所有菜单项。

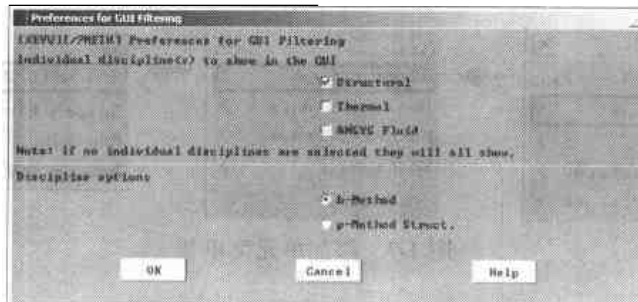


图 1-4 菜单过滤对话框

如图 1-5 所示,依次选择“Preprocessor→Create→Block→By Dimensions”菜单选项。(图 1-5 中的“→”表示在下一级菜单中选择某个菜单项,在以后各章都采用这种表示法),弹出如图 1-6 所示的对话框。ANSYS 主菜单的主要特点是:它的子菜单是相对独立的,迭加在主菜单上。您也可以单击“压住”的菜单,将它调到前面来。

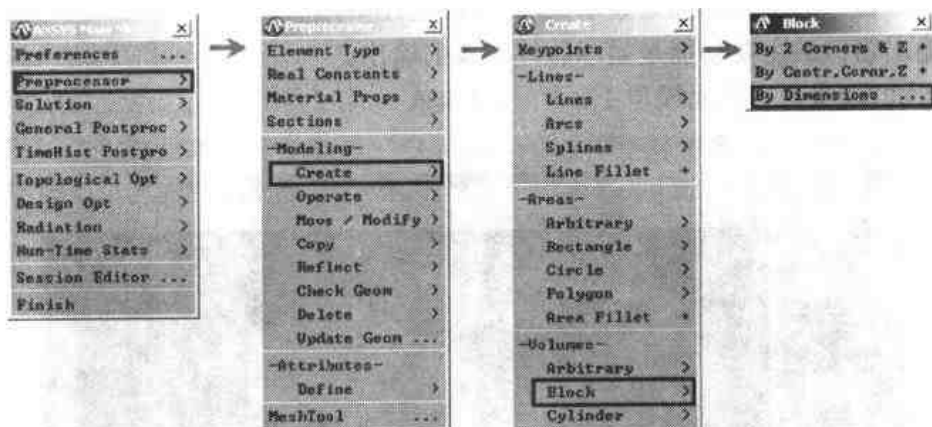


图 1-5 菜单

在图 1-6 所示的对话框中填上立方体的尺寸,如图所示,单击 OK 按钮,一个立方体就出现在图形窗口中。

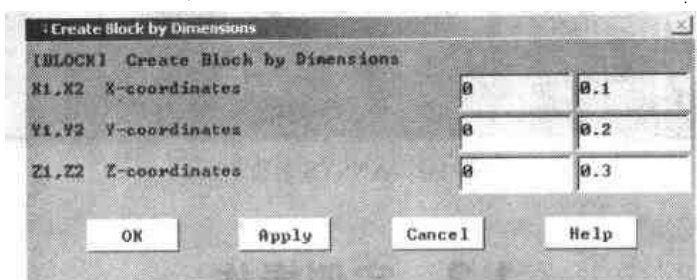


图 1-6 尺寸对话框

1.3.2 网格划分

立方体的实体模型已经建立,下面对其进行网格划分。具体的步骤如下:

1. 选择单元:如图 1-7 所示,选择菜单“Preprocessor→Element Type →Add/Edit/Delete”,出现如图 1-8 所示的对话框,接受默认选项,单击 Add 按钮,出现如图 1-9 所示的对话框,选择 Solid 中的 Brick 8node 45。

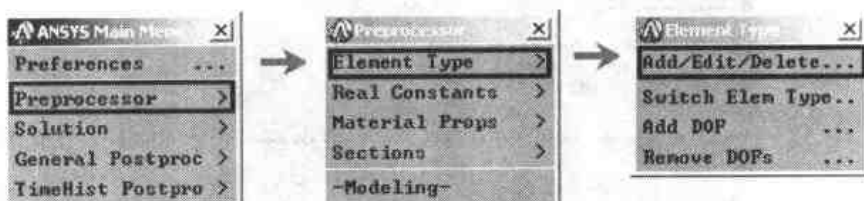


图 1-7 添加单元菜单

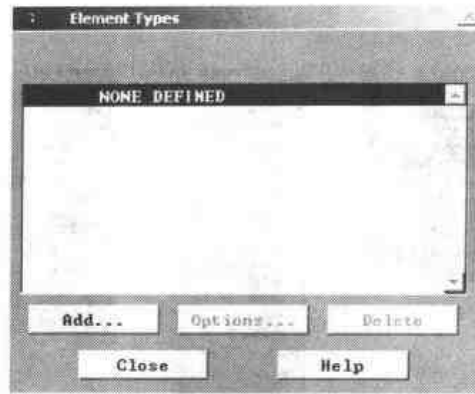


图 1-8 单元对话框

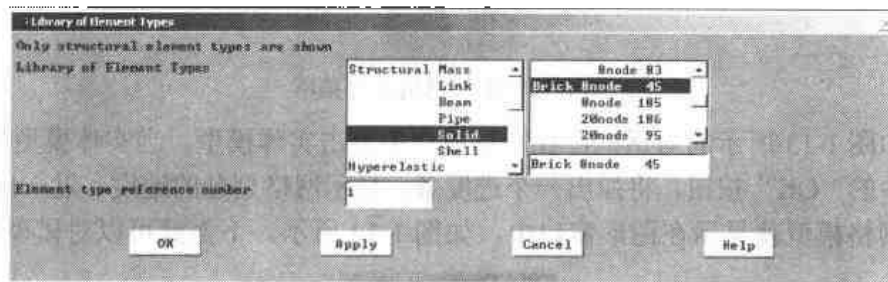


图 1-9 选择单元

2. 设置网格划分精度: 如图 1-10 所示, 依次选择 “Preprocessor→Meshing Size Cntrl→SmartSize Basic” 菜单选项, 弹出如图 1-11 所示的对话框。



图 1-10 选择网格划分精度菜单

在 “Size Level” 文本框中选择网格划分的精度等级为 9。

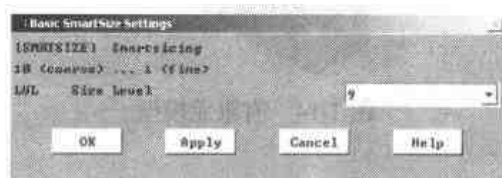


图 1-11 选择网格划分精度对话框

3. 网格划分: 依次选择 “Preprocessor → Meshing Mesh → Volumes Free” 菜单选项,

如图 1-12 所示。

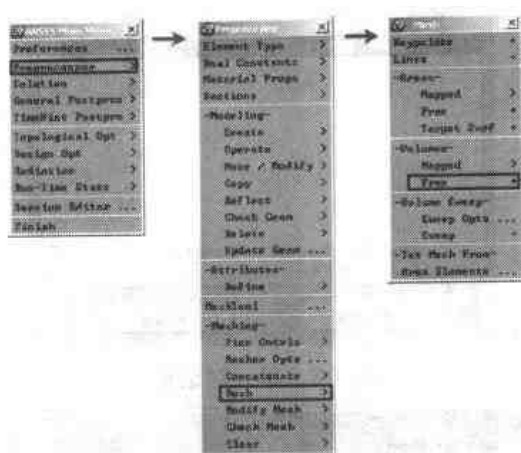


图 1-12 实体网格划分菜单

将弹出如图 1-13 所示的对话框，在图形窗口中单击实体模型。当实体模型变为红色后，单击对话框中的“OK”按钮，将弹出一个进度条，显示网格划分的速度。过一段时间，进度条消失后，网格模型就显示在图形窗口中，如图 1-14 所示。下面就可以对模型进行操作。

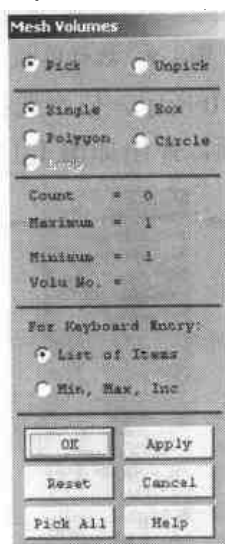


图 1-13 选择实体

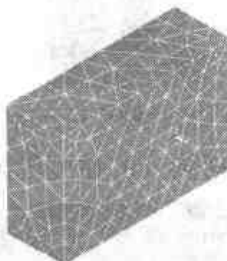


图 1-14 有限元模型

1.3.3 模型操作

您创建的立方体模型是由多个单元构成的，而每个单元又由节点构成。立方体的创建过

程是：关键点→面→立方体。

如图 1-15 所示，选择应用菜单中的 Plot 选项，分别选择 Keypoints、Lines 和 Areas，图形窗口中显示的对应图形见图 1-16。

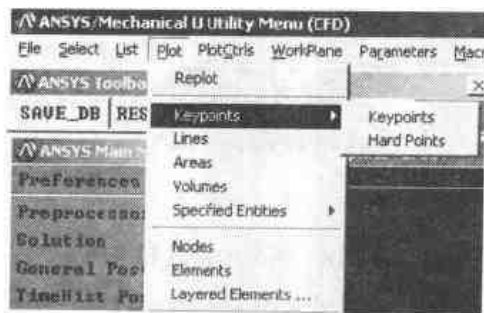


图 1-15 绘图菜单

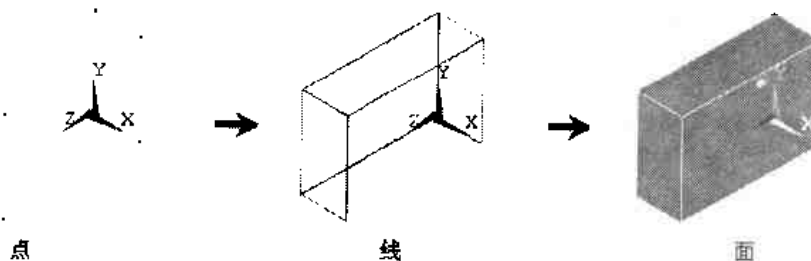


图 1-16 立方体的点线面

下面介绍模型的平移、缩放和旋转。

选择应用菜单中“PlotCtrls→Pan-Zoom-Rotate...”选项，弹出 Pan-Zoom-Rotate 对话框。下面将该对话框分为三个部分，分别介绍各个部分的功能：

1. 模型视图的转换：如图 1-17，标出了各个按钮的功能。当您单击“Iso”按钮后，在图形窗口中将显示立方体的正等轴侧图。

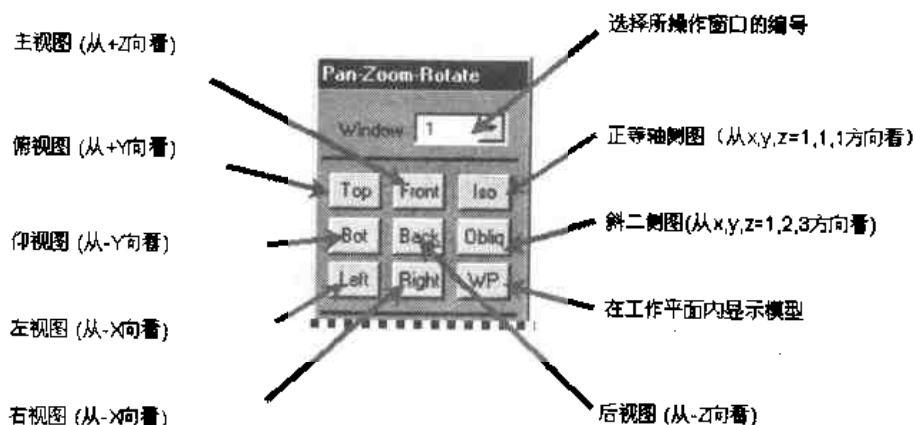


图 1-17 模型视图的转换

2. 模型的缩放和平移：如图 1-18，标出了各个按钮的功能。当您单击“Back Up”按钮后，将恢复到缩放前的画面。

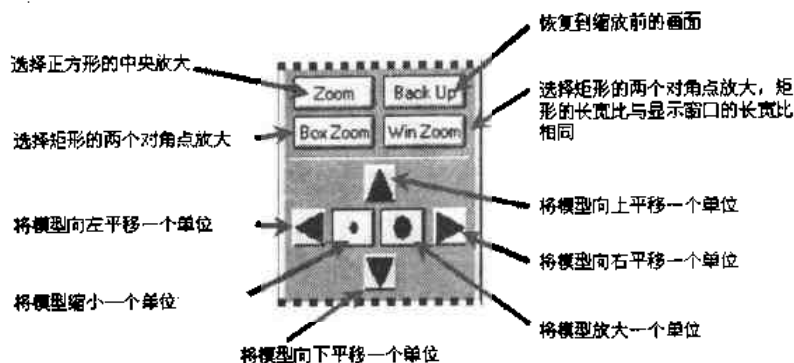


图 1-18 模型的缩放和平移

3. 模型的旋转：如图 1-19，标出了各个按钮的功能。当您选中“Dynamic Mode”开关时，就可以进行模型的动态的平移、旋转、缩放操作。三键鼠标中各键的功能为：鼠标左键进行平移，鼠标中键进行缩放，鼠标右键进行旋转。

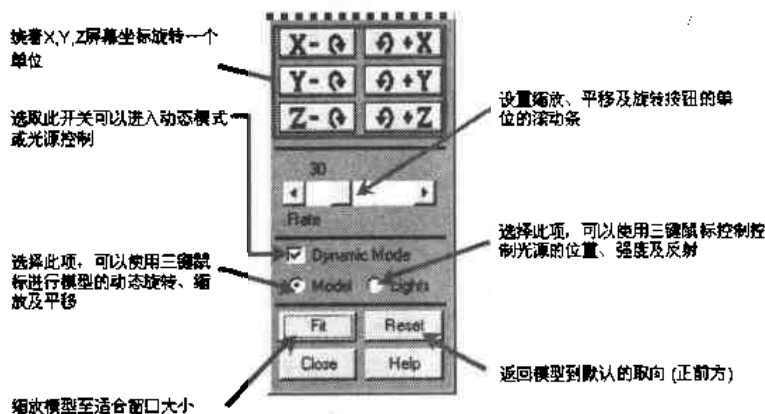


图 1-19 模型的旋转

1.3.4 ANSYS 帮助系统

ANSYS 的帮助系统包括所有 ANSYS 命令解释及所有的 GUI 解释, 还包括 ANSYS 系统分析指南。

ANSYS 帮助系统可以通过下列三种方式进入：

1. 在应用菜单中选取 Help 菜单选项。
2. 在 ANSYS 程序组中选择 Help System 项。您可以进行关键字查找和阅读 ANSYS 的教程。
3. 在任何对话框中选择“Help”按钮。当您单击如图 1-9 所示的对话框中的“Help”按钮时，就可以得到关于 Solid 45 单元方面的帮助。

1.3.5 退出 ANSYS

退出 ANSYS 的步骤如下：

1. 选择工具条中的 QUIT，或依次选择应用菜单中的“File→Exit”选项。

2. 选择退出对话框中的存盘选项，如图 1-20 所示。四个选项分别表示：存储几何信息和加载信息；存储几何信息、加载信息和求解信息；存储所有信息；不存储任何信息。您可以选择“Save Everything”，但由于该模型没有加载信息和求解信息，就只存储了几何信息。

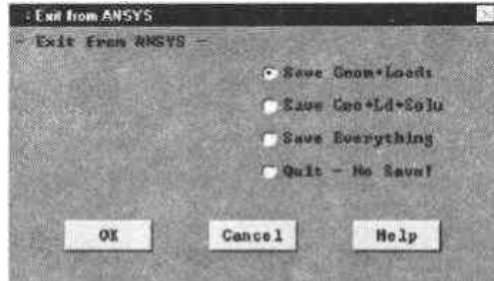


图 1-20 退出对话框

3. 选择退出对话框中的“OK”按钮，退出 ANSYS。

通过本章的学习，相信您已经对 ANSYS 的界面有了初步的认识，建立了一个简单的立方体模型，并能够对模型进行平移、缩放和旋转等操作。为了便于进一步介绍 ANSYS，将在下一章介绍有限元分析的基本理论。

第 2 章

有限单元法基础

2.1 有限单元法的基本概念

有限元法是一种采用电子计算机求解结构静、动态力学特性等问题的数值解法。在机械结构的动力学分析中，利用弹性力学有限元法建立结构的动力学模型，进而可以计算出结构的固有频率、振型等模态参数以及动力响应（包括响应位移和响应应力）。由于有限元法具有精度高、适应性强以及计算格式规范统一等优点，所以在短短 50 多年间已广泛应用于机械、宇航航空、汽车、船舶、土木、核工程及海洋工程等诸多领域，已成为现代机械产品设计中的一种重要工具。特别是随着电子计算机技术的发展和软、硬件环境的不断完善以及高档计算机和计算机工作站的逐步普及，现在已有许多著名的有限元程序（如 ANSYS、ANDIA、NASTRAN、SAP 等）可用，从而为有限元法在机械结构动态设计中的推广应用创造了更为良好的条件，并将展示出更为广阔的工程应用前景。

有限元法的基本思路是：①把很复杂的结构拆分为若干个形状简单的单元，这些单元一般要小到可以用简单的数学模型来描述特性参数在其中的分布，这一步骤称为离散。②通过对单元的研究来建立各特性参数之间的关系方程，这一过程称为单元分析。在弹性力学中，单元分析的任务是：建立联系应变与节点位移分量的方程，联系应力与节点位移分量的方程，同时研究单元的节点力与节点位移之间的关系，以及把作用在单元中间的外载荷转化成节点载荷。③在单元分析基础上，利用平衡条件和连续条件，将各个单元拼装成整体结构。对整体在确定边界条件下进行分析，从而得到整体的参数关系方程组，即矩阵方程。这一过程称为整体分析。④解这样的矩阵方程，即可得到各种参数在整体结构中的分布。

2.2 结构动力学分析的有限元法

2.2.1 引言

由于后面几章的有限元例子来源于开发数控自动万能铣头的课题，该课题的具体研究对象是

一台五轴加工中心的自动回转铣头。为了让读者有一个整体的概念，对该课题做一个简单的介绍。

该课题的主要任务是高速铣头的虚拟动力学研究。五轴加工中心（在铣头上具有 C 轴和 A 轴（或 B 轴）回转功能）是数控机床产品中的高技术难度产品。由于这种机床可进行复杂曲面的加工，易于实现高速，除提高加工效率外并可确保产品的精度，这是当前高性能航空、宇航等军工产品所需要的。因此，长期以来被国外列为禁止进口产品。目前，我国机床行业正在致力于研究开发。尽快研制出这种五轴加工中心产品，以适应军工产品的需要并填补国内空白，在机械制造行业中具有重大意义。

研究开发的五轴加工中心要求具有较高的性能技术指标，接近国际先进水平。机床不仅要具有多坐标复杂曲面的加工功能，而且还应具有高速度、高刚度和高精度的要求。因此，这种机床的研究开发是一个难度很大的任务。

由于五轴加工中心日益向高速度、高精度（工件的加工精度）和高刚度的方向发展，其机构日趋复杂，对其工作性能的要求越来越高。五轴加工中心的铣头的设计是整个机床保证机床性能指标的关键部分，铣头的性能对机床的整体特性影响很大。五轴加工中心的创新结构设计主要体现在铣头部分，而且机床的两个回转自由度的实现也是由铣头部分完成的。为使铣头安全可靠地工作，其结构必须具有良好的静动特性，故对其进行动力学分析是个重要的任务。

虚拟制造技术的发展应用，为开发研究高技术数控机床产品提供了技术手段。高性能数控机床有其自身特点和要求，如何在设计阶段采用虚拟和仿真技术解决机床的关键技术，是目前机床界研究的重点课题。

为了缩短产品开发周期，降低开发成本，本课题的主要任务是在设计阶段采用有限元法完成铣头的虚拟动力学分析研究。

目前在国际领域中非常重视机械产品的虚拟动力学研究。如日本的 SHIN NIPPON KOKI Co.,Ltd 在机床产品说明书上重点强调，该机床产品是经过虚拟动力学研究的，见图 2-1。图 2-1 的左下角小图即为机床的有限元分析的网格图。

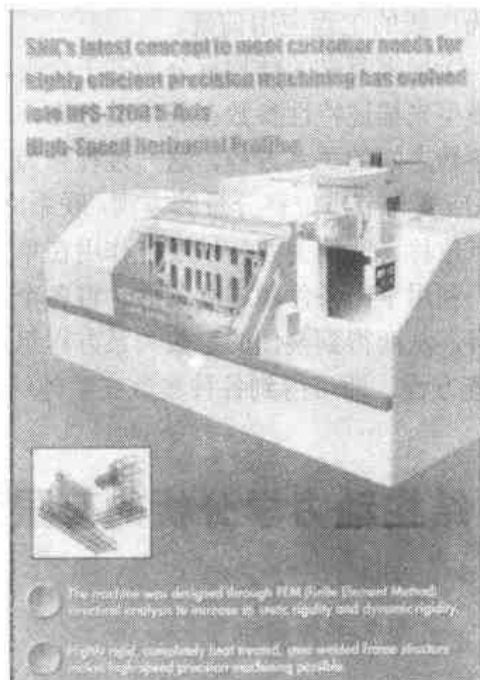


图 2-1 日本 SNK 公司的产品图

五轴加工中心主要应用于具有复杂曲面的工件的加工。在航空、航天、汽车、造船和模具制造等重要产品生产领域具有非常重要的用途。图 2-2 为五轴加工中心加工的航空产品。

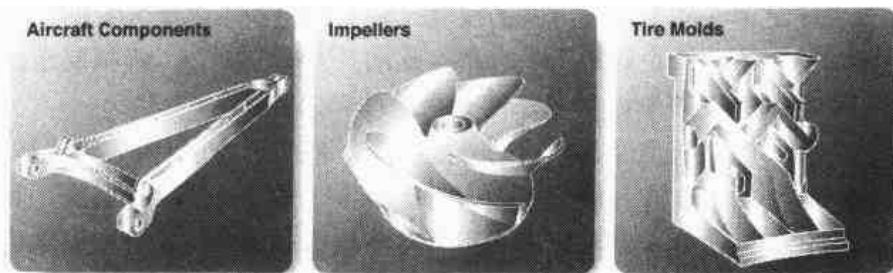


图 2-2 五轴加工中心加工的航空产品

和三轴数控加工相比，五轴加工能够实现更复杂型面工件的加工，得到更好的表面加工质量。有两种五轴加工中心的结构形式。一种是三个直线运动和两个回转运动均在工作台上实现，如图 2-3 所示。这种结构的机床目前国内已经能够自己设计制造。另一种五轴加工中心的结构是在铣头上具有 C 轴和 A 轴（或 B 轴）回转功能，见图 2-4。

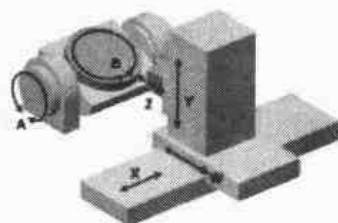


图 2-3 在工作台上具有 C 轴和 A 轴（或 B 轴）回转功能五轴加工中心

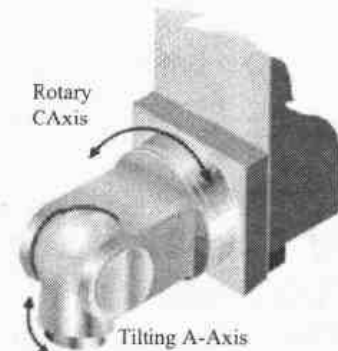


图 2-4 在铣头上具有 C 轴和 A 轴（或 B 轴）回转功能五轴加工中心

图 2-4 所示的五轴加工中心由于受机床尺寸及布局的限制，在结构上实现其技术难度要大得多。但是，这种结构的五轴加工中心还可发展为多轴结构，可用于更复杂曲面的加工，工业用途范围大，使用灵活，易于实现高速，这常是一些军工产品加工必须使用的机床设备，也是数控机床产品中具有高技术难度的产品。国内机床行业一直在寻求开发这种结构的加工中心。从 1999 年和 2000 年的机床展览会的情况来看，很多机床制造工厂正在以各种方式开发生产机床产品。比较成功的是北京第一机床厂和济南第二机床厂和国外合作生产的产品。但这些产品的主要结构关键部件是依赖进口，并没有实现真正意义上的国产化。

多年来，我们不能自己生产而受国外限制的原因很多，除了我国工业基础技术薄弱的原

因外, 研究手段落后, 缺少资金投入也是重要原因。进口一台五轴加工中心一般要 100 万美元以上, 做一台样机也要投入几百万人民币。由于国外的技术封锁, 缺乏可参考的技术资料。研究开发一台五轴加工中心需要多种方案的反复比较及试验, 也需要大量的技术投资和较长时间。因此, 国内的机床制造企业常常无力进行此项开发研制工作。虚拟制造技术的应用, 为高速五轴加工中心的开发研制提供了非常有力的技术途径。

对于五轴加工中心的核心部件, 即自动万能铣头, 目前国内正在研制。国外目前生产自动铣头且技术水平较高的主要有西班牙、意大利、瑞士、德国、法国等国家, 其中以西班牙阿德拉集团最具有代表性, 处于世界先进水平。在上述国家中, 自动万能铣头已较普遍地应用于数控滑枕铣床和数控龙门铣床, 使机床达到五轴以上联动, 实现四面或五面加工, 由于主轴转速高, 常达到 6000~40000rpm 以上, 大大提高机床的自动化水平、加工领域和工作效率。具有五面加工和五轴联动功能的铣头大大扩展了数控铣床的加工范围, 可加工其他铣头无法加工的部位, 广泛适用于模具、航空航天、船舶工业和汽车等制造领域, 提高了数控铣床的使用价值。

研制的铣头按功能可分为实现五面体加工的铣头和实现五轴联动的铣头两类, 按结构可分为机械式的铣头和电主轴式的铣头两类。采用机械传动铣头时, 转速范围在 120~6000rpm。使用高速电主轴铣头, 主轴转速可达 10000rpm 以上。

实现五面体加工的机械传动头有它自己的特点。采用机械传动, 主轴的刀具锥柄为 BT50 (直径最大, 应用面广), 主电机转速范围为 120~6000rpm, 可以满足相当大范围的零件加工, 可以进行大切削量的粗加工和精加工。

本课题以研究用于五面体加工的机械式铣头为主。因为机械式铣头的技术难度大, 机械的动态性能问题也多。相比较而言, 电主轴头的传动环节少得多。下面介绍实现五面体加工的机械式铣头。

五轴加工中心主轴系统, 分为两部分, 即滑枕部分和用于五面体加工的铣头部分。C 轴旋转和驱动装在滑枕中。该五轴加工中心主轴系统的滑枕部分是通用的, 可以连接高速电主轴万能铣头或机械传动万能铣头。

一个机床新产品的开发研制按传统的方式要经过几个阶段。产品设计——根据用户要求将设计思想变成二维图纸; 样机制造——按照设计图纸制造出实体样机; 性能实验——对制造出的样机进行性能实验, 以检验设计是否满足要求; 最后是根据实验结果进行样机评价和修改设计。这种传统的设计方法开发研制周期长, 做实体样机投资大。对于高速铣头这样的运动自由度多、性能要求高和结构复杂的机床产品可能要经过几个反复才能得到满意的结果而投入生产。

虚拟制造技术是将虚拟现实技术应用于机床新产品的设计开发。在计算机上设计出满足视觉动感效果的三维动态机床虚拟样机模型, 对模型进行虚拟实验和样机评价。其结果直接反馈修改设计虚拟样机模型。对实体机床的实验和评价过程可以完全用计算机虚拟地进行, 节约了大量样机试制投资, 也缩短了开发时间。

虚拟现实技术 (VRT) 是利用计算机生成一个三维空间, 用户置身于该环境中, 借助轻便的多维输入输出设备, 并根据由此产生的一种身临其境的感觉, 去感知和研究客观世界的变化规律。用户在虚拟的环境中可以“自由”运动, 任意观测周围的景物。

虚拟制造技术不消耗现实资源和能量, 使生产部门的产品变为可视的虚拟产品, 但它具

有真实产品所必须具备的所有特征。通过装配模型软件的使用,产品设计人员还可以检查部件间的间隙和部件间相互运动的干扰,并在现实加工之前,建立整个产品虚拟工作原型,对此虚拟原型进行虚拟实验分析,如固有振动特性分析和动力响应特性分析等,如果设计不符合要求,可以十分方便地更改模型或重新生成模型。

机床典型的虚拟研究有:机构运动分析的虚拟运动学研究;动态性能分析的虚拟动力学研究;虚拟热性能分析研究等。

本课题研究的铣头的主传动轴是高速运转的,对于现代机床来说,高速切削比常规切削具有下列优点:(1)随切削速度的提高,进给速度也可相应提高,以便基本保持每齿切削厚度不变,单位时间内的材料去除率可大大增加,极大地提高了加工生产率;(2)在切削速度增加到一定值后,切削力可降低30%以上,尤其是径向切削力的大幅度减少,特别有利于提高薄壁件等刚性差的零件的加工精度;(3)在高速切削状态下,95%以上的切削热还来不及传给工件时,就被切屑迅速带走,工件基本上保持冷态,因而特别适合于加工容易热变形的零件;(4)高速切削时,机床的激振频率特别高,它远远离开了机床关键零部件的基本阶固有振动频率范围,使机床工作平稳振动小,因而能加工出非常精密且光洁的零件;(5)采用高速切削可以得到很高的零件加工表面质量,可以达到磨削的水平;(6)高速切削可以加工常规切削无法加工的高硬度材料,可取代磨床加工;(7)可以在无冷却的情况下进行干切削。但高速度带来更多的机床动态性能问题,如振动、噪声、热变形等。故虚拟动力学研究已成为高速机床设计必不可少的环节。虚拟动力学研究可分为虚拟刚体动力学研究和虚拟弹性体动力学研究。

虚拟刚体动力学研究是将电机转速、功率和切削力等机床运行参数加载在机床数字样机上,并且可以不断改变参数,试验机床数字样机在不同载荷下的运行情况。

虚拟弹性体动力学研究目的是得到机床的动态特性参数,如固有振动频率、动力响应位移、动力响应应力和噪声指标等。它主要借助于大型有限元分析软件,本课题使用的是ANSYS5.7软件。进行虚拟弹性体动力学研究使用的模型已不是立体数字样机模型,而是样机模型经过二次建模所得到的力学和数学模型。二次建模是针对机床产品的特点而采用的虚拟现实技术,根据不同的分析任务,需要建立不同的模型。建模需要考虑多种因素的影响。

本课题虽然是针对高速铣头的虚拟动力学研究,但其中的分析方法易于推广到其他各类机床的开发研究中,故本课题的研究方法及结论具有广泛的工程意义。

下面分固有振动特性和响应特性两方面介绍动力学分析的基本理论。

2.2.2 固有振动特性

固有振动特性分析是通过研究无阻尼的自由振动,得到振动系统的自然属性,即固有频率和振型。

要研究高速铣头系统的固有振动特性,首先要建立该系统的动力方程。多自由度的运动微分方程可以应用牛顿第二定律,达朗伯原理,拉格朗日方程和哈密顿原理等来建立。

根据达朗伯原理,只要引入相应的惯性力,就可以将弹性体的动力问题化为相应的静力问题,即化为弹性体的平衡问题来处理。

将弹性体分割成有限个元素,因为位移和时间有关,以 $\{u(t)\}_e$ 表示元素 e 上的节点位移列

向量，它是时间 t 的函数。利用所给定的位移插值方式，元素 e 中任意一点的位移 $\{f(t)\}$ 可以用下面的矩阵方程来表示：

$$\{f(t)\} = [N]\{x(t)\}^e \quad (2-1)$$

其中 $[N]$ 是形函数矩阵。

在元素 e 上的应变向量为：

$$\{\varepsilon(t)\}^e = [B]\{x(t)\}^e \quad (2-2)$$

其中 $[B]$ 为联系应变与节点位移的矩阵，称几何矩阵。

因此，在元素 e 上应力为：

$$\{\sigma(t)\}^e = [D]\{\varepsilon(t)\}^e = [D][B]\{x(t)\}^e \quad (2-3)$$

$[D]$ 为弹性矩阵，亦称为材料矩阵。

因此，在元素 e 上的元素刚度矩阵为：

$$[K]^e = \iiint_e [B]^T [D] [B] \quad (2-4)$$

元素 e 上的元素负荷向量应由下面几部分组成。一部分是由作用在元素 e 上的动载荷构成的元素负荷，它按通常的办法来形成，但由于此时载荷是时间 t 的函数，由此形成的元素负荷向量也与时间 t 有关，记为 $\{F(t)\}^e$ 。另一部分是由此元素上的惯性力所构成的负荷向量。 $\{f(t)\}$ 表示加速度向量，设 ρ 为物体的密度，则单位体积中的惯性力即惯性密度为：

$$\{P(t)\}_{\text{惯}} = -\rho\{\ddot{f}(t)\} \quad (2-5)$$

由此可得惯性体积力所产生的元素负荷向量为：

$$\{F(t)\}_{\text{惯}}^e = -\iiint_e \rho [N]^T \{\ddot{f}(t)\} dN \quad (2-6)$$

将式 (2-1) 代入得：

$$\{F(t)\}_{\text{惯}}^e = -\iiint_e \rho [N]^T [N] dN \{x(t)\}^e \quad (2-7)$$

即为：

$$[M]^e = \iiint_e \rho [N]^T [N] dN \quad (2-8)$$

$[M]^e$ 为元素的质量矩阵，于是上式又可写为：

$$\{F(t)\}_{\text{惯}}^e = -[M]^e \{\ddot{x}(t)\}^e \quad (2-9)$$

如果当弹性体振动时，还有正比于速度 $\{\dot{f}(t)\}$ 的阻尼力，则还应考虑阻尼力对节点负荷向量的贡献。设阻尼系数为 γ ，则单位体积上所受的阻尼力，即阻尼密度为：

$$\{P(t)\}_{\text{阻}} = -\gamma \{\dot{f}(t)\} \quad (2-10)$$

由此可得其所产生的元素负荷向量为:

$$\{F(t)\}_{\text{阻}}^e = -\iiint_e \gamma [N]^T \{\dot{f}(t)\} dN = -\iiint_e \gamma [N]^T [N] dN \{\dot{x}(t)\}^e \quad (2-11)$$

$$\text{即} \quad [C]^e = \iiint_e \gamma [N]^T [N] dN, \quad (2-12)$$

$[C]^e$ 为元素的阻尼矩阵, 上式又可写为:

$$\{F(t)\}_{\text{阻}}^e = -[C]^e \{\dot{x}(t)\}^e \quad (2-13)$$

$\{\delta(t)\}$ 为整个弹性体上的节点位移列向量, 并将元素刚度矩阵 $[K]^e$ 按相应的“贡献”叠加而得到总刚度矩阵, 相应的也可得到总质量矩阵 $[M]$ 及总阻尼矩阵 $[C]$ 。即:

$$\begin{cases} [K] = \sum_{e=1}^{e_0} [K]^e \\ [M] = \sum_{e=1}^{e_0} [M]^e \\ [C] = \sum_{e=1}^{e_0} [C]^e \end{cases} \quad (2-14)$$

矩阵 $[K]$, $[M]$ 和 $[C]$ 称为刚度矩阵, 质量矩阵和阻尼矩阵。

其中 e_0 为元素的总数, 则总负荷量为:

$$\{F(t)\} = [M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} \quad (2-15)$$

其中 $\{F(t)\}$ 为由元素负荷向量 $\{F(t)\}^e$ 按相应的“贡献”叠加而得到的节点负荷向量, 即:

$$\{F(t)\} = \sum_{e=1}^{e_0} \{F(t)\}^e \quad (2-16)$$

于是, 由达朗伯原理, 就有:

$$[K] \{x(t)\} = \{F(t)\} - [M] \{\ddot{x}(t)\} - [C] \{\dot{x}(t)\} \quad (2-17)$$

$$\text{即:} \quad [M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2-18)$$

这就是弹性体的动力方程, 即用有限元素法来解弹性体的动力问题的基本方程。

对于无阻尼无外载荷的自由振动问题阻尼项和外力项均为零。于是, 动力方程成为:

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = 0 \quad (2-19)$$

由于弹性体的自由振动总可以分解为一系列简谐振动的叠加，为了决定弹性体自由振动的固有频率及相应的振型，考虑如下简谐振动的解：

$$\{\delta(t)\} = \{g\} \sin \omega t \quad (2-20)$$

其中 $\{g\}$ 是位移 $\{\delta(t)\}$ 的振幅列向量，它与时间 t 无关， ω 是固有圆频率， t 是时间。将式 (2-20) 代入 (2-19) 中并消去 $\sin \omega t$ 因子，就得到：

$$([K] - \omega^2 [M])\{g\} = 0 \quad (2-21)$$

于是，要找如式 (2-20) 的简谐振动就化为要 ω^2 和非零向量 $\{g\}$ ，使其满足 (2-21) 式。这样的问题称为广义特征值问题，而这样的 ω^2 和 $\{g\}$ 分别称为广义特征值和广义特征向量，求得的 ω 就是振动的圆固有频率， $\{g\}$ 就给出相应的振型。

由于物体的密度 $\rho > 0$ ，因此由式 (2-8) 定义的元素的质量矩阵 $[M]^e$ 以及由式 (2-8) 定义的总质量矩阵 $[M]$ 均是对称正定阵。

此外，刚度矩阵 $[K]$ 在未经过划行划列处理时是对称半正定阵。若在实际问题中有位移约束条件，建立了位移约束条件且排除刚体位移时，在经过划行划列处理后的刚度矩阵 $[K]$ 就是对称正定阵。

即： $\lambda = \omega^2 \quad (2-22)$

可将式 (2-21) 改写为： $([K] - \lambda[M])\{g\} = 0 \quad (2-23)$

由于 $\{g\}$ 是非零向量，故由上式中 $([K] - \lambda[M])$ 的行列式应等于零，即：

$$\det([K] - \lambda[M]) = \begin{vmatrix} K_{11} - \lambda M_{11} & K_{12} - \lambda M_{12} & \dots & K_{1n} - \lambda M_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} - \lambda M_{n1} & K_{n2} - \lambda M_{n2} & \dots & K_{nn} - \lambda M_{nn} \end{vmatrix} = 0 \quad (2-24)$$

它称为广义特征值方程。如果矩阵 $[K]$ 的阶数为 n ，那么由行列式展开公式可知，广义特征方程 (2-24) 是 λ 的 n 次代数方程，因此可决定 n 个广义特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

可以证明，若刚度矩阵 $[K]$ 是对称正定阵，则这些广义特征值是正实数，因此由式 (2-22) 可以决定出弹性体的 n 个固有圆频率值：

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2-25)$$

而 n 就是用有限元法求解的节点位移参数的总自由度。

显然特征值仅取决于系统本身的刚度，质量等物理参数。 n 个自由度的系统有 n 个固有频率。

2.2.3 动力响应特性

下面介绍无阻尼响应特性。 n 自由度无阻尼系统的强迫振动方程如下：

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{P(t)\} \quad (2-26)$$

式中 $\{P(t)\} = \{P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t)\}^T$ ，为任意激振力向量。

式 (2-26) 实质上是一个二阶常系数线性微分方程, 可用常规解法或数值解法。在数值解法中常用直接积分和模态叠加两种方法。本文采用模态叠加法解式 (2-26) 以求出关键零件的响应位移和响应应力。在本课题中主要研究主轴的响应特性。铣削工件时, 铣刀的每一个刀齿切削工件时, 工件给高速旋转的铣刀一个冲击力。加给主轴的激振力就是这个冲击力。

设 $\{\psi_i\}$ 为通过正则化得到的第 i 阶正则振型, 以 n 个正则振型作为列而得到正则振型矩阵 $[\psi]$, 即

$$[\psi] = [\{\psi_1\} \{\psi_2\} \dots \{\psi_n\}] \quad (2-27)$$

以正则振型矩阵 $[\psi]$ 为变换矩阵, 作如下变换:

$$\{x(t)\} = [\psi] \{\xi(t)\} \quad (2-28)$$

式中 $\{\xi(t)\}$ 为结构系统的正则坐标。

则正则坐标下的强迫振动方程为

$$[\psi]^T [M] [\psi] \{\ddot{\xi}(t)\} + [\psi]^T [K] [\psi] \{\xi(t)\} = [\psi]^T \{P(t)\} \quad (2-29)$$

上式可写成

$$[I] \{\ddot{\xi}(t)\} + [\wedge] \{\xi(t)\} = \{R(t)\} \quad (2-30)$$

式中 $[I]$ 为单位矩阵, $[\wedge]$ 为特征值矩阵, 既

$$[\wedge] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & 0 \\ & \omega_2^2 & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

式 (2-30) 中 $\{R(t)\}$ 是正则坐标下的激振力, 为

$$\{R(t)\} = \begin{Bmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ \dots \\ R_n(t) \end{Bmatrix} = [\psi]^T \{P(t)\} = \begin{Bmatrix} \{\psi_1\}^T \{P(t)\} \\ \{\psi_2\}^T \{P(t)\} \\ \dots \\ \{\psi_n\}^T \{P(t)\} \end{Bmatrix} \quad (2-32)$$

显然, 式 (2-30) 已经解耦, 其中第 i 个方程为

$$\ddot{\xi}_i(t) + \omega_i^2 \xi_i(t) = R_i(t) \quad (2-33)$$

假定初始时刻 $t=0$ 时系统的位移和速度分别为

$$\{x(0)\} = \{x_0\}; \quad \dot{\{x(0)\}} = \{\dot{x}_0\} \quad (2-34)$$

其中

$$\{x_0\} = \{x_1(0)x_2(0)\dots x_n(0)\}^T \quad (2-35)$$

$$\{\dot{x}_0\} = \{\dot{x}_1(0)\dot{x}_2(0)\dots\dot{x}_n(0)\}^T \quad (2-36)$$

由单自由度系统的振动理论, 得知在上述初始条件下, 系统在第 i 个正则坐标下的响应是

$$\xi_i(t) = \xi_i(0)\cos(\omega_i t) - \frac{\dot{\xi}_i(0)}{\omega_i}\sin(\omega_i t) + \frac{1}{\omega_i} \int_0^t R_i(\tau)\sin\omega_i(t-\tau)d\tau \quad (2-37)$$

式中 $\xi_i(0)$ 和 $\dot{\xi}_i(0)$ 可以由式 (2-28) 和 (2-34) 得出。

由式 (2-28) 可求出物理坐标下系统对任意激励的响应为

$$\{x(t)\} = [\psi]\{\xi(t)\} = [\{\psi_1\}\{\psi_2\}\dots\{\psi_n\}] \begin{Bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \{\psi_i\}\xi_i(t) \quad (2-38)$$

如果以一般振型矩阵 $[\Phi]$ 代替正则振型矩阵 $[\psi]$, 作如下坐标变换

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{\eta(t)\} \quad (2-39)$$

式中 $\{\eta(t)\}$ 为结构系统的主坐标; 而 $[\Phi] = [\{\phi_1\}\{\phi_2\}\dots\{\phi_n\}]$ 。

则主坐标下的强迫振动方程为

$$[\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{\eta}(t)\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{\eta(t)\} = [\Phi]^T\{P(t)\} \quad (2-40)$$

或写为

$$[M_p]\{\ddot{\eta}(t)\} + [K_p]\{\eta(t)\} = \{Q(t)\} \quad (2-41)$$

其中 $\{Q(t)\}$ 是主坐标下的激振力, 为

$$\{Q(t)\} = \begin{Bmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \\ \vdots \\ Q_n(t) \end{Bmatrix} = [\Phi]^T\{P(t)\} = \begin{Bmatrix} \{\phi_1\}^T\{P(t)\} \\ \{\phi_2\}^T\{P(t)\} \\ \vdots \\ \{\phi_n\}^T\{P(t)\} \end{Bmatrix} \quad (2-42)$$

在主坐标下

$$[M_p] = [\Phi]^T [M] [\Phi] = \begin{bmatrix} M_{p1} & & & 0 \\ & M_{p2} & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & M_{pn} \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$[K_p] = [\Phi]^T [K] [\Phi] = \begin{bmatrix} K_{p1} & & & 0 \\ & K_{p2} & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & K_{pn} \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

即质量矩阵 $[M_p]$ 和刚度矩阵 $[K_p]$ 都是对角阵,式(2-41)的 n 个方程以解耦,其中第 i 个方程为

$$M_{pi} \ddot{\eta}_i(t) + K_{pi} \eta_i(t) = Q_i(t) \quad (2-45)$$

或写为

$$\ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = \frac{1}{M_{pi}} Q_i(t) \quad (2-46)$$

由式(2-43)可知,一般的振型矩阵的逆矩阵为

$$[\Phi]^{-1} = [M_p]^{-1} [\Phi]^T [M] \quad (2-47)$$

由式(2-39)和(2-47)可知

$$\{\eta(t)\} = [\Phi]^{-1} \{x(t)\} = [M_p]^{-1} [\Phi]^T [M] \{x(t)\} \quad (2-48)$$

于是主坐标下的初始条件为

$$\{\eta(0)\} = [M_p]^{-1} [\Phi]^T [M] \{x_0\} \quad (2-49)$$

$$\{\dot{\eta}(0)\} = [M_p]^{-1} [\Phi]^T [M] \{\dot{x}_0\} \quad (2-50)$$

这样,系统在第 i 个主坐标的响应为

$$\eta_i(t) = \eta_i(0) \cos(\omega_i t) + \frac{\dot{\eta}_i(0)}{\omega_i} \sin(\omega_i t) + \frac{1}{M_{pi} \omega_i} \int_0^t Q_i(\tau) \sin \omega_i(t - \tau) d\tau \quad (2-51)$$

其中

$$\eta_i(0) = \frac{1}{M_{pi}} \{\phi_i\}^T [M] \{x_0\} \quad (2-52)$$

$$\dot{\eta}_i(0) = \frac{1}{M_{P_i}} \{\phi_i\}^T [M] \{\dot{x}_0\} \quad (2-53)$$

最后，将式(2-51)代入式(2-39)，便得到以物理坐标描述的系统对任意激励的响应。假设 $\{P(t)\}$ 中各作用力是频率相同的简谐激励力，即

$$\{P(t)\} = \{P_0\} \sin \omega t \quad (2-54)$$

其中 $\{P_0\}$ 是表示激振力幅值的常数列向量，现在来研究系统对简谐激振力的稳态响应。即

$$\{Q_0\} = [\Phi]^T \{P_0\} \quad (2-55)$$

由式(2-42)得知 $\{Q_0\}$ 的第 i 个元素是 $Q_{0i} = \{\phi_i\}^T \{P_0\}$ ，这时式(2-45)成为

$$M_{P_i} \ddot{\eta}_i(t) + K_{P_i} \eta_i(t) = Q_{0i} \sin \omega t \quad (2-56)$$

设 $\eta_i(t) = A_i \sin \omega t$ ，代入上式得

$$A_i = \frac{Q_{0i}}{K_{P_i} - \omega^2 M_{P_i}} = \frac{Q_{0i}}{K_{P_i}} \frac{1}{1 - r_i^2} \quad (2-57)$$

其中 r_i 是激励频率与系统第 i 阶固有频率之比，即

$$r_i = \frac{\omega}{\omega_i} \quad (2-58)$$

于是系统在第 i 个主坐标的稳态响应为

$$\eta_i(t) = \frac{Q_{0i}}{K_{P_i}} \frac{1}{1 - r_i^2} \sin \omega t \quad (2-59)$$

将各个主坐标的稳态响应代入公式(2-21)，便得到系统对简谐激励的稳态响应为

$$\begin{aligned} \{x(t)\} &= [\Phi] \{\eta(t)\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \eta_i(t) \\ &= \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \frac{Q_{0i}}{K_{P_i}} \frac{1}{1 - r_i^2} \sin \omega t \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\{\phi_i\} \{\phi_i\}^T}{K_{P_i} (1 - r_i^2)} \{P_0\} \sin \omega t \end{aligned} \quad (2-60)$$

当 $\omega \approx \omega_s$ 时，第 s 阶主振动的振幅会变得很大，即系统发生了第 s 阶共振，这时上式可写为

$$\{x(t)\} \approx \{\phi_s\} \frac{\{\phi_s\}^T \{P_0\}}{K_{P_s}(1-r^2)} \sin \omega t \quad (2-61)$$

这说明系统在第 s 阶共振时的振动形态接近于第 s 阶主振型。

2.3 温度场的有限元法

工程中的许多结构部件在高温条件下工作，温度应力是设计中不可忽略的控制因素。研究温度场的问题可以通过实测和计算的办法解决，本节主要介绍温度场问题的有限单元法的最基本的理论和方法。温度场问题也称热传导问题，一般分为两种情况来研究，即稳态温度场问题，它与时间无关，另外则是瞬态温度场问题，它与时间有关。

2.3.1 温度场问题的基本方程

在三维问题中，瞬态温度场的场变量 $\Theta(x, y, z, t)$ 在直角坐标中应满足的微分方程是

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z}) - \rho Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2-62)$$

此方程即是热量平衡方程。式中的第一项是微体升温需要的热量；第 2, 3, 4 项是由 x , y 和 z 方向传入微体的热量；最后一项是微体内热源产生的热量。微分方程表明：微体升温所需要的热量应与传入微体的热量以及微体内热源产生的热量相平衡。

另外，求解域 Ω 的温度场分布，适应满足边界条件。边界条件可分为三类，其表示如下：

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= \bar{\Theta} \dots \dots \dots (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \\ k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z &= q \dots \dots \dots (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \\ k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z &= h(\Theta_o - \Theta) \dots (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \end{aligned} \right\} \quad (2-63)$$

式中： ρ ——材料密度；

c ——材料比热；

t ——时间；

k_x, k_y, k_z ——材料沿 x, y, z 方向的热传导系数；

$Q=Q(x, y, z, t)$ ——物体内部的热源密度；

n_x, n_y, n_z ——边界外法线的方向余弦；

$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}(\Gamma, t)$ —— Γ_1 边界上的给定温度；

$q=q(\Gamma, t)$ —— Γ_2 边界上的给定热量;

h ——热系数;

$\Theta_a = \Theta_a(\Gamma, t)$ ——在自然对流条件下, 是外界环境温度;

在强迫对流条件下, 是边界层的绝热壁温度。

Ω 域的全部边界 Γ 满足:

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma$$

在 Γ_1 边界上给定温度 $\bar{\Theta}(\Gamma, t)$ 称为第一类边界条件, 它是强制边界条件。在 Γ_2 边界上给定热流量 $q(\Gamma, t)$ 称为第二类边界条件, 当 $q=0$ 时就是绝热边界条件。在 Γ_3 边界上给定对流换热的条件, 称为第三类边界条件。第二、三类边界条件是自然边界条件。

当在一个方向上, 例如 z 方向温度变化为零时, 方程 (2-63) 就退化为二维问题的热传导微分方程:

$$pc \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) - \rho Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2-64)$$

这时场变量 $\Theta(x, y, z)$ 不再是 z 的函数。场变量同时应满足的边界条件是:

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= \bar{\Theta}(\Gamma, t) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \\ k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y &= q(\Gamma, t) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \\ k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y &= h(\Theta_a - \Theta) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \end{aligned} \right\} (2-65)$$

对于轴对称问题, 在柱坐标中场函数 $\Theta(r, z, t)$ 应满足的微分方程是

$$pcr \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) - \rho r Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内})$$

边界条件是

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= \bar{\Theta}(\Gamma, t) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \\ k_r \frac{\partial \Theta}{\partial r} n_r + k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z &= q(\Gamma, t) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \\ k_r \frac{\partial \Theta}{\partial r} n_r + k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z &= h(\Theta_a - \Theta) \dots\dots\dots (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \end{aligned} \right\}$$

求解瞬态温度场问题是在初始条件下求解, 即在:

$$\Theta = \Theta_0 \quad (\text{当 } t=0)$$

条件下满足瞬态传导方程及边界条件的场函数 Θ , Θ 应是坐标和时间的函数。

如果边界上的 $\bar{\Theta}$, q , Θ_a 及内部的 Q 不随时间变化, 则经过一定时间的热交换后, 物体内部各点温度也将不再随时间而变化, 即:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = 0$$

这时瞬态热传导方程就退化为稳态热传导方程了。再由式(2-62)得到三维问题的稳态热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \rho Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2-66)$$

二维问题的稳态热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \rho Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2-67)$$

轴对称问题的稳态热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z r \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \rho r Q = 0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \quad (2-68)$$

求解稳态温度场的问题就是求满足稳态热传导方程及边界条件的场变量 Θ , Θ 只是坐标的函数, 与时间无关。

2.3.2 稳态温度场的有限元法

稳态温度场的有限单元法求解和弹性静力学问题基本相同, 在弹性力学问题中所采用的单元和相应的插值函数在此都可以使用, 主要的不同在于场变量。在弹性力学问题中, 场变量是位移, 是向量场。在热传导问题中, 场变量是温度, 是标量场。

现以二维问题为例, 说明用伽辽金法建立稳态温度场有限单元法问题的求解的一般格式。现构造一个近似场函数 $\tilde{\Theta}$, 并设 $\tilde{\Theta}$ 以满足 Γ_1 边界上的强制边界条件。将近似函数代入场方程(2-67)及 Γ_2 和 Γ_3 边界条件式中, 因 $\tilde{\Theta}$ 的相似性, 将产生余量, 即有:

$$\left. \begin{aligned} R_{\Omega} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} \right) + \rho Q \\ R_{\Gamma_2} &= k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - q \\ R_{\Gamma_3} &= k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - h(\Theta_a - \tilde{\Theta}) \end{aligned} \right\} \quad (2-69)$$

用加权余量法建立有限元格式的基本思想是使余量的加权积分为零, 即:

$$\int_{\Omega} R_{\Omega} \omega_1 d\Omega + \int_{\Gamma_2} R_{\Gamma_2} \omega_2 d\Gamma + \int_{\Gamma_3} R_{\Gamma_3} \omega_3 d\Gamma = 0 \quad (2-70)$$

式中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 是全函数。上式的意义是使微分方程(2-68)和自然边界条件式在全域及边界上得到加权意义上的满足。

将式(2-69)代入(2-70)并分部积分可得出:

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \omega_1}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} \right) - \rho Q \omega_1 \right] d\Omega + \\
& \oint_{\Gamma_1} \omega_1 \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y \right) d\Gamma + \\
& \int_{\Gamma_2} \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - q \right) \omega_2 d\Gamma + \\
& \int_{\Gamma_3} \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - h(\Theta_a - \tilde{\Theta}) \right) \omega_3 d\Gamma = 0 \quad (2-71)
\end{aligned}$$

将空间域 Ω 离散为有限个单元体,在典型单元内各点的温度 Θ 可以近似地用单元的节点温度 Θ_i 插值得到:

$$\Theta = \tilde{\Theta} = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(x, y) \Theta_i = N \Theta^e$$

$$N = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_{n_e}] \quad (2-72)$$

式中 n_e 是每个单元的节点个数; $N_i(x, y)$ 是插值函数,它是 C_0 型插值函数,它亦具有性质:

$$N_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 0, & j \neq i \\ 1, & j = i \end{cases}$$

及 $\sum N_i = 1$

由于近似场函数是构造在单元中的,因此(2-71)式的积分可改写为对单元积分的总和。用伽辽金法选择全函数:

$$\omega_1 = N_j \quad (j=1, 2, \dots, n_e)$$

式中 n_e 是 Ω 域全部离散得到的节点总数。在边界上不失一般性地选择

$$\omega_2 = \omega_3 = -\omega_1 = -N_j \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

在 $\tilde{\Theta}$ 已满足强制边界条件(在解方程前引入强制边界条件修正方程),因此在 Γ_1 边界上不再产生余量,可令 ω_1 在 Γ_1 边界上为零。

将以上各式代入(2-71)则可以得到:

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial N_j}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_j}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right] \Theta^e d\Omega - \\ & \sum_e \int_{\Omega^e} \rho Q N_j d\Omega - \sum_e \int_{\Gamma_2^e} q d\Gamma - \\ & \sum_e \int_{\Gamma_3^e} N_j h \Theta_a d\Gamma + \int_{\Gamma_3^e} N_j h N \Theta^e d\Gamma = 0 \quad (j=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (2-73)$$

写成矩阵形式则有:

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{\Omega^e} \left[\left(\frac{\partial N_j}{\partial x} \right)^T k_x \frac{\partial N}{\partial x} + \left(\frac{\partial N_j}{\partial y} \right)^T k_y \frac{\partial N}{\partial y} \right] \Theta^e d\Omega + \\ & \sum_e \int_{\Gamma_3^e} h N^T N \Theta^e d\Gamma - \sum_e \int_{\Gamma_2^e} N^T q d\Gamma - \\ & \sum_e \int_{\Gamma_3^e} N^T h \Theta_a d\Gamma - \int_{\Omega^e} N^T \rho Q d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (2-74)$$

这是 n 个联立的线性代数方程组, 用以确定 n 个节点温度 Θ_i 。按照一般有限元格式可表示为:

$$K\Theta = p \quad (2-75)$$

式中 K 称为热传导矩阵; $\Theta = [\Theta_1 \Theta_2 \dots \Theta_n]^T$ 是节点温度列阵; p 是温度载荷列阵。矩阵 K 和 p 的元素分别表示如下:

$$K_{ij} = \sum_e \int_{\Omega^e} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \sum_e \int_{\Gamma_3^e} (h N_i N_j) d\Gamma \quad (2-76)$$

$$p_i = \sum_e \int_{\Gamma_2^e} N_i q d\Gamma + \sum_e \int_{\Gamma_3^e} N_i h \Theta_a d\Gamma + \sum_e \int_{\Omega^e} N_i \rho Q d\Omega \quad (2-77)$$

式 (2-76) 中的第一项是各单元对热传导矩阵的贡献, 第二项是第三类热交换条件对热传导矩阵的修正。(2-77) 式中的三项分别为给定热流、热交换以及热源引起的温度载荷。可以看出热传导矩阵和温度载荷矩阵都是由单元相应的矩阵集合而成。可将式 (2-76) 和式 (2-77) 改写成单元集成的形式:

$$K_{ij} = \sum_e K_{ij}^e + \sum_e H_{ij}^e \quad (2-78)$$

$$p_i = \sum_e p_{qi}^e + \sum_e p_{hi}^e + \sum_e p_{Qi}^e \quad (2-79)$$

式中:

$$K_{ij}^e = \sum_e \int_{\Omega^e} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$H_{ij}^e = \int_{\Gamma_3^e} h N_i N_j d\Gamma$$

$$P_{qi}^e = \sum_e \int_{\Gamma_3^e} N_i q d\Gamma$$

$$P_{Hi}^e = \sum_e \int_{\Gamma_3^e} N_i h \Theta d\Gamma$$

$$P_{Qi}^e = \int_{\Omega^e} N_i \rho Q d\Omega$$

以上就是二维稳定传导问题有限元的一般格式。

现以平面 3 节点三角形单元为例来说明稳态温度场问题的有限元法的基本思路。

其插值函数为：

$$N_i = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (i, j, m) \quad (2-80)$$

对于任一单元 ijm ，热传导矩阵元素为：

$$K_{ij}^e = \frac{k_x}{4A} b_i b_j + \frac{k_y}{4A} c_i c_j \quad (2-81)$$

单元热传导矩阵为：

$$K^e = \frac{k_x}{4A} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_j b_j & b_j b_j & b_j b_m \\ b_m b_m & & b_m b_m \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4A} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_j c_j & c_j c_j & c_j c_m \\ c_m c_m & & c_m c_m \end{bmatrix} \quad (2-82)$$

对于具有第三边界条件的边界单元，如 rsp 单元，除按上式计算单元热矩阵外，还应计算由于第三类边界条件引起的对热传导矩阵的修正。

$$\begin{cases} H_{sr}^e = H_{rs}^e = \int_l h N_r N_s dl = \frac{1}{6} hL \\ H_{rr}^e = H_{ss}^e = \int_l h N_3^2 dl = \frac{1}{3} hL \end{cases} \quad (2-83)$$

式中 L 是对流边界 rs 的边长。若单元中只有 rs 边为对流换热边界，则对单元热传导矩阵的修正是：

$$H^e = \frac{1}{6} hL \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-84)$$

单元节点编码顺序是 r, s, p 。

当热源密度 Q 以及给定热量 q 都是常量时，单元的温度载荷为：

$$P_Q^e = \frac{1}{3} \rho Q A \quad (i, j, m)$$

$$p_{hi}^e = \frac{1}{2} h \Theta L \quad (i=r,s) \quad (\text{当 } \Gamma_3 \text{ 为 } r-s \text{ 边时})$$

$$p_{qi}^e = \frac{1}{2} q L \quad (i=r,s) \quad (\text{当 } \Gamma_2 \text{ 为 } r-s \text{ 边时})$$

2.3.3 瞬态温度场的有限元法

瞬态温度场与稳态温度场主要的差别是瞬态温度场的场函数不仅仅是空间域 Ω 的函数, 而且是时间的函数。但是时间和空间两种域并不耦合, 因此建立有限元格式时可以采用部分离散的方法。

仍以二维问题为例来建立瞬态温度场有限元的一般格式。首先将空间域 Ω 离散为有限个单元体, 在典型单元内温度 Θ 仍可以近似地用节点温度 Θ_i 插值得到, 但要注意此时节点温度是时间的函数, 即:

$$\Theta = \tilde{\Theta} = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(x, y) \Theta_i(t) \quad (2-85)$$

插值函数 N_i 只是空间域的函数, 它与以前讨论的问题一样, 也应具有插值函数的基本性质。构造 $\tilde{\Theta}$ 时已满足 Γ_1 上的边界条件, 因此上式代入场方程和边界条件时将产生余量:

$$R_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} \right) + \rho Q - \rho c \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial t} \quad (2-86)$$

$$R_{\Gamma_2} = k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - q \quad (2-87)$$

$$R_{\Gamma_3} = k_x \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial y} n_y - h(\Theta_a - \tilde{\Theta}) \quad (2-88)$$

令余量的加权积分为零, 即:

$$\int_{\Omega} R_{\Omega} \omega_1 d\Omega + \int_{\Gamma_2} R_{\Gamma_2} \omega_2 d\Gamma + \int_{\Gamma_3} R_{\Gamma_3} \omega_3 d\Gamma = 0 \quad (2-89)$$

按伽辽金法选择权函数:

$$\omega_1 = N_j \quad (j=1, 2, \dots, n_e)$$

$$\omega_2 = \omega_3 = -\omega_1$$

与稳态温度场建立有限元格式的过程类同, 经分部积分后可以得到用以确定 n 个节点温度 Θ_j 的矩阵方程:

$$C \dot{\theta} + K \theta = p \quad (2-90)$$

这是一组以时间 t 为独立变量的线性常微分方程组。式中 C 是热容矩阵, K 是热传导矩阵, C 和 K 都是对称正定矩阵。 p 是温度载荷矩阵, θ 是节点温度矩阵, $\dot{\theta}$ 是节点温度对时间的导数列阵, $\dot{\theta} = d\theta/dt$ 。矩阵 K , C 和 P 的元素由单元相应的矩阵元素集成。

$$\left. \begin{aligned} K_{ij} &= \sum_e K_{ij}^e + \sum_e H_{ij}^e \\ C_{ij} &= \sum_e C_{ij}^e \\ p_i &= \sum_e p_{Qi}^e + \sum_e p_{qi}^e + \sum_e p_{Hi}^e \end{aligned} \right\} \quad (2-91)$$

单元的矩阵元素由下列各式给出:

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} (k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}) d\Omega \quad (2-92)$$

是单元对热传导矩阵的贡献;

$$H_{ij}^e = \int_{\Gamma_3^e} h N_i N_j d\Gamma \quad (2-93)$$

是单元热换边界对热传导矩阵的修正;

$$C_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \rho c N_i N_j d\Omega \quad (2-94)$$

是单元对热容矩阵的贡献;

$$p_{Qi}^e = \int_{\Omega^e} \rho Q N_i N_j d\Omega \quad (2-95)$$

是单元热源产生的温度载荷;

$$p_{qi}^e = \int_{\Gamma_2^e} q N_i d\Gamma \quad (2-96)$$

是单元给定热流边界的温度载荷;

$$p_{Hi}^e = \int_{\Gamma_3^e} h \Theta_a N_i d\Gamma \quad (2-97)$$

是单元对流换热边界的温度载荷。

至此, 已将时间域和空间域的偏微分方程问题在空间域内离散为 n 个节点温度 $\Theta(t)$ 的常微分方程的初值问题。对于给定温度的边界 Γ_1 上的 n_1 个节点, 方程组中相应的式子应引入以下条件

$$\Theta_i = \bar{\Theta}_i \quad (i=1,2,\dots,n)$$

式中 i 是 Γ_1 上 n_1 个节点的编号。

第 3 章

ANSYS 建模

3.1 模型生成概述

3.1.1 什么是模型生成

有限元分析的最终目的是要还原一个实际工程系统的数学行为特征，换句话说分析必须是针对一个物理原型的准确的数学模型。广义上讲，模型包括所有的节点、单元、材料属性、实常数、边界条件，以及其他用来表现这个物理系统的特征。在 ANSYS 术语中，模型生成一般狭义地指用节点和单元表示空间体域及实际系统连接的生成过程。因此，在这里讨论的模型生成指模型的节点和单元的几何造型。ANSYS 程序为用户提供了下列生成模型的方法：

- 用 ANSYS 创建一个实体模型
- 利用直接生成方法
- 输入在计算机辅助设计 (CAD) 系统创建的模型

3.1.2 ANSYS 中建模的典型步骤

通常的建模过程应该遵循以下要点：

- 开始确定分析方案。在开始进入 ANSYS 之前，首先确定分析目标，决定模型采取什么样的基本形式，选择合适的单元类型，并考虑如何能建立适当的网格密度。
- 进入前处理 (PREP7) 开始建立模型。多数情况下，将利用实体建模创建模型。
- 建立工作平面。
- 利用几何元素和布尔运算操作生成基本的几何形状。
- 激活适当的坐标系。
- 用自底向上方法生成其他实体，即先定义关键点，然后再生成线、面和体。
- 用布尔运算或编号控制将各个独立的实体模型域适当地连接在一起。
- 生成单元属性表 (单元类型、实常数、材料属性和单元坐标系)。
- 设置单元属性指针。
- 设置网格划分控制以建立想要的网格密度，这个步骤并不总是必要的，因为进入了

ANSYS 程序有缺省设置单元尺寸存在（参见第 7 章）（若需用自动网格划分功能，此时应退出前处理（PREP7），激活自适应网格划分）。

- 通过对实体模型划分网格来生成节点和单元。
- 在生成节点和单元之后，再定义面与面的接触单元，自由度耦合及约束方程等。
- 把模型数据存为 Jobname.DB。
- 退出前处理。

3.1.3 实体建模和直接生成的比较

可以用两种方法来生成模型：实体建模和直接生成。对于实体建模，描述模型的几何边界，建立对单元大小及形状的控制，然后令 ANSYS 程序自动生成所有的节点和单元。与之对比，用直接生成方法，在定义 ANSYS 实体模型之前，必须确定每个节点的位置，及每个单元的大小、形状和连接。

尽管有些数据自动生成是可能的，直接生成方法基本上是依次传递的，这种方法要求在建立有限元网格时记录所有的节点号。这种详细的记录对于大模型来说是乏味的，并很可能出错。实体建模一般比直接生成方法更加有效和通用，是一般建模的首选方法。

尽管实体建模有诸多优点，有时会碰到直接生成更方便的情形。用户可以在直接生成与实体建模间方便地来回转换，对模型的不同部分采取适当的不同建模技术。

实体建模的优点：

- 对于庞大或复杂的模型，特别是对三维实体模型更合适。
- 相对而言需处理的数据少一些。
- 容许对节点和单元不能进行的几何操作（如拖拉和旋转）。
- 支持使用面和体素（如多边形面和圆柱体）及布尔运算（相交、相减等）以顺序建立模型。
- 便于使用 ANSYS 程序的优化设计功能。
- 是自适应网格划分所需的。
- 为便于施加载荷之后进行局部网格细化所要求的（实体模型加载也需要如此）。
- 便于几何上的改进。
- 便于改变单元类型，不受分析模型的限制。

实体建模的缺点：

- 有时需要大量的 CPU 处理时间。
- 对小型、简单的模型有时很繁琐，比直接生成需要更多的数据。
- 在特定的条件下可能会失败（程序不能生成有限元网格）。

直接生成的优点：

- 对小型或简单模型的生成较方便。
- 使用户对几何形状及每个节点和单元的编号有完全的控制。

直接生成的缺点：

- 除最简单的模型外往往比较耗时，大量需要处理的数据可能令人难以忍受。
- 不能用自适应网格划分。

- 使优化设计变得不方便。
- 改进网格划分十分困难（诸如面网格细化，SmartSizing 等工具均不能使用）。
- 可能是十分乏味的，需要用户留意网格划分的每一个细节；更容易出错。

3.1.4 从 CAD 系统中输入的实体模型

代替在 ANSYS 中建模，可在用户擅长的 CAD 系统中建模并把它输入 ANSYS 中进行分析。

它有如下优点：

- 避免了重复对现有 CAD 模型的劳动而生成待分析的实体模型。
- 工程师可利用熟悉的工具去建模。

但是，从 CAD 系统中输入的模型如果不适于网格划分则需要大量的修补工作。

3.2 规划分析方案

3.2.1 规划的重要性

当你开始建模时，用户将（有意地或无意地）作许多决定以确定如何来对物理系统进行数值模拟：分析的目标是什么；模型是全部或仅是物理系统的部分；模型将包含多少细节；选用什么样的单元；有限元网格用多大的密度；总之，你将对要回答问题的计算费用及结果的精度进行平衡考虑。你在规划阶段作出的这些决定将大体上控制你分析的成功与否。

3.2.2 确定分析目标

确定分析目标的工作与 ANSYS 程序的功能无关，完全取决于用户的知识、经验及职业技能，只有用户才能确定自己的分析目标，开始时建立的目标将影响用户生成模型时的其他选择。

3.2.3 选择模型类型（二维、三维等）

有限元模型可分为二维和三维两种。可以由点单元、线单元、面单元或实体单元组成，当然，也可以将不同类型的单元混合使用（注意要保证自由度的相容性）。例如，带筋的薄壳结构可用三维壳单元离散蒙皮，用三维梁单元来离散蒙皮下的筋。对模型的尺寸和单元类型的选择也就决定生成模型的方法。

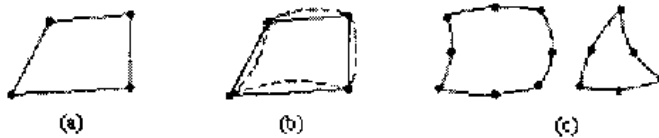
线模型代表二维和三维梁或管结构，及三维轴对称壳结构的二维模型。实体建模通常不便于生成线模型，而通常由直接生成方法创建。二维实体模型在薄平板结构（平面压力），等截面的“无限长”结构（平面应变）或轴对称实体结构。尽管许多二维分析模型用直接生成方法并不困难，但通常用实体建模更容易。

三维壳模型用于描述三维空间中的薄壁结构，尽管某些三维壳模型用直接生成方法创建并不困难，但用实体建模方法通常会更容易。

三维实体分析模型用于描述三维空间中截面积不等，也不是轴对称的厚结构。用直接生成的方法建立三维实体模型较复杂，实体建模会使其变得容易些。

3.2.4 线性单元和高次单元的选择

ANSYS 程序的单元库包括两种基本类型的面和体单元：线性单元（有或无特殊形状的）和二次单元。这些基本单元类型如图 3-1 所示，下面来探讨这两种基本类型单元的选择。

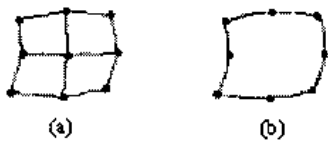


(a) 线性等参元 (b) 特殊形状的线性等参元 (c) 二次单元

图 3-1 ANSYS 程序中可用的基本面和块单元类型

线性单元（无中间节点）

对结构分析，带有附加形函数的角点单元会在合理的计算时间内得到准确的结果。当使用这些单元时，要注意防止在关键区域的退化形式。即避免在结果梯度很大或其他关注的区域使用二维三角线单元和楔形或四面体形的三维线单元。还应避免使用过于扭曲的线性单元，对于非线性结构分析，如果使用线性单元细致地而不是用二次单元相对粗糙地进行网格划分，那么将以很少的花费获得很好的精度。



(a) 线性单元 (b) 二次单元

图 3-2 网格的比较

当对弯曲壳体建模时，必须选用弯曲的（二次的）或平面（线性）的壳单元，每种选择都有其优缺点，对于多数的实际情况，主要问题利用平面单元以很少的计算时间，即可获得很高精度的结果。但是，必须保证使用足够多的平面单元来创建曲面。明显地，单元越小，准确性越好。推荐三维平面壳单元延伸不要超过 15° 的弧，圆锥壳（轴对称线）单元应限制在 10° 的弧以内（或离 Y 轴 5° ）。

对多数非结构分析（热、电磁等），线性单元几乎与高次单元有同样好的结果，而且求解费用较低。退化单元（三角形和四面体）通常在非结构分析中产生准确结果。

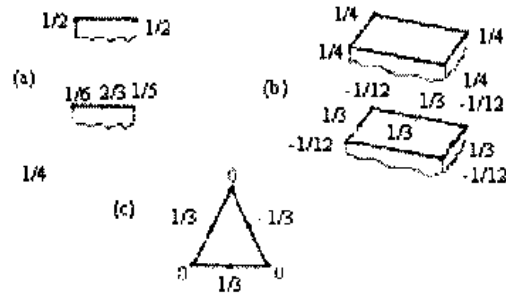
二次单元（带中间节点）

对于用退化的单元形式进行的结构分析（即二维三角形单元和楔形或三维四面体单元），二次单元通常会比线性单元的求解费用更低且产生良好的结果。

可是，为正确地使用这些单元，需要注意它们的特殊性质：

- 对于分布载荷和面压力不象线性单元按一般意义上分配到单元节点上（见图 3-3），单元的中间节点对反力也表现出相同的非直观的解释。

- 三维带中间节点的热流单元在承受对流载荷时按固定模式分配热流，在中间结点沿一个方向流动而在角点又沿另外方向流动。
- 对于结构单元，中点节点的温度如果在两相邻角点温度范围之外则要重新定义为这两角点的平均温度。
- 由于中间节点的质量也大于角节点的质点，所以通常将中间节点选为主自由度（对于减缩自由度分析）。



(a) 在一个二维单元上节点平衡分配一个均匀的单元面载荷
 (b) 在三维单元上节点平衡分配一个均匀的单位面载荷
 (c) 在三维三角形单元上节点平衡分配一个均匀的面载荷

图 3-3

- 由于质量分配不均匀，在动力分析中感兴趣的波传波技术不推荐使用带中间节点的单元。
- 不要在有中间节点的边定义一般的接触表面，也不要将间隙单元与带中间节点的边连接。类似地，对热问题，不要应用辐射连接或非线性对流表面到带有中间节点的边（实体建模的分网中提供了去掉特定的中间节点的方法）。
- 当约束一个单元（或表面）的边缘自由度时，包括中间节点在内的边缘上所有的节点都要约束（如图 3-4）。



图 3-4 在间隙或接触表面处避免中间节点

- 单元的角点只能与单元的角点相连，而不能与相邻单元的中间节点相连。相邻的单元应该有相连（或共同的）中间节点（如图 3-5）。

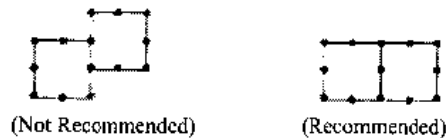


图 3-5 避免单元间中间节点与角点相连

- 对于有中间节点的单元，通常希望每一个这样的中间节点在相应角点之间直接的中点位置，可是，有时却希望出现在其他地方：
 节点沿着弯曲的几何边界通常可产生更准确的分析结果——所有的 ANSYS 网格划

分器缺省地将它们放在那里。

有的内边界也不得不弯曲以防止单元倒置或过于扭曲，ANSYS 网格划分器有时也产生这种弯曲。

用故意将中间节点偏离中心四分之一点可以模拟裂纹尖端的奇异性，利用 ANSYS 的 KSCON 命令可以产生这种特殊的面网格 (Main Menu>Preprocessor>Meshing-Size Cntrl>Concentrat KPs-Create)。

- 中间节点位置可由下面描述的单元形状测试进行检查。
除三节点三角形和四节点四面体外，所有实体和壳单元都要进行实三维空间与单元本身的自然坐标空间一致性映射的测试。雅可比比值过大表明单元过于扭曲，可能是由中间节点的位置设置不当引起的。
- 如果不给中间节点指定位置，程序会自动按线性笛卡尔坐标插值将中间节点放在两角点的中间，按此法放置的节点的节点坐标系旋转角度也是按线性插值得到的。
- 在相连单元的公共边应有相同的节点数，当混合单元类型时有必要从一个单元去除中间节点。例如，图 3-6 中的 8 节点单元与一个 4 节点单元相连时应把 8 节点单元的 N 节点去掉 (或在生成这个单元时给它一个 0 节点号)。



图 3-6 避免单元相交时中点节点不匹配

注意 程序在下列情况下会自动地将线性和二次单元共同一侧的中间节点去掉：一个面 (或体) 用线性单元划分网格 [AMESH、VMESH、FVMESH]，然后相邻面 (或体) 用二次单元划分网格。如果网格划分的次序颠倒了，中间节点则不能去掉 (先分二次单元，后分线性单元)。

去掉了中间节点意味着边缘仍保持直的，相应地导致刚度增加，建议只在转接区域使用去掉中间节点的单元，而不在增加了形函数的简化线单元处使用。如果需要，那么在产生单元之后可利用下列命令增加或去掉中间节点：

命令：EMID

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Add Mid Nodes

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Remove Mid Nd

命令：EMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Modify Nodes

- 二次单元并不比线性单元的积分点多。因此，在非线形分析中优先使用线性单元。
- 诸如平面 PLANE82 和 SHELL93 的高次四面体单元的一种网格可由于零变形产生奇异。
- 对后处理程序只用截面的角点和隐藏线显示，类似地，节点应力结果的输出和后处理只能对角节点进行。
- 在图形显示时，曲边形的中间节点单元显示为直线段 (除非使用 Powergraphics) 模

型，因此看起来比实际的要粗糙些。

3.2.5 不同单元连接的限制

在连接有不同自由度的单元时必须小心，因为在界面处可能会发生不协调的情况，当单元彼此不协调时，求解时会不同单元之间传递不适当的力或位移。

为保证协调，两个单元必须有相同的自由度。例如，它们必须有相同数目和类型的位移自由度及相同数目和类型的旋转自由度，而且，自由度必须是耦合的，即它们必须连续地穿过界面处单元的边界。

考查三个应用了不协调单元的例子：

- 单元有不同个数的自由度是不协调的，SHELL63 和 BEAM4 单元每个节点有三个平动和三个转动自由度。Solid45 单元每个节点有三个平动自由度，但缺少转动自由度。如果 Solid45 单元与 SHELL63 或 BEAM4 单元相连，相应平动自由度的节点力会传到实体块单元上。但是，相应 SHELL63 和 BEAM4 单元的转动自由度的节点位移则不会传递给 Solid 45 单元。
- 单元有相同个数的自由度也不总是协调的。BEAM3（二维弹性梁）单元和 SHELL41（薄膜壳）单元每个节点都各有三个自由度。可是，壳单元有三个平动自由度（UX、UY 和 UZ），而梁单元只有两个平动自由度（UX 和 UY），因为只有 UZ 的结果能反映壳单元的刚度，而且壳单元没有转动自由度（ROTZ）而梁单元有。与梁单元旋转自由度对应的节点位移将不会传递给壳单元，界面表现为梁象是被钉住了。
- 每个三维梁单元与三维壳单元都有 6 个自由度，可是，壳单元的 ROTZ 自由度是与平面内旋转刚度相联系的，这是一个虚构的刚度；即它不是数学计算的真实刚度，因此壳的 ROTZ 自由度不是真实的自由度（例外的是当 SHELL43 或 SHELL63 单元（两者都有 KEYOPT（3）=2）的 Allman 旋转刚度被激活时），因此对三维梁单元仅有一个节点与三维壳单元相连导致梁单元的旋转自由度与壳单元的 ROTZ 自由度对应是不协调的，不应该将梁单元与壳单元按此方式连接起来。

类似的不协调也可在不同数目和（或）类型自由度的单元之间存在。

当连接单元有协调的自由度时也有限制存在，在 SOLID72 或 SOLID73 单元与其他类型的单元连接及加在 SOLID72 或 SOLID73 单元上的刚体运动约束不足时也有出现错误结果的危险。这个问题甚至也在诸如 SOLID72 和 SOLID73 的有 6 个自由度的其他单元类型中存在，以下对 SOLID72 和 SOLID73 单元限制的叙述在 ANSYS 单元参考手册中指出了：

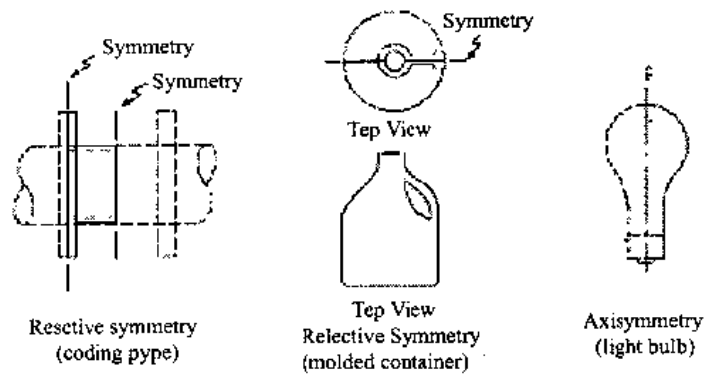
- 应当对 SOLID72 或 SOLID73 单元的节点指定刚体运动约束，因为对其他单元而不是这些实体块单元指定约束可能导致错误的结果。
- 要对至少一个节点给出全部三个转动方向的约束。

这些问题并不会使分析无效，但至少应该注意到两个不同类型单元交界的条件。

3.2.6 找到利用对称性的办法

许多物体都有某种对称，重复对称（如一个长管道上平均分布的散热片，反对称（如塑料容器的模子），或轴对称（如灯泡）。当一个物体在所有方面都是对称的（几何、载荷、约

束和材料属性)，可以利用上述事实减少模型的大小和范围（如图 3-7）。



(A) 重复对称（散热等） (B) 镜像对称（模铸容器） (C) 轴对称（灯泡）

图 3-7 对称的例子

任何表现在对一中心轴几何对称的结构（如旋转壳或实体）是轴对称。例如直管、圆锥、圆盘、圆盖等。

三维轴对称结构的模型可用二维形式等效。可以想象得到二维轴对称分析比相应的三维分析更精确。

由定义可知，一个完全轴对称模型只能施加轴对称载荷。但在很多情况下，轴对称结构实际受的并不是轴对称载荷，必须利用一种特殊的轴对称谐波单元，来建立轴对称结构二维模型的非轴对称载荷。

对轴对称结构模型的特殊要求有：

- 对称轴必须与总体笛卡尔坐标的 Y 轴重合。
- 不允许 X 方向的负节点坐标出现。
- 总体笛卡尔坐标 Y 方向代表轴向，总体笛卡尔坐标 X 方向代表径向，总体笛卡尔坐标 Z 方向代表周向。
- 模型应当用适当的单元类型组合在一起：

对轴对称模型，可用二维实体且 KEYOPT (3) =1 和（或）轴对称壳体。而且，可用不同的连接、接触、组合及表面单元并将轴对称实体和壳单元容在一个模型里（除非是轴对称实体或壳单元否则程序不会识别其他的单元）。如果 ANSYS 单元手册没有对一个特殊单元类型讨论其在轴对称结构中的应用，那么对轴对称分析不要使用此种单元类型。

- SHELL51 和 SHELL61 单元不应位于总体 Y 轴上。
- 对包含二维实体单元的模型剪切影响是重要的，在厚度方向上至少要使用两个单元。

如果结构沿对称轴包含有孔，不要忘记在 Y 轴和二维轴对称模型间留适当的距离（见图 3-8）。

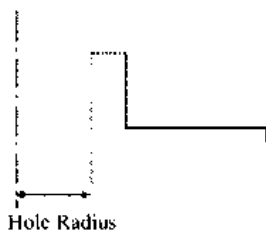


图 3-8 沿 X 方向的距离代表一个轴对称孔

3.2.7 决定包含多少细节

一些小的细节对分析来说不重要，不必在模型中体现，因为它只会使你的模型过于复杂。可是对有些结构，小的细节如倒角或孔可能是最大应力之所在，可能非常重要，取决于用户的分析目的。必须对结构的预期行为有足够的理解以对模型应包含多少细节作出适当的决定。有些情况下，仅有一点微不足道的细节破坏了结构的对称。那么，可以忽略这些细节（或相反的将它们视为对称的），以利于用更小的对称模型，必须权衡模型简化带来的好处与精度降低的代价来确定是否对一个非（拟）对称结构故意忽略其非对称细节。

3.2.8 确定合适的网格密度

有限元分析中经常碰到的问题是网格应划分得如何好才能获得合理的好结果单元。不幸的是，还没有人能给出确定的答案。你必须自己解决这个问题，关于这个问题的解决可求助于以下一些技术：

- 利用自适应网格划分产生可满足能量误差估计准则的网格（此技术只适用于线性结构静力或稳态热问题，对什么样的误差水平是可接受的依据于你的分析要求）。自适应网格划分需要实体建模。
- 与先前独立得出的实验分析或已知解析解进行对比。对已知和算得结果偏差过大的地方进行网格细化。（对所有的由四面体组成的面或体网格可用 NREFINE、EREFINE、KREFINE、LREFINE 和 AREFINE 命令（Main Menu> Preprocessor> Meshing-Modify Mesh>-Refine At-entity type）进行局部网格细化。）
- 执行一个你认为是合理的网格划分的初始分析，再在危险区域利用两倍多的网格重新分析并比较两者的结果。如果这两者给出的结果几乎相同，则网格是足够的。如果产生了显著不同的结果，应该继续细化网格直到随后的划分获得了近似相等的结果。
- 如果细化网格测试显示只有模型的一部分需要更细的网格，可以对模型进行子建模以放大危险区域。

网格划分密度很重要，如果网格过于粗糙，那么结果可能包含严重的错误，如果网格过于细致，将花费过多的计算时间，浪费计算机资源，而且模型可能过大以致于不能在你的计算机系统上运行，为避免这类问题的出现，在生成模型前应当考虑网格密度问题。

3.3 坐标系

3.3.1 坐标系的类型

ANSYS 程序提供了多种坐标系供用户选取。

- 总体和局部坐标系用来定位几何形状参数（节点、关键点等）的空间位置。
- 显示坐标系。用于几何形状参数的列表和显示。
- 节点坐标系。定义每个节点的自由度方向和节点结果数据的方法。

- 单元坐标系。确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。
- 结果坐标系。用来列表、显示或在通用后处理操作中将节点或单元结果转换到一个特定的坐标系中。

3.3.2 总体和局部坐标系

总体和局部坐标系用来定位几何体。缺省地，当定义一个节点或关键点时，其坐标系为总体笛卡尔坐标系。可是对有些模型，定义为不是总体笛卡尔坐标系的另外坐标系可能更方便。ANSYS 程序允许用任意预定义的三种（总体）坐标系的任意一种来输入几何数据，或在任何用户定义的（局部）坐标系中进行此项工作。

总体坐标系被认为是一个绝对的参考系。ANSYS 程序提供了前面定义的三种总体坐标系：笛卡尔坐标、柱坐标和球坐标。所有这三种系统都是右手系。且由定义可知有共同的原点。它们由其坐标系号来识别：0 是笛卡尔坐标，1 是柱坐标，2 是球坐标（见图 3-9）。

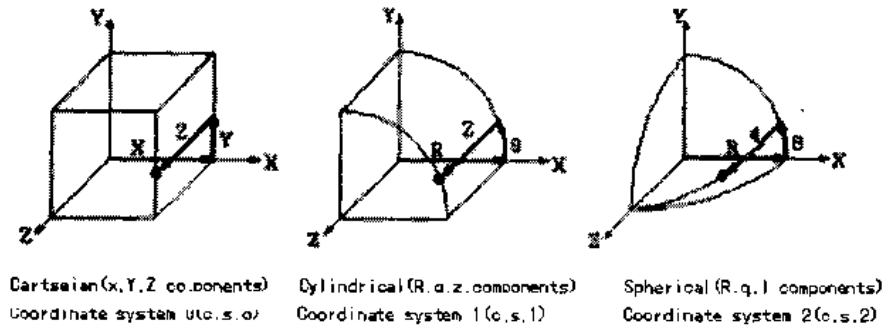


图 3-9 总体坐标系

在许多情况下，必须要建立自己的坐标系。其原点与总体坐标系的原点偏移一定的距离，或其方位不同于先前定义的总体坐标系（如图 3-10 所示定义的一个经旋转得到的坐标系）。用户可定义局部坐标系，按以下方式创建：

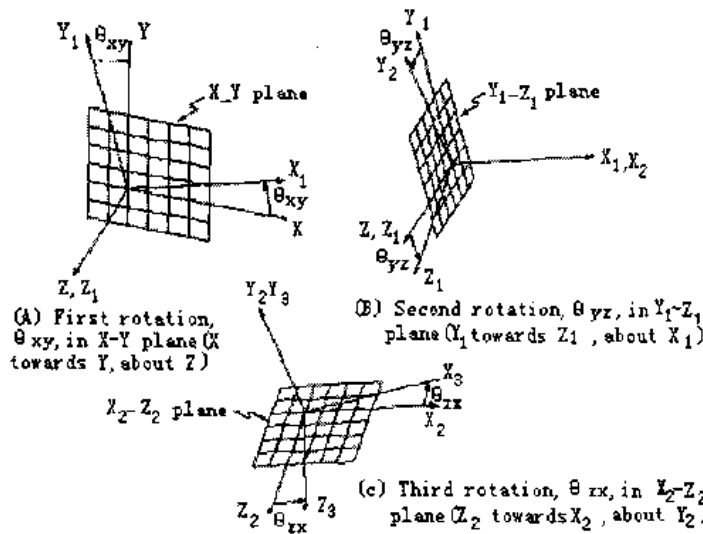


图 3-10 用于局部、节点或工作平面坐标系旋转的欧拉旋转角

按总体笛卡尔坐标定义局部坐标系。

命令: LOCAL

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At Specified Loc

通过已有节点定义局部坐标系。

命令: CS

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Nodes

通过已有关键点定义局部坐标系。

命令: CSKP

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Keypoints

以当前定义的工作平面的原点为中心定义局部坐标系。

命令: CSWPLA

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin

- 通过激活的坐标系由 CLOCAL 命令定义局部坐标系。(见后面题为“激活的坐标系”一节)(没有与 CLOCAL 相应的 GUI)

当用户定义了一个局部坐标系后,它就会被激活。当创建了局部坐标系后,分配给它一个坐标系号(必须是 11 或更大),可以在 ANSYS 程序中的任何阶段建立(或删除)局部坐标系。

若要删除一个局部坐标,利用下列方法:

命令: CSDELE

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Delete Local CS

要查看所有的总体和局部坐标系使用下列方法:

命令: CSLIST

GUI: Utility Menu>List>Other>Local Coord Sys

与三个预定义的总体坐标系类似,局部坐标系可以是笛卡尔坐标系、柱坐标系或球坐标系。

局部坐标系可以是圆的,也可以是椭圆的,此外,还可以建立环形局部坐标系,如图 3-11 所示。

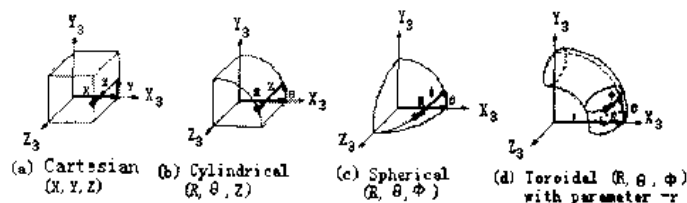


图 3-11 坐标系类型

注意 一般建议不要在环形坐标系下进行实体建模操作,因为生成的可能不是用户想要的面或体。

用户可定义任意多个坐标系，但某一时刻只能有一个坐标系被激活。激活坐标系的方法如下：首先自动激活总体笛卡尔坐标系。每当用户定义一个新的局部坐标系，这个新的坐标系就会自动被激活。如果要激活一个总体坐标系或以前定义的坐标系，可用下列方法：

命令：CSYS

GUI：Utility Menu>Change Active CS to>Global Cartesian
 Utility Menu>Change Active CS to>Global Cylindrical
 Utility Menu>Change Active CS to>Global Spherical
 Utility Menu>Change Active CS to>Specified Coord Sys
 Utility Menu>Change Active CS to>Working Plane

在 ANSYS 程序运行的任何阶段都可以激活某个坐标系。若没有明确地改变激活的坐标系，当前激活的坐标系将一直保持有效。

在定义节点或关键点时，不管哪个坐标系是激活的，程序都将坐标标为 X、Y 和 Z，如果激活的不是笛卡尔坐标系，用户应将 X、Y、Z 理解为柱坐标中的 R、 θ 、Z 或球及环坐标系中的 R、 θ 、 ϕ 。

给一个单一的坐标就表示一个曲面。例如，在笛卡尔坐标中 $X=3$ 表示在 $X=3$ 处的平面（或曲面）。这种曲面常与各种命令一起使用（如选择命令 xSEL，移动命令 MOVE、KMOVE 等）。这些曲面均可在总体或局部坐标系中按所需的方向定位。对椭圆坐标系，曲面 $R=C$ 中 R 只能是沿 X 轴取值。

曲面可看成是无限延伸的。如图 3-12 所示，圆柱面在 $\theta=\pm 180^\circ$ 处奇异。所以生成节点（FILL）命令或生成关键点（KFILL）命令不能超过 180° 线。这样，从 A 点到 C 点经过 B 点，从 A 点到 D 点要经过 E 点，从 C 点到 D 点要经过 B、A 和 C 点。

对柱坐标系可将奇异点移至 $\theta=0^\circ$ （或 360° ），则从 C 点到 D 点就可以不通过 B、A 和 E 点了。移动奇异点使用下列方法：

命令：CSCIR

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Move Singularity

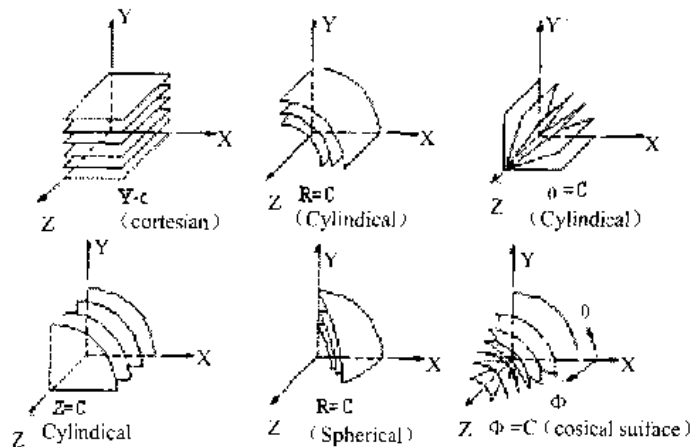


图 3-12 常数所表示的一些曲面

同样地，环坐标系在 $\Phi=\pm 180^\circ$ 处发生奇异，可用上述方法将其转移。球坐标系在 $\Phi=\pm 90^\circ$ 处发生奇异，因此，不使用这些位置。

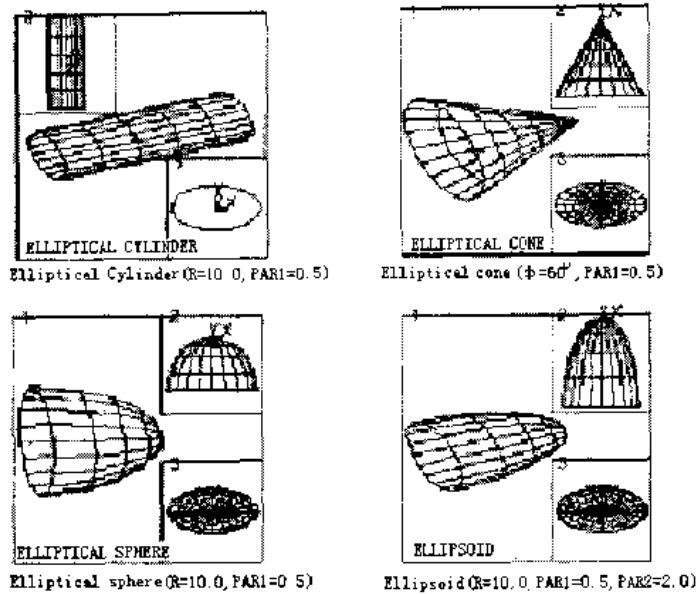


图 3-13 常数所表示的一些曲面

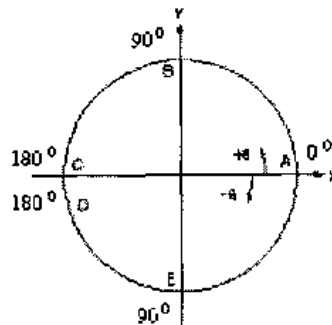


图 3-14 奇异点

注意 奇异点不影响实体模型中的线。两个关键点之间的曲线将取其夹角最小的路径而不管奇异点的位置如何（为此，曲线不会超过 180° ）。在图 3-14 中从 B 点到 D 点或从 D 点到 B 点的圆弧都经过 C 点。

3.3.3 显示坐标系

在缺省情况下，即使是在其他坐标系中定义的节点和关键点，其列表都显示它们的总体笛卡尔坐标。可用下列方法改变显示坐标系：

命令：DSYS

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Cartesian

Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Cylindrical

Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Spherical

Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Specified Coord Sys

改变显示坐标系也会影响图形显示。除非用户有特殊的需要，一般在用诸如 NPLOT, EPLOT 命令显示图形前，应将显示坐标系重置为 C、S、0（总体笛卡尔坐标系）。DSYS 命令对 LPLOT, APLOT 和 VPLOT 命令无影响。

3.3.4 节点坐标系

总体和局部坐标系用于几何体的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，缺省情况下，它总是平行于总体笛卡尔坐标系（与定义节点的激活坐标系无关）。可用下列方法将任意节点坐标系旋转到所需方向。

将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向。即节点坐标系的 X 轴转成平行于激活坐标系的 X 轴或 R 轴，节点坐标系的 Y 轴旋转到平行于激活坐标系的 Y 或 θ 轴。节点坐标系的 Z 轴转成平行于激活坐标系的 Z 或 Φ 轴。

命令：NROTAT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-To Active CS

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-To Active CS

按给定的旋转角旋转节点坐标系（由于通常不易得到旋转角，因此 NROTAT 命令可能更实用）在生成节点时可以定义旋转角度，或对已有节点指定旋转角度（NMODIF 命令）。

命令：N

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>In Active CS

命令：NMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-By Angles

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-By Angles

可利用下列方法列出节点坐标系相对总体笛卡尔坐标旋转的角度。

命令：NANG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-By Vectors

Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-By Vectors

命令：NLIST

GUI：Utility Menu>List>Nodes

Utility Menu>List>Picked Entities>Nodes

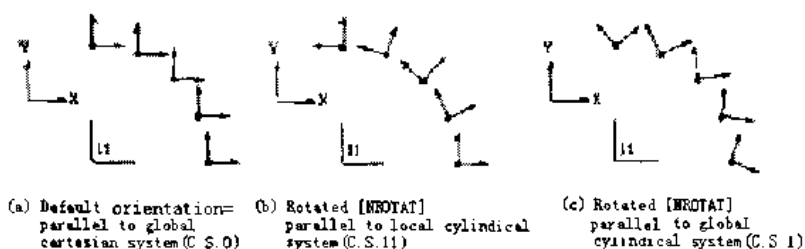


图 3-15 节点坐标系

输入数据在节点坐标系中译码包含的分量如下：

约束自由度

力

主自由度

从自由度

约束方程

下列是在节点坐标系下输出文件和 POST26 中显示的数据结果：

自由度解
节点载荷
反作用载荷

在 POST1 中，结果数据换算到结果坐标系 (RSYS) 下记录的，而不是在节点坐标系下。

3.3.5 单元坐标系

每个单元都有它自己的坐标系，单元坐标系用于规定正交材料特性的方向，加面压力和结果（如应力和应变）的输出方向。所有的单元坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的缺省方向遵循以下规则：

- 线单元的 X 轴通常从该单元的 I 节点指向 J 节点。
- 壳单元的 X 轴通常也取 I 节点到 J 节点的方向。Z 轴过 I 点且与壳面垂直，其正方向由单元的 I、J 和 K 节点按右手定则确定，Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴。
- 对二维和三维实体单元的单元坐标系总是平行于总体笛卡尔坐标系。

然而，并非所有的单元坐标系都符合上述规则；对于特定单元坐标系的缺省方向参见 ANSYS 单元手册部分的详细说明。

许多单元类型都有选项 (KEYOPTS；在 DT 或 KETOPT 命令中输入)。这些选项用于修改单元坐标系的缺省方向。对面单元和体单元而言，可用下列命令将单元坐标系的方向调整到已定义的局部坐标系上。

命令：ESYS

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Elem Attributes

Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude / Sweep>Default Attributes

如果既用 KEYOPT 命令又用了 ESYS 命令，则 KEYOPT 命令的定义有效。对某些单元而言，通过输入角度可相对先前的方向进一步旋转（例如：SHELL63 单元中的实常数 THETA）。

3.3.6 结果坐标系

在求解的过程中，计算的结果数据有位移 (UX, UY, ROTX 等)，梯度 (TGX, TGY 等)，应力 (SX, SY, SZ 等)，应变 (EPPLX, EPPLXY 等) 等。这些数据存储在数据库和结果文件中，要么是在节点坐标系 (初始或节点数据) 要么是单元坐标系 (导出或单元数据)。但是，结果数据通常是旋转到激活的结果坐标系 (缺省为总体坐标系) 中显示、列表和单元表数据存储 (ETABLE 命令)。

用户可将活动的结果坐标系转到另一个坐标系 (如总体柱坐标系或一个局部坐标系)，或转到在求解时所用的坐标系下 (例如，节点和单元坐标系)。如果用用户列表、显示或操作这些结果数据，则它们将首先被旋转到结果坐标系下。利用下列方法即可改变结果坐标系：

命令：RSYS

GUI：Main Menu>General Postproc>Options for Output

Utility Menu>List>Results>Options

3.4 利用工作平面

3.4.1 什么是工作平面

尽管光标在屏幕上只表现为一个点，但它实际上代表的是空间中垂直于屏幕的一条线。为了能用光标拾取一个点，首先必须定义一个假想的平面，当该平面与光标所代表的垂线相交时，能唯一地确定空间中的一个点。这个假想的平面就是工作平面。从另一种角度想象光标与工作平面的关系，可以描述为光标就象一个点在工作平面上来回游荡。工作平面因此就如同在上面写字的平板一样（工作平面可以不平行于显示屏）。

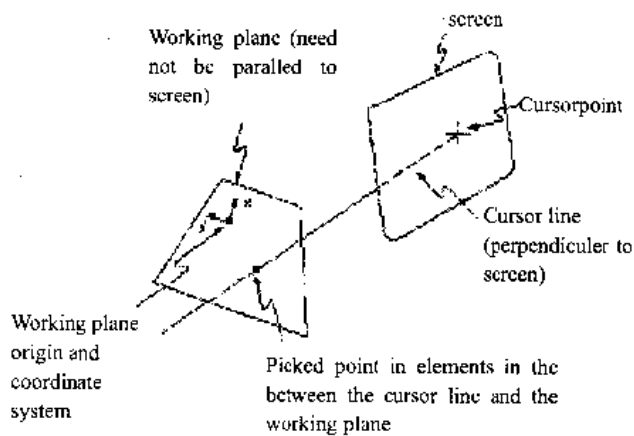


图 3-16 显示屏、光标、工作平面及拾取点之间的关系

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系，捕捉增量（下面讨论）和显示栅格。在同一时刻只能定义一个工作平面（当定义一个新的工作平面时就会删除已有的工作平面）。工作平面是与坐标系独立的。例如，工作平面与激活的坐标系可以有不同的原点和旋转方向。

3.4.2 生成一个工作平面

进入 ANSYS 程序时，有一个缺省的工作平面，即总体笛卡尔坐标系的 X-Y 平面。工作平面的 X、Y 轴分别取为总体笛卡尔坐标系的 X 轴和 Y 轴。

定义一个新的工作平面

用户可利用下列方法定义一个新的工作平面。

由三点定义一个工作平面或通过一指定点的垂直于视向量的平面定义为工作平面，用下列方法：

命令：WPLANE

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>XYZ Locations

由三节点定义一个工作平面或通过一指定节点的垂直于视向量的平面定义为工作平面，用下列方法：

命令: NWPLAN

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Nodes

由三关键点定义一个工作平面或通过一指定关键点的垂直于视向量的平面定义为工作平面, 用下列方法:

命令: KWPLAN

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Keypoints

由过一指定线上的点的垂直于视向量的平面定义为工作平面, 用下列方法:

命令: LWPLAN

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Plane Normal to Line

还可以通过现有坐标系的 X—Y (或 R— θ) 平面上定义工作平面。

命令: WPCSYS

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Active Coord Sys

Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian

Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Specified Coord Sys

控制工作平面的显示和样式

为获得工作平面的状态 (即位置、方向、增量) 可用下列方法:

命令: WPSTYL, STAT

GUI: Utility Menu>List>Status>Working Plane

将工作平面重置为缺省状态下的位置和样式, 利用命令 WPSTYL, DEFA。

移动工作平面

用户可将一个工作平面利用下列方法 (都是将工作平面移到与原位置平行的新位置) 移到新的位置 (即新的原点):

将工作平面的原点移动到关键点的中间位置, 分别用下列命令:

命令: KWPAVE

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints

将工作平面的原点移动到节点的中间位置, 分别用下列命令:

命令: NWPAVE

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Nodes

将工作平面的原点移动到指定点的中间位置, 分别用下列命令:

命令: WPAVE

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Global Origin

Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Origin of Active CS

Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>XYZ Locations

偏移工作平面, 使用下列方法:

命令: WPOFFS

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments

工作平面的旋转

用户可用两种方式将工作平面转到一个新的方向：在工作平面内旋转工作平面的 X-Y 轴，或使整个工作平面都旋转到一个新的位置（如果不清楚旋转的角度，利用上述方法之一可以很容易在正确的方向上定义一个新的工作平面）。

要旋转工作平面利用下列方法：

命令：WPROTA

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments

还原一个已定义的工作平面

尽管实际上不能存储一个工作平面，用户可以在工作平面的原点创建一个局部坐标系，然后利用这个局部坐标系还原一个已定义的工作平面。

在工作平面的原点创建局部坐标系用下列方法：

命令：CSWPLA

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin

利用局部坐标系还原一个已定义的工作平面利用下列方法：

命令：WPCSYS

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Active Coord Sys

Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian

Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Specified Coord Sys

3.4.3 增强的工作平面

用 WPSTYL 命令或前面论述的 GUI 方法可以增强工作平面的功能。使其具有捕捉增量，显示栅格，恢复容差和坐标类型功能。然后，就可以迫使用户的坐标系随工作平面的移动而移动。可用如下方法：

命令：CSYS

GUI：Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian

Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cylindrical

Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical

Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Specified Coordinate Sys

Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Working Plane

Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Global Origin

捕捉增量

如果没有捕捉增量功能，在工作平面上将光标定位到已定义的点上将是一件非常困难的事。为了能精确地拾取，可用 WPSTYL 命令或 GUI 建立捕捉增量功能。一旦建立了捕捉增量，拾取点将定位在工作平面上最近的捕捉点。数学上表示如下，当光标在区域

$$N * \text{SNAP} - \text{SNAP} / 2 \leq X \leq N * \text{SNAP} + \text{SNAP} / 2$$

对任意正整数 N ，拾取点的 X 坐标为：

$$XP=N*SNAP。$$

在工作平面坐标系中的 X ， Y 坐标均可建立捕捉增量，捕捉增量也可以看成是个方框，拾取到方框里的点将定位于方框的中心。

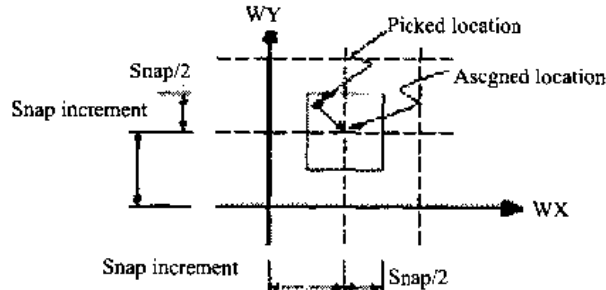


图 3-17 捕捉增量

显示栅格

可在屏幕上建立栅格以帮助用户观察工作平面上的位置和方向。栅格的间距、状况和边界可由 WPSTYL 命令来设定（栅格与要捕捉点无任何关系）。发出不带参量的 WPSTYL 命令控制栅格在屏幕上打开和关闭。

恢复容差

需拾取的图元可能不在工作平面上，而是在工作平面的附近。这时，通过 WPSTYL 命令或 GUI 路径指定恢复容差，在此容差内的图元将认为是在工作平面上的。这种容差就如同在恢复拾取时，给了工作中的一个厚度。

坐标系类型

有两种可选的工作平面：笛卡尔坐标系和极坐标系工作平面。讨论到这一点主要针对笛卡尔工作平面，但当几何体容易在极坐标 (r, θ) 系中表述时可能用到极坐标工作平面。图 3-18 所示为用 WPSTYL 命令激活了极坐标工作平面的栅格。在极坐标平面中拾取操作与在笛卡尔坐标工作平面中的是一致的。对捕捉参数进行定位的栅格点的标定是通过指定待捕捉点之间的径向距离 (SNAP ON WPSTYL) 和角度 (SNAPANG) 来实现的。

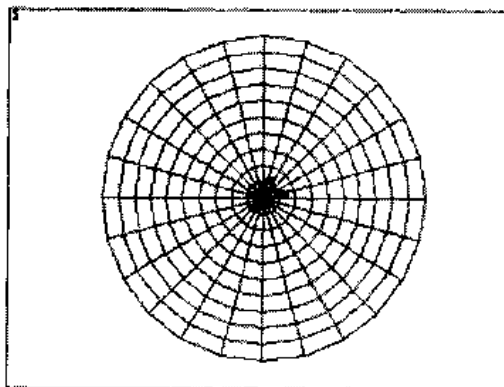


图 3-18 极坐标工作平面栅格

工作平面的轨迹

如果用户用与坐标系重合在一起的工作平面定义几何体，可能发现工作平面是完全与坐标系分离的。例如，当改变或移动工作平面时，坐标系并不做出反映新工作平面类型或位置的变化。这可能使用户结合使用拾取（靠工作平面）和键盘输入体如关键点（用激活的坐标系）变得无效。例如，用户将工作平面从缺省位置移开，然后想要在新的工作平面的原点用键盘输入定义一个关键点（即 K, 1205, 0, 0）会发现关键点落在坐标系的原点而不是工作平面的原点（见图 3-19）。

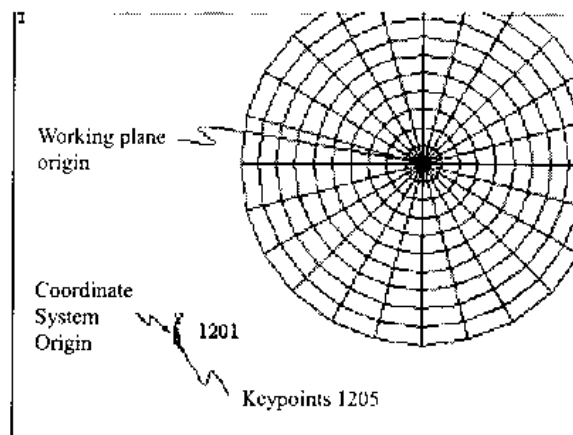


图 3-19 工作平面/坐标系不匹配

如果用户想强迫激活的坐标系在建模时跟着工作平面一起移动，可以在用 CSYS 命令或 GUI 路径时利用一个选项来自动完成。命令 CSYS, WP 或 CSYS4 将迫使激活的坐标系与工作平面有相同类型（如笛卡尔）和相同的位置。那么，尽管用户离开了激活的坐标系 WP 或 4，在移动工作平面时，坐标系将随其一起移动。如果改变所用工作平面的类型，坐标系也将相应更新。例如，当用户将工作平面从笛卡尔转为极坐标系时，激活的坐标系也将从笛卡尔坐标系转到柱坐标系。

如果重新来看上面讨论的例子，假如用户想在已移动工作平面之后将一个关键点放置在工作平面的原点，但这次在移动工作平面之前激活跟踪工作平面（CSYS, WP），然后象前面一样移动工作平面，现在，当用户使用键盘定义关键点（即 K, 1205, 0, 0），这个关键点被放在工作平面的原点，因为坐标系与工作平面的方位一致（见图 3-20）。

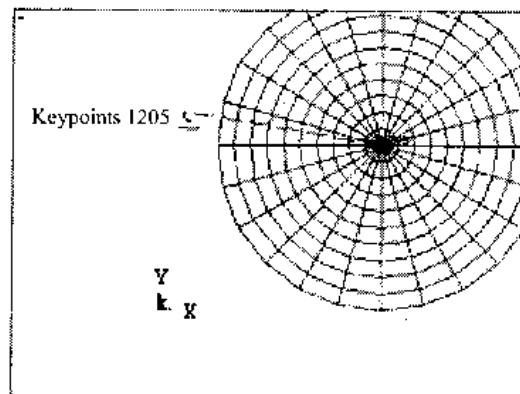


图 3-20 工作平面与坐标系匹配

3.5 实体造型

3.5.1 实体造型操作概述

用直接生成的方法构造复杂的有限元模型费时费力，使用实体造型的方法就是要减轻这部分工作量。我们先简要地讨论一下使用实体建模和网格划分操作的功能是怎样加速有限元分析的建模过程。

自底向上地构造有限元模型：定义有限元模型顶点的关键点是实体模型中最低级的图元。在构造实体模型时，首先定义关键点，再利用这些关键点定义较高级的实体图元（即线、面和体）。这就是所谓的自底向上的建模方法。一定要牢记的是自底向上构造的有限元模型是在当前激活的坐标系内定义的。

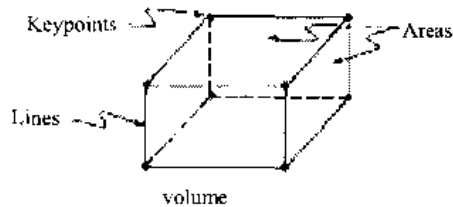


图 3-21 自底向上构造模型

自顶向下构造有限元模型：ANSYS 程序允许通过汇集线、面、体等几何体素的方法构造模型。当生成一种体素时，ANSYS 程序会自动生成所有从属于该体素的较低级图元。这种一开始就从较高级的实体图元构造模型的方法就是所谓的自顶向下的建模方法。用户可以根据需要自由地组合自底向上和自顶向下的建模技术。注意几何体素是在工作平面内创建的，而自底向上的建模技术是在激活的坐标系上定义的。如果用户混合使用这两种技术，那么应该考虑使用 CSYS, WP 或 CSYS, 4 命令强迫坐标系跟随工作平面变化。

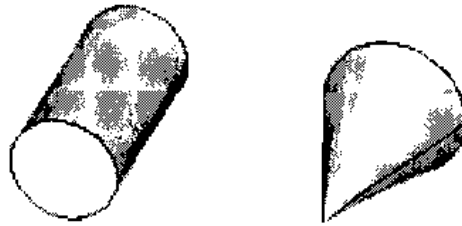


图 3-22 自顶向下构造模型（几何体素）

注意 建议不要在环坐标系中进行实体建模操作，因为会生成用户不想要的面或体。

运用布尔运算：可以使用求交、相减或其他的布尔运算雕塑实体模型。通过布尔运算用户可直接用较高级的图元生成复杂的形体。布尔运算对于通过自底向上或自顶向下方法生成的图元均有效。

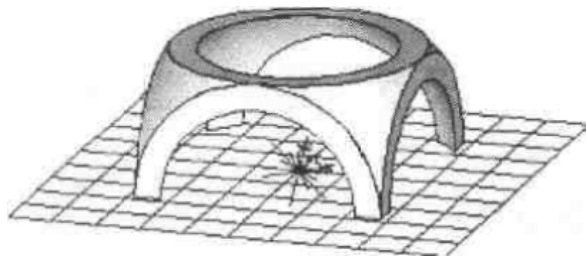


图 3-23 使用布尔运算生成复杂形体

◆ 拖拉或旋转

布尔运算尽管很方便，但一般需耗费较多的计算时间。故在构造模型时，如果用拖拉或旋转的方法建模，往往可以节省计算时间，提高效率。

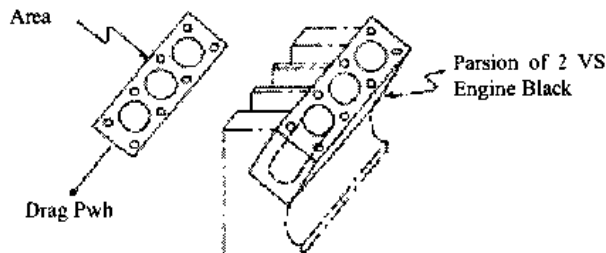


图 3-24 拖拉一个面生成一个体 (VDRAG)

◆ 移动和拷贝实体模型图元

一个复杂的面或体在模型中重复出现时仅需要构造一次。之后可以移动、旋转或拷贝到所需的地方。用户会发现在方便之处生成几何体素再将其移动到所需之处，这样往往比直接改变工作平面生成所需体素更方便。

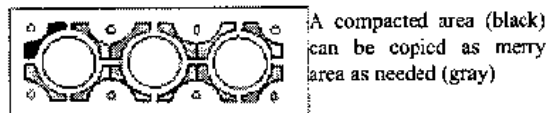


图 3-25 拷贝一个面

◆ 网格划分

实体建模的最终目的是为了划分网格以生成节点和单元。在完成了实体建模和建立了单元属性，网格划分控制之后，ANSYS 程序可以轻松地生成有限元网格。考虑到要满足特定的要求，用户可以请求映射网格划分生成全部都是四边形、三角形或块单元。

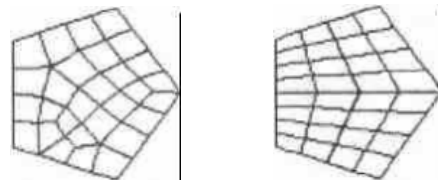


图 3-26 自由网格和映射网格

◆ 移动、拷贝节点和单元

与直接生成节点和单元相比，自动网格划分是一个巨大的改进，但自动网格划分需耗费较多机时。若模型具有重复性，则可先对某一部分进行网格划分，再将其拷贝到所需的地方，一般来说，这将比对各部分分别进行网格划分来得快。

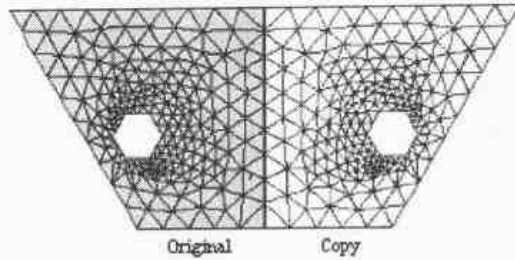


图 3-27 拷贝已划分网格的面

◆ **实体模型加载**

在 ANSYS 程序中，载荷一般是加在节点和单元上的。但采用实体建模时，对节点和单元直接加载不太方便，幸运的是，用户可以直接在实体模型上加载，在发出 SOLVE 命令求解时，ANSYS 程序会自动地将实体模型上的载荷转换到有限元模型上。

◆ **修改模型**

(清除和删除)：在修改模型时，需要知道实体模型和有限元模型中图元的层次关系。不能删除依附于较高级图元上的低级图元。如不能删除已划分了网格的体，也不能删除依附于面上的线等。若一个实体已加加载荷，删除或修改该实体，附加在该实体上的载荷也将从数据库中删除。图元间的层次关系如下：

最高级图元：单元（包括单元载荷）

节点（包括节点载荷）

实体（包括实体载荷）

面（包括面载荷）

线（包括线载荷）

最低级图元：关键点（包括点载荷）

在修改已划分了网格的实体模型前，首先必须用 `xCLEAR` 命令（Main Menu>Preprocessor>Clear）清除该实体模型上所有的节点和单元。一旦清除了网格，就可以自上而下地删除和重新定义图元以达到修改模型的目的。清除、删除和修改模型时，也可用下列方法修改关键点：

命令：KMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Set of KPs

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Single KP

用 KMODIF 自动清除并重新定义与此关键点相关联的所有线、面和体，修改完模型之后，还需对已清除部分重新划分网格。

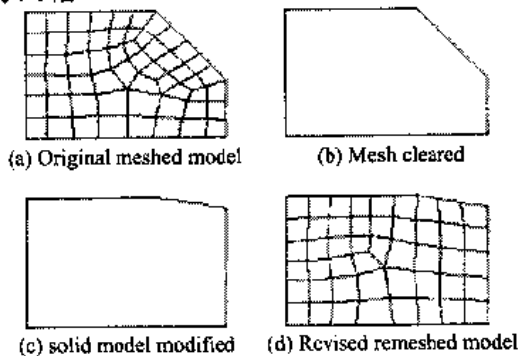


图 3-28 修改已划分网格的模型

3.5.2 用自底向上的方法建模

无论是使用自底向上还是自顶向下的方法构造的实体模型，均由关键点、线、面和体组成。如图 3-29 所示。

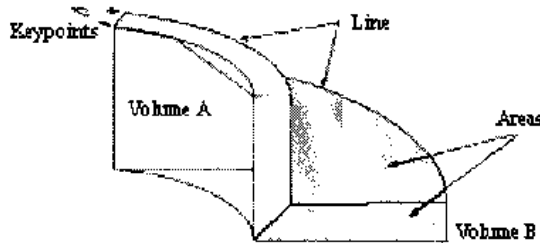


图 3-29 基本实体模型图元

顶点为关键点，边为线，表面为面而整个物体内部为体。这些图元的层次关系是：最高级的图元体以面为边界，面以线为边界，线则以关键点为端点。

注意 建议不要在环坐标系下进行实体建模操作。因为可能产生并非用户想要的面或体。

用自底向上的方法构造模型时，首先定义最低级的图元：关键点。关键点是在当前激活的坐标系内定义的。用户不必总是按从低级到高级的办法定义所有的图元来生成高级图元，可以直接在它们的顶点由关键点来直接定义面和体。中间的图元需要时可自动生成。例如，定义一个长方体可用八个角的关键点来定义，ANSYS 程序会自动地生成该长方体中所有的面和线。

线主要用于表示物体的边。象关键点一样，线是在当前激活的坐标系内定义的。并不总是需要明确地定义所有的线，因为 ANSYS 程序在定义面和体时，会自动地生成相关的线。只有在生成线单元（如梁）或想通过线来定义面时，才需要定义线。

平面可以表示二维实体（如平板或轴对称实体）。曲面和平面都可表示三维的面，如壳，三维实体的面等。用到面单元或由面生成体时，才需定义面。生成面的命令也将自动地生成依附于该面的线和关键点；同样，面也可在定义体时自动生成。

体用于描述三维实体，仅当需要用体单元的才必须建立体。生成体的命令自动生成低级的图元。

3.5.3 用自顶向下的方法建模：体素

什么是体素

几何体素是可用单个 ANSYS 命令来创建的常用的实体建模的轮廓（如一个球体或正棱柱）。

因为体素是高级图元，可不用首先定义任何关键点而形成，利用体素进行模型生成有时指自顶向下建模（当生成一个体素时，ANSYS 程序会自动生成所有必要的低级图元，包括关键点）。几何体素是在工作平面内生成的。

如何生成面体素

利用下列方法可生成矩形：

在工作平面上任意位置生成一个长方形区域:

命令: RECTNG

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By Dimensions

通过角点生成一个长方形区域:

命令: BLC4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By 2 Corners

通过中心和角点生成一个长方形区域:

命令: BLC5

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By Centr & Cornr

生成圆或环形区域

利用如下命令可生成圆或部分圆环:

生成以工作平面原点为圆心的环形区域:

命令: PCIRC

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>By Dimensions

在工作平面的任意位置生成一个环形区域:

命令: CYL4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Annulus

Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Partial Annulus

Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Solid Circle

通过端点生成一个环形区域:

命令: CYL5

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>By End Points

生成正多边形

利用下列方法生成一个正多边形:

以工作平面的原点为中心生成一个正多边形区域:

命令: RPOLY

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>By Circumscrib Rad

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>By Inscribed Rad

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>By Side Length

在工作平面的任意位置处生成一个正多边形区域:

命令: RPR4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Hexagon

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Octagon

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Pentagon

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Septagon

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Square

Main Menu>Preprocessor>Create>Polygon>Triangle

除以上的正多边形外，用户还可以用 POLY 命令基于工作平面坐标对生成任意多边形区域。POLY 命令必须跟随 PTXY 命令之后使用（在 GUI 中没有与 POLY 相应的途径）。

面体素中应注意的问题

用面体素工作时应注意：

- 由命令或 GUI 途径生成的面位于工作平面上，方向由工作平面坐标系而定。

注意 面体素的面积必须大于零，也就是说，不能用退化面定义线。

- 有限元模型中，两个相接触的体素之间会产生一条不连续的接缝，只有用诸如 NUMMRG、AADD 或 AGLUE 等命令来“焊接”才能将接缝除去。
- 用上面讨论的 PCIRC 和 CYL4 命令或在下一节实体体素中讨论的 CONE、CYLIND、SPHERE 或 TORUS 等命令生成环几何体素的弧时，弧从代数值小的角度开始，按正的角方向，到大的角度处终止（THETA1 和 THEAT2 的输入顺序并不表示生成体素的开始角和终止角）。下图表明如何用这些命令工作的。

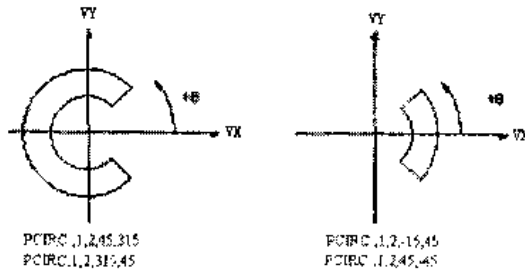


图 3-30 环形几何体素的圆弧扇区

如何生成实体体素

下面论述的命令可用来定义实体体素。

可用下列方法生成长方体：

在工作平面坐标上生成长方体：

命令：BLOCK

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Block>By Dimensions

通过角点生成一个长方体：

命令：BLC4

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Block>By 2 Corners & Z

通过中心及角点生成一个长方体：

命令：BLC5

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Block>By Centr, Cornr, Z

利用下列方法生成端面为圆或圆环区域的直棱柱体（如圆柱）：

以工作平面原点为圆心生成一个圆柱体：

命令：CYLIND

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>By Dimensions

在工作平面的任意处生成圆柱体:

命令: CYL4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Hollow Cylinder

Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Partial Cylinder

Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Solid Cylinder

通过端点生成圆柱体:

命令: CYL5

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>By End Pts & Z

可用下列方法生成正棱柱体:

以工作平面的原点为圆心生成一个正棱柱体:

命令: RPRISM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>By Circumscrib Rad

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>By Inscribed Rad

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>By Side Length

在工作平面的任意位置处生成多棱柱体:

命令: RPR4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Hexagonal

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Octagonal

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Pentagonal

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Septagonal

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Square

Main Menu>Preprocessor>Create>Prism>Triangular

若要生成基于工作平面坐标对的任意多棱柱体, 使用 PRISM 命令, PRISM 命令必须跟随着 PTXY 命令之后 (在 GUI 中没有与 PRISM 命令相应的途径)。

利用下列方法可以生成球体或部分球体:

以工作平面原点为中心生成球体:

命令: SPHERE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Sphere>By Dimensions

在工作平面的任意位置处生成球体:

命令: SPH4

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Sphere>Hollow Sphere

Main Menu>Preprocessor>Create>Sphere>Solid Sphere

以直径的端点生成球体:

命令: SPH5

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Sphere>By End Points

利用以下方法可以生成锥或截锥:

以工作平面的原点为中心生成锥体:

命令: CONE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Cone>By Dimensions

在工作平面的任意位置处生成锥体：

命令：CON4

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Cone>By Picking

若要生成环体：

命令：TORUS

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Torus

可用 TORUS、RAD1、RAD2、RAD3、THEAT1、THETA2 命令生成环体或部分环体。

- 若要生成环体，不必给 THETA1 或 THETA2 赋值，必须指定用于定义环的三个半径值(RAD1、RAD2 和 RAD3)。可以以任意顺序指定半径，最小的值是内部半径，中间值为外部半径，最大值为主半径（有一个例外需指定半径值的顺序：如果想生成一个实心环体，内部半径指定为零或空，这种情况下零或空必须占据 RAD1 或 RAD2 的位置）。至少其中的两个值必须指定为正值；它们用来定义外面半径和主半径。

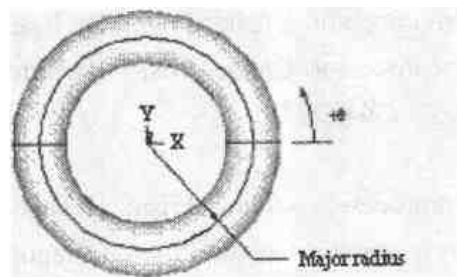


图 3-31 环体体素

要生成图 3-31 的环体，键入 TORUS, 5, 1, 2 命令，由于指定半径值有相对的大小关系，5, 1, 2 分别用来定义环体的主半径，内部半径和外部半径。若没有给 THETA1 和 THETA2 指定值，缺省的值 0 和 360 用来表示环体的起始和终结角度。

- 要生成图 3-22 所示的部分环体，键入 TORUS, 5, 1, 2, 0, 180；此处 5、1 和 2 分别为环体的主半径、内部半径和外部半径，0 和 180 表示环体的起始和终结角度。

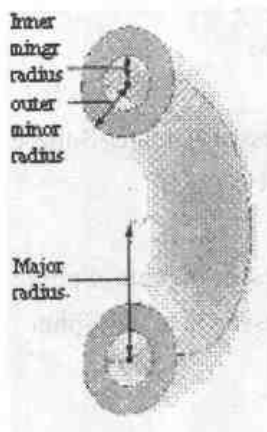


图 3-32 部分环体

当用实体体素时应当注意：

- 上述命令定义的体都是相对于工作平面。
- 在有限元模型中，两个相接触的体素间会生成一个不连续的接缝，只有用诸如

NUMMRG、VGLUE 和 VADD 命令“焊接”才能将此接缝除去。

3.5.4 用布尔运算雕塑实体模型

在布尔代数中，对一组数据可用诸如交、并、减等逻辑运算处理。ANSYS 程序也允许用户对实体模型进行同样的布尔运算。这样修改实体模型就更加容易了。

几乎可以对任何实模型进行布尔运算操作，无论是自顶向下还是自底向上构造的实体模型。例外是通过连接生成的图元对布尔运算无效，对退化的图元也不能进行某些布尔运算。完成布尔运算之后，紧接着就是实体模型的加载和单元属性的定义。如果用布尔运算修改了已有的模型，应该注意的是重新进行单元属性和加载的定义。

下面讨论修改模型的布尔运算的多种形式，在看这些部分时，要注意可以任意选用这些方法指定布尔运算：

命令：BOPTN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Settings

是否保留原始图元

对两个或多个图元进行布尔运算时，需要用户确定是否保留原始图元。可用 BOPTN, Lab, Value 命令来控制是否保留原始图元，参见图 3-33。

一般来说对依附于高级图元的低级图元进行布尔运算是允许的。

不能对已划分网格的图元进行布尔操作。必须在执行布尔操作前将网格从体中清除。

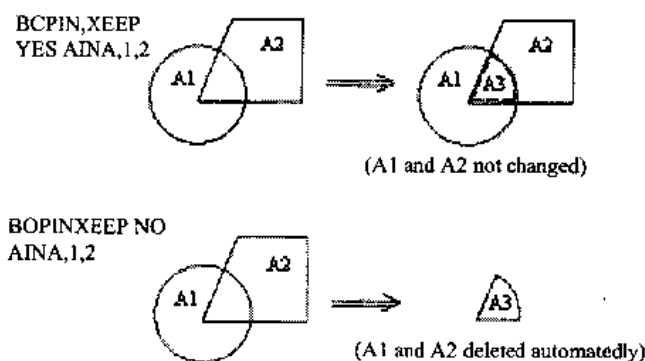


图 3-33 布尔运算保留操作

其他有用的 BOPTN 设置

BOPTN 命令中的 NWARN 项允许用户控制警告信息。值“0”将使布尔运算无效时显示警告信息。值“1”将消除布尔运算无效的所有警告或错误信息。值“-1”将允许布尔运算无效时的错误信息。版本标记用来控制采用何种版本 ANSYS 程序对由布尔操作产生的图元编号。

布尔操作之后的图元编号

编号程序对布尔运算输出图元依据其拓扑结构和几何形状进行编号。例如，面的拓扑信息包括定义的边数，组成面的线数（即三边形面或四边形面等），面中任何原始线（在布尔操作之前存在的线）的线号，任意原始关键点的关键点号等。面的几何信息包括形心的坐标、

端点和其他相对于一些任意的参考坐标系的控制点。控制点是由 NURBS 定义的描述模型的参数。编号程序首先给输出图元分配按其拓扑结构唯一识别的编号。任何剩余图元按几何编号，不幸的是，按几何的图元编号可能会与通过设计优化循环不一致，尤其是当从循环到循环几何改变的情况。因此，当出现按几何给图元编号时，程序会显示下列警告信息：

*** WARNING ***Entity numbers from the Boolean operation were assigned based on geometry If you are planning to do optimization, (or input looping), do not rely on the entity numbers for loads, etc. To suppress this warning, issue "BOPT, NWARN, 0".

交运算

交运算的结果是由每个初始图元的共同部分形成一个新图元。也就是说，交表示两个或多个图元的重复区域。这个新的图元可能与原始的图元有相同的维数，也可能低于原始图元的维数。例如两条的交可能只是一个关键点（或关键点的集合），也可能是一条线（或线的集合）。布尔交命令有如下形式：

生成线的交

命令：LINL

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Common-Lines

生成面的交

命令：AINA

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Common-Areas

生成体的交

命令：VINV

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Common-Volumes

生成线与面的交：

命令：LINA

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>Line with Area

生成面与体的交

命令：AINV

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>Area with Volume

生成线与体的交

命令：LINV

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>Line with Volume

两两相交

两两相交是由图元集叠加而形成的一个新的图元集。就是说，两两相交表示至少任意两个原图元的相交区域。比如，线集的两两相交可能是一个关键点（或关键点的集合），或是一条线（或线的集合）。布尔运算的两两相交命令为：

线的两两相交

命令：LINP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Pairwise-Lines

面的两两相交

命令: AINP

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Pairwise-Areas

体的两两相交

命令: VINP

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Intersect>-Pairwise-Volumes

图 3-34、3-35 和 3-36 是两两相交的例子:

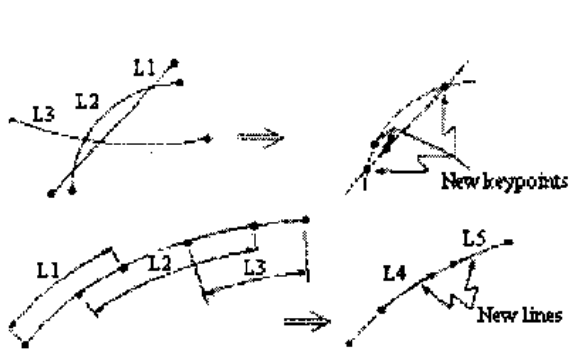


图 3-34 线的两两相交

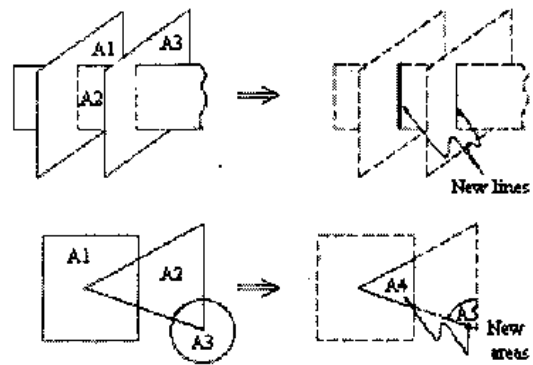


图 3-35 面的两两相交

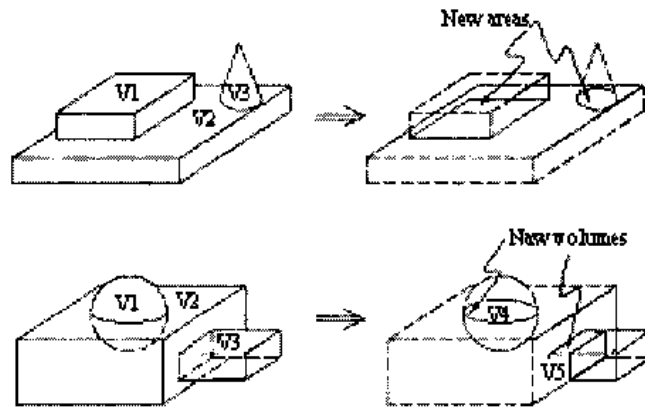


图 3-36 体的两两相交

加运算

加运算的结果是得到一个包含各个原始图元所有部分的新图元。(这种运算也可称为并、连接或和)。这样形成的新图元是一个单一的整体,没有接缝(实际上,加运算形成的图元在网格划分时常不如搭接形成的图元)。在 ANSYS 程序中只能对三维实体或二维共面的面进行加操作。面相加可以包含有面内的孔,即内环。布尔加命令如下:

将分开的面相加生成一个面:

命令: AADD

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Add>Areas

将分开的体相加生成一个体:

命令: VADD

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Add>Volumes

下图为以上加运算的例子

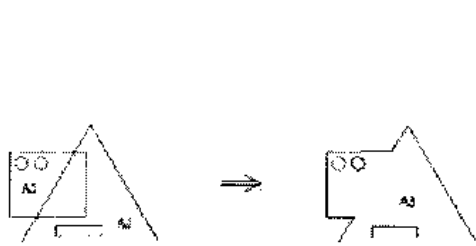


图 3-37 面的相加

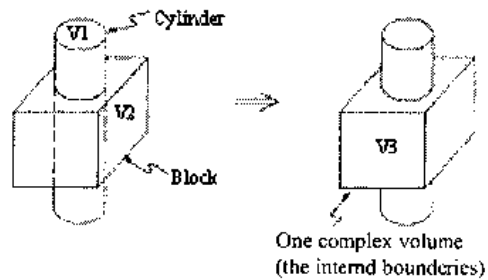


图 3-38 体的相加

减运算

如果从某个图元 (E1) 减去另一个图元 (E2), 其结果可能有两种情况: 一是生成一个新图元 E3 ($E1-E2=E3$), E3 与 E1 有同样的维数, 且与 E2 无搭接部分。另一种情况是 E1 与 E2 的搭接部分是个低维的实体。这时, 结果将 E1 分成两个或多个新的实体 ($E1-E2=E3, E4$)。

如果减命令的 SEPO 命令域置空 (缺省), 图元的减运算会产生带有公共端点的线; 或带有公共边界线的面; 或带有公共边界的体。命令域置为 “SEPO”, 结果图元将不再有公共的边界而是不同但重合的边界。后一个操作如果图元的搭接部分不能将输入图元中的一个分成至少二个不同的线、面或体, 则该运算无效。布尔减命令 (及相应的 GUI 途径) 如下:

从线中减去线

命令: LSBL

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>Lines

Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>With Options>Lines

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Line by Line

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Line by Line

从面中减去面

命令: ASBA

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>Areas

Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>With Options>Areas

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Area by Area

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Area by Area

从体中减去体:

命令: VSBV

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>Volumes

Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>With Options>Volumes

从线中减去面:

命令: LSBA

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Line by Area

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Line by Area

从线中减去体:

命令: LSBV

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Line by Volume

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Line by Volume

从面中减去体:

命令: ASBV

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Area by Volume

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Area by Volume

从面中减去线:

命令: ASBL

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Area by Line

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Area by Line

注意 使用 ASBL 命令时不出现 SEPO 域。

从体中减去面:

命令: VSBA

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Volume by Area

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Volume by Area

图 3-39 到图 3-54 是简单的减运算的例子。详见 ANSYS 命令手册中 LSBL, ASBA, VSBV, LSBA, LSBV, ASBV, ASBL 和 VSBA 命令。

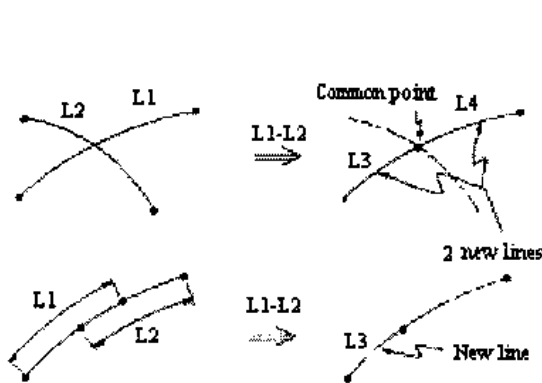


图 3-39 LSBL 线线相减

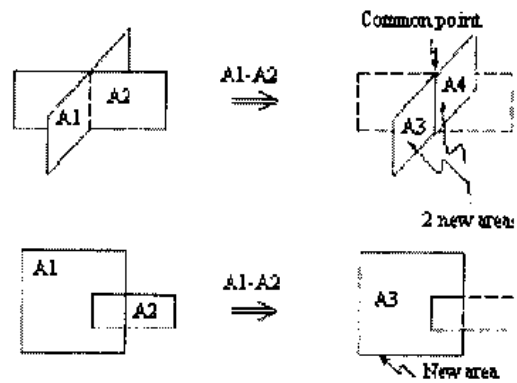


图 3-40 ASBA 面面相减

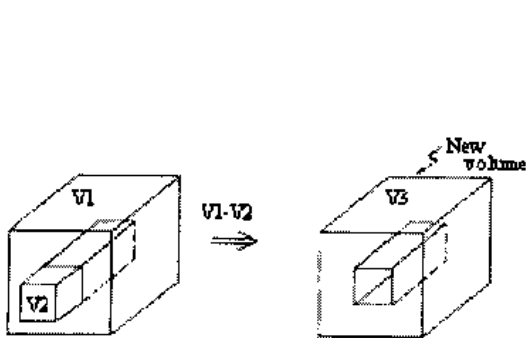


图 3-41 VSBV 体体相减

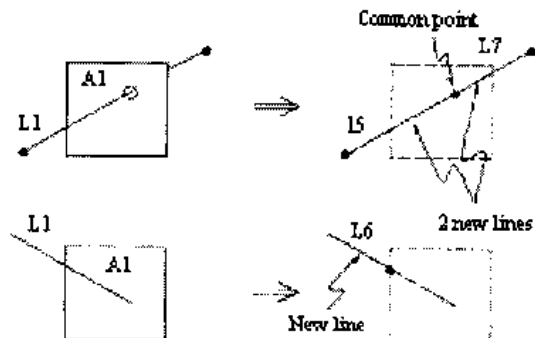


图 3-42 LSBA 线中减去面

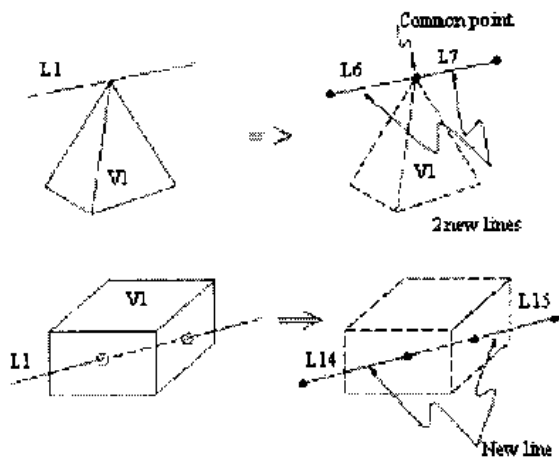


图 3-43 LSBV 线中减去体

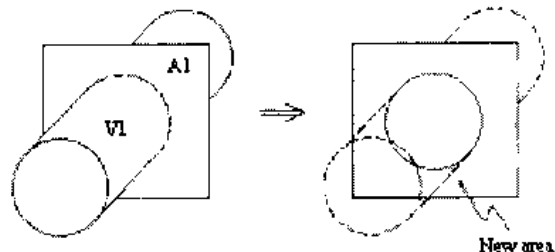


图 3-44 ASBV 面中减去体

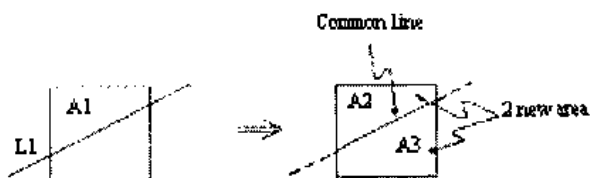


图 3-45 ASBL 面中减去线

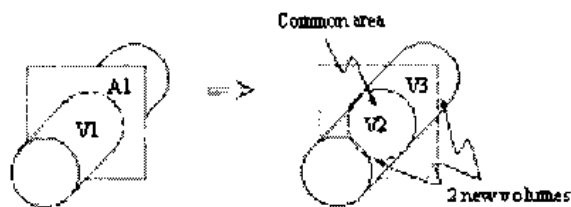


图 3-46 VSBA 体中减去面

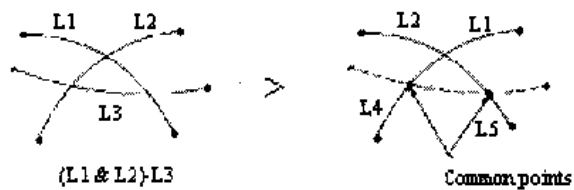


图 3-47 LSBL 多条线减去线

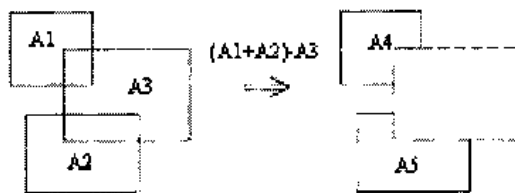


图 3-48 ASBA 多个面减去面

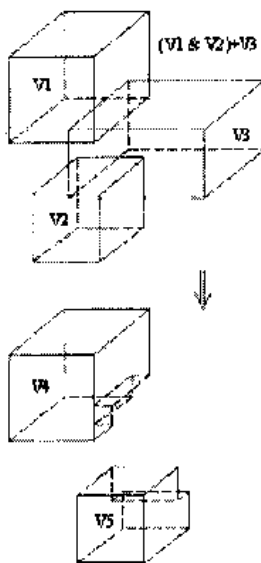


图 3-49 VSBV 多个体中减去一个体

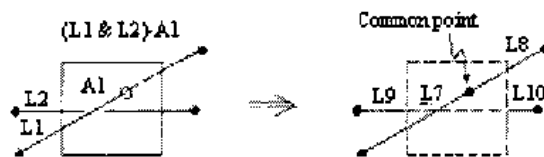


图 3-50 LSBA 多条线减去一个面

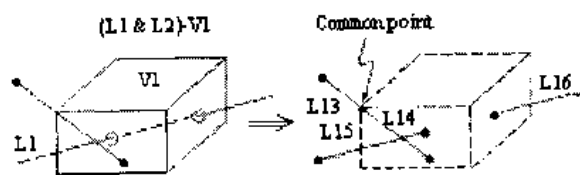


图 3-51 LSBV 多条线中减去体

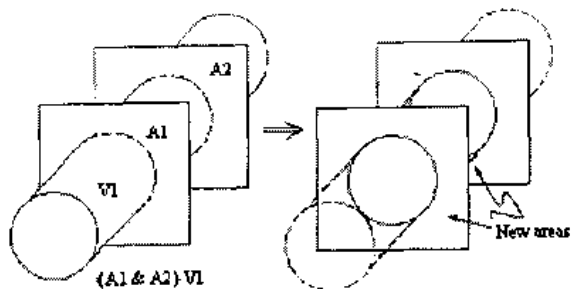


图 3-52 ASBV 多个面中减去一个体

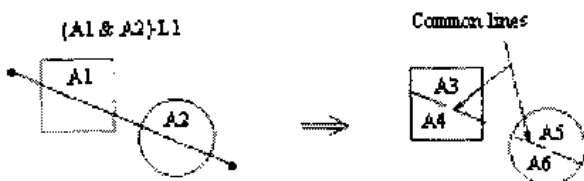


图 3-53 ASBL 多个面中减去一条线

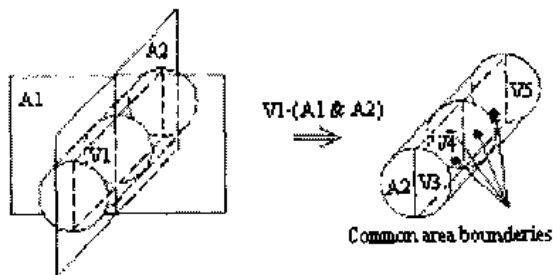


图 3-54 VSBA 单个体中减去多个面

注意 在减运算中无论何种图元都可能用到 ALL 命令，如果 ALL 用在被减域，则在减域列出或选中的图元将从所有选中的图元中移去；如果 ALL 用在减域，所有选中的图元将从列在被减域中的图元中减去。如果 ALL 既出现在减域又出现在被减域，则减运算无任何变化；即结果仍是输入图元。

图元的减命令中的 KEEP (X) 项允许有选择地保留或删除图元。例如，ASBL 命令的 KEEPA 和 KEEPL 项允许保留或删除在 ASBL 操作中用到的面或线。与 BOPTN, KEEP, Value 命令保留或删除全部输入图元相反。KEEPL 和 KEEPA 项取消了由 BOPTN 命令的设置(Main Menu>Preprocessor>Operate>Settings)，如果这两栏为空，缺省设置由 BOPTN 命令控制。缺省的 BOPTN 设置在减运算命令之后删除所有输入的图元。

用工作平面的减运算

工作平面可用来做减运算将一个图元分成两个或更多的图元。可以将线、面或体利用以下的命令或 GUI 途径用工作平面去减。对每个这种减命令，SEPO 栏用来确定生成的图元有公共边界或独立但恰好重合的边界。KEEP 栏用来保留或删除输入图元，而不管 BOPTN 命令 (GUI 途径 Main Menu > Preprocessor > Operate > Setting) 的设置如何。

工作平面常用来去切已有未划分映射网格的模型。布尔运算减工作平面命令 (及相应的 GUI 途径) 如下：

从线上减去与工作平面的交点：

命令：LSBW

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Line by WrkPlane

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Line by WrkPlane

从面中减去与工作平面相交的部分：

命令: ASBW

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Area by WrkPlane

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Area by WrkPlane

从体中减去与工作平面相交的部分:

命令: VSBW

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>Volu by WrkPlane

Main Menu>Preprocessor>Operate>Divide>With Options>Volu by WrkPlane

以下是用工作平面去做减运算的例子:

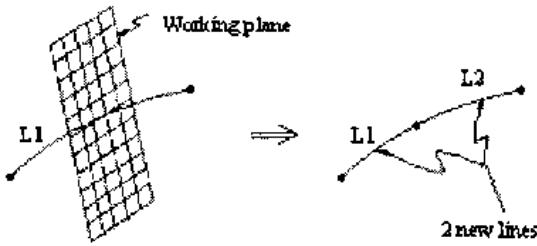


图 3-55 LSBW 用工作平面去减线

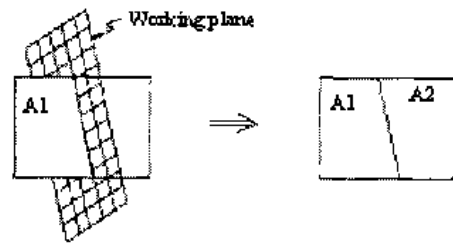


图 3-56 ASBW 用工作平面去减面

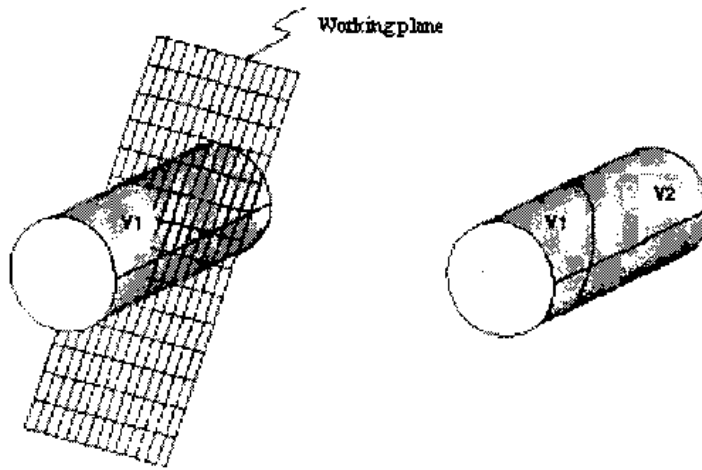


图 3-57 VSBW 用工作平面去减体

分类运算

分类运算与减运算类似,但它用新图元来替代两个原始的图元。目前 ANSYS 程序提供了线线之间的分类运算。执行线线分类运算,可使用 LCSL 命令。在 GUI 中没有与 LCSL 相应的途径。

下图是分类运算的例子。

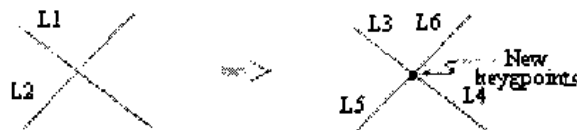


图 3-58 LCSL 线线的分类运算

搭接功能

搭接命令用于连接两个或多个图元，以生成三个或更多个新的图元的集合。搭接命令除了在搭接域周围生成了多个边界外，与加运算非常类似。也就是说，搭接操作生成的是多个相对简单的区域，加运算生成一个相对复杂的区域。因而，搭接生成的图元比加运算生成的图元更容易划分网格。

搭接区域必须与原始图元有相同的维数。布尔搭接命令（及其相应的 GUI 途径）如下：

搭接线：

命令：LOVLAP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Overlap>Lines

搭接面：

命令：AOVLAP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Overlap>Areas

搭接体：

命令：VOVLAP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Overlap>Volumes

下列图为上述搭接功能的例子：

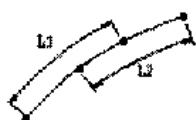


图 3-59 LOVLAP 线与线的搭接

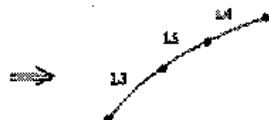


图 3-60 APVLAP 面与面的搭接

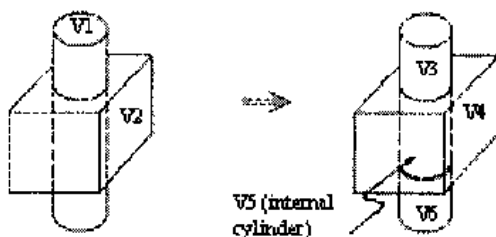


图 3-61 VOVLAP 体与体的搭接

分割

分割命令用于连接两个或多个图元，以生成三个或更多新图元的集合。如果搭接区域与原始图元有相同的维数，那么分割结果与搭接结果相同。但是与搭接操作不同的是，没有参加搭接的输入图元将不被删去。布尔分割命令如下：

对线进行分割：

命令：LPTN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Partition>Lines

对面进行分割：

命令：APTN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Partition>Areas

对体进行分割:

命令: VPTN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Partition>Volumes

图 3-62 至图 3-64 是分割运算的例子。详见 ANSYS 命令参考册中的 LPTN、APTN 及 VPTN 命令。

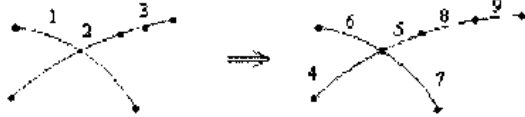


图 3-62 LPTN 线分割

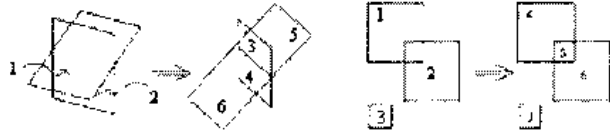


图 3-63 APTN 面分割

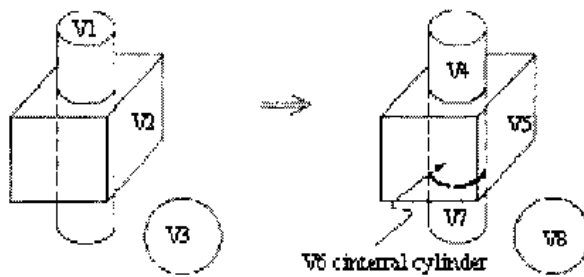


图 3-64 VPTN 体分割

粘接 (或合并)

粘接命令与搭接命令类似，只是图元之间仅在公共边界处相关，且公共边界的维数低于原始图元一维。这些图元间仍然相互独立，只在边界上连接（它们相互对话），如下图所示。布尔粘接命令（及与之相应的 GUI 途径）如下：

通过粘接线生成新线：

命令: LGLUE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Glue>Lines

通过粘接面生成新的面：

命令: AGLUE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Glue>Areas

通过粘接体生成新的体：

命令: VGLUE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Glue>Volumes

以下图为上述粘接操作的例子：

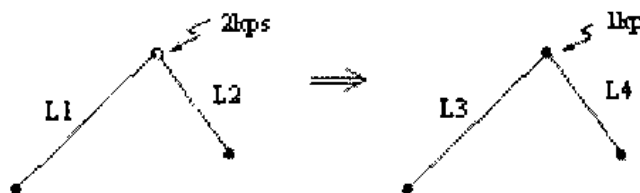


图 3-65 LGLUE 线与线的粘接

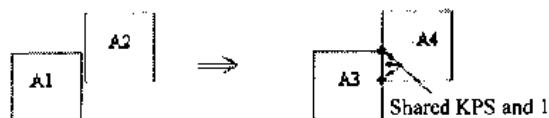


图 3-66 AGLUE 面与面的粘接

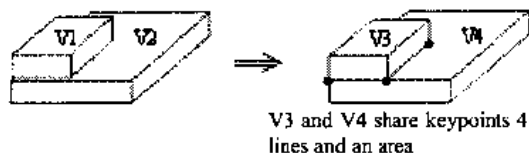


图 3-67 VGLUE 体与体的粘接

布尔运算的替代

布尔运算有时比较费时。有些情况下，可用一些其他命令来代替布尔运算。下面列出一些可以替代布尔运算的操作。

◆ 拖拉和旋转

用 VDRAG 和 VROTAT 命令定义棱柱体或圆柱体，与布尔运算生成同样方便，但更加高效。如中间钻了孔的长方体就是一个很好的例子。

将面沿一条路径拖拉生成体：

命令：VDRAG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude / Sweep>Along Lines

将面沿一轴旋转生成圆柱体：

命令：VROTAT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude / Sweep>About Axis

◆ 延伸和偏移

利用 VEXT 和 VOFFST 命令可将二维横截面偏移或延伸成为三维体。

通过延伸面生成另外的体：

命令：VEXT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude / Sweep>By XYZ Offset

通过偏移给定的面生成体：

命令：VOFFST

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude / Sweep>Along Normal

◆ 体素命令的实用选项

对于很多体素命令而言，仅用一条命令即可生成一个相对复杂的形体。例如，用一条 SPHERE 命令 (Main menu>Preprocessor> Create>Sphere>By Dimesions)：就可以生成一个指定壁厚的空心球。

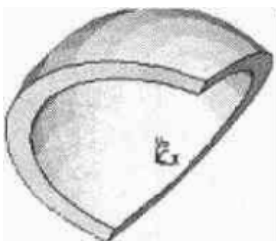


图 3-68 用一条命令生成空心球的部分区域

可以清楚地看到，充分的使用体素命令往往能节省执行几个布尔运算所花费的时间。

3.5.5 布尔运算之后的更新

有些布尔运算命令在对附属的低级图元进行了布尔运算之后自动地更新图元。例如，如果使用 AADD 布尔运算命令 (Main Menu>Preprocessor>Operate>Add>Areas) 将属于一个体的几个面进行了加操作之后，体会被新生成面替换原始面进行更新。这会免除使用删除高级图元 (本例中为体)，再用自底向上的建模技术对其重新生成的工作。表 3-1 所示的命令自动执行更新高级图元。

表 3-1 能自动更新图元的命令

Command	Entities directly modified by command	Entities that can be updated
AADD	Areas	Volumes
ASBA	Areas and Lines	Areas and Volumes
ASBV	Areas and Lines	Areas and Volumes
ASBL	Areas and Lines	Areas and Volumes
AFILLT	N/A	Areas and Volumes
LSBL	Lines	Areas
LSBA	Lines	Areas
LSBV	Lines	Areas
LCSL	Lines	Areas

更新只能发生在布尔运算产生图元与原始图元相同时。例如，如果用 ASBA 命令 (Main Menu>Preprocessor>Operate>Add>Areas) 将一个面分成两半，两个新的面会代替原始面，下面的体将被更新为包括新的面。可是，如果 ASBA 命令将原始面的一部分割掉 (如生成一个孔)，那么图元将不被更新。

图 3-69 是自动布尔运算更新的例子。在这个例子中，将在两相交体之间生成倒角面 (AFILLT) (Main Menu>Preprocessor>Create>Area Fillet)，布尔倒角操作生成一个倒角面，但也自动更新体表面上的面，两原始表面被新的四个表面所代替，体被更新。

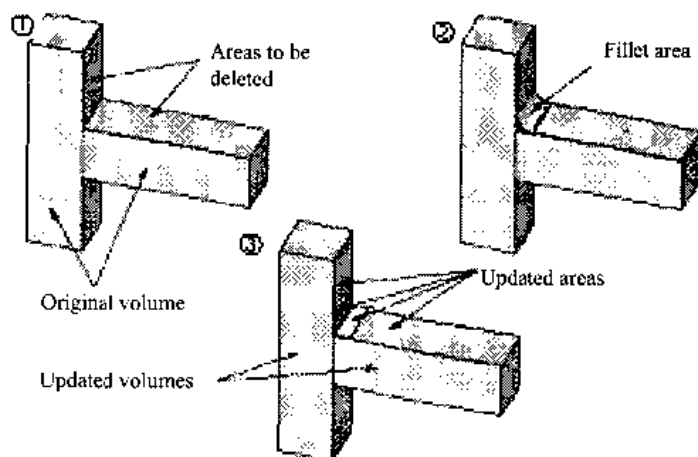


图 3-69 布尔运算 AFILLT 之后的自动更新

3.5.6 移动和拷贝实体模型

如果模型中的相对复杂的面或体重复出现时，则仅需对重复部分构造一次，然后在所需位置处按所需方向拷贝生成。例如，在一个平板上开几个细长的孔，只需生成一个孔，然后再拷贝该孔即可完成。

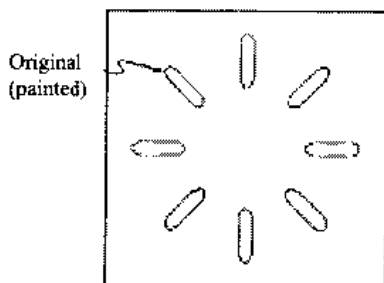


图 3-70 拷贝面

几何体素也可被看作部分。生成几何体素时，其位置和方向由当前工作平面决定。因为对生成的每一个新体素都重新定义工作平面很不方便，允许体素在错误的位置生成，然后将体素移到正确的位置可能更符合实际。当然，这种操作并不局限为几何体素，任何实体模型图元都可以拷贝或移动。

对实体图元进行移动和拷贝命令有：`xGEN`、`xSYM (M)` 和 `xTRAN`（及其相应的 GUI 途径）。其中 `xGEN` 和 `xTRAN` 命令对图元的拷贝进行移动和旋转可能最为有用。（拷贝一个高级图元将会自动地把它所有附带的图元一起拷贝。而且，如果拷贝图元的单元（`NOELEM=0`），所有的单元及其附属的低级图元都将拷贝。）在 `xGEN`、`xSYM(M)` 和 `xTRAN` 命令中，设置 `IMOVE=1` 就可实现移动操作。

按照样本生成图元

ANSYS 程序提供下列 `xGEN` 命令和 GUI 途径：

从关键点的样本生成另外的关键点：

命令：`KGEN`

GUI：Main Menu>Preprocessor>Copy>Keypoints

从线的样本生成另外的线：

命令：`LGEN`

GUI：Main Menu>Preprocessor>Copy>Lines

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Lines

从面的样本生成另外的面：

命令：`AGEN`

GUI：Main Menu>Preprocessor>Copy>Areas

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Areas

从体的样本生成另外的体：

命令：`VGEN`

GUI：Main Menu>Preprocessor>Copy>Volumes

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Volumes

由对称映像生成图元

ANSYS 程序提供了下列 xSYM (M) 命令和 GUI 途径:

生成关键点的映像集:

命令: KSYMM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>Keypoints

样本线通过对称映像生成线:

命令: LSYMM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>Lines

样本面通过对称映像生成面:

命令: ARSYM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>Areas

样本体通过对称映像生成体:

命令: VSYMM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>Volumes

将图元样本转换坐标系

ANSYS 程序提供了下列 XTRAN 命令和 GUI 途径:

将样本关键点转移到另一个坐标系:

命令: KTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Transfer Coord > Keypoints

将样本线转到另一个坐标系:

命令: LTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Transfer Coord>Lines

将样本面转到另一个坐标系:

命令: ATRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Transfer Coord>Areas

将样本体转到另一个坐标系

命令: VTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Transfer Coord>Volumes

3.5.7 实体模型图元的缩放

已定义的图元可以进行放大或缩小。xSCALE 命令族用来将激活的坐标系下的单个或多个图元进行定比例。

四个定比例命令每个都是将比例因子用到关键点坐标 X、Y、Z 上。如果在坐标系下进行定比例操作, X、Y、Z 分别代表 R、 θ 和 Z, 其中 θ 是偏转角。对球坐标系, X、Y 和 Z 分别代表 R、 θ 和 Φ , 而这里 θ 和 Φ 都是偏转角。

从关键点样本生成一定比例的关键点（已划分网格的）：

命令：KPSCALE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Keypoints

从线样本生成一定比例的线：

命令：LSSCALE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Lines

从面样本生成一定比例的面：

命令：ARSCALE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Areas

从体样本生成一定比例的体：

命令：VLSSCALE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Volumes

图 3-71 为对图元定比例的例子。

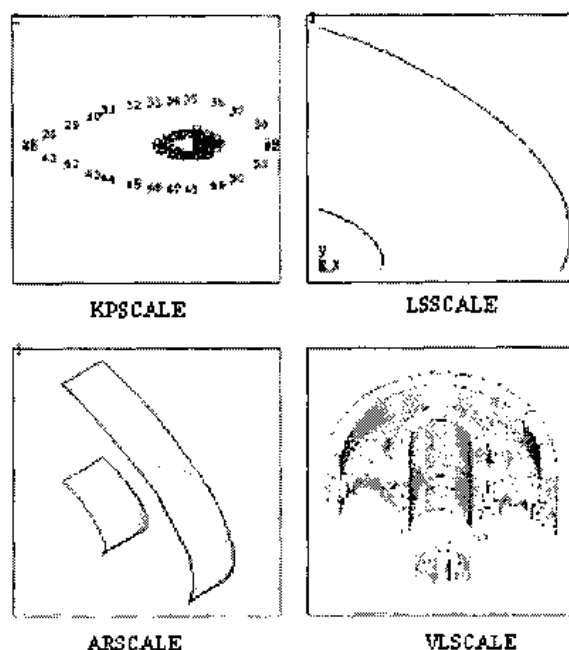


图 3-71 给图元定比例

3.5.8 实体模型加载

求解前，可随时在实体上直接加载。因此，实体模型加载可在划分有限元网格之前或之后进行（具体如何定义实体模型载荷在 ANSYS 基本分析程序指南第 2 章中有述）。下面讨论与实体模型加载有关的其他功能。

当发出 SOLVE 命令（GUI）开始求解计算时，实体模型上的载荷会自动传递到有限元模型中去。或者可以用下列方法手工地将其传递到有限元模型中去：

将实体模型载荷和边界条传递到有限元模型中去：

命令：SBCTRAN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Loads>Operate>All Solid Lds

Main Menu>Solution>Operate>All Solid Lds

将实体模型体积力载荷传递到有限元模型中去:

命令: BFTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Operate>Body Loads

Main Menu>Solution>Operate>Body Loads

将实体模型的自由度约束传递到有限元模型中去:

命令: DTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Operate>Constraints

Main Menu>Solution>Operate>Constraints

将实体模型的力传递到有限元模型中去:

命令: FTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Operate>Forces

Main Menu>Solution>Operate>Forces

将实体模型的表面载荷传递到有限元模型中去:

命令: SFTRAN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Operate>Surface Loads

Main Menu>Solution>Operate>Surface Loads

可以在打开适当的载荷标记之后的任何时候显示实体型载荷:

利用/PBC 命令显示边界条件标记。这个命令包含显示边界条件值和标记的选项。(在键入/PBC 命令之前关闭/VSCALE 可能会很有帮助。)

用/PBF 命令显示体积力的等值线。

用/PSF 命令显示模型上的表面力标记。

所有这些命令可以在 GUI 途径中得到: Utility Menu>PlotCtrls>Symbols.

节点和关键点位置处缺省显示大标记 (/PSYMB, DOT, 1)

要以小标记显示节点和关键点位置, 利用下列方法:

命令: /PSYMB, DOT, 0

GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Symbols

可以对所有的实体模型载荷列表, 或用以下方法对单一类型的实体模型载荷列表:

所有的实体模型载荷列表:

命令: SBCLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>Solid Model Loads

所有的关键点处的体积力载荷列表:

命令: BFKLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>Body Loads>On All Keypoints

Utility Menu>List>Loads>Body Loads>On Picked KPs

节点的自由度约束列表:

命令: DKLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On All Keypoints

Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On Picked KPs

线上的自由度约束列表:

命令: DLLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On All Lines

Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On Picked Lines

面上的自由度约束列表:

命令: DALIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On All Areas

Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On Picked Areas

关键点上的力列表:

命令: FKLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>Forces>On All Keypoints

Utility Menu>List>Loads>Forces>On Picked KPs

线上的表面载荷列表:

命令: SFLLIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>Surface Loads>On All Lines

Utility Menu>List>Loads>Surface Loads>On Picked Lines

面上的面载荷列表:

命令: SFALIST

GUI: Utility Menu>List>Loads>Surface Loads>On All Areas

Utility Menu>List>Loads>Surface Loads>On Picked Areas

3.5.9 质量和惯量的计算

XSUM 命令计算打印与实体模型图元相关的几何项。对于十分窄的面或细的体, 最小尺寸与最大尺寸之比小于 0.01, ASUM 和 VSUM 命令可能会产生错误的面或体的信息。为保证计算的准确性, 要保证将这样的体或面细分, 使最小与最大尺寸之比至少为 0.05。

计算和打印所选关键点的形心位置、转动惯量:

命令: KSUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Calc Geom Items>Of Keypoints

计算和打印所选线的长度、形心位置、转动惯量等:

命令: LSUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Calc Geom Items>Of Lines

计算和打印所选面的形心、转动惯量等:

命令: ASUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Calc Geom Items>Of Areas

计算和打印所选体的形心、转动惯量等:

命令: VSUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Calc Geom Items>Of Volumes

计算和打印所有前面提到的节点、线、面和体的几何参数。

命令: GSUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Operate>Calc Geom Items>Of Geometry

3.6 输入实体模型

3.6.1 从 IGES 文件中输入实体模型

本章讨论 ANSYS 内置的 IGES 转换过滤器，它不是诸如 ANSYS Connection Kit for SAT 这样的 ANSYS 接口产品。接口工具包是独立的，它增强了 ANSYS 的功能并有自己的文档。若想获得更多的信息，可参看 ANSYS 接口用户指南。

用户可以在 ANSYS 里直接建立模型，当然，作为一种可供替换的方案，也可以先在用户擅长的 CAD 系统里建立实体模型，把模型存为 IGES 文件格式，然后把这个模型输入到 ANSYS 中，一旦模型成功地输入后，就可以象在 ANSYS 中创建的模型那样对这个模型进行网格划分。

3.6.2 用 IGES 文件进行工作

IGES 是一种被普遍接受的中间标准格式，用来在不同的 CAD 和 CAE 系统之间交换几何模型。ANSYS 的 IGES 输入能力在工业界是最强的。而且，因为过滤器程序可以输入部分文件，所以用户至少可以输入模型的一些部分。

对于输入 IGES 文件，ANSYS 提供了下面两种选项：

- **DEFAULT**：这个选项使用一种增强的几何数据库，在大多数的情况下，应当选择这个选项。如果可能的话，这个选项可以在用户不必干预的情况下进行 IGES 文件的转换。转换包括自动地合并和生成体，为模型划分网格做准备。如果 DEFAULT 选项在转换 IGES 文件时遇到问题，ANSYS 会提示用户并激活一组增强的拓扑和几何工具，这些工具是专门设计成采用交互方式修改输入模型的。
- **ALTERNATE**：这个选项使用标准的 ANSYS 几何数据库，并提供同以前的 RV52 版本输入选项的向下兼容能力。然而有些时候，ANSYS 不能用 DEFAULT 选项转换 IGES 格式的模型，这时程序会提示试一试 ALTERNATE 选项。ALTERNATE 选项没有自动生成体的能力，而且通过这个转换器输入的模型还需要一些手工的修补。但是，通过这个转换器输入的模型不能使用增强的拓扑和几何修改工具，而必须使用标准的 PREP7 几何工具来修改模型。这个选项的指令在本章后面提供。

使用 DEFAULT 选项

对于一些模型，应用此选项的过程只需以下简单的几步，选择所要输入的 IGES 文件，设置一些选项，进行转换以后就可以对模型进行网格划分了。但是，许多模型并不能完全地输入或可能还需要一些手工修改，以便生成容易进行网格划分的体。这种情况是不可避免的，因为众多的 CAD 程序供应商对 IGES 标准有多种不同的解释。但是，一般使用此选项输入

IGES 文件时需要更多的内存，下面是一些建议。

1. 输入模型时打开自动合并和生成体的开关选项（缺省的条件）。对于大的文件（5MB 或更多），在输入模型之前先增加 ANSYS 的内存分配。
2. 模型需要手工清理时的一些指示包括进行合并时发生失败，或 ANSYS 发出一些不合理的内存要求。通常情况下，如果文件包含一些不必要（或无限制的）的图元，则自动合并就会失败或要求更多的内存。用户可以进行逐步的拓扑修改以删除那些图元，然后进行合并。否则必须：
 - 输入文件时不必进行合并和体的生成。
 - 通过拓扑和几何修整程序删除不想要的实体。
 - 合并模型。
 - 生成线和面以取代丢失的实体。
 - 生成体。
3. 如果 ANSYS 检测到模型中包含有多个连接在一起的体，程序就会将生成体的开关关掉，而用户必须自己生成这些体。

当 DEFAULT IGES 转换器遇到问题时，ANSYS 会建议用户必须使用拓扑和几何修改工具交互式地完成模型修改。下面简略地介绍一下对模型划分网格的各种准备工作。

- 使用拓扑修改工具闭合模型中各图元间的间隙。这应当是修改模型的第一步。除非已经明确地完成了拓扑修改，否则 ANSYS 是不准进行几何修改的。
- 修改不完全的图元以生成线、面和体。这一步通常是完成可以用线和面填充的边界（可以这样考虑这一步：通过已有的关键点生成线或通过已有的线生成面）。然后就可以通过已生成的面生成体了。
- 通过生成的几何体素增加几何形体并使用布尔操作。当重建某些不能从 IGES 文件转换进来的几何图元时，这一点就非常有必要了。
- 试着将模型划分成象第 7 章所示的那种网格。如果发现网格划分问题是由于模型中的物理特征引起的（非常小的线、面或环；面在一个方向上太长以致不成比例；或其他的参数问题），那么可以使用几何简化工具对模型进行简化。
- 简化几何结构以改善网格划分性能。对于这步工作，应当找出并去掉模型中的产生问题的细节。
- 试着再一次对模型划分网格。如果仍在网格划分中遇到问题，那么需要再进一步简化几何模型。

修改和增加从 CAD 文件输入的模型是一个典型的人机交互过程。当使用各种工具的命令时，GUI 会提供更为直观的方法来输入和修改实体模型。

用 DEFAULT 选项输入 IGES 文件

为输入一个 IGES 文件设置选项：

命令：IOPTN

GUI：Utility Menu>File>Import>IGES

- 选择缺省选项。
- 合并重合关键点选项设置为 YES（缺省）

- 如果可用则生成实体的选项设置为 YES (缺省)

选择 IGES 文件:

命令: IGESIN

GUI: File picker dialog box that follows after setting IGES options.

如果已经用缺省选项装入了一个 IGES 文件的话,那么在开始装入一个新的 IGES 文件之前,必须清理一下数据库。

当希望设置输入选项不同于上面所述的时候,会有几种情况。如果出现以下几种情况,就不应当合并关键点或生成实体了:

- 模型中存在一些已知道的实体并且在转换后要将其删掉。
- 模型中包含了一些已知没有进行适当修整的表面。在合并之前,应当在 ANSYS 中删除这些表面。

IGES 文件是非常大的。在这种情况下,下面的方法是一个很好的策略,即在试图合并关键点和生成实体之前不必激活这些选项而把模型输入到 ANSYS 中去。

- 模型包含一些与普通的边界不共享的表面。在这种情况下,用户可能希望单独对这些表面进行网格划分。
- 输入的模型不是一个实体模型。

如果 ANSYS 不能生成体,就会出现一个错误的对话框并建议使用拓扑和几何修改工具去手工修改模型。如果这种情况发生,程序会使拓扑修改工具成为可用的(必须首先试着用这个工具修改模型)。

对于 IOPTN 命令, SMALL 选项允许用户指定小的面是否被删除或保留。在大多数情况下,删除小面能加快处理时间并使模型成功地输入。但是,如果模型是一个薄壳结构或包含重要的小面时,将值设为 NO 就能保留所有的小面。这个设置可能会增加处理时间和内存使用量。

如果模型丢失了一些几何图元,对于 IOPTN 命令,可以设置 GTOLER 选项,然后再重新输入模型就能恢复它们了。GTOLER 设置一个因子值用来调整实际模型的最大尺寸(转换时,最大尺寸影响内公差)。通常,如果模型包含的平面与模型本身比例失调,就应当设置因子值,这样结果的尺寸就与模型的大小大至相当了。

大多数情况下,不推荐使用 GTOLER 选项。但是,如果模型不能成功地输入的话,有时使用 GTOLER 选项会有些帮助的。具体地说,设置大的因子值可以删除模型的一些小的细节。相反,如果模型丢失了一些小的细节特征(但是重要的),使用小的因子值就可以恢复它们。

修改拓扑结构

通过菜单途径 Menu>Preprocessor>-Modeling->Topo Repair 可以访问拓扑修改工具。通过把相邻图元缝合在一起的方法,可以使用这些工具在模型中修改小的间隙。间隙也指如下情况,如一个面的开口的边界处,或仅依附于一个面的线段。象这样的开口边界或线段必须合并到附近的面上以生成一个封闭的体。

拓扑修理工具提供了下面的功能:

- 设置间隙列表和画图命令的选项。
- 只画出开口的边界(间隙),只画出封闭的边界,或两者都画。

- 只列出开口的边界或只列出封闭的边界。
- 合并是指在指定公差范围内的间隙。
- 通过一个自动迭代合并过程，尽可能多的合并间隙。
- 删除几何图元。

可以认为拓扑修改工具是从其他 CAD 几何修改工具中分离出来的。如果 ANSYS 在模型输入过程中发现模型的拓扑和几何结构有问题，或模型输入时关闭了合并的开关，都能使这些工具成为可用状态。而且，当拓扑修改工具激活时，其他几何修改工具就不能用。当发出 GAPFINISH 命令 (Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Finish) 后，拓扑修理工具就消失了，而且对那个模型，不能再访问此工具了 (其他的几何修改工具此时被激活)。这个命令也可以使前处理回到开始的状态。在访问其他的几何工具之前必须进入拓扑修改的状态，因为在许多实际问题中，只需单独使用这些工具就能修改输入的模型了。虽然拓扑修改对于在模型中生成体不是很有效，但是在处理模型的几何问题之前，这些修改还是应当做的。通常使用下面的程序来修改模型的拓扑结构：

1. 设置绘图和列表这两种工具的选项。
2. 检查模型的间隙 (通过列表和绘图)。
3. 删除没有连接在一起的和不必要的几何图元。
4. 使用迭代合并工具来合并间隙。
5. 退出拓扑修改工具状态，如果需要的话，通过几何工具继续修改模型。

在对模型中的间隙定位之前，应当先设置绘图和列表工具的选项。可以通过下面的命令设置选项：

命令：GAPOPT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Preferences

这里有两个选项要进行设置：

- TOLER：这个选项为 GAPLOT，GAPLIST，GAPMERGE 等命令设置合并的公差因子。每一次设置这个公差，ANSYS 都会查询一下数据库并生成一个在指定公差范围内可以进行合并的内部线列表。当在拓扑修改选项的对话框上点击 OK 或 Apply 时，如果在这个公差范围内没有间隙能被合并的话，ANSYS 就会报告 (通过一个信息框)。
- OESELE：这个选项设置被列表和绘图命令所显示的开口边界 (间隙) 的类型。可以指定命令如下：
 - 对所有的开口边界列表/绘图，包括可以合并和不可合并的边界。
 - 将被合并的开口边界列表/绘图。
 - 将要保留的开口边界列表/绘图。

用以下方法，可以找出模型中的间隙，通过表格形式将它们列出或用绘线图的方式把它们显示出来。

使用列表功能：

列出在当前公差设置下可以被合并的开口边界 (间隙)。

命令：GAPLIST

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>-Lst Model Gaps-Open edges

列出所有的闭合边界。

命令: GAPLIST

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>-Lst Model Gaps-Closed edges

可以使用绘图功能对开口和闭合边界进行定位。而且还可以区别两类开口边界,一类是在当前合并公差下可以闭合的边界,另一类是不能闭合的边界。

下面解释不同的颜色在这个绘图命令中的用法和它们的意义:

- 蓝—闭合边界。
- 红—开口边界,如果在当前 GAPOPT 公差设置下(注意 GAPOPT 公差必须单独设置)发出 GAPMERGE 命令后,它仍然保持开口状态。
- 黄—开口边界,如果在当前 GAPOPT 公差设置之下(注意 GAPOPT 公差必须单独设置)发出 GAPMERGE 命令之后,它将闭合。

可以使用绘图命令进行下面的工作。

画出所有的在当前公差设置之下能被合并的开口边界:

命令: GAPPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>-Plt Model Gaps-Open Edges

画出所有的闭合边界:

命令: GAPPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Topo Repair>-Plt Model Gaps->Closed Edges

不管公差设置大小,画出所有的开口边界和闭合边界。

命令: GAPPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Topo Repair>-Plt Model Gaps->Opn & Closed

在拓扑修改菜单中还包括删除关键点、线和面的功能。可以使用删除功能完成下面的工作。

删除不与线相连接的关键点:

命令: KELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Delete>Keypoints

删除不与面相连接线:

命令: LDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Delete>Lines Only

删除不与面相连接的线和所有只与此线相连接的关键点:

命令: LDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Delete>Lines and Below

删除面:

命令: ADELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Delete>Areas Only

删除面和所有与此面相联系的线和关键点(不包括与其他面共享的):

命令: ADELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Delete>Areas and Below

有两种方法合并间隙:手工(指定一个公差)和自动(使用迭代合并工具)。对于大多

数的模型，应当使用自动的方法。无论使用哪一种方法，都要先保存数据，这样如果得到一个不想要的结果时，可以将原先的数据再调出。

◆ 使用自动合并功能

自动迭代合并工具试图合并所有的间隙，它从最低阶的公差（缺省为 1）开始，逐渐增加并通过每一个公差等级直到最大（缺省值为 10）。因此，每个间隙都能在尽可能低的公差水平上被闭合。几乎是在所有的情况下，都应想到使用这个功能。

如果此项操作得到了所不希望的结果，那么事先保存数据库可以“取消”自动合并的操作。如果发现在比较公差设置之下，经过迭代后几何形状发生变形，那么可以减小最大公差，然后再试一次。记住，尽管应当在这一步时尽可能多的修改间隙，但也可以使用其他的建模工具来修改间隙。

在尽可能低的公差水平下自动合并所有的间隙：

命令：GAPMERGE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>-Mrg Model Gaps->Iterative

◆ 使用手工合并功能

如果希望使用手工合并功能，那应使用尽可能低的公差设置来合并间隙。使用过高的公差值可能会导致曲面畸变。这种曲面在网格划分时就可能会产生问题。再一次重申，在每一次手工合并操作之前都应先保存一下数据库。这可以取消合并的结果。在合并之前，应确信已经通过 GAPOPT 命令（Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Preferences）设置了公差。

在所设置的公差值下合并间隙：

命令：GAPMERGE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>-Mrg Model Gaps-By Tolerance

◆ 如果不能将所有的间隙都合并掉该怎么办

有时候不能把模型中的所有间隙都合并掉。这种情况下，应当从拓扑修改工具退出，然后使用建模工具来修改剩下的间隙。

◆ 退出拓扑修改

当已经合并完所有想要修改的间隙后（或发现有些间隙不能在这一步中合并掉），就可以从拓扑修改中退出了。退出后，就不能再回到 TopoRepair 菜单里或发出 GAPMERGE 的命令，除非把模型通过 DEFAULT IGES 转换器再重输一遍，或从以前保存的模型中再恢复这个模型。

退出拓扑修改

命令：GAPFINISH

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Topo Repair>Finish

使用建模工具

ANSYS 提供了一整套用来修改和增加输入模型几何结构的工具，以便能完成体的生成并对模型进行网格划分。也可以使用这些工具来简化几何结构，消除在网格划分时引起问题的那些细节结构。下面列出了所能做的工作：

- 使用几何修改工具填充大的间隙（因为太大或不明确而不能被自动合并）。做这项

工作时,可能需要生成线以便完成连续的边界,然后在这些边界内生成面。也可从相邻的图元中分离出不需要的线和面。

- 使用几何简化工具消除不成比例的小的几何图元(例如非常小的线或环),不重要的细节特征,或在某一个方向上不成比例的面(细长条的面)。这些图元在对模型进行网格划分时可能会引起问题。最好是一个体已经生成了再做简化工作,这里推荐在简化之前应先完成体的生成。
- 使用几何增加工具生成附加的图元或增加的部分。这些工具被设计成与布尔工具一起工作,可用来填加孔洞或用几何体素增加模型。这些工具是 ANSYS 标准的 PREP7 几何工具的一个子集。

如前所提到的,可以使用几何修改工具来闭合孔洞和完成边界的连续化。也可以分离删除掉额外的或不必要的线和面。如果拓扑修改的合并操作不能完成所有的边界,就需要使用这些工具了。

按着下面的步骤完成一个体:

1. 在模型中找出孔洞或未闭合的边界(间隙)。在很多情况下,可以通过目视检查模型的方法来找出这些问题。为发现间隙,几何修改工具包括了一些用来绘出或列出那些在拓扑修改时未能解决的线的命令。但是,这些命令的功能在几何修改和拓扑修改之间还是有些微小的差异,拓扑修改方案被设计成与合并工具一起工作,因此需要通过 GAPOPT 命令来设置选项。这些命令的几何修改方案没有这些选项设置。
2. 近似表示出丢失的几何图元。可以在两个已存在的关键点之间生成一条直线以完成一个边界。然后就可以在边界内生成面。注意:ANSYS 总是生成由边界所定义的最小的面。
3. 用已完成的面生成体。

◆ 找出不完全的边界

使用下面的方法来定位不完全的边界。

列出开口边界:

命令: GAPLIST

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>-Lst Model Gaps-Open edges

列出所有的闭合边界:

命令: GAPLIST

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>-Lst Model Gaps-Closed edges

绘出所有的开口边界(开口的边界用红色绘出):

命令: GAPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>-Plt Model Gaps- Open Edges

绘出所有的闭合边界(闭合边界用蓝色绘出):

命令: GAPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>-Plt Model Gaps-Closed Edges

绘出所有的开口边界(红)和闭合边界(蓝):

命令: GAPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>-Plt Model Gaps-Opn & Closed

◆ 完成边界

将不完全的边界定位后,就可以生成线或完成环来生成边界。可以通过在已存在的关键点之间生成线来做到这一点(不能在空间中生成关键点)。

在两个关键点之间生成线:

命令: LNFILL

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>Fill Lines



图 3-72 一个开口边界

图 3-72 显示了一个简单的开口边界,它可以通过使用 LNFILL 命令和选择两个已设计好的关键点来闭合。

◆ 完成面

当已经完成了一个边界后,就可以生成那个边界的最小的面。用户不必选取一组完成的线来定义边界;如果它们存在,ANSYS 会自动找出这些连续线。如果边界中的任意一条线是同时属于一个以上的面,那么这个命令就会失败。而且,如果这个命令应用在多连接面(带有内环的面)上也会发生失败。

从一组线中创建一个面:

命令: ARFILL

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>Fill Areas

◆ 分离非拓扑图元

非拓扑线是一些连接在某一个面上的线,但它们没有用处,并且如果它们存在就会在生成体时引起问题。当把这些线从面上分离出来后,就可以使用 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete 功能把它们删去。

从面上分离出一个非拓扑线

命令: LNDETACH

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geom Repair>Detach Lines

删除一个非拓扑线

命令: LDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Lines Only

删除一个非拓扑线并同时删除所有属于这个线上的关键点

命令: LDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Lines and Below

同非拓扑线相似,非拓扑面必须从他们相邻的面上分离出来然后再删掉。

分离一个非拓扑面

命令: ARDETACH

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Geometry Repair>Detach Areas

删除一个非拓扑面

命令: ADELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Areas Only

删除一个已分离出来的非拓扑面和属于这个面的线和关键点（不包括与其他面共享的）

命令: ADELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Areas and Below

几何简化工具通常是被设计用在简单、局部结构的几何和拓扑修改上以避免网格划分时的不利影响。试图删除或修改重要（大的）几何图元可能会导致非法的拓扑表示，不推荐这种做法。几何简化命令最好在体上工作。推荐用户在进行简化之前应首先完成体。同时也建议用户无论何时都应尽可能保存正确的模型。

注意 用这些工具编辑图元时会除去任何已添加的载荷和边界条件。因此，应当在添加载荷和边界条件之前进行简化模型的工作。

模型可能包含：

- 不匀称的小图元，例如小的线，环和面。
- 形状不匀称的图元，例如薄片和某一个方向上很长的面。

这些图元在网格划分时可能会引起问题，应当删除掉或合并到大的图元中。用户的模型也许可能包含一些想删掉的几何图元以便简化模型，例如通孔，凸起等。

简化工具被设计用来删除这些有问题的细节。为帮助确定这些细节，ANSYS 提供了绘出小的面、线和环的功能。许多这些细节特征可以用目视检查模型的方法来发现。也可以通过先进行模型网格划分然后检查错误记录和结果网络来定位这些问题。

简化工具只能在还未进行网格划分的图元上使用。如果想在网格划分后还使用这些工具，必须先清理目标图元的网格。

◆ 目视检查有问题的细节

下面的插图（图 3-73）显示了多种可能在网格划分时引起问题的细节结构。

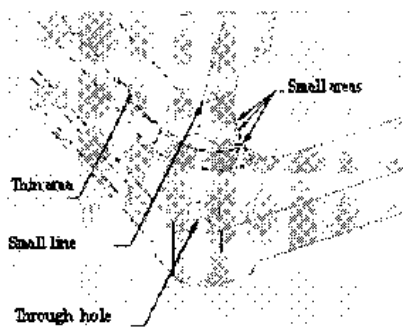


图 3-73 典型的可引起网格划分问题的模型图元



图 3-74 所显示的细节结构的网格划分结果

图 3-74 显示了上面模型网格划分的结果。请注意，从大单元到小单元的迅速过渡和网格的不规则性。

下面一节详细介绍这些工具，可以用它们自动地定位小的细节特征，例如小的线和面。

◆ 对微小细节进行定位

小的细节会导致很差的网格划分结果。ANSYS 有一组绘图和列表命令来帮助定位这些细节结构。每一个定位命令都有不同的选项设置，可用它们来定义“小”细节的组成。例如，如果用 SLSPLIT（菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-

>Simplify>Small Lines)命令,并用 FACTOR 作为寻找标准来找出的小的线,ANSYS 将会画出所有长度小于模型中线平均长度 VALUE 倍的微小的线。因此,设置一个较大的 VALUE 值就能让这个命令画出更长的线。查阅 ANSYS 命令参考手册可得每个命令和它的选项的完整描述。

定位微小的线:

命令: SLSPLIT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Detect/Display-Small Lines

定位微小的环:

命令: SLPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Detect/Display-Small Loops

定位微小的面:

命令: SARLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Detect/Display-Small Areas

在将有问题的图元定位后,就可以使用几何简化工具除去这些图元。下面的章节概括了除去这些图元的技术。

◆ 合并线

当可行时,应该合并短线形成更长的线。

只有在下列条件下,两条线才能合并在一起:

- 它们彼此是相连接的。
- 没有其他的连接线在它们的公共点上。

当用选择列表工作时,命令自动确定可以合并在一起的线(最后只能连一条线),形成可能的合并集,然后合并这些线。但是为了保持模型的规则性,建议一次只合并两条线。

◆ 将多条线合并成一条线

命令: LNMERGE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Merge Lines

图 3-75 的例子显示了一个有很多线的模型(a)可以合并形成一个简单得多的模型(b)。对于这样一个有规则形状和面数有限的模型,可以使用 LNMERGE, ALL 命令合并所有的线。但是,通常情况应该“一次只合并两条线”。

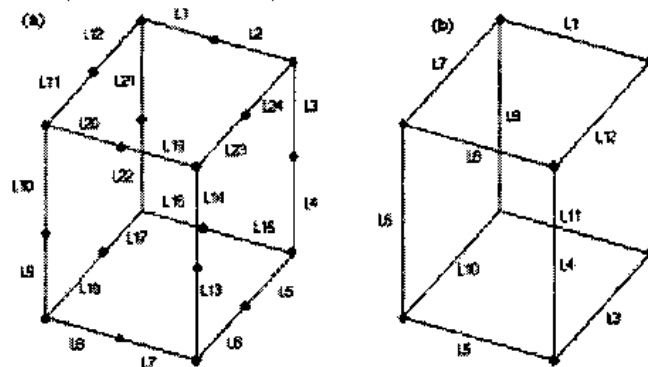


图 3-75 线合并操作的结果

◆ 合并相邻的面

当可行时,应从模型中除去那些非常小的面。一种方法是把面与相邻的面合并。虽

然合并面通常不会改变面的形状，但这可能引起参数问题。根据经验，应该用让它们保持规则形状这一原则来合并面（一个面是另一个面的延展）。图 3-76 提供了一个保持四边形形状的简化的例子。

注意 当面含有内环时（多连接面），不能进行面合并。

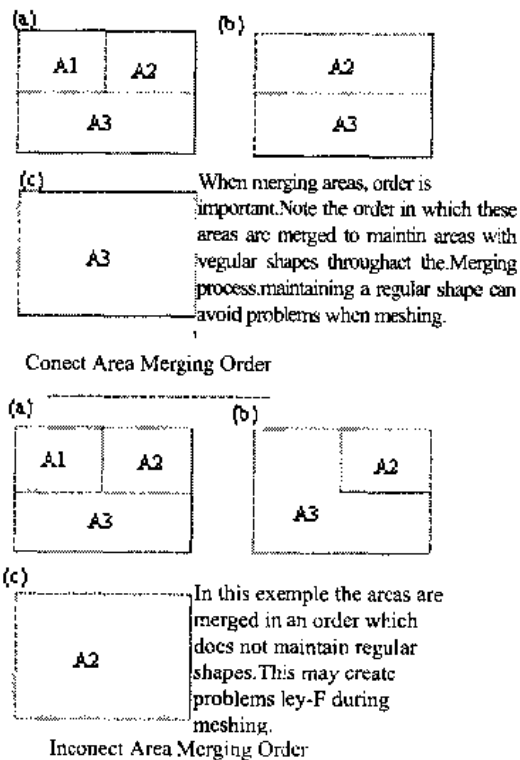


图 3-76 合并面时保持一个规则形状

尽管在一次操作中可以合并两个以上的面，但是最好每次只合并一对面。这会更好地保持规则形状，有助于避免网格划分时出现问题。面的参数依赖于面合并时的顺序。同一组面两种不同顺序的合并可能会导致不同的面参数并导致不同的网格划分结果。如果合并操作导致高度不正常的参数，命令就会失败。

注意 由于较差的面参数而导致的面合并失败或网格划分失败可以通过删除面并用 ARFILL 命令重新生成它这一方法来消除。

合并相邻的面：

命令：ARMERGE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Merge Areas

◆ 收缩线

可以将一个被选定的线收缩到它的任意一个关键点上（关键点必须包含在所选的线内）。对于消除多余的线，这是一个强有力的命令；但是它可能改变模型的几何结构，应该小心使用。特别是，线和面的收缩不检查图元相交，应避免任何导致图元互相贯穿的收缩操作。

收缩线到关键点上:

命令: LNCOLLAPSE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Collapse Lines

图 3-77 的例子显示了 LNCOLLAPSE 命令用来消除一般微小的线并使周围的面变成更规则形状的结果。图只显示了面周围的一部分。

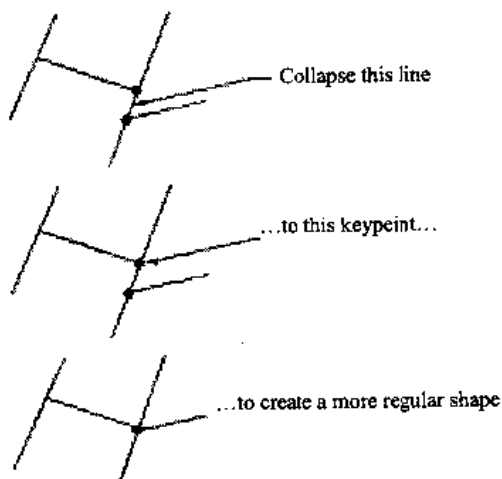


图 3-77 LNCOLLAPSE 命令的使用

◆ 收缩面

通过收缩面,可以改变模型的几何结构以删除可能在网格划分时引起问题的细节结构。例如,可以收缩一系列的面以除去一个细节结构(例如一个缺口,曲线或倒角)。收缩一个面不同于合并面,ANSYS 会将最小的线拉长延长到相邻的面以填补收缩面所留下的空间。因此,除了参数改变外,收缩面也改变模型的形状,以便完成去除不必要的细节这一工作。图 6-13 显示这一工作是如何进行的,详细叙述了将一系列面压缩成线。注:可以通过合并前面面上所留下的两个面来进一步简化这个模型(如图 3-78 (d) 所示)。

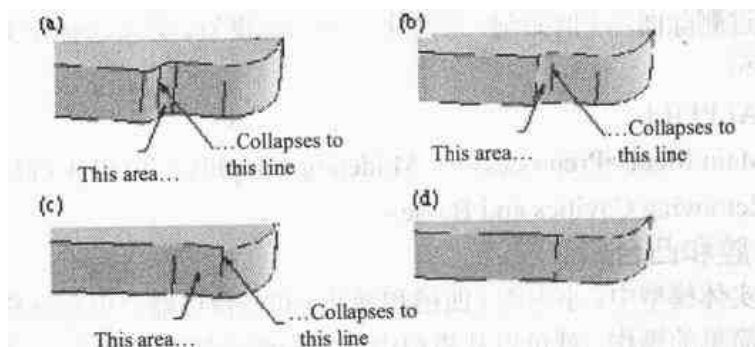


图 3-78 对模型进行了一系列的面收缩操作

当收缩一个面时,必须先拾取这个面,然后拾取这个面将要收缩到的线。根据经验,试着将一个面收缩到一个较长(相对于较短而言)的线,同时避免收缩带有很多线的面。有时在收缩面之前先收缩线比较有利。而且,面收缩命令不能对带有内环的面(多连接面)进行收缩。

收缩一个面:

命令: ARCOLLAPSE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Collapse Areas

◆ 分割线

可以往任何线上加一个附加的关键点, 把这条线分割成两条线, 这两条线以此新的关键点作为共同的端点。使用这个功能时, 必须先拾取一条线然后指定关键点的位置。新的关键点将被赋以下一个可用的关键点号。

这个工具最普通的用法是定义一对可用来分割一个面的新关键点。

分割一条线

命令: LNSPLIT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Simplify>-Toolkit->Split Lines

◆ 分割面

可以通过选择一对面内的可生成平分线的关键点来分割一个面。线是两个面内已存在的关键点之间的最短距离。如果在面边界线的合适位置上并不存在关键点, 可以用 LNSPLIT 命令生成它们。

注意 这个命令允许用户生成一条落在面外边的分割线, 应该避免生成这样的线。下列情况时应该考虑分割面。

- 除去一个“细长面”。实际上, 除掉细长面, 还需执行一些附加的步骤(这些步骤在本章后面“将命令组合起来”里有叙述)。
- 把一个多边形面简化成一个四边面(规则几何形状)。

分割一个面:

命令: ARSPLIT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Split Areas

Removing Area Loops

◆ 删除面环

可以通过删除面环(例如洞)来简化一个二维模型。必须选择定义面环的那一组线。

删除一个面环:

命令: ALPFILL

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Fill Loops

Removing Cavities and Bosses

◆ 删除内腔和凸台

在一个实体模型中, 小内腔(凹槽和通孔)和凸台可能会引起网格划分时出现问题。用一个简单的操作, 就可以从模型中把它们删除掉并包括所有附着其上的面。在一个细节结构被删除之前, 必须选定所有和它相联系的面, 而且面的选择顺序是很重要的。如果凸台或内腔是一个单独的图元, 面的选择顺序就没有多大关系了。但是, 如果凸台或内腔连接在某一个面上, 那个面就必须是选择列表中最后一个选定的面。如果被连接的面不是选择列表中最后一个面, 那么这个命令就可能会使几何模型发生畸变。

注意 如果命令的结果引起模型过大的畸变或无效的模型表示，ANSYS 会忽略这个命令。

删除一个内腔或通孔：

命令：VCVFILL

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Fill Cavity

删除一个凸台

命令：VCVFILL

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Simplify>-Toolkit-Remove Boss

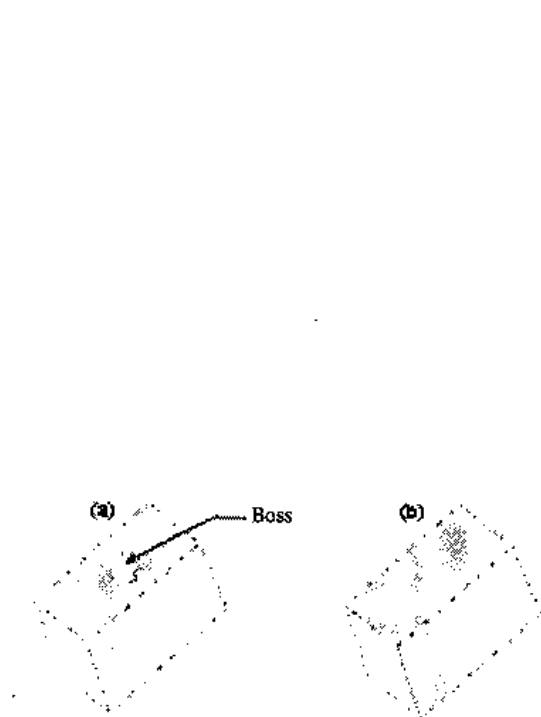


图 3-79 用 VCVFILL 命令删除两个通孔

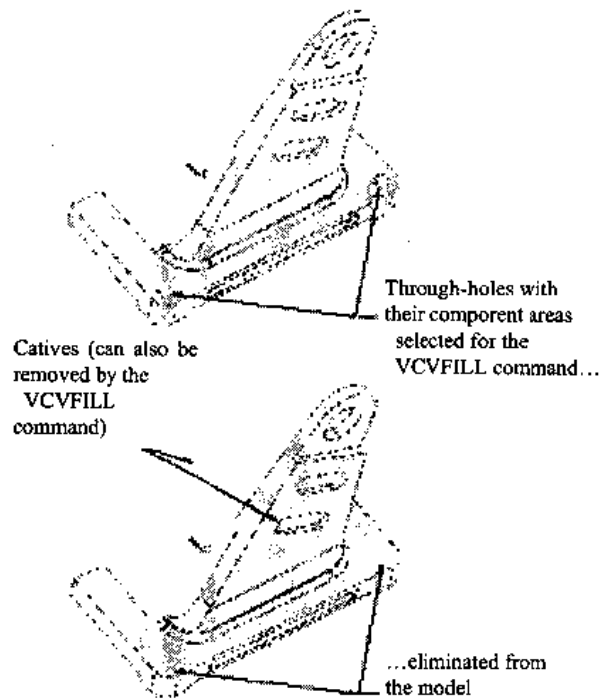


图 3-80 用 VCVFILL 命令删除一个凸台

产生输入问题的一些原因

- CAD 程序可能用一种不完全一致，带有特殊格式的方式来定义图元。
- CAD 文件是用一种看起来正确但对有限元分析工具却会引起问题（例如两个面之间的间隙，重叠等）的方法生成的。
- CAD 文件可能包含难以进行网格划分的物理细节，例如“细长”面。
- DEFAULT 选项有下列的局限。
- 这个选项不能转换诸如面积、文本、注解图元、结构图元等数据。而且，ANSYS 也会忽略任何这个选项不能识别的 IGES 图元。但是，这个选项会转换所有的 IGES 拓扑和几何图元。
- 在输入文件后，ANSYS 将不容许从 DEFAULT 选项转换到 ALTERNATE 选项，因而，自底向上的模型生成方法将不容许。

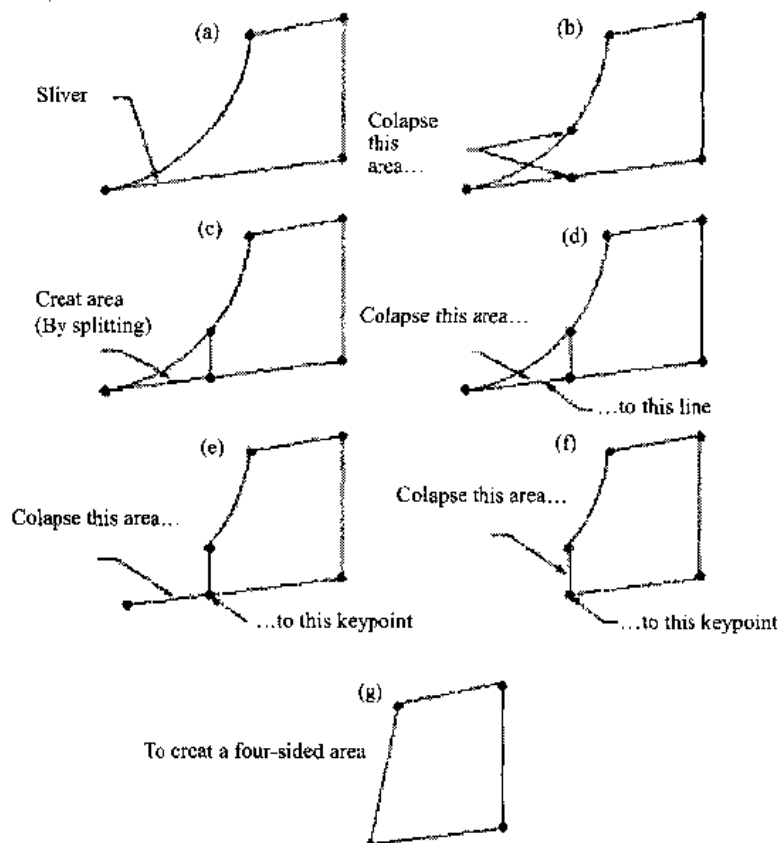


图 3-81 经常用来删除一个细节结构的各种不同的几何工具。

- ANSYS 不允许输出一个用 DEFAULT 过滤器输入的模型，就是说，不能使用 IGESOUT 和 CDWRITE 命令。如果一定要输出这个模型，就要使用 ALTERNATE 选项。
- ANSYS 不会合并关键点 (NUMMRG, KP)；在输入操作过程中合并是自动进行的。
- ANSYS 不连接线 and 面。但是，面和线的合并是可能的。

使用 ALTERNATE 选项

尽管在大多数情况下应该使用 DEFAULT 选项，但在下面的几种情况中可能会希望使用 ALTERNATE 选项：

- ANSYS 不能通过 DEFAULT 选项输入模型，程序可能会建议试一试 ALTERNATE 选项。
- 希望把模型输出到一个 IGES 文件中。
- 希望在输入的模型基础上建立新的模型图元。

为输入一个 IGES 文件设置选项：

命令：IOPTN

GUI：Utility Menu>File>Import>IGES

- 选择 Alternate 选项

选择 IGES 文件：

命令：IGESIN

GUI: File picker dialog box that follows after setting IGES options.

当 ANSYS 问 IGES 命令是否被执行时, 回答 Yes。

如果选择使用 ALTERNATE 选项来输入 IGES 模型, 在 CAD 系统中建模时, 应当注意以下准则。

◆ 当在 CAD 系统中建模时

- 考察 ANSYS 实体建模的程序, 相关的计划, 对称性和对有限元分析来说所必需的细节。例如, 对于轴对称模型, ANSYS 程序要求总体坐标的 Y 轴是旋转轴。参考第 2 章“规划分析方案”。
- 避免生成闭合曲线 (也就是说, 一条线的起点和终点是同一个点) 和闭合曲面 (例如曲面的起点和终点是同一条线)。ANSYS 不能存储闭合曲线或闭合区面 (它要求至少两个关键点)。如果一段闭合曲线, 闭合曲面, 或“修整好的”闭合曲面 (由 IGES 图元 120 和 144 或 128 和 144 所定义) 在读一个 IGES 文件时发生冲突, ANSYS 会试着把它分割成两个或更多的图元。
- 尽可能用 ANSYS 程序所支持的数据格式写进 IGES 文件 (参看 ANSYS 命令参考手册中 IOPTN 命令的描述)。

◆ 当从 CAD 程序写进 IGES 文件时

- 只转换分析所需要的几何体的一部分。有限元分析可以不需要 CAD 模型过多的细节。
- 对于已修整过表面的转换, IGES 文件中包括总体 XYZ 数据和 UV 数据。
- 如果要分析的模型非常大, 使用 CAD 程序的选择能力来创建几个 IGES 文件, 每一个文件包含模型的一部分。当每一个文件被读进时, ANSYS 程序会使用下面可用的实体号。然后用 PREP7 合并重合的图元 (NUMRG 命令或菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Merge Items)。
- 用 ASCII 码格式写 IGES 文件, 每个记录包含 80 个字符。
- 对于 PRO/ENGINEER 程序, 使用下面附加的准则:
- 设置 Config.pro 选项。“iges_out_trim_xyz”为“Yes”。
- 设置精度为 1E-6 然后再重新生成模型。

◆ 当把 IGES 文件读进 ANSYS 时

- 注意 ANSYS 程序发出的消息。警告信息给出一些事件的细节, 如 IGES 图元不能转换相应的 ANSYS 图元号。
- 如果任何的 IGES 图元不能被转换, 就使用 ANSYS 实体建模命令重新生成它们。ALTERNATE IGES; 过滤器程序能读进度数为小于等于 20 的任何有理 B 样条曲线图元 (类型号: 126), 或有理 B 样条曲面图元 (类型号 128)。当试图读进度数超过 20 的 B 样条曲线或曲面图元时会导致错误信息。
- 当从一个 IGES 文件中转换模型时, 可能会产生双重的线和关键点。这经常发生在由于公差和惯例影响所生成的 CAD 模型中。有时需要用 ANSYS 命令来清理这些实体模型以便合并重合的图元 (NOMMRG 命令或菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Merge Items)。当一个 IGES 文件用 ARX15 读进 ANSYS 时 (IGESIN) 合并是自动进行的。缺省的公差用来决定是否关键点应被合并成一个单

一的关键点。有时缺省的公差会不适当，必须进行调整。

- ◆ 当从 ANSYS 中写一个 IGES 文件时
- 在写 IGES 文件之前设置系统单位 (IVNITS)。这个信息是在 IGES 文件得到的，并被许多读过 IGES 文件的程序读过 (不能直接地在 GUI 中访问 IVNITS 命令)。
- 在写文件之前选择所有较低级的实体模型图元 (ALLSEL, BELOW, ALL 或菜单途径 Utility Menu>Select>Everything Below)
- 如果只输出模型的一部分，那么只选择这些图元 (例如面) 以及相应依附于这些图元的所有较低级的图元 (线和关键点) 来输出。然后在写文件之前反选掉任何较高级的图元 (体)。

第 4 章

ANSYS 网格划分及修改模型

4.1 如何对实体模型进行网格划分

生成节点和单元的网格划分过程包括三个步骤：

- 定义单元属性。
- 定义网格生成控制（不是必需的）ANSYS 程序提供了大量的网格生成控制，可按需选择。
- 生成网格。

第二步定义网格生成控制不是必须的，因为缺省的网格生成控制对多数模型生成都是合适的。如果没有指定网格生成控制，程序会在 DESIZE 命令使用缺省设置生成自由网格。可用 Smartsize 项替代产生质量更好的自由网格。

在对模型进行网格划分之前，甚至在建立模型之前，对于确定采用自由网格还是映射网格进行分析更为合适是十分重要的。自由网格对于单元形状无限制，并且没有特定的准则。

与自由网格相比，映射网格对包含的单元形状有限制，而且必须满足特定的规则。映射面网格只包含四边形或三角形单元，而映射体网格只包含六面体单元。而且，映射网格典型具有规则形状，明显成排的单元。如果想要这种网格类型，必须将模型生成具有一系列相当规则的体或面才能接受映射网格划分。

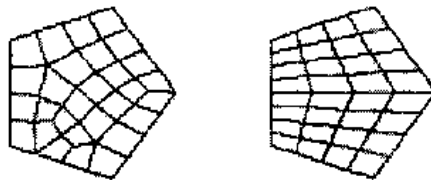


图 4-1 自由网格和映射网格

可用 MSHSKEY 命令或相应的 GUI 途径（后面有述）选择自由网格或映射网格。注意所用网格控制将随自由网格或映射网格划分而不同。后面将详细说明自由网格和映射网格划分。

4.2 定义单元属性

在生成节点和单元网格之前，必须定义合适的单元属性。即必须设定：

- 单元类型（如：BEAM3, SHELL61 等）。
- 定义实常数（给定诸如厚度或截面积等单元的几何特性）。
- 定义材料特性（如杨氏模量、热传导率等）。
- 单元坐标系
- 段标志

注意 在对梁划分网格时，还需给定作为线属性的关键点方向。

4.2.1 生成单元属性表

为定义单元属性，首先必须建立一些单元属性表。典型地包括单元类型（ET 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete）、实常数组（R 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants）、材料特性（MP 和 TB 命令，菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>material option）。

利用诸如 LOCAL、CLOCAL 等命令也可以组集坐标系表（菜单途径 Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>option）。这个表用来给单元分配单元坐标系（并非所有的单元类型都可用这种方式分配单元坐标系）。

对于用 BEAM188 或 BEAM189 单元对梁进行网格划分，可用 SECTYPE 和 SECDATA 命令建立分段表（Main Menu>Preprocessor>Sections）。

注意 方向关键点是线的属性而不是单元的属性。不能生成方向关键点表。

Type	Real	MAT	ESYS	SECTNUM
1 BEAM99	1 TYZ	1 EX	0 Cartesian	1 SECN01
2	2 TRZ	2 PRXY	1 Cylindrical	2 SECN02
3	3 ADDMAS		2 Spherical	3 SECN03
	⋮		3 Local	
	⋮			
m	n	p	q	s

Reference Number

图 4-2 单元属性表

查看表的内容可用 ETLIST（单元类型表）、RLIST（实常数表）、MPLIST（材料特性表）命令（或选择相应的菜单途径 Utility Menu>List>Properties>property type）。可用 CSLIST（或菜单途径 Utility Menu>List>Other>Local Coord Sys）命令查看坐标系表。可用 SLIST（Main Menu>Preprocessor>Sections>List Sections）命令查看分段表。

4.2.2 在划分网格之前分配单元属性

一旦建立了属性表，通过指向表中合适的条目即可对模型的不同部分分配单元属性。指针就是参考号码集，包括材料号 (MAT)，实常数集号 (REAL)，单元类型号 (TYPE)，坐标系号 (ESYS)，及用 BEAM188 或 BEAM189 单元对梁进行网格划分的分段号 (SECNUM)。可以直接给所选定的实体模型图元分配单元属性，或定义缺省的属性集，在后来的生成单元的网格划分操作中使用。

注意 如前面提到的，在对梁划分网格时给线分配方向关键点作为其属性，但并不能建立方向关键点表。因此，分配方向关键点为其属性时，必须是直接分配给所选线；不能定义缺省的方向关键点集以备后面网格划分操作所使用。

直接给实体模型图元分配属性

给实体模型图元分配单元属性允许对模型的每个区域预置单元属性，从而可以避免在网格划分过程中重置单元属性（清除实体模型的节点和单元不会删除直接分配给图元的属性）。

利用下列命令和 GUI 途径可直接给实体模型图元分配属性。

给关键点分配属性：

命令：KATT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>All Keypoints

Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Picked KPs

给线分配属性：

命令：LATT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>All Lines

Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Picked Lines

给面分配属性：

命令：AATT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>All Areas

Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Picked Areas

给体分配属性：

命令：VATT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>All Volumes

Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Picked Volumes

分配缺省属性

仅通过指向属性表的不同条目即可分配缺省的属性集。在生成模型时（即开始划分网格时），程序将从表中给实体模型和单元分配属性。直接分配给实际模型图元（上述）的属性将取代缺省的属性。而且，当清除实体模型图元的节点和单元时，任何通过缺省属性分配的属性也将被删除。

分配缺省的属性集：

命令: TYPE, REAL, MAT, ESYS, SECNUM

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Creat>Elements>Elem Attributes

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>Extrude / Sweep>Elem Ext Opts

自动选择维数正确的单元类型

有些情况下, ANSYS 程序能对网格划分或延伸操作选择正确的单元类型, 当选择为明显正确时, 用户不必人为地转换单元类型。

特殊地, 当未给实体模型图元分配单元类型 (xATT) 并且缺省的单元类型 (TYPE) 对于要执行的操作维数不对时, 但已定义单元属性表中只有一个维数正确的单元, 那么 ANSYS 程序会自动地利用此种单元类型执行这个操作。

网格划分和延伸操作受此影响的命令有 KMESH、LMESH、AMESH、VMESH、FVMESH、VOFFST、VEXT、VDRAG、VROTAT 和 VSWEAP。

4.3 网格划分控制

ANSYS 程序使用的缺省网格控制也许可以使用户的分析模型生成足够的网格。在此种情况下, 不必指定任何网格划分控制。可是, 如果使用网格划分控制, 则必须在对模型划分网格前设定网格划分控制。

网格划分控制能建立用在实体模型划分网格的因素, 如单元形状、中间节点位置、单元大小等。此步骤是整个分析中最重要的因素之一, 因为此阶段对模型生成的决定将对分析的准确性和经济性有决定性的影响。

4.3.1 ANSYS 网格划分工具

ANSYS 网格划分工具 (Main Menu>Preprocessor>MeshTool) 提供了最常用的网格划分控制和最常用网格划分操作的便捷途径。网格划分工具是一个交互的“工具箱”, 不仅由于它包含了大量的功能或(工具), 还因为一旦打开它, 它就保持打开的状态直到关闭它或离开前处理 PREP7。

尽管网格划分工具的所有功能也能通过另外的 ANSYS 命令和菜单得到, 但利用网格划分工具是十分有效的捷径。

通过网格划分工具可得的功能包括:

- 控制 SmartSizing 水平
- 设置单元尺寸控制
- 指定单元形状
- 指定网格划分类型 (自由或映射)
- 对实体模型图元划分网格
- 清除网格
- 细化网格

这个向导包含了所有的功能，关于网格划分工具的详细情况，利用上述途径打开它并点击它的帮助按钮。

4.3.2 单元形状

如果打算划分网格的单元类型可以采用不止一种形状，那么应当设置单元形状为最小的那一种。例如，在同一个划分网格的区域的多个面单元可以是三角形或四边形的。单元可是六面体（块）或四面体形状，但建议在同一个模型中不要混用这两种形状的单元。

◆ 注意单元形状的退化

本章假定用户熟悉单元形状退化的概念。例如，PLANE82 单元，它是有八个节点（I、J、K、L、M、N、O、P）的二维结构实体单元。缺省地，PLANE82 单元有四边形形状。可是，通过定义相同节点号的 K、L、O 可形成三角形单元。因此，PLANE82 单元可以退化为三角形。如 4-3 图所示 PLANE82 单元的缺省形式和退化形式。

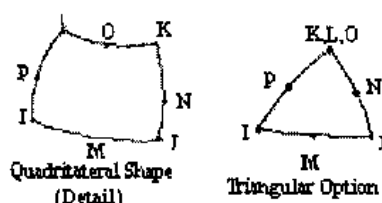


图 4-3 单元形状退化的例子

尽管它有助于用户理解这个概念，当在划分网格前指定单元形状时，不必考虑单元形状是缺省形式还是某一单元的退化形式。相反，可以考虑想要的单元形状本身最简单的形式。

用下列方法指定单元形状：

命令：MSHAPE, KEY, Dimension

GUI: Main Menu>Preprocessor>MeshTool

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

指定单元形状时要考虑两个因素：想要的单元形状和要划分网格的模型的维数。

◆ 命令方法

如果正在使用 MSHAPE 命令，维数（2D 或 3D）的值表明待划分网格模型的维数。

KEY 值（0 或 1）表示划分网格的单元形状：

当 KEY=0，如果 Dimension=2D，ANSYS 将用四边形单元划分网格，如果 Dimension=3D，ANSYS 将用六面体形的单元划分网格（只要单元类型分别支持四边形或六面体单元形状）。

当 KEY=1，如果 Dimension=2D，ANSYS 将用三角形单元划分网格，如果 Dimension=3D，ANSYS 将用四面体形单元划分网格（只要单元类型分别支持三角形或四面体单元形状）。

◆ GUI 方法（通过分网工具）

为提高效率，网格划分工具是推荐的指定单元形状的方法。可以通过下列 GUI 途径打开分网工具：Main Menu>Preprocessor >MeshTool。利用分网工具，只在让 ANSYS 对模型划分想要的单元形状上拾取即可。以网格划分工具中，也可拾取想让 ANSYS 所用的网格划分的类型（自由或映射）。使用网格划分工具使选择单元形状得到简化，因为它只提供所要求网格划分类型和模型维数相容的单元形状。

有些情况下, MSHAPE 命令及合适的网格划分命令 (AMESH、YMESH, 或其相应的菜单途经 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>meshing option) 就是对模型划分网格所需的。每个单元的大小由指定的缺省单元大小 (SMRTSIZE 或 DESIZE) 确定。例如, 图 4-4 (左) 模型可用 VMESH 命令生成右边的网格。

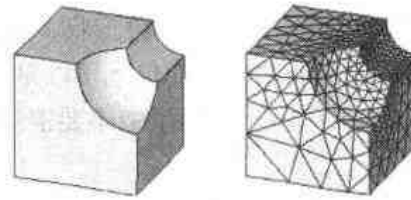


图 4-4 缺省单元尺寸

以上模型程序选择的单元尺寸可能对分析是足够的或不够, 取决于结构物理方面。改变网格划分的另一途径是改变缺省的 SmartSize level[SMRTSIZE]并重新进行网格划分。

4.3.3 选择自由或映射网格划分

除指定单元形状外, 还要指定对模型进行网格划分的网格划分类型 (自由或映射)。通过设置网格划分指令:

命令: MSHKEY

GUI: Main Menu>Preprocessor>MeshTool

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

可用网格划分工具 (Main Menu>Preprocessor>MeshTool) 指定网格划分类型。网格划分工具是推荐方法。

单元形状 (MSHAPH) 和网格划分类型 (MSHKEY) 的设置共同影响网格的生成。表 4-1 列出了 ANSYS 程序支持的单元形状和网格划分类型。表 4-2 未指定单元形状和 (或) 网格划分类型将发生的情况。

表 4-1 ANSYS 支持的单元形状和网格划分类型

Element Shape	Free Meshing	Mapped Meshing	Mapped If Possible Otherwise Free Mesh With SmartSizing On
Quadrilateral	Yes	Yes	Yes
Triangle	Yes	Yes	Yes
Hexahedral	No	Yes	No
Tetrahedral	Yes	No	No

表 4-2 未设定单元形状和 (或) 网格划分类型值的结果

Your action...	How it affects the mesh...
You issue the MSHAPE command with no arguments.	ANSYS uses quadrilateral-shaped or hexahedral-shaped elements to mesh the model, depending on whether you are meshing an area or a volume.
You do not specify an element shape, but you do specify the type of meshing to be used.	ANSYS uses the default shape of the element to mesh the model. It uses the type of meshing that you specified.

(续上表)

Your action...	How it affects the mesh...
You specify neither an element shape nor the type of meshing to be used.	ANSYS uses the default shape of the element to mesh the model. It uses whichever type of meshing is the default for that shape.

4.3.4 控制边中节点的位置

当使用二次单元划分网格时，可以控制中间节点的位置。中间节点位置的选择有：

- 边界区域单元上的中间节点沿着边界线或面的弯曲方向。这是缺省设置。
- 设置所有单元的中间节点且单元边是直的。此选项允许沿曲线进行粗糙的网格划分。但是模型的弯曲并不与之匹配。
- 不生成中间节点（从单元中消除中间节点）。

控制中间节点的位置：

命令：MSHMID

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

4.3.5 自由网格划分中单元的 SmartSizing

灵活的单元大小 (SmartSizing) 是自由网格划分操作生成初始单元大小的网格划分特点。灵活的单元大小在自由网格生成过程中对生成合理的单元形状提供了机会。这个特点由 SMRTSIZE 命令控制，提供了可供 H 方法和 P 方法模型使用的网格划分设置范围（从粗糙到细致的网格划分）。

缺省的，DESIZE 命令方法控制单元大小在自由网格划分中使用。然而，在自由网格划分中推荐使用 Smartsizing。为打开 Smartsizing，只要在 SMRTSIZE 命令中指定单元大小即可（见下面的讨论）。

注意 如果利用 Smartsizing 对只包含一个面的模型进行网格划分，则 ANSYS 将利用此面去计算对此模型划分网格所用的向导单元的大小。另一方面，对既包含面又包含体的模型用 SmartSize，ANSYS 程序将用体去计算模型的向导单元。尽管第一个模型中的面（仅有面）和第二个模型中的面（有面和体）相同，Smartsizing 设置也相同，ANSYS 用来对第一个模型划分网格的单元没有第二个模型中的单元粗糙。ANSYS 这样做是为了防止体划分了过多的网格（可是，如果指定了总体单元大小 [ESIZE]，两个模型的单元就会相同了，因为 ANSYS 将使用给定的大小作为向导单元的大小）。

注意 当使用 SmartSizing 时，建议指定想要的 SmartSizing 设置 [SMRTSIZE]，然后应立即对整个模型进行网格划分 [AMESH, ALL 或 VMESH, ALL]，而不是用面对面设置 SmartSizing 或用体对体设置 SmartSizing，用面对面或体对体设置模型的 SmartSizing 会生成不令人满意的网格。

SmartSizing 的优点

SmartSizing 算法首先对待划分网格的面或体的所有线估算单元边长。然后对几何体中的弯曲近似区域的线进行细化。由于所有的线和面在网格划分开始时已指定大小，生成网格的质量将与待划分网格的面或体的顺序无关（记住，所有的面和体应当同时划分网格结果最好）。

如果用四边形单元来给面划分网格，SmartSizing 尽量给每一个面平均分配线数以使全部划分为四边形成为可能。只有在迫使所有的网格都为四边形时会生成形状很差的单元或在边界出现奇异区域时在网格中才会出现三角形单元。

基本与高级的 SmartSizing 控制

这里有两种 SmartSizing 控制：基本的和高级的。

◆ 基本的控制

利用基本控制，可以简单地指定网格划分大小从 1（细网格）到 0（粗网格），程序会自动地设置一系列独立的控制值用来生成想要的大小。利用下列方法指定单元大小：

命令：SMRTSIZE, SIZLVL

GUI：Main Menu>Preprocessor>MeshTool

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrls>-SmartSize-Basic

图 4-5 表示利用几个不同的 SmartSizing 设置（包括缺省值 6 在内）生成的网格。

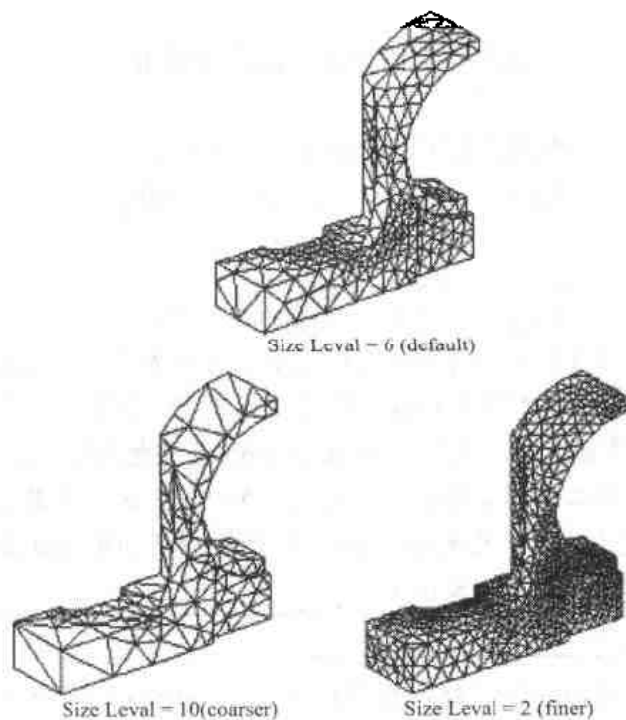


图 4-5 对同一模型改变 SmartSize 的尺度

◆ 高级控制

用户可能会乐于使用高级方法，专门设置人工控制网格质量。允许“tweak”网格

以更好地适应用户的需要。

可以改变诸如小孔和小角度处的细化选项。而且，可用 ESIZE 命令给 SmartSizing 设定初始单元尺寸。

用下列方法设置高级 SmartSizing 控制：

命令：SMRTSIZE and ESIZE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-SmartSize-Adv Opts

与其他网格控制相互联接

局部单元尺寸控制可用来与 SmartSizing 相连。但是，当设置的单元尺寸发生冲突时，SmartSizing 算法将做如下处理：

- 给指定线的单元尺寸将作为定义尺寸使用（LESIZE 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Lines-option）。SmartSizing 和 LESIZE 命令一起工作比 ANSYS5.4 版本要好得多。当用 SmartSizing 命令对已定义了单元的线相邻的线进行定义时，ANSYS 在执行 SmartSizing 前将会考虑那个尺寸，生成良好的网格。
- 任何对关键点指定的单元尺寸（KESIZE 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Keypoints-option）都会得到分配，但为适应弯曲和几何近似将被取代。
- 如果设置总体单元尺寸（ESIZE 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Size），为适应弯曲和几何近似它将会在必要时被取代。如果希望单元尺寸一致，应当设定总体单元尺寸，并将 SmartSizing 关闭（SMRTSIZE，OFF 或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-SmartSize-Basic）。
- 用 DESIZE 命令（Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Other）指定的缺省单元尺寸在 SmartSizing 打开时将被忽略。

4.3.6 对映射网格划分的缺省单元尺寸

DESIZE 命令可以改变下列缺省值：最小未划分网格的线上最少和最多的单元数。每个单元的最大跨角，最大及最小边长。

DESIZE 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Other）常用来控制映射网格划分的单元尺寸。DESIZE 命令也用在自由网格划分的缺省设置。但是，对自由网格划分建议使用 SmartSizing（SMRTSIZE）。

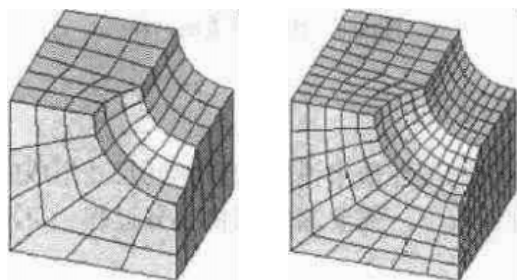


图 4-6 改变缺省单元尺寸。

对于较大的模型，通过 DESIZE 命令查看缺省的网格尺寸是明智的。可通过显示线的分割来实现。预查看缺省的网格尺寸的步骤如下：

1. 建立实体模型
2. 选择单元类型
3. 选择容许的单元形状 (MSHAPE)
4. 选择网格划分器 (自由或映射) (MSHKEY)
5. 键入 LESIZE, ALL (通过 DESIZE 规定调整线的分割数)
6. 画线 (LPLOT)

例如：

```
ET,1,45          ! 8 node hexahedral-shaped element
MSHAPE,0        ! Use hexahedra
MSHKEY,1        ! Use mapped meshing
LESIZE,ALL      ! Adjust line divisions based on DESIZE
LPLOT
```

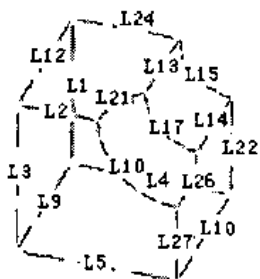


图 4-7 预览缺省的网格

```
DESIZE,5,,30,15 ! Change default element sizes
LESIZE,ALL,,,,,1 ! Adjust line divisions based on DESIZE, force adjustments
LPLOT
```

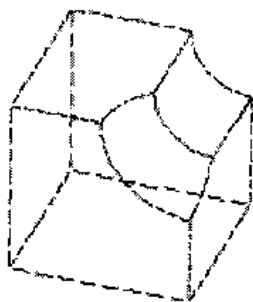


图 4-8 预览改进的网格

4.3.7 局部网格划分控制

在许多情况下，对结构的物理性质来说用缺省单元尺寸生成的网格不合适。例如有应力集中或奇异的模型。在这种情况下，需要深入网格划分过程。可用下列定义单元的方法来进行控制。

通过表面的边界所用的单元边长控制总体单元尺寸，或控制每条线划分的单元数：

命令: ESIZE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Size

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>Extrude/Sweep>Size

控制给定关键点附近的单元尺寸:

命令: KESIZE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Keypoints-All KPs

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Keypoints-Picked KPs

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Keypoints-Clr Size

控制给定线上的单元数:

命令: LESIZE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Lines-All Lines

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Lines-Picked Lines

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Lines-Clr Size

注意 当用 GUI 方法对给定线设置单元数时, 任何与一个或更多的已划分网格的线、面或体相连的线, ANSYS 程序提示用户决定是否清除已划分网格的图元。如果肯定提示, 那么 ANSYS 就会清除已划分了网格的图元 (只有在通过 GUI 执行此项操作时出现; 在使用 [LESIZE] 命令方法时 ANSYS 并不提示用户)。

以上叙述的所有定义尺寸的方法都可以一起使用。当使用一个以上上述命令并发生尺寸冲突的情况时, 遵守一定的级别。这种级别与使用 DESIZE 还是 SMRTSIZE 方法定义缺省单元尺寸而会有所不同。

用 DESIZE 定义单元尺寸命令的级别。对任何给定线, 沿线定义的单元尺寸如下:

——用 LESIZE 命令给线分割常是高级别。

——如果未对线进行分割, 则用 KESIZE 在其关键点处定义。

——如果未在线上或其关键点上指定尺寸, 可用 ESIZE 定义单元尺寸。

——如果没有上述任何尺寸定义, 则用 DESIZE 命令控制线上的单元尺寸。

用 SMRTSIZE 定义单元尺寸的优先级。对任何给定线, 沿着线生成的单元尺寸如下:

——用 LESIZE 定义的线分割常是高优先级。

——如果没有给线分割, 则用 KESIZE 在其关键点上定义, 但在弯曲线和一些小的几何区域将被取代。

——如果没有任何上述尺寸定义, 则 SMRTSIZE 命令会控制线的单元尺寸。

注意 对于用 KESIZE 或 ESIZE 命令建立的线分割和网格划分操作, 在线列表 [LLIST] 时会出现负的编号。而由 LESIZE 建立的线分割则为正的编号。这些号码的符号反映在清除网格 (ACLEAR, VCLEAR 命令, 或菜单途径 Main Menu> Preprocessor> -Meshing-Clear> entity) 之后 ANSYS 如何处理线分割。如果线分割的号码为正, 则在 ANSYS 清除网格操作时不消除线分割; 如果号码为负, 则 ANSYS 在清除网格操作时也将消除线分割 (在后来的线列表中会表现为零)。

对线性静态结构分析和线性稳态热分析可用自适应网格划分功能自动建立网格划分控制，这种控制基于使离散误差低于某个目标值。

4.3.8 网格划分控制

关于网格划分尺寸的讨论是集中在实体模型边界的外部单元尺寸的定义 (LESIZE, ESIZE 等)。然而，也可以在面的内部没有可以引导网格划分的尺寸线处控制网格划分。可用下列方法实现：

命令：MOPT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Area Cntrl

控制网格的扩展

MOPT 命令中的 Lab=EXPND 项可以用来引导在一个面的边界处将网格划分得较细，而在内部划分得相对粗糙（如图 4-9 所示）。

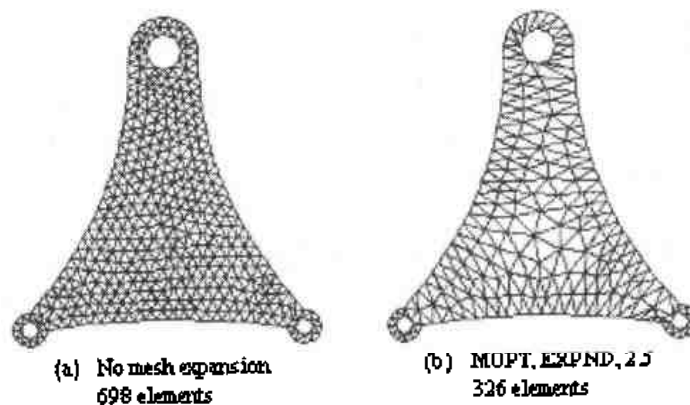


图 4-9 网格扩展及有网格扩展的面网格划分

图 4-9 中，网格 (a) 是由 ESIZE 命令 (Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Cntrl>-Global-Size) 对面进行设定而生成的。注意到单元形状较好，但由于单元尺寸较均匀，所以需要 698 个单元来填充这个面（这个模型仅由一个面组成）。利用 MOPT 命令的扩展功能 (Lab=EXPND)，网格 (b) 生成较少的单元，因为这种网格划分容许面上网格从边界上的较小尺寸的单元扩展到内部较大的单元。但是，有些用这种方法划分的网格单元，尺寸比较差（例如，小孔附近）。样式 (b) 的另一缺点是从小单元到大单元的单元变化较大。尤其是在小孔附近更加明显。

注意 尽管讨论局限在面网格扩展 [LAB=EXPND]，仍可用 MOPT 命令控制四面体网格的扩展 [LAB=TETEXPND]，详见 ANSYS 命令参考手册中有关 MOPT 命令的叙述。

控制转换网格划分

为改善 (b) 中的网格，需要从边界的小单元到内部的大单元的更平缓过渡。MOPT 命令中的 Lab=TRANS 项用来控制从细到粗网格的过渡。图 4-10 为用 MOPT, TRAN, 1.3 命令对上述相同区域划分的网格，这个网格比图 4-9 中的 (a) 中网格数少，但从小单元到大

单元的过渡却是相当平缓，而且单元的尺寸比 4-9 图中的 (b) 网格好得多。

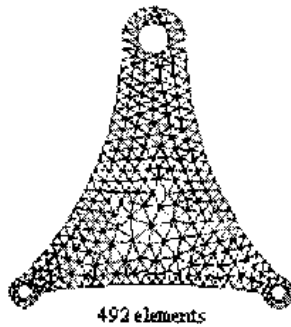


图 4-10 用扩展和转接控制 (MOPT 命令) 划分的面网格

控制 ANSYS 的网格划分器

可用 MOPT 命令控制表面网格划分器(三角形和四边形)和四面体网格划分器,使 ANSYS 执行网格划分操作 (AMESH、VMESH)

注意 四边形的表面网格划分与选择三角形表面网格划分器划分的网格是不同的。这是对的，因为所有的自由四边形网格划分算法用三角形网格作为起点。

命令: MOPT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

◆ 表面网格划分功能

以下功能针对三角形表面网格划分:

- 让 ANSYS 选择使用哪一个三角形表面网格划分器。这是建议设置和缺省设置。多数情况下, ANSYS 选择主三角网格划分器, 即 Riemann 空间网格划分器。无论何种原因网格划分器失效, ANSYS 都要变换网格划分器并重新执行网格划分操作。

选择此功能, 键入 MOPT, AMESH, DEFAULT 命令。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并在三角网格划分器功能菜单中选择程序 (Program Chooses)。

- 主三角表面网格划分器 (Riemann 空间网格划分器)。ANSYS 使用主网格划分器, 并且在主网格划分器失效时并不会更换网格划分器。Riemann 空间网格划分器适于大多数表面。

选择此项功能, 键入 MOPT, AMSEH, MAIN。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并在三角网格划分器功能菜单中选择主网格划分器 (Main)。

- 第一替换三角表面网格划分器 (3-D tri 网格划分器)。ANSYS 使用第一替换三角网格划分器, 在此网格划分器失效时程序不会更换其他网格划分器。出于速度考虑建议不使用它。但是, 对在参数空间中的退化表面, 这种网格划分器却有最好的结果。

选择此项功能, 键入命令 MOPT, AMESH, ALTERNATE。通过 GUI 途径, 打开网格划分器对话框并在三角网格划分器功能菜单中选择替换项 (Alternate)。

- 第二替换三角表面网格划分器 (2-D 参数空间网格划分器) ANSYS 使用第二替换三角网格划分器, 在此网格划分器失效时程序不会更换其他网格划分器。对于退化的

表面（球、圆锥等）或参数化较差的表面建议不使用它，因为生成的网格质量较差。

选择此项功能，键入命令 MOPT, AMESH, ALTZ。通过 GUI 途径，打开网格划分器对话框并在三角网格划分器功能菜单中替换项 2（Alternate 2）

◆ 以下功能针对四边形表面网格划分

注意四边形的表面网格划分与三角形表面网格划分器划分的网格是不同的。这是对的，因为所有的自由四边形网格划分算法用三角形网格作为起点。

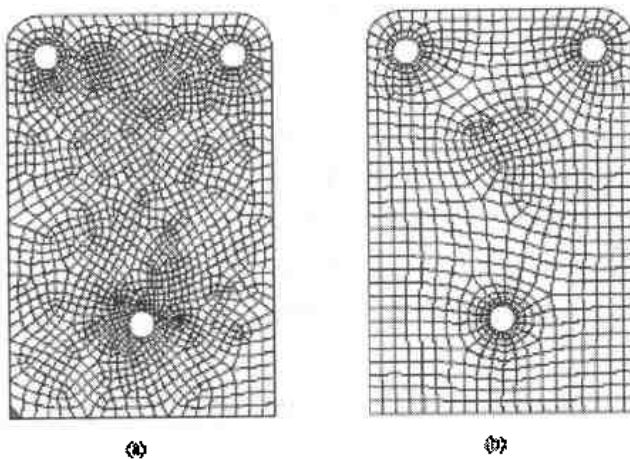
- 让 ANSYS 程序选择四边形表面网格划分器。这是建议设置和缺省设置。在多数情况下，ANSYS 会选择主四边形网格划分器，即 Q-Morph（quad-morphing）网格划分器。对十分粗糙的网格划分，ANSYS 会选择替换为四边形网格划分器。无论何种原因使网格划分器失效，ANSYS 选择其他网格划分器并重新开始网格划分操作。

选择此项功能，键入 MOPT, QMESH, DEFAULT 命令，通过 GUI 途径，打开网格划分功能对话框，从四边形网格划分器功能菜单选择程序选择（Program Chooses）。

- 主四边形表面网格划分器（Q-Morph），ANSYS 使用主网格划分器，如果主网格划分器失效 ANSYS 并不会更换网格划分器。

在多数情况下，Q-Morph 网格划分器会得到高质量的单元（见图 4-11）。Q-Morph 网格划分器对要求边界敏感的应用及高度有规则的节点和单元时尤其有用。

注意 尽管图 4-11 这两种网格都只包含一个三角形单元（三角形单元已在图中用相影表示），图 4-11（a）中的三角形单元出现在面的边界上。而图 4-11（b）中的三角形单元出现在内部，是在网格划分中更希望的位置。



网格（a）是用替换的四边形网格划分器划分的表面网格
网格（b）是用 Q-Morph 网格划分器对同一表面的网格划分

图 4-11

对 Q-Morph 网格划分将一个面全部生成四边形的网格，面边界线的分割数必须是偶数（在多数情况下，打开 SmartSizing [SMRTSIZE, SIZLVL] 将会在边界上产生偶数个线分割）。

如果任何下列条件成立将会在面中出现三角形单元：

1. 在面的边界上线分割的总数为奇数。
2. 将错误四边形网格单元分裂选项打开（MOPT, SPLIT, ON 或 MOPT, SPLIT, ERR），

如果 ANSYS 不将此单元分裂就会使四边形单元形状错误超过限制（将错误单元分裂是缺省项）。

3. 将错误和警告单元 (MOPT, SPLIT, WARN) 四边形单元分裂项打开, 如果 ANSYS 不将单元分裂成三角形单元将生成有严重形状错误和警告的四边形单元。
4. 对于 a) 错误单元或 b) 错误和警告四边形单元分裂项都打开时, 并且面中两相邻边界有小角度 ($<30^\circ$)。见图 4-12。

选择此功能 (Q-Morph 网格划分器), 键入命令 MOPT, QMESH, MAIN。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并从四边形网格划分器功能菜单选择主网格划分器 (Main)。

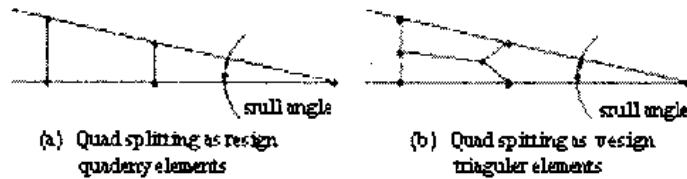


图 4-12 当四边形分裂项打开时包含小角度的面生成三角形单元

- 替换四边形表面网格划分器。ANSYS 使用替换网格划分器时, 如果替换网格划分器失效时并不更换为主网格划分器。

因此此网格划分器能在一个面全部生成四边形单元的网格, 面的边界处总的线分割数必须是偶数。并且分裂四边形网格项必须关闭 (MOPT, SPLIT, OFF) 要选择此功能, 键入 MOPT, QMESH, ALTERNATE 命令。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框, 并选择四边形网格划分器功能菜单中的替换项 (Alternate) 为使用此网格划分器, 必须选择第一替换或第二替换三角形表面网格划分器。

◆ 四面体单元网格划分功能

以下功能针对四面体单元网格划分:

- 让 ANSYS 程序选择采用何种四面体形网格划分器, 这是缺省设置。在这种设置下, 只要可能 ANSYS 会用主四面体网格划分器; 否则它用替换的四面体网格划分器 (ANSYS 在用 P 方法进行网格划分时常采用替换的四面体网格划分器)。

为选择此功能, 键入 MOPT, VMESH, DEFAULT 命令。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并选择四边形网格划分器功能菜单中的程序选择项 (Program Chooses)。

- 主四面体网格划分器 (Delauay 技术网格划分器)。对多数模型而言, 此网格划分器明显比替换的网格划分器速度快。

为选择主四面体网格划分器, 键入 MOPT, VWESH, MAIN 命令。通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并选择四面体网格划分器功能菜单中的主网格划分器 (Main)。

- 替换的四面体网格划分器 (由早先 5.2 版本增强的网格划分器)。此网格划分器不支持从面网格生成四面体网格 (FVMESH)。如果选择了此网格划分器并键入了 FVMESH 命令, ANSYS 将利用主四面体网格划分器由面生成四面体网格并给用户一个警告信息。

为选择替换的四面体网格划分器, 键入 MOPT, VMESH, ALTERNATE 命令, 通过 GUI 途径, 打开网格划分器功能对话框并选择四面体网格划分器功能菜单中的替换项 (Alternate)。

控制四面体单元的改进

可在 ANSYS 程序执行下一步自由体网格划分操作 (VMESH, FVMESH) 之前, 用 MOPT 命令控制四面体单元改进的程度。

命令: MOPT, TIMP, Value

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

四面体单元改进的程度范围为从 1 到 6, 程度 1 只提供最小的改进, 程度 5 对线性四面体网格划分提供了最大程度的改进, 而程度 6 对二次四面体网格提供了最大程度的改进, 最小程度的改进 (MOPT, TIMP, 1) 只由主四面体网格划分器 (MOPT, VMESH, MAIN) 支持。如果改进程度置为 1, 使用替换的网格划分器 (MOPT, VMESH, ALTERNATE) 时, ANSYS 程序会自动地以程度 3 执行对四面体单元的改进。可以将四面体改进项关闭, 但建议不要这样做, 因为常导致极差的单元形状和网格划分失败。关于每一改进程度, 参见 ANSYS 命令参考手册中 MOPT 命令的叙述。

注意 多数情况下, ANSYS 所用缺省的四面体单元改进的程度将给以用户满意的结果。但是, 可能会遇到用 VIMP 命令对给定四面体单元网格进行另外的改进情况。详见 4.6.5 节中关于如何要求另外的改进及何时这样做才会有益。

4.3.9 生成过渡的棱锥单元

体的有些区域很容易分成可用映射网格划分部分, 而另一些区域可能具有复杂的几何形状。对体可用六面体单元填充能用映射网格划分的区域。用四面体单元填充其他区域。有些情况下, 高梯度区域要求用六面体单元去细致雕刻, 而其他非关键区域, 用四面体单元可能就足够了。

不幸的是, 在同一网格中混用六面体和四面体形的单元会导致不协调。且有限元方法要求单元网格相同。可通过下面的向导避免这种情况下问题的出现。令 ANSYS 在它们的交界处自动生成棱锥单元, 可以容易地在六面单元和四面体单元之间保证数学上的连续。

ANSYS 程序可以生成过渡棱锥单元的情形

ANSYS 程序在下列情况会生成过渡的棱锥单元:

- 用户准备对体用四面体单元进行网格划分。待划分网格的体直接与已用六面体单元划分了网格的体相邻。两个体已被粘在一起 (VGLUE) (想生成过渡棱锥单元的两个体必须共享一个公共面; 由六面体单元而来的四面体的表面必须位于公共面上)。
- 体上至少有一个面已用四边形网格划分了。这种情况下, 仅用四面体单元对体划分网格。ANSYS 程序将直接从四边形单元形成棱锥单元。如果需要, 可用六面体单元对任何相邻体进行网格划分。

图 4-13 所示为在四面体和六面体单元的交界处生成过渡的棱锥。在这个例子中, 一简单的长方体被一任意切平面分成两部分。切平面体为两体间的界面, 一块生成四面体单元而另一块生成六面体单元 (a)。图 4-13 (b) 为过渡的棱锥的分解图, 四面体单元已被移去。

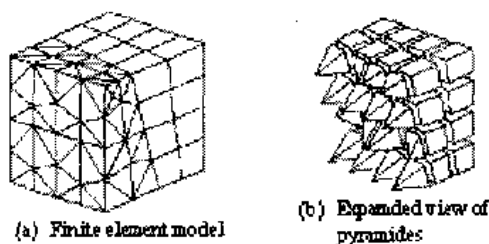


图 4-13 在界面处生成过渡的棱锥单元

自动生成过渡的棱锥单元的先决条件

当对体用四面体单元进行网格划分时，为生成过渡的棱锥单元，应满足的先决条件为：

- 当设定了单元属性，确信给体分配的单元类型可以退化成棱锥形状；现在，这种单元包括 SOLID61, SOLID73, VISCO89, SOLID90, SOLID95, SOLID96, SOLID97 和 SOLID122。ANSYS 对任何其他的单元类型都不支持过渡的棱锥单元（见 7.2.2 节中设置属性的方法）。
- 设置网格划分控制时，激活过渡单元表明想让三维单元退化。

激活过渡单元（缺省），利用下列方法：

命令：MOPT, PYRA, ON

GUI: Main Menu >Preprocessor >-Meshing-Mesher Opts

生成退化三维单元，用下列方法：

命令：MSHAPE, 1, 3D

GUI: Main Menu >Preprocessor >-Meshing-Mesher Opts

如果这些先决条件已满足，则在用四面体（VMESH）对体划分网格时，ANSYS 程序会自动地：

- 确定哪里有过渡的棱锥单元合适。
- 合并和重新安排四面体以生成棱锥单元。
- 在网格中插入棱锥单元。

ANSYS 缺省地生成过渡的棱锥单元；如果不想在网格中插入过渡的棱锥单元，键入 MOPT, PYRA, OFF 命令。注意：对直接与二次棱锥单元相邻的线性六面体单元，ANSYS 自动在界面处清除中间节点。这事实上发生在对与线性单元相邻的体进行二次单元网格划分时。

4.3.10 将退化的四面体单元转化为非退化形式

在模型中生成过渡的棱锥之后，可以将模型中的 20 节点退化四面体单元转化成相应的 10 节点非退化单元。

转变退化四面体单元的益处

上一节中论述的允许棱锥的信息只有在使用的单元类型支持退化的四面体和棱锥形单元时才出现。在实际应用中，用户会发现这个先决条件太苛刻了。

例如：用户做结构分析，在需要过渡的棱锥单元时却被限制要用 SOLID95 单元。求解包

含 20 节点退化的 SOLID95 单元（并存储这些单元）比用 SOLID92 单元作相同的分析要耗费更多的时间和内存（SOLID92 单元是 10 节点相对于 SOLID95 单元的非退化单元）。

在这个例子中，将 SOLID95 单元转化为 SOLID92 单元的好处有：

- 每个单元所需的随机存储单元（RAM）更少。
- 当不使用预条件共轭梯度（PCG）方程求解器时，ANSYS 在求解过程中写的文件相当少。
- 即使使用 PCG 方程求解器，仍可得到中等求解速度。

执行转换

将 20 节点退化的四面体单元转化为对应的 10 节点非退化形式。

命令：TCHG, ELEM1, ELEM2, ETYPE2

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>Change Tets

不论是使用命令还是 GUI 方法，用户都将按表 4-3 转换合并的单元。

表 4-3 允许 ELEM1 和 ELEM2 单元合并。

Physical Properties	Value of ELEM1	Value of ELEM2
Structural Solid	SOLID95 or 95	SOLID92 or 92
Thermal Solid	SOLID90 or 90	SOLID87 or 87
Electrostatic Solid	SOLID122 or 122	SOLID123 or 123

用 TCHG 命令执行转换，为下列变元定义值。

- 用 ELEM1 变元代表想转换的单元类型，例如转换 SOLID95 单元，必须指定 ELEM1 为 SOLID95 或 95。
- 用 ELEM2 变元代表与 ELEM1 单元对应的单元。例如，为转换 SOLID95 单元，必须将 ELEM2 指定为 SOLID92 或 92。
- 也可以用 ETYPE2 变元来指定 ELEM2 的单元号。继续以上例子，分配单元号 2 给新转换的 SOLID92 单元，给 ETYPE2 赋值 2。

TCHG 命令可参见 ANSYS 命令参考手册。

如果通过 ANSYS GUI 途径执行转换，按以下步骤：

1. 选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>Change Tets, 将选定的六面体退化单元转换为非退化的四面体单元对话框出现。
2. 使用功能菜单进行转换，选择合并单元。
3. ELEM2 栏中的 TYPE 号，为 ELEM2 单元选择合适的单元号（包括所有当前已定义的单元类型的列表。）
- 在选择列表中选择 NEXT AVAIL TYPE#并按 OK，ANSYS 利用单元属性表的位置确定 ELEM2 的单元类型号。或在 ELEM2 已出现在单元属性表中时，ANSYS 使用赋给 ETYPE2 已有的 ELEM2 的单元类型号。
- 从选择列表中选择 USER SPECIFIED 并按 OK。出现另一个对话框，必须在此输入单元类型号并按 OK。ANSYS 赋给 ELEM2 单元类型号。
- 从选择列表中选择 一个有效的单元类型号（如果有的话）。记住尽管所有已定义的

单元号及其单元类型号都出现在列表中，但并不都是有效的选择（例如，要将 SOLID95 单元转换为 SOLID92 单元，必须从选择列表中选择已定义的 SOLID92 单元的类型号）。如果当前并未定义 SOLID92 单元，必须使用上述的其他选择方法。假定所选的有效单元类型号存在，ANSYS 将给新转换的单元分配类型号。

退化四面体单元转换的其他性质

退化四面体单元转换的其他性质包括：

- 转换操作的结果为选定 ELEM1 类型的单元转换为类型 ELEM2。ANSYS 忽视除非退化四面体单元外的所有 ELEM1 类型的单元。例如，ANSYS 将忽略有六面体、棱锥或棱柱形状的 SOLID95 单元。例如，用户有一个仅包含 SOLID95 单元的简单模型。这些单元有六面体的、四面体的和棱锥形的形状。如果键入命令 TCHG, 95, 92, 2, ANSYS 只将四面体的 SOLID95 单元转换为 SOLID92 单元，剩下六面体形的和棱锥形的 SOLID95 单元未动。因为将 ETYPE2 值定为 2，ANSYS 将单元类型号 2 分配给 SOLID92 单元。
- 执行转换就象在一个体中定义了不止一种单元类型。当前 ANSYS 还无法在每个体中存储多于一种类型的单元。这个限制在执行体列表操作（VLIST 命令）时会出现不正确的信息。列表输出失败表明转换单元时单元类型已转变了。而且表明单元类型号已分配给了哪些单元（另一方面，输出单元列表操作（ELIST）命令表明新的单元类型号）。如果想执行转换，建议转换为建模和网格划分过程的最后一步，即完成任何想要的网格细化、移动或拷贝节点和单元。在开始转换以前进行其他想要做的建模和修正网格划分过程。

4.3.11 对层进行网格划分

ANSYS 程序的层网格划分功能（当前只能对 2 维面）能生成线性梯度的自由网格。

- 沿线具有均匀的单元尺寸（或适当变化的）。
- 垂直于线的方向单元尺寸和数量有急剧过渡。

这样的网格适于模拟 CFD 边界层的影响，电磁表面层的影响等。

4.3.12 通过 GUI 设置层网格划分控制

如果通过 ANSYS GUI 对选定线集设置层网格划分控制，选择 Main Menu>Preprocessor>Mesh Tool，显示网格划分工具控制板。按与“Layer”相邻的设置按钮打开选择线的对话框，接下来是“Area Layer Mesh Controls on Picked Lines”对话框。可在其上指定：

- 线上想要的单元尺寸，可以直接设置单元尺寸（SIZE）或设置线的分割数（NDIV）。
- 线间距比率（SPACE，对层网格划分一般为 1.0）。
- 内部网格层的厚度（LAYER1）这一层单元将是均匀尺寸的，边长等于线上给定的单元尺寸。LAYER1 的厚度可以指定为线上单元尺寸带一个系数（尺寸系数=2 沿线生成两行尺寸均匀的单元；尺寸系数=3，为三行等等。）或用一个绝对长度。

- 外部网格层的厚度 (LAYER2) 这一层的单元尺寸会从 LAYER1 的尺寸缓慢增加到总体单元的尺寸。LAYER2 的厚度可用一个网格过渡系数 (过渡系数=2 生成大约等于前面垂直于线网格 2 倍尺寸的单元; 过渡系数=3, 大约 3 倍的尺寸等) 或给定一个绝对长度。

注意 LAYER1 的厚度应当大于或等于给定线的单元尺寸。如果用尺寸系数给定 LAYER1, 它必须大于或等于 1.0。

LAYER2 的厚度实际上是发生在 LAYER1 单元尺寸和总体单元尺寸之间过渡网格区的距离。LAYER2 的适当值因此依赖于总体到 LAYER1 尺寸比率的大小。如果给定 LAYER2 的网格过渡系数, 它必须大于 1.0 (暗示下一行尺寸必须大于前面的尺寸), 为达到最好的结果, 且应当小于 4.0。

对选定的线集, 层网格划分控制可以设定或清除而不改变已有的线分割或距离比率。实际上, 在此对话框中, 空白或零设置, SIZE/NDIV, SPACE, LAYER1 或 LAYER2 将保持不变 (即它们不会被置为零或缺省值)。

要删除选定线集的指定的层网格划分控制, 选择网格划分工具控制板上包含 “Layer” 的清除按钮。已有线集的线段和距离比率将保持不变。

下图表示层网格。

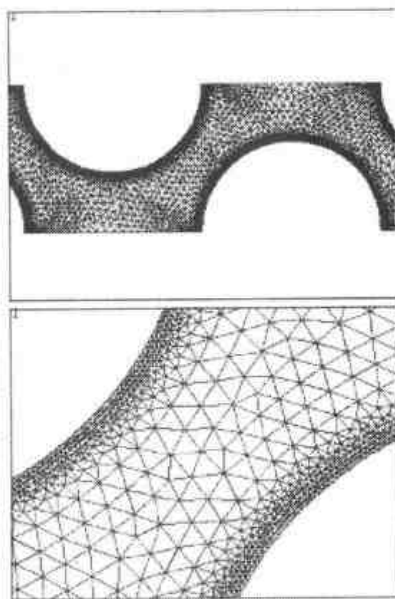


图 4-14 线性梯度层网格沿线显示为均匀的单元尺寸
在垂直于线方向上单元的尺寸和数量急剧过渡

4.4 自由网格和映射网格划分控制

前面主要讲述可用的不同网格划分控制, 现集中讨论适合于自由网格划分的控制, 它也适用于映射网格划分。

4.4.1 自由网格划分

自由网格划分操作，对实体模型无特殊要求。任何几何模型，尽管是不规则的，也可以进行网格划分。所用单元形状依赖于是对面还是对体进行网格划分。对面进行网格划分，自由网格可以只由四边形单元组成，或只由三角形单元组成，或两者混合。对体进行网格划分，自由网格一般限定为四面体单元。棱锥形单元作为过渡也可加入到四面体网格中。

如果选择的单元类型严格地限定为三角形或四面体（例如 PLANE2 和 SOLID92），程序在网格划分时只用这种单元。但是，如果选择的单元类型允许多于一种形状（如，PLANE82 或 SOLID95），可通过下列方法指定用哪一种（或几种）形状：

命令：MSHAPE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

还必须指定对此模型用自由网格划分：

命令：MSHKEY, 0

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts

对于支持多于一种形状的面单元，缺省地会生成混合形状（通常是四边形单元占多数）。可用[MSHAPE, 1, 2D 和 MSHKEY, 0]来要求全部生成三角形网格，但如果用低次单元时建议不要这样做。

注意 可能会遇到全部网格都必须为四边形网格的情况。当面边界上总的线分割数为偶数时，面的自由网格划分会全部生成四边形网格，并且四边形单元质量不会出错。通过打开 SmartSizing 项并让它来决定合适的单元数，可以增加面边界线分割总数为偶数的机率（而不是通过 LESIZE 命令人工设置任何边界划分的单元数）。应保证四边形分裂项关闭 [MOPT, SPLIT, OFF]，以使 ANSYS 不将形状较差的四边形单元分裂成三角形（四边形单元分裂对出错单元缺省是打开的。参见 MOPT 命令的叙述）。

使体生成一种自由网格，应当选择只允许一种四面体形状的单元类型，或利用支持多种形状的单元并只设四面体一种形状功能（MSHAPE, 1, 3D 和 MSHKEY, 0）。

对自由网格划分操作，生成的单元尺寸依赖于 DESIZE、ESIZE、KESIZE 和 LESIZE 的当前设置。如果 SmartSizing 打开，单元尺寸将由 SMRTSIZE 及 ESIZE、DESIZE 和 LESIZE 命令决定。（对自由格划分推荐使用 SmartSizing）。可知所有这些网格划分均由 Main Menu>Preprocessor>MeshTool 和 Main Menu> Preprocessor> -Meshing-Size Cntrls 控制。

一种称为扇形网格划分的特殊自由网格划分，适于涉及用 TARGE170 单元对三边面进行网格划分的特殊接触分析。当三个边中有两个边只有一个单元而第三边有任意数目分割数时，结果将为扇形网格（LESIZE 命令用于设置单元划分）。扇型网格划分保证 ANSYS 使用最少的三角形来填充面，这对接触问题是重要的。考虑图 4-15 所示的例子，两个边仅有一个单元，而第三边分为四个单元。

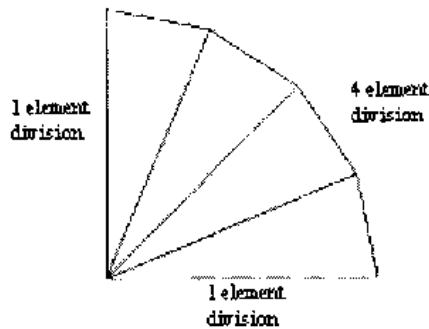


图 4-15 扇型网格划分的例子

记住使用扇型网格划分必须满足下列条件：

- 必须是对三边面进行网格划分。两边必须仅分为一个网格，而第三边可以有任何数目的划分。
- 必须用 TARGE170 单元进行网格划分。
- 必须指定使用自由网格划分 (MSHKEY, 0 或 MSHKEY, 2)。

详见 ANSYS 结构分析指南和 ANSYS 单元参考手册中 TARGE170 单元的叙述。

4.4.2 映射网格划分

可指定程序全部用四边形面单元、三角形面单元、或全部用六面体单元生成映射网格。映射网格划分要求面或体形状规则，即必须满足一定准则。

对映射网格划分，生成的单元尺寸依赖于当前 DESIZE 及 ESIZE、KESIZE 和 KESIZE 的设置 (Main Menu > Preprocessor > Meshing-Size Cntrls > Manual Size-option)，SmartSizing (SMRTSIZE) 不能用于映射网格划分。

注意 当使用硬点时不支持映射网格划分。

面映射网格划分

面映射网格包括全部是四边形单元或全部是三角形单元。

注意 映射三角形网格划分是指 ANSYS 映射一可划分网格的面并用三角形单元划分网格的过程。取决于指定的形式，这种类型的网格划分特别适于刚体接触分析单元的网格划分。

面接受映射网格划分，必须满足以下条件：

- 该面必须是三或四条边 (有或无连接)。
- 面的对边必须划分为相同数目的单元，或其划分与一个过渡形网格的划分相匹配 (见图 7-22)。
- 该面如有三条边，则划分的单元必须为偶数且各边单元数相等。
- 网格划分必须设置为映射网格 (MSHKEY, 1)。结果得到全是四边形单元或全是三角形单元的映射网格。依赖于当前单元类型和单元形状的设置 (MSHAPE)。
- 如果想生成映射三角形网格，可以指定 ANSYS 所用模式生成三角形单元网格 (MSHPATTERN)。如果不指定一种模式，ANSYS 将为用户指定。见 ANSYS 命令参考手册

中的 MSHPATTERN 命令可用模式的叙述。

图 4-16 所示为全用四边形单元划分网格的基本面，和全用三角形单元划分网格的基本面。

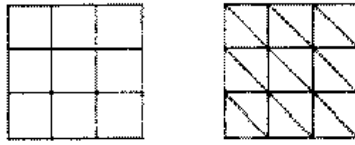


图 4-16 面映射网格

如果一个面多于四条边，不能用映射网格划分。但是有些线可以合并或连接使总线数减少到四条，线的连接在本节之后讨论。

建议用 AMAP 命令替代连接线，拾取面的三或四个角点进行面映射网格划分。这种方法内在地连接两关键点之间的所有线（简化的面映射网格划分在本节后叙述）。

◆ 将线分割以进行映射网格划分

面的对边指定为相同数目的线分割（或其线段与一个过渡形式的划分相匹配）以生成映射网格。不必对所有线指定分割数。尽管请求映射网格划分（MSHKEY, 1）程序将把线的分割从一条线转到相对的线，并转到待划分网格的相邻面上（AMESH），在需要时程序可用 KDSIZE 或 ESIZE 命令生成相匹配的线分割。

LESIZE, ESIZE 命令的屏蔽等级同样适用于传递边的分割数。因此在图 4-17 的例子中，从线 1 传至线 3，由 LESIZE 规定的分割数将屏蔽 ESIZE 定义的分割数。

```
MSHKEY,1      ! mapped mesh
ESIZE,,10    ! 10 divisions set by ESIZE
LESIZE,1,,,20 ! 20 divisions specified for line 1
AMESH,1      ! 20 line divisions will be transferred onto line 3
```

请参见 MSHKEY、ESIZE、LESIZE、和 AMESH 命令的叙述。

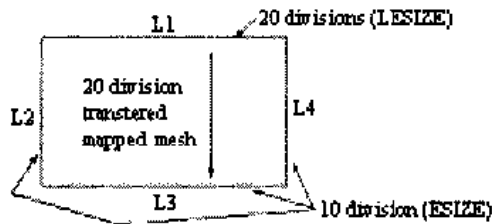


图 4-17 用 LESIZE 控制屏蔽 ESIZE 控制

◆ 连接线

如果一个面的边数多于四条，可将部分线合并（LCOBMB）或连接（LCCAT）起来以使边数降为四。一般来说 LCOBMB 命令优先于 LCCAT 命令。LCOBMB 命令可用于相切或不相切的线，线的交点也可不是节点。

连接线：

命令：LCCAT

GUI：MainMenu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Mapped>-oncatenate-Lines

注意 LCCAT 命令不支持用 IGES 缺省功能 (IOPTN, IGES, DEFAULT) 输入的模型, 但是, 可用 ONMERGE 命令将从 CAD 文件输入的模型线进行连接。

合并线:

命令: LCOMB

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Add> Lines

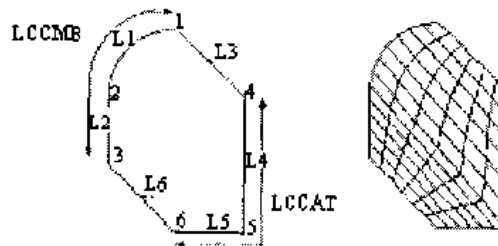


图 4-18 合并和连接线以进行映射网格划分

见图 4-18, 该面共有六条线, 其中两条线可以合并, 两条线可以连接, 以生成四条边的面, 可以进行映射网格划分。

线、面或体上的关键点处将针生成节点。因此一条连接线将至少有线上已定义的关键点数同样多的分割数。程序不允许用更少的分割数来屏蔽。而且指定的总体单元尺寸 (ESIZE), 是针对原始线的, 而不是针对连接线的。

不能直接给连接线指定线分割。但是, 分割数可以指定给合并线 (LCOMB)。因此, 使用合并线比连接线会有一些优势。

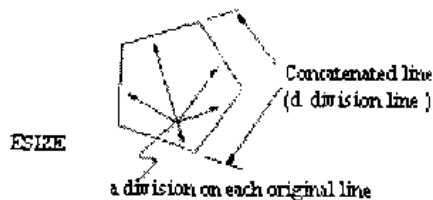


图 4-19 ESIZE 是针对原始线的 (不是连接线)

◆ 简化面映射网格划分

AMAP 命令提供了获得映射网格的最简捷途径。AMAP (Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Arcas-Mapped>By Corners) 使用指定的关键点作为角点并连接关键点之间的所有线。面自动地全部用四边形或全部用三角形单元进行网格划分 (不需要 MSHKEY 命令)。与 AMAP 通过连接线的映射网格划分控制有相同的规则。

考查前连接面的例子, 现用 AMAP 方法进行网格划分。注意到在已选定的几个关键点之间有多条线。在选定面之后, 可按任意顺序拾取关键点 1、3、4 和 6, 会自动生成映射网格。

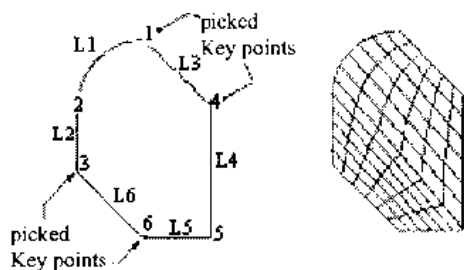


图 4-20 简化的映射网格划分 (AMAP)

在 AMAP 操作之前不需要连接线；内部做连接并删除。面的线并未改变。

注意 AMAP 命令不支持用 IGES 缺省功能 [IOPTN, IGES, DEFAVIT] 输入 的模型。

◆ 过渡映射四面体网格的划分

另一种生成映射面网格的途径是指定面的对边的分割数，以生成过渡映射四边形网格。过渡映射四边形网格只适用于有四条边的面（有或无连接线）。一些例子如图 4-21 所示。

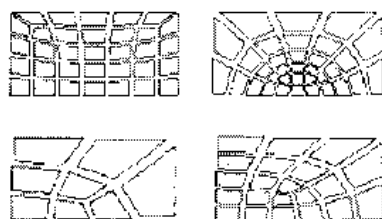


图 4-21 过渡四边形映射网格划分的例子

为生成过渡四边形映射网格，必须使用支持四边形形状的单元类型，设置网格划分指令为映射的 (MSHKEY, 1)，并指定形状容许四边形 (MSHAPE, 0, 2D)（想要过渡型的映射三角形网格，参见下一节）。另外，指定的线分割必须与图 4-22 所示形式相匹配。

四边形为主的自由网格划分器 (MSHAPE, 0 和 MSHKEY, 0) 自动寻找与这些过渡形式相匹配的四边形区域。如果发现匹配，面就会划分为过渡四边形映射网格，除非结果单元质量过差（这时会生成自由网格）。

◆ 过渡三角形映射网格划分

过渡映射网格划分对于生成三角形单元的映射面网格也是有效的。与过渡四边形映射网格划分相比，过渡三角形映射网格划分只适用于四边形的面，指定的线分割必须与图 4-22 所示之一相匹配。为生成过渡三角形映射网格，必须使用支持三角形的单元类型，网格划分设置指定为映射的 (MSHKEY, 1)，并指定形状容许三角形 (MSHAPE, 1, 2D)。

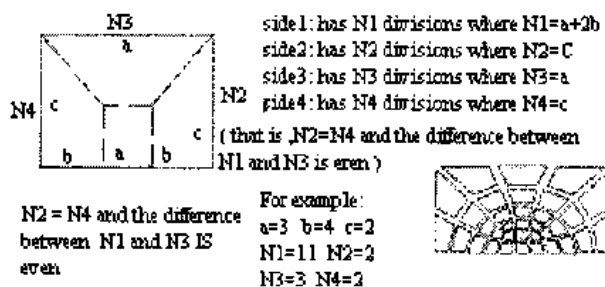


图 4-22 可用的过渡形式——过渡四边形映射网格

图 4-23 (b) 为过渡三角形映射网格示意图。当请求三角形映射网格时, ANSYS 实际上是以四边形单元映射网格划分为开始的。然后自动地将四边形单元分割成三角形单元。图 4-23 (a) 表示作为 (图 4-23 (b) 所示的) 基础的四边形网格。图 4-23 (c) 所示为含有四边形单元的三角形网格。虚线代表 ANSYS 分割成三角形的四边形单元的边界。

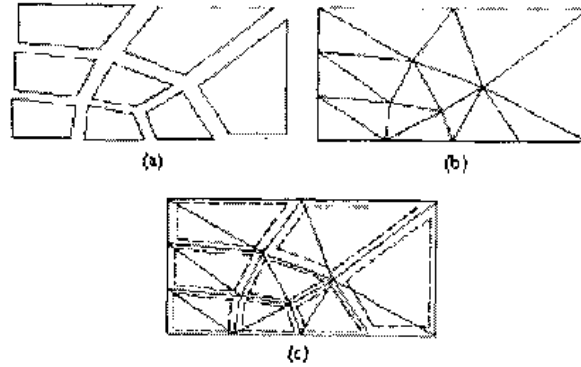


图 4-23 过渡四边形映射网格与过渡三角形映射网格之间的关系

体映射网格划分

要将体全部划分为六面体单元, 必须满足以下条件:

- A、该体的外形应为块状 (有六个面)、楔形或棱柱 (五个面)、四面体 (四个面)。
- B、对边上必须划分相同的单元数, 或分割符合过渡网格形式适于六面体网格划分。见图 4-24 例中不同形状体的映射单元网格划分。
- C、如果体是棱柱或四面体, 三角形面上的单元分割数必须是偶数。

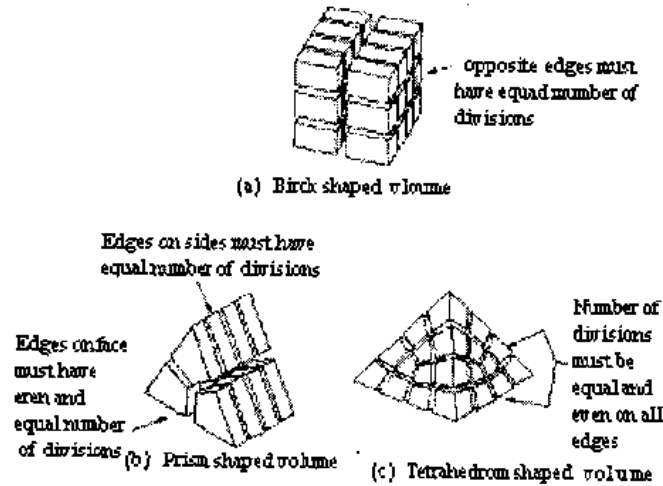


图 4-24 映射体网格单元划分的例子

◆ 连接面

与线一样, 当需要减少围成体的面数以进行映射网格划分时, 可以对面进行加 (AADD) 或连接 (ACCAT)。如果连接面有边界线, 线也必须连接在一起, 必须先连接面, 再连接线。此过程的输入列表范例如下:

```
! first, concatenate areas for mapped volume meshing:
ACCAT,...
```

```
! next, concatenate lines for mapped meshing of bounding areas:
LCCAT,...
LCCAT,...
VMESH,...
```

注意 一般来说 AADD (面为平面或共面时) 的连接效果优于 ACCAT (线分割如前面所述会从一边传到另一边)。

正如上面输入列表范例所示, 在连接面 (ACCAT) 之后一般需要连接线 (LCCAT)。但是, 如果相连接的两个面都是由四条线组成 (无连接线)。连接线操作会自动进行。因此, 图 4-25 中两个面都由四条线组成所以不需要连接线 (LCCAT)。另外须注意删除连接面并不会自动删除相关的连接线。

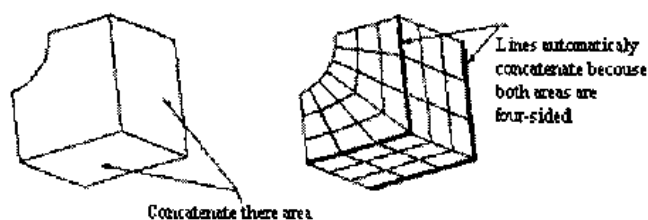


图 4-25 连接面用来对实体进行映射网格划分

连接面用下列方法:

命令: ACCAT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Meshing-Mesh>Volumes-Mapped>-Concatenate-Areas

注意 ACCAT 命令不支持用 IGES 缺省功能 [IOPTN, IGES, DEFAULT] 输入的模型, 但是, 可用 ARMERGE 命令合并由 CAD 文件输入模型的两个或更多的面。注意当以此方式使用 ARMERGE 命令时, 在两合并线之间删除了关键点的位置不会有节点。

将面相加, 用下列方法:

命令: AADD

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Add>Areas

详见 ACCAT、LCCAT 和 VMESH 命令的叙述。

◆ 过渡六面体映射网格

可以通过指定体的对边的分割数来生成映射体网格。且分割允许过渡型的六面体映射网格, 过渡型的六面体映射网格划分只适用于有六个面的体 (有或无连接面) 例子如图 4-26 所示。

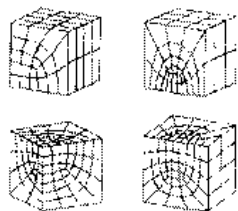


图 4-26 过渡型六面体映射网格的例子

为生成过渡六面体映射网格，必须使用一种支持六面体形状的单元类型。如果先前设置的网格划分的单元形状是四面体形单元 (MSHAPE, 1, 3D)，现在必须设置允许六面体形 (MSHAPE, 0, 3D) 的单元形状。另外，指定的线分割必须与图 4-27 所示之一相匹配。

注意 尽管指定为自由网格划分 [MSHKEY, 0] ANSYS 自动寻找与那些过渡形式相匹配的六面体。如果发现相匹配，则体将划分为过渡六面体映射网格。除非结果单元质量很差 (这样情况下网格划分会失败)

如图 4-27 所示，体的有些边是隐藏的 (N5、N9 和 N10 边)。N5 的对边是 N8，N9 的对边是 N11；N10 的对边是 N2。

关于连接线的面的一些说明

连接仅是映射网格划分的辅助工具，并非布尔运算的加。连接应是映射网格生成前的最后一步，连接生成的图元不能作任何实体模型操作 (网格划分、清除及删除图元除外)。例如，由 LCCAT 操作生成的线不能在实体模型上加载，不能参与布尔运算，不能拷贝、拖拉、旋转 (xGEN, xDRAG, xROTAT) 等，也不能再用于连接。

连接生成的线、面可用删除线或面命令来清除连接：

- 最便捷的删除连接线或面是通过选择菜单途径 (Main Menu> Preprocessor> -Modeling-Delete> -Del Concats-Lines 或 menu path Main Menu>Preprocessor> -Modeling-Delete> -Del Concats-Areas)

注意 当使用此方法时，ANSYS 会自动选择所有连接线 (或面) 并删除它们而不通知用户。

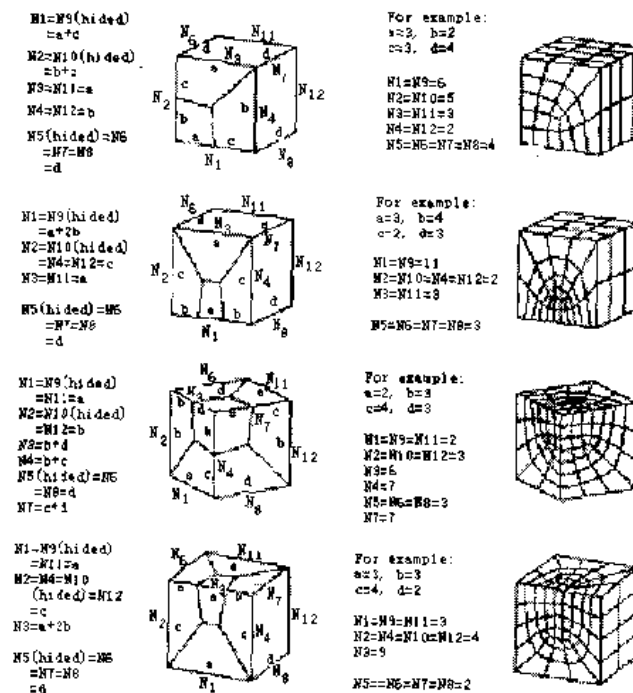


图 4-27 可用的过渡形式——过渡映射六面体网格划分

如果想对选择和删除连接线或面有更多的控制，可用下列方法：

命令：LSEL, Type, LCCA, , , , , KSWP or ASEL, Type, ACCA, , , , , KSWP

GUI：Utility Menu>Select>Entities

如果用户正使用选择图元对话框，选择“both, Lines and Concatenated”来选定连接线，选择“both, Lines and Concatenated”选定连接面。如果需要，可用对话框中的其他控制来改变选择。

必要时可以删除所有已选择的线或面（LDELETE, ALL 或 ADELETE, ALL）。

尽管要注意本节前面所列对输出图元的限制，但这种对连接的限制不会影响输入图元。然而，只要涉及高级图元，输入图元将会“丢失”或“孤立起来”。即，当一个面由 5 条边组成（L1~L5），其中两条线是连接的（LCCAT, 1, 2=>L6）程序不再将线 L1 和 L2 视为该面的边。但可以通过删除线 L6，L1、L2 重新成为该面的边（见图 4-28）。

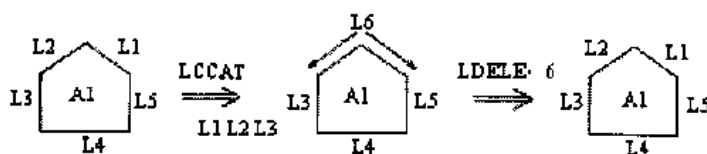


图 4-28 进行连接时原输入线“孤立”直到取消连接

当用户发现连接对预定的建模操作限制太多时，可用其他方法获得映射网格，如将面或体细分为适当形状的图元。布尔操作对图元按此方式细分时会很有用处。

详见 ANSYS 命令参考手册中 ASEL、LSEL、ACCAT、AKELE 和 LDELETE 命令的叙述。

4.5 实体模型的网格划分

构造完实体模型，定义了单元属性和网格划分控制之后，即可生成有限元网格了。在网格生成之前，首先将模保存起来是一个好习惯：

命令：SAVE

GUI：Utility Menu>File>Save as Jobname.db

如果想打开“接受/拒绝网格”提示，拾取（Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts）。这个提示只能通过 GUI 选取，使用户方便地放弃不想要的网格。

4.5.1 用 xMESH 命令生成网格

为对模型进行网格划分，必须使用适合于待划分网格图元类型的网格划分操作。可对关键点、线、面和体使用下列命令和 GUI 途径进行网格划分。

在关键点处生成点单元（如 MASS21）：

命令：KMESH

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>Keypoints

在线上生成线单元（如 LINK31）：

命令：LMESH

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>Lines

在面上生成面单元（如 PLANE82）：

命令：AMESH, AMAP

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Mapped>3 or 4 sided

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Free

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Target Surf

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Mapped>By Corners

在体上生成体单元（如 SOLID90）：

命令：VMESH

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volumes-Mapped>4 to 6 sided

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volumes-Free

4.5.2 生成带有方向节点的梁单元网格

可定义方向关键点作为线的属性对梁进行网格划分，就象给实常数赋值，或给材料属性编号。方向关键点与待划分网格的线是独立的。在这些关键点的位置处，ANSYS 会沿着梁单元自动生成方向节点。支持在生成线网格时自动生成方向节点的单元有 BEAM4、BEAM24、BEAM44、BEAM161、BEAM188 和 BEAM189。

将方向关键点定义为线的属性：

命令：LATT

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>All Lines

Main Menu>preprocessor>-Attributes-Define>Picked Lines

ANSYS 如何确定方向节点的位置

如果一条线由两个关键点（KP1 和 KP2）组成且两方向关键点（KB 和 KE）已定义为线的属性，方向矢量从线的开始处 KP1 延伸到 KB，且方向矢量在线的末端从 KP2 延伸到 KE。ANSYS 通过上面给定两方向矢量的插入方向来计算方向节点。

注意 尽管在这里称为方向节点，其他地方可见这种节点称作远节点、第三节点（只对梁单元）或第四节点（只对二次梁单元）。

用方向节点对梁进行网格划分的益处

梁截面取向的方向将影响梁单元网格和分析结果。用方向节点对梁划分网格可对这些影响进行控制。

如果用 BEAM188 或 BEAM189 单元进行分析，可充分利用 ANSYS 程序的横截面数据定义、分析和对这些单元的可视化能力。可定义截面的 ID 号作为线的属性（LATT）。当对线划分网格时，截面的 ID 号表示生成梁单元的横截面。ANSYS 自动生成的方向节点依赖于用户指定的方向关键点（LATT），确定梁单元截面的方向。

用方向节点生成梁网格

本节讨论如何用输入命令或 ANSYS GUI 途径，用方向节点生成梁的网格。这里假定用

户已定义了模型的几何体和单元属性表，并准备给线定义属性并对梁进行网格划分。本节不准备包括典型梁分析的其他方面。

用命令方法生成梁网格，要输入下列命令：

1. 用 LSEL 命令选择想用方向节点进行网格划分的线。
2. 用 LATT 命令将选定的未划分网格线与单元属性联系起来。指定 MAT、REAL、TYPE、ESYS、KB、KE 和 SECNUM 的值。

当指定 LATT 命令中的 TYPE 项的值时，要保证给线定义的单元类型支持用方向节点生成梁网格。当前，这些单元类型包括 BEAM4、BEAM24、BEAM44、BEAM161、BEAM188 和 BEAM189。

用 LATT 命令中的 KB 和 KE 变量指定开始和结束的方向关键点。如果用 BEAM24、BEAM161、BEAM188 或 BEAM189 单元进行网格划分，要求在设置网格划分属性时至少定义一个方向关键点。当 ANSYS 生成网格时 (LMESH)，沿线的每个单元将有两个端节点和一个方向节点。当用 BEAM4 和 BEAM44 单元划分网格时指定方向关键点是可选择的。如果给单元指定了方向关键点，每个梁单元沿网格划分线将有两个端节点和一个方向节点。如果不给 BEAM4 和 BEAM44 单元指定方向关键点，每个梁单元将有两个端点，但没有方向节点（即 ANSYS 将用标准线网格划分生成网格）。

如果使用 BEAM188 单元或 BEAM189 单元，用 LATT 命令中 SECNUM 变量指定截面的 ID 号。

3. 设置沿线生成网格的单元分割数 (LESIZE)。
4. 用 LSESH 命令对线划分网格。
5. 对梁划分网格后，常用 /ESHAPE, 1 命令在图上验证梁的方向。
6. 可用 LLIST, , , , ORIENT 命令对已选线列表，连同任何指定的方向关键点和截面数据。

如果用 ANSYS GUI 途径生成梁网格，按下列步骤：

1. 选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>MeshTool，出现网格划分工具。
2. 在网格划分工具中单元属性区域，从左边的选择菜单选择线 (Lines) 并点击设定 (Set)，出现线属性拾取器。
3. 在 ANSYS 图形窗口，拾取想要指定的属性（包括方向关键点），然后在线属性拾取器中点击 OK。出现线属性对话框。
4. 在线属性对话框中，指定 MAT、REAL、TYPE、ESYS 和 SECT 属性，拾取方向关键点 (Orientation Keypoint(s)) 选项出现 Yes，拾取 OK，线属性拾取器重复出现。
5. 在 ANSYS 图形窗口，拾取方向关键点，然后在线属性拾取器中拾取 OK。
6. 回到网格划分工具，设置任何想要的单元尺寸控制。然后从网格划分选择菜单中选择线并拾取 MESH 开始线网格划分操作。出现线网格划分拾取器。
7. 在 ANSYS 图形窗口；拾取想划分网格的线并在线网格划分拾取器中拾取 OK。ANSYS 对梁划分网格。
8. 在梁生成网格之后，常在图上验证梁的方向。选择菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape。拾取 /ESHAPE 选项打开并拾取 OK，出现划分了网格的梁。

9. 可对已选择的线列表，连同任何定义的方向关键点和截面数据。为如此，选择菜单途径 Utility Menu>List>Lines。出现 LLIST 列表形式对话框。选择方向 KP 并拾取 OK。

用方向节点划分梁网格的例子

可定义一个或二个方向关键点作为线的属性。如果定义了两个，可在模型上为它们指定相同的位置。

图 4-29 为三个例子。每一个例子，开始方向关键点和结束方向关键点都是定义在相同的位置。例子告诉用户如何在一个结构的不同方向给定不同的方向关键点去排列选定的梁截面。

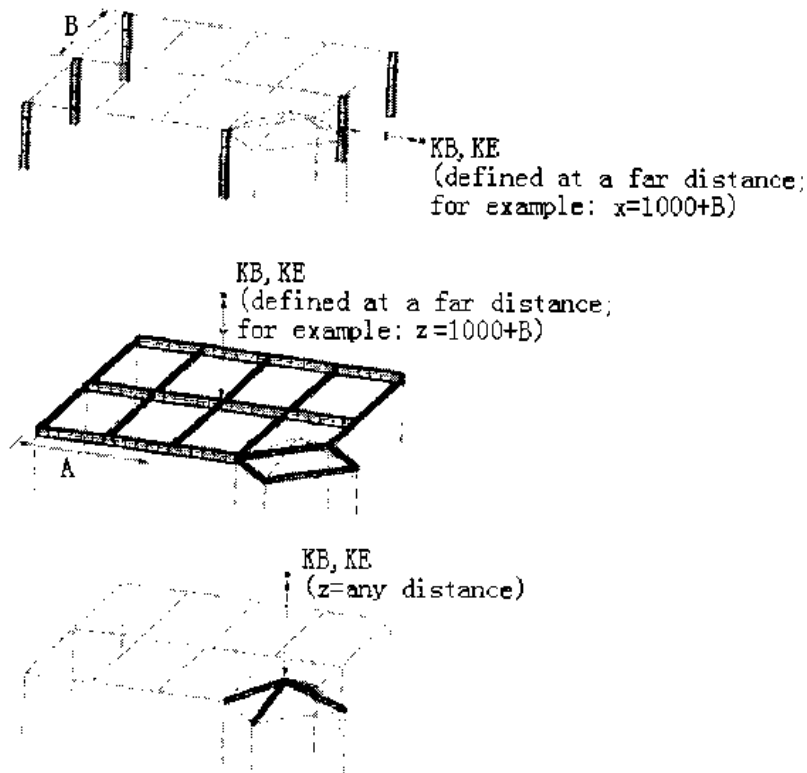


图 4-29 放置方向关键点和单元方向

如果给一条线指定了一个方向关键点，ANSYS 沿线按一定方向生成梁单元。如果在线的末端给定的方向关键点，ANSYS 生成前弯梁。

图 4-30 为按固定方向的梁网格划分与前弯梁网格划分的区别。

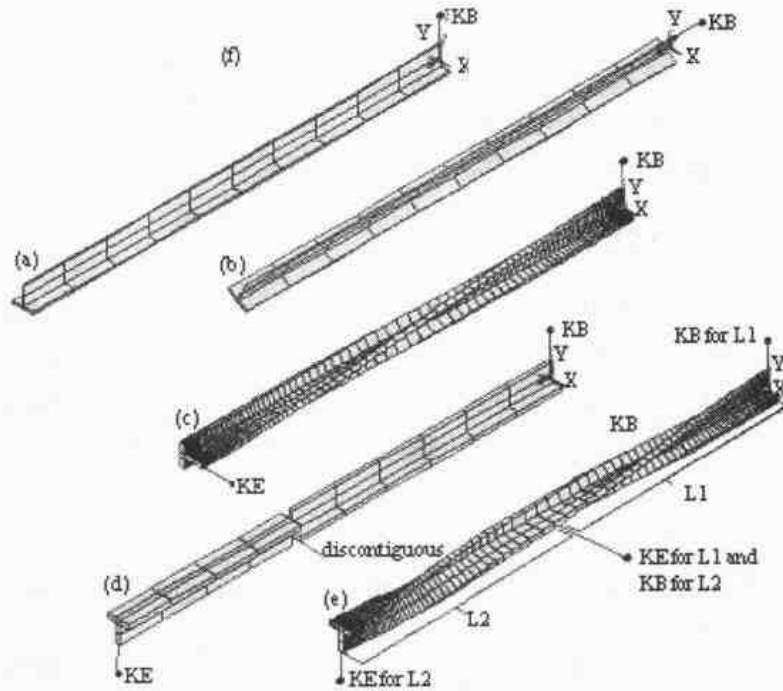


图 4-30 常方向与前扭

图 4-30 (a)，只指定了一个开始方向关键点。该关键点与 Y 轴成 0° ，沿 Y 方向为 10 个单位距离。梁为固定方向。

图 4-30 (b)，只指定了一个开始方向关键点。该关键点与 Y 轴成 30° ，半径为 10 个单位。梁为固定方向。

图 4-30 (c)，指定了开始和结束方向关键点。关键点分开 90° ，引起梁的 90° 扭曲。由于按线性插值确定方向节点的位置，用偏离每一端点一段微小距离的线使节点位于由关键点生成的向量附近。

图 4-30 (d)，方向关键点相差 180° ，梁发生翻转。因为两向量是线性插值的，指定关键点引起梁不连续。

图 4-30 (e) 提供了对图 4-30 (d) 的挽救措施。一条线分成两段，L1 的结束方向关键点与 L2 的开始方向关键点指定为同一关键点。梁的 180° 的扭曲就达到了。

用方向节点对梁划分网格的其他考虑

用方向节点对梁划分网格的其他考虑有：

如果用方向节点生成了梁网格之后键入 CDWRITE 命令，数据库文件会包含每个梁单元的所有节点，包括方向节点在内。可是，为线指定的方向关键点 (LATT) 不再与线相联系并且写输出到几何文件中去。线不认为方向关键点是给定给它的，而方向关键点不知道它们是方向关键点。因此，CDWRITE 命令不支持（对梁划分网格）任何与实体模型相联系的操作。例如，对已划分了网格的相邻的面划分网格，画包含方向节点的线，或删除包含方向节点的线与预想的工作方式不同。对 IGESOUT 命令也有此限制。参见 ANSYS 命令参考手册中 CDWRITE 和 IGESOUT 命令的叙述。

二维梁单元不要求方向，因此本节叙述的梁划分网格过程不支持二维梁单元。

线的任何操作（如拷贝线、移动线等）将破坏关键点的属性。

如果删除了方向关键点，ANSYS 会出现警告信息。

如果移动了方向关键点，它仍为方向关键点。但如果重新定义了一个方向关键点（K, NPT, X, Y, Z），ANSYS 不再认为它是一个方向关键点。

4.5.3 由面生成体网格

除用 VMESH 命令生成体单元外，还可由单个的外表面单元生成体网格。例如，在遇到不能对特殊面划分网格时这种方法显得非常有用。在这种情况下，首先对可进行网格划分的面划分网格。然后，用直接生成法定义剩下的面单元（用直接生成定义的单元将被视为孤立单元，因为没有与之相联系的实体模型）。最后，利用下列方法从孤立面单元生成节点和四面体单元：

命令：FVMESH

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Tet Mesh From-Area Elements

注意 主四面体网格划分 [MOPT, VMESH, MAIN] 是唯一支持由面生成体网格的四面体网格划分器；替换四面体网格划分器则不支持 [MOPT, VMESH, ALTERNATE]。

FVMESH 命令及其相应的菜单途径不支持多体。如果模型中有多个体，为一个体选择表面单元，同时保证其他体未选择表面单元。用 FVMESH 命令生成第一个体的网格。按此步骤一次只选一个体划分网格，直到模型中的所有体都划分了网格。

4.5.4 用 xMESH 命令的注意事项

用 xMESH 命令的注意事项有：

有时需要对实体模型用不同维数的多种单元划分网格。例如，带筋的壳有梁单元（线单元）和壳单元（面单元），或用表面作用（面）单元覆盖三维实体模型（体单元）的表面。可按任意顺序使用相应的网格划分操作（KMESH, LMESH, AMESH 和 VMESH）。但在划分网格前要设置合适的单元属性（本章前面所讨论的）。

无论选取何种体网格划分器（MOPT, VMESH, Value），在不同的硬件平台上对体用四面体单元划分网格（VMESH, FVMESH）会生成不同的网格。因此，评估一特殊节点或单元的结果时要当心。如果在一个平台上生成的图元输入到另一个不同硬件平台上运行，图元的位置可能会改变。

自适应网格划分宏（ADAPT）是替换的网格划分方法，会在网格离散错误的基础上自动改进网格。

4.5.5 通过扫掠生成体网格

利用体扫掠，可从一边界面（称为源面）网格扫掠贯穿整个体将已有未划分网格的体生成单元。如果源面网格由四边形网格组成，体将生成六面体单元。如果面由三角形网格组成，体将生成楔形单元。如果面由三角形和四边形单元共同组成，则体将由楔形和六面体单元共同填充。扫掠的网格与体密切相关。

体扫掠的优点

体扫掠有如下优点：

与其他拖拉——已划分网格的面成为划分网格的体方法（VROTAT, VEXT、VOFFST 和 VDRAG 命令）不同，体扫掠（VSWEEP）试图使用已有未划分网格的体。在下列情况下尤其有用：

——输入从其他程序建立的实体模型，想在 ANSYS 中划分网格。

——对一不规则体生成六面体网格。现在仅需将体分裂为一系列离散的可扫掠区域，与过去在必要时将体分裂为离散的可进行映射网格划分的区域相反。

——用户想生成与一种其他延伸方法不同的网格，或用那些操作时忘记生成网格了。

体扫掠允许用使用任何面单元对源面划分网格。上面提到的其他延伸方法需要初始面网格为壳单元网格。

如果在体扫掠之前未对源面划分网格，ANSYS 在激活体扫掠时会为用户对其进行网格划分。而其他延伸方法要求在激活它们时由用户自己对面划分网格。如果不进行网格划分，由其他延伸方法生成体，但不会生成面和体网格。

在扫掠体之前应该做的工作

在激活体扫掠之前按此步骤进行：

1. 确定体的拓扑是否能够进行扫掠，如果下列情况成立则不能进行扫掠：
 - 体的一个或多个侧表面包含多于一个环；换句话说，侧面有孔。
 - 体包含多于一个壳；即体内有内腔的情况。（壳是与体相当的环面——由一系列图元定义了一个连续封闭的边界）。体列表（VLIST）中 SHELL 栏表示体中的壳数。）
 - 体的拓扑中源面与目标面不是相对的面。（由定义，目标面必须与源面相对。）

注意 即使满足了这些要求，仍会出现由于体的形状而引起扫掠生成形状较差的单元。

2. 确保已定义了合适的二维或三维单元类型（ET）。例如，如果对源面进行预网格划分，并想扫掠包含二次的六面体单元，应当用二次二维单元对源面划分网格。
3. 确定在扫掠操作中如何控制生成单元层的数目，即沿扫掠方向生成的单元数（见图 4-31）。可用下列方法控制单元数：

用 EXTOPT, ESIZE, val1, val2 命令指定沿体的侧面线（val1 是分割单元数，val2 是位移分割的单元数）。注意用 EXTOPT 指定的单元分割数和位移会加在体的所有未划分网格侧面线上。对任何已预划分了网格的边线或其他相关尺寸定义（通过 LESIZE），由 EXTOPT 定义的值将被忽略。用 EXTOPT 命令或其菜单途径是设置这些值的优选方法。

命令：EXTOPT, ESIZE, Val1, Val2

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volume Sweep-Sweep Opts

- 在体的一个或多个边线上，用 LESIZE 命令为其指定分割单元数。此方法还允许对体扫掠指定一个优先的位移（LESIZE,,, ,SPACE）；但是位移

只加到用 LESIZE 命令标记的线上。不管对所有其他侧边指定了多少分割单元数（例如，通过预划分网格或另外的 LESIZE 定义），所有体的侧边必须有相同数目的分割单元。

- 在一个侧面或与侧面或侧边相邻的体内或面上生成映射网格。
- 在一个侧边上生成梁单元网格（LMESH）。

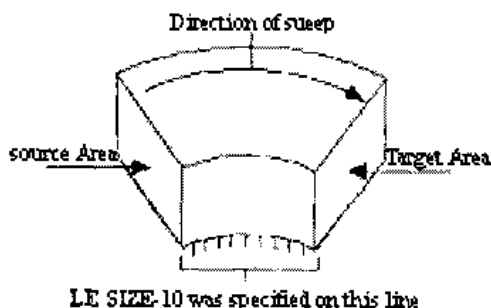


图 4-31 指定体扫掠的分割单元数、源面和目标面。

4. 确定体的哪一个边界面作为源面，哪一个面作为目标面。ANSYS 在源面上使用面单元模式（可以是四边形和三角形单元），用六面体和楔形单元填充体。（如果在体扫掠之前未对面预划分网格，ANSYS 自动生成“临时”面单元。在数据库中并不存储这些面单元；在确定了体扫掠模式后会立即丢弃这些临时面单元）。目标面仅是与源面相对的面。如图 4-31 所示，为体扫掠设置分割单元数、源面和目标面的方法。

5. 有选择地对源面、目标面和边界划分网格。

体扫掠操作的结果会因在扫掠之前是否对模型中的任何面（源面、目标面和边界面）进行了网格划分而不同。

典型情况是在扫掠面之前，由用户自己对源面划分网格。如果不对源面划分网格，ANSYS 会在用户活体扫掠操作时内在对其划分网格（如第 4 步中所述）。

在扫掠前确定是否去预划分网格应当考虑以下因素：

- 如果想让源面用四边形映射网格或三角形映射网格，那么应当预划分网格。
- 如果想让源面用起初单元尺寸划分网格，那么应该预划分网格。
- 如果不预划分网格，ANSYS 通常用自由网格划分器生成网格（对简单面，ANSYS 生成的自由网格可能与用映射网格划分器生成的映射网格相同，但不能保证总是这样）。
- 如果不预划分网格，ANSYS 使用由（MSHAPE）设置的单元形状来确定对源面划分网格（MSHAPE, 1, 2D 生成四边形单元；MSHAPE, 1, 2D 生成三角形单元）所用单元的形状。
- 如果与体关联的面或线上出现硬点则扫掠操作会失败，除非对包含硬点的面或线预划分网格。
- 如果对源面和目标面都进行预划分网格，那么面网格必须互相匹配。然而，源面和目标面不必都划分成映射网格。
- 在扫掠之前，体的所有侧面必须是映射网格划分或四边形网格（此准则有一个例外：

必须对任何起初多于四个面然后用线连接而成的四边形面用映射网格进行预网划分网格)。而且, 每一个未划分网格的侧面上必须有一条线在源面上, 且必须有一条线在目标面上。

- 尽管源面与目标面的拓扑结构不同, 扫掠操作仍能成功, 只要对引起源面和目标面拓扑不同的体的侧面进行预划分网格 (用映射网格)。如图 4-32 所示。

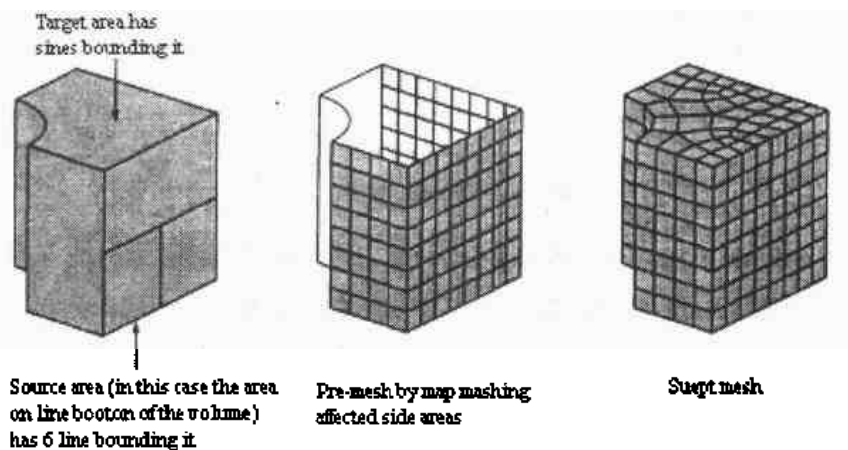


图 4-32 源面和目标面有不同拓扑的体的扫掠

图 4-33 (a) 为一包含两相邻体的模型。由于模型的几何因素, 有必要象图 4-33 (b) 那样沿不同方向对体扫掠。

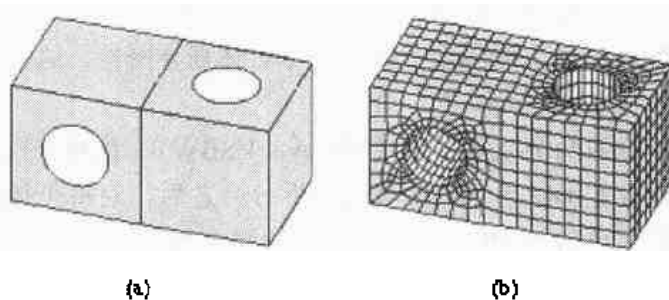


图 4-33 在不同方向扫掠相邻的体

有关体扫掠

激活体扫掠:

命令: VSWEEP, VNUM, SRCA, TRGA, LSMO

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volumes-Sweep

如果用 VSWEEP 命令扫掠体, 指定下列变量值:

- 用 VNUM 变量标记待扫掠体。
- 用 SRCA 变量标记源面。
- 用 TRGA 变量标记目标面。
- 可选用 LSMO 变量指定 ANSYS 在扫掠操作中是否执行线的光滑化处理。

可参见 ANSYS 命令参考手册中关于 VSWEEP 命令的叙述。

如果用 ANSYS GUI 途径去扫掠体, 接下列步骤:

1. 选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh> -Volumes-Sweep。出现体扫掠选择框。
2. 选择待扫掠的体并单击 APPLY。
3. 选择源面并单击 APPLY。
4. 选择目标面，单击 OK 关闭选择框。

注意 使用 ANSYS GUI 来扫掠体，不能控制出现线光滑化处理。通过 GUI 扫掠体时，ANSYS 不执行线光滑化处理。

避免扫掠过程中的形状失败的对策

如果体扫掠操作因单元形状差而失败，可试用下列对策。建议用户按下列次序进行尝试。

1. 交换源面和目标面并重新激活体扫掠。例如，如果将 A1 面为源面而 A2 面为目标面，如果体扫掠失败了，将 A2 作为源面而 A1 作为目标面再进行尝试。
2. 选择一系列不同的源面和目标面并重新进行体扫掠（有些体可沿多个方向进行扫掠）。例如，如果 A1 面和 A2 面不成功，用 A5 和 A6 面再试。
3. 使用形状检查作为诊断模型中何处引起扫掠中失败的工。降低单元形状检查的尺度为警告模式（SHPP, WARN），于是有严重错误的单元导致警告信息而不是单元失败。然后重新执行扫掠操作。利用结果的警告信息确认模型中包含差单元的区域，清除差单元（VCLEAR）再将形状检查打开（SHPP, ON）。接着，修改模型中包含差单元的区域。最后，再用一个扫掠操作对体划分网格。这里有对修改模型的几点建议：
 - 将体分为两个或多个体（VSBA, VSBW），将减少扫掠方向的长度。试将出现较差形状单元的区域体拆分。之后，对每个体激活 VSWEEP 命令。
 - 如果标记为 SHPP, WARN 单元出现在如图 4-34（c）所示的细长的目标面上，试将该区域的侧面沿扫掠方向进行分割。按下列步骤：
 - （1）清除网格（VCLEAR）。
 - （2）通过在想要分割的位置增加关键点来对源面的线和目标面的线进行分割（LDIV）见图 4-34（e）。
 - （3）按图 4-34（e）将源面上新线的线分割拷贝到目标面的相应新线上。（新线是由步骤 2 生成的线。）可通过网格划分工具轻松地进行线分割拷贝。选择菜单途径 Main Menu > Preprocessor > MeshTool。在网格划分工具上，按下拷贝（COPY）按钮打开拾取器。用拾取器将线分割从一条线拷贝到另一条线，包括距离比率在内。
 - （4）手工对由步骤 2 作用过的边界面划分映射网格。见图 4-34（f）。
 - （5）重新激活体扫掠。
4. 如果由 SHPP, WARN 标记的单元在目标面的细长域内伸展，但前面的对策不起作用，清除网格然后打开线光滑化处理（VSWEEP,,, 1）并激活体扫掠。见图 4-34（d）（出于速度的考虑对大模建议不设置这一项。）

图 4-34 (c)、图 4-34 (d) 和图 4-34 (g) 表示三种不同扫掠操作的结果，并告诉用户如何使用上述对策去影响扫掠网格质量。所有这三种情况，用户都是由图 4-34 (a) 所示的相同体开始工作的。图 4-34 (b) 表示在扫掠中所用的源网格。在所有这三种情况中，用户都是在体扫掠前生成此种源网格。

结果不同是因为在用户在扫掠前采取了另外的措施。图 4-34 (c) 为未采取上述任何措施的体扫掠结果。注意到扫掠单元出现在目标面上。图 4-34 (d) 所示为将线光滑化处理打开体扫掠的结果 (VSWEEP,,, 1)。此种情况下单元形状比图 4-34 (c) 中的要好；但不如图 4-34 (g) 中所示的好。图 4-34 (g) 中所示为在扫掠前将源面和目标面进行了线分割 (LDIV) 并对侧面进行了映射网格划分。注意目标面上的单元形状有很大改善。

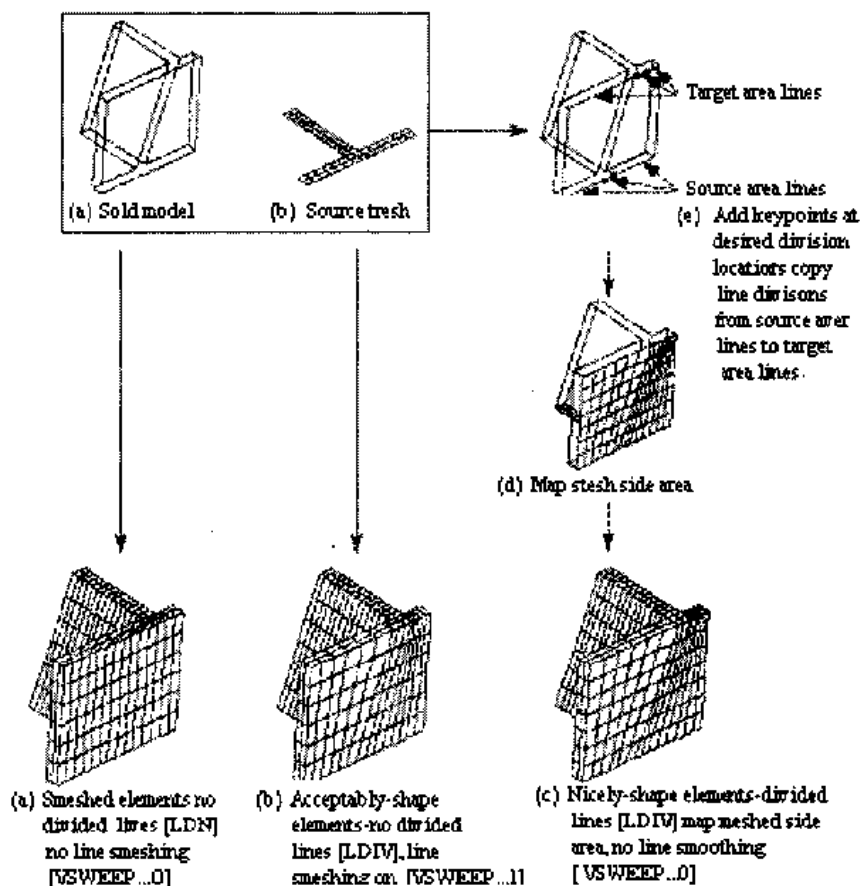


图 4-34 避免单元过于伸长的措施

体扫掠的其他性质

体扫掠的其他性质包括如下：

- 源面和目标面不必是平面或平行面。
- 如果源面和目标面的拓扑结构相同，尽管源面与目标面的形状不同，扫掠操作仍能成功。但是形状彻底不同可导致单元形状失败。
- 在体扫掠中，ANSYS 可以生成线性或二次单元。可将二次面单元扫掠成线性体单元，也可将线性面单元扫掠成二次体单元（但是，当 ANSYS 将线性面单元扫掠成二次体单元时，中间节点并不加到源面的边界上。这对使用不支持去掉中间节点的

二次体单元将产生单元形状失败)。

- 如果对源面、目标面和边界面进行了预网格划分,可在扫掠前使用 EXTOPT, ACLEAR, I 命令, ANSYS 在生成了扫掠体网格之后自动地将任何选定的源面、目标面或边界面上的面单元清除(注意:在 GUI 中,选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volume Sweep-Sweep Opts 打开一个对话框,可在此将清除选项打开或关闭)。必须在进行面网格清除前选择待清除的面。
- 体扫掠并不要求模型为等截面,但如果是变截面,只有从扫掠的一端到另一端为线性变化才有最好的结果。
- 在体扫掠中, ANSYS 将忽略任何为 SMRTSIZE 命令所做的设置。但是,如果不对源面进行预网格划分, ANSYS 将用 DESIZE、ESIZE 或 DESIZE 命令的设置对源面划分网格。还注意下列 ESIZE 命令的信息。用 ESIZE, NDIV 来设置确定扫掠中沿体的侧边生成的单元分割数。然而,这不是首选的方法,因为如果源面没预划分网格,由 NDIV 指定的单元分割数也将加到所有源面的边上。首选方法是用 EXTOPT 命令(如前所述)。

4.5.6 中断网格划分操作

当开始网格划分,会出现 ANSYS 状态窗口。窗口显示当前网格划分操作的当前状态信息,还显示网格划分操作完成的百分比。随着操作的进行状态信息和百分比不断地更新。

在状态窗口下有一 STOP 按钮。单击 STOP 按钮放弃网格划分操作,导致放弃未完成的网格。在 STOP 之前完成的面或体网格将被保留。实体模型和有限元模型将保持网格划分开始前的样子。

只有在用 GUI 模式工作时才能看到网格划分状态窗口(状态窗口在缺省情况下将出现,但可用/UIS, ABORT, OFF 命令将其关闭)。在非 GUI 模式,放弃网格划分操作要由中断系统功能来触发(多数系统为 CTRL—C 或 CTRL—P)。

注意 如果将带有网格划分中断的交互运行过程所发生的 log 文件输入 ANSYS, 其结果可能会与交互运行的结果不同。

4.5.7 单元形状检查

不好的单元形状会使分析结果不准,因此, ANSYS 程序进行单元检查以提醒用户网格划分操作是否生成了形状不好的单元。然而不幸的是没有通用的判别网格好坏的准则。换句话说,一种单元形状对某一个分析可能得出不准确的结果,但对另一个分析可能是完全可以接受的,因此必须明确 ANSYS 程序判别形状不好单元的准则完全是武断的,出现了数百次的单元警告信息并不意味着单元形状会引起不准确的结果(相反,如果没有得到单元形状的任何警告信息,也不能保证一定能得到精确的分析结果)。如同有限元分析的许多方面一样,单元形状的好坏还是用户自己去判别。

ANSYS5.5 在生成单元时及储存每个单元之前发现并标记所有单元形状的警告和错误情况。这与 ANSYS5.3 及以前版本在求解前检查单元形状的情况相反。

尽管 ANSYS 缺省执行单元形状检查，仍有许多控制单元形状检查的选项。多数选项将在下节叙述，可参考 ANSYS 命令参考手册中 SHPP 命令中的叙述。修改单元形状检查的方法：

命令：SHPP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Shape Checking

Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Toggle Checks

以下包括：

- 完全关闭单元形状检查或只打开警告模式
- 打开和关闭个别形状检测
- 查看形状检测结果
- 查看当前形状参数限制
- 改变形状参数限制
- 恢复单元形状参数数据
- 理解何种情况下 ANSYS 对已有单元重新检验，及为什么这样做是必要的
- 决定单元形状是否可以接受

完全关闭单元形状检查或只打开警告模式

如上所述，ANSYS 缺省执行单元形状检查，当出现形状检查时，任何新单元——无论它是怎样生成的，都要按已有形状警告和错误限制参数进行检测。如果单元超过了任何错误限制，不仅要生成错误信息，还要引起：(a) 网格划分失败；或 (b) 不是由 AMESH 或 VMESH 命令生成的单元不进行存储。

有些情况下，希望关闭形状检查，或只打警告模式。关闭单元形状检查 (SHPP, OFF, ALL) 完全使形状检查失效。当仅打开单元形状检查的警告模式 (SHPP, WARN)，在进行形状检查时，超过错误限制的单元只给出警告并不引起网格划分或单元存储失败。

在 GUI 中，可通过选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl> Shape Checking 运行只有警告模式的形状检查或将其完全关闭。当形状检查控制对话框出现时，选择 “On w/Warning msg” 或 “ Off”，然后单击 OK。

下列情况建议用户关闭形状检查或只在警告模式下运行：

- 当用 (AMESH) 命令生成面网格，但用户的最终目的是用此面作为体的表面生成二次四面体网格 (VMESH)。注意四面体网格划分器能对雅可比比率不好的面单元校正网格。因此，如果正在对一个体的表面生成网格然后对体划分网格的操作，只打开警告模式的单元形状检查对体划分网格是明智的，打开单元形状检查，然后对体划分网格。
- 当输入网格时 (CDREAD)，如果待输入模型中有“坏”单元存在并且单元形状检查是打开的，ANSYS 将会在坏单元的地方出现孔并写入数据库（或根本不输入该网格）。因而这两者都是不希望看到的。因此在输入网格之前应关闭单元形状检查或只打开警告模式。输入之后，建议打开形状检查并重新对单元进行检查 (CHECK, ESEL, WARN 或 CHECK, ESEL, ERR)。

注意 一旦单元存到数据库中，执行单元形状检查将不能删除它们。当开始求解时 [SOLVE]，如果选择了任何超过错误限制的单元，ANSYS 生成错误信息并停止求解。

- 当用直接生成方法并生成用户知道暂时无效的单元时。例如，生成有重合节点的楔形单元。用户知道需要合并重合的节点 (NUMMRG) 以获得有效单元。这种情况下，关闭单元形状检查是明智的。

完成要做的操作（如本例中合并节点），打开单元形状检查，然后重新检查单元的完整性 (CHECK)。

打开或关闭个别形状检查

不完全关闭形状检查，可以有选择地控制哪些检测打开或关闭。

用命令方法触发检测开和关。键入命令 SHPP, LAB, VALUE1:

- 用 LAB 变量指明是否打开或关闭检测。指定 OFF 为检测关闭。指定 ON 为检测打开。
 - 用 VALUE1 变量指明打开或关闭哪一项检测。可以指定 ANGD (SHELL28 拐角处偏角检测)，ASPECT (纵横比检测)，PARAL (对边平行度偏差检测)，MAXANG (最大拐角角度检测)，JACRAT (Jacobian 比率检测)，或 WARP (扭曲因子检测)。
- 还可用 ALL 指定打开或关闭所有检测。

例如：SHPP, OFF, WARP 命令关闭所有扭曲因子检测。

通过 GUI 触发检测打开或关闭，选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor >CheckingCtrls>Toggle Checks，当触发形状检查对话框出现时，单击想要打开或关闭的个别检测，然后单击 OK。

查看形状检测结果

下列输出，是由 SHPP, SUMMARY 命令得到，提供了对所有选定单元的形状检查结果。

通过 GUI，查看结果列表选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>CheckingCtrls>Shape Checking，当触发形状检查对话框出现时，选择功能菜单中的“Summary”，然后单击 OK。

```
SUMMARIZE SHAPE TESTING FOR ALL SELECTED ELEMENTS
```

```
-----
<<<<<<  SHAPE TESTING SUMMARY      >>>>>>
<<<<<<  FOR ALL SELECTED ELEMENTS   >>>>>>
-----
```

```
| Element count      214 PLANE82 |
-----
```

Test	Number tested	Warning count	Error count	Warn+Err %
Aspect Ratio	214	0	0	0.00 %
Maximum Angle	214	59	0	27.57 %
Jacobian Ratio	214	0	0	0.00 %
Any	214	59	0	27.57 %

查看当前形状参数限制

下列输出是 SHPP, STATUS 命令产生, 对 ANSYS5.5 中单元形状参数和缺省形状参数限制进行了列表。缺省地当一个单元的形状在这些限制以外, 会出现警告或错误信息。

在 GUI 中, 可通过菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl's>Shape Checking 查看状态列表。当形状检查控制对话框出现时, 在功能菜单中选择“Status”, 然后单击 OK。

如上所述, 输出表明 ANSYS 中的缺省形状参数范围。如果修改了任何限制或关闭了任何个别形状检查, 输出结果都会相应地不同。

下面输出的多数情况里, “FACE”也指实体单元的横截面“Cross-Section of Solid element.” 例如, ASPECT RATIO 限制了四面体、六面体(块)、棱锥和楔形体的表面和截面。

```

ASPECT RATIO (EXCEPT FLOTRAN OR EMAG)
  QUAD OR TRIANGLE ELEMENT OR FACE
    WARNING TOLERANCE (1)   = 20.00000
    ERROR TOLERANCE  (2)   = 1000000
  DEVIATION FROM 90 DEGREE CORNER ANGLE
    SHELL28 SHEAR/TWIST PANEL
      WARNING TOLERANCE (7) = 5.000000
      ERROR TOLERANCE  (8) = 30.00000
  DEVIATION FROM PARALLEL OPPOSITE EDGES IN DEGREES (EXCEPT FLOTRAN OR EMAG)
    QUAD ELEMENT OR FACE WITHOUT MIDSIDE NODES
      WARNING TOLERANCE (11) = 70.00000
      ERROR TOLERANCE  (12) = 150.0000
    QUAD OR QUAD FACE WITH MIDSIDE NODES
      WARNING TOLERANCE (13) = 100.0000
      ERROR TOLERANCE  (14) = 170.0000
  MAXIMUM CORNER ANGLE IN DEGREES (EXCEPT FLOTRAN OR EMAG)
    TRIANGLE ELEMENT OR FACE
      WARNING TOLERANCE (15) = 165.0000
      ERROR TOLERANCE  (16) = 179.9000
    QUAD ELEMENT OR FACE WITHOUT MIDSIDE NODES
      WARNING TOLERANCE (17) ~ ~ 155.0000
      ERROR TOLERANCE  (18) = 179.9000
    QUAD ELEMENT OR FACE WITH MIDSIDE NODES
      WARNING TOLERANCE (19) = 165.0000
      ERROR TOLERANCE  (20) = 179.9000
  JACOBIAN RATIO
    H-METHOD ELEMENT
      WARNING TOLERANCE (31) = 30.00000
      ERROR TOLERANCE  (32) = 1000.000
    P-METHOD ELEMENT
      WARNING TOLERANCE (33) = 30.00000
      ERROR TOLERANCE  (34) = 40.00000

```

```

QUAD ELEMENT OR FACE WARPING FACTOR
SHELL43, SHELL143, SHELL163, SHELL181
  WARNING TOLERANCE (51) = 1.000000
  ERROR TOLERANCE (52) = 5.000000
INFIN47, INTER115, SHELL57, SHELL157,
SHELL63 WITH NLGEOM OFF AND KYOPT1 NOT = 1
  WARNING TOLERANCE (53) = 0.1000000
  ERROR TOLERANCE (54) = 1.000000
SHELL41, OR SHELL63 WITH KYOPT1=1
  WARNING TOLERANCE (55) = 0.4000000E-04
  ERROR TOLERANCE (56) = 0.4000000E-01
SHELL28
  WARNING TOLERANCE (57) = 0.1000000
  ERROR TOLERANCE (58) = 1.000000
SHELL63 WITH NLGEOM ON AND KYOPT1 NOT = 1
  WARNING TOLERANCE (59) = 0.1000000E-04
  ERROR TOLERANCE (60) = 0.1000000E-01
3D SOLID ELEMENT FACE
  WARNING TOLERANCE (67) = 0.2000000
  ERROR TOLERANCE (68) = 0.4000000
ELEMENT SHAPE CHECKING IS ON WITH DEFAULT LIMITS

```

改变形状参数限制

如果 ANSYS 程序的缺省形状参数限制不适合用户的目的, 可用命令方法 (SHPP, MODIFY, VALUE1, VALUE2) 或 GUI 方法加以改变。

关于如何使用命令方法, 参见 ANSYS 命令手册中 SHPP 命令的叙述。

GUI 方法是最简的。也是首选的改变形状参数限制的方法。按下列步骤:

1. 选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>CheckingCtrls>Shape Checking, 出现形状检查控制对话框。
2. 改变单元设置功能 (Change setting) 出现 Yes。
3. 单击 OK。出现改变形状检查设置对话框。
4. 对任何待改的限制, 利用滚动条在所列范围内上下移动, 输入新的限制。
5. 当输入新范围完成后, 单击 OK。

◆ 改变形状参数范围的例子

ANSYS 程序的形状检查控制提供了灵活性以适应不同分析所需。例如:

也许用户不太关心纵横比的检查。可在用户的 START5X.ANS 文件中用 SHPP, OFF, ASPECT 命令关闭所有的纵横比检查。如用户对用户过于随意了, 可选择指定 SHPP, MODIFY, 1, 1000。如此大的对纵横比检查警告的松弛限制, 并不完全关闭此项检查。

假设用户用耦合场顺序分析方法执行热应力分析。计划先用 SHELL57 单元作热分

析,然后用 SHELL63 单元(带有几何非线性)进行结构分析。如果开始用 SHELL57 单元,ANSYS 将用松散的扭曲限制检查单元(即警告公差为 0.1,错误公差为 1.0,参照 7.5.7 节中提供的缺省限制完整列表的输出例子)。与此对比,对带有几何非线性的 SHELL63 单元的缺省扭曲限制则十分严格(警告公差为 0.00001,错误公差为 0.01)。因为对热分析 ANSYS 将按松散限制检查单元。检查不会出现任何单元超过非线性 SHELL63 的限制。但对结构分析,转换单元类型为 SHELL63(ETCHG, TTS)并打开几何非线性(NLGEOM, ON) ANSYS 将重新检查单元形状。因为第二个分析限制较为严格,对热分析没有问题的单元在结构分析中可能会产生警告或错误。用户将面临选择: a) 接受不好的结构单元,这将降低分析结果的质量; b) 修改网格开始一个新的热分析。避免这种情况出现的一个途径是将 NLGEOM 打开用 SHELL63 单元生成初始模型;对热分析转成 SHELL57 单元;对结构分析再转回 SHELL63 单元。另一个替代方法是重置 SHELL57 扭曲限制与打开 NLGEOM 的 SHELL63 单元一样严格。可用命令 SHPP, MODIFY, 53, 0.0001 和 SHPP, MODIFY, 54, 0.01 来实现。

恢复单元形状参数数据

可用 *GET 和 *VGET 命令恢复单元形状参数数据。

命令: *GET, Par, ELEM, ENTNUM, SHPAR, IT1NUM

GUI: Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data

命令: *VGET, ParR, ELEM, ENTNUM, SHPAR, IT1NUM, ,, KLOOP

GUI: Utility Menu>Parameters>Get Array Data

注意 不能用 GUI 途径恢复单元形状参数数据

例如:命令 *GET, A, ELEM, 3, SHPAR, ASPE 返回到单元 3 的计算纵横比并存在为参数 A。命令 *VGET, A(1), ELEM, 3, SHPAR, ASPE 返回单元 3 的纵横比并存在 A 的第一个位置,对单元 4、5、6 等可继续进行恢复,直到连续排列位置已填满。

见 ANSYS 命令手册中 *GET 和 *VGET 命令的叙述。

理解何种情况下 ANSYS 重新检查已有单元

通过定义单元改变单元类型可使先前的单元形状检查失效。ANSYS 设计成能自动捕捉单元类型的改变并重新对受影响单元进行检查。ANSYS 重新对已有单元进行检查的情况有:

- 改变单元类型(ET, Ename 或 ETCHG, CnV)或其关键选项之一(KEYOPT)。
- 当改变一种单元的单元类型(TYPE)号(EMODIF)。
- 当改变 SHELL63 单元的大变形指令(NLGEOM, Key)。
- 当定义一种单元之后定义壳厚度(R),或改变已有厚度(RMODIF),或一种壳单元的 REAL 实常数(EMODIF)。

注意 单元类型与单元的类型 TYPE 号是不同的。单元类型是单元的真实名称（例如，BEAM4 或 SHELL63，有时缩短简化为 4 或 63）。单元类型的 TYPE 号指定给一具体单元类型的任意号码；当给模型定义属性时，用 TYPE 号代表单元类型。

确定单元形状是否可以接受

下列建议帮助用户确定是否应当关心单元形状警告：

- 不要忽略单元形状警告，分析形状不好的单元给分析结果带来的影响。
- 形状不好的单元对结构动力分析的影响比其他类型的分析（挠度或名义应力、模态、热场、磁场等）要严重得多。
- 如果形状不好的单元位于临界区域（如在极限应力点附近），对分析的影响将更大。
- 形状不好的高阶单元（带边中节点）一般其分析结果要比同样形状的线性单元要好。ANSYS 缺省的形状参数限制对线性单元比高阶单元要严格得多。
- 无论单元是否产生形状警告，通过与其他分析、实验数据或手工计算的分析结果相比较验证是必要的。如果验证表明有高质量的结果，那么没有必要担心形状警告。
- 单元是否可以接受的最好定量测定是依据应力或热梯度区内单元与单元的不连续的差错测定。

对已有网格（ANSYS 生成的网格或由 CAD 程序输入的网格）进行单元形状检查，用 CHECK 命令（Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Set Bad Elems）。

关于单元形状检查参见 ANSYS 命令手册中 SHPP 命令的叙述。

4.6 改变网格

如果用户认为生成的网格不合适，可用下列方法轻易地改变网格：

- 用新的单元尺寸定义划分网格。
- 用接受/拒绝（accept/reject）提示放弃网格，然后重新划分网格。
- 清除网格，重新定义网格控制并重新划分网格。
- 细化局部网格。
- 改进网格（只适于四面体单元网格）。

这些方法在下面详细讨论。

4.6.1 对模型重新划分网格

可通过重新设置单元尺寸控制并开始网格划分。对已划分网格模型重新划分网格（AMESH 或 VMESH）这是最简便的改变网格的途径。不需要 accept/reject 提示，不必清除已有网格即可对其进行网格划分。

但是，应用这种方法有一些限制。可用 KESIZE、ESIZE、SMRTSIZE 和 DESIZE 控制命令改变单元尺寸定义，但不能改变尺寸定义直接到线上（LESIZE）。如果在网格划分前希望

改变 LESIZE 设置功能，不用这种方法而用网格 accept/reject 提示。

只有通过 GUI 交互执行网格划分时才可用网格重新划分功能。如果用命令输入，必须在网格重新划分前清除网格。

4.6.2 利用网格 Accept/Reject 提示

如前所述，在网格划分前可在 GUI 中单击 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesher Opts 激活 accept/reject 提示。（此提示缺省是关闭的。）当激活时，在每一网格划分操作之后出现提示允许接受或拒绝生成的网格。如果网格被拒绝了，所有的节点和单元将从已划分网格的图元中清除。可以重新设置任何网格划分控制并对模型重新划分网格。

accept/reject 提示适于面和体网格划分。使用提示的好处是不必手工清除网格（ACLEAR 和 VCLEAR）。

4.6.3 清除网格

在重新划分网格时并不是每次都要求清除节点和单元。但对于用 LESIZE 命令设置时必须清除网格。要从根本上改变实体模型也必须清除网格。

从关键点（KCLEAR）、线（LCLEAR）、面（ACLEAR）或体（VCLEAR）上清除网格，在 GUI 中选择 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>entity type。

4.6.4 细化局部网格

如果用户对网格划分基本满意但希望在某个区域划分更多的单元，可在选定的节点（NREFINE）、单元（EREFINE）、关键点（KREFINE）、线（LREFINE）或面（AREFINE）附近细化局部网格，这些选定图元附近的单元将被分裂以生成新的单元。可通过定义控制细化过程：

- 细化的程度（换句话说，相对于原来单元尺寸的细化区域想要的尺寸）。
- 按照所选定图元以外单元的数量确定周围待重新划分网格的深度。
- 在分裂原来的单元之后的后处理类型（光滑化和修整，只光滑化，或既不光滑化也不修整）。
- 在用另外的全部四边形网格细化中是否可以引入三角形网格。

可在 GUI 中得到局部网格细化 Main Menu> Preprocessor> -Meshing-Modify Mesh>-Refine At-entity。也可使用命令 ESEL, ALL 做出全部的细化或单击菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At-All。

4.6.5 改进网格（只针对四面体单元网格）

四面体网格改进功能可对一给定四面体网格进行改进。ANSYS 执行这种改进是通过面交换、节点光滑和其他技术来减少形状不好的四面体单元（尤其是分裂四面体的单元数）的数量也减少网格中总单元数。它也改变了全部网格的质量。

自动进行四面体网格改进

在许多情况下，不必采取任何动作即可获得四面体网格改进的好处。四面体网格改进还自动地发生在生成过渡棱锥单元和细化四面体单元网格时。

用户进行四面体网格改进

尽管四面体网格改进会自动地进行，有时用户会碰到对一给定四面体网格要求另外的改进也是很有益处的情况：

- 在体网格划分操作中自动进行四面体改进时 (VMESH)，ANSYS 用线性四面体形状尺度去改进，这意味着 ANSYS 将会忽略各单元中可能出现的边中节点。但当对一给定网格按下列方式要求四面体改进时，ANSYS 会将边中的节点考虑进去。因此，对二次（有边中节点）四面体单元网格，在生成网格之后 (VMESH) 要求另外的四面体改进 (VEMP)，将有助于除去或至少是减少单元形状检查中产生警告单元的数量，并改进整个网格的质量。
- 因为输入的四面体网格没有得到 ANSYS 自动执行的改进四面体单元网格的好处，因此输入的四面体网格有待用户去改进其网格。

四面体网格改进是一个迭代的过程。每处理完一次，出现一个特殊窗口报告这次迭代改进的状况，连同诊断信息。如果想进一步改进网格，可反复地执行请求，直到获得满意的网格，或直到已收敛并且不再有明显的改进。

可以要求改进两种类型的四面体单元。

可对不附属于某一个体的四面体单元请求进行改进（典型地，此功能对一个输入的附带几何信息的四面体网格是有用的），用下列方法：

命令：TIMP

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>Improve Tets> Detached Elems

可对选定体内的四面体单元请求改进（可用此功能对在 ANSYS 中生成的体网格 (VMESH) 做进一步的改进）。用下列方法：

命令：VIMP

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>Improve Tets> Volumes

使用四面体网格改进的限制

下列为使用四面体网格改进的限制：

- 网格必须全部由线性单元或全部由二次单元组成。
- 对网格中所有适于四面体网格改进的单元，它们必须都具有包括单元类型在内的相同属性，（单元类型必须是四面体的，但四面体单元也可能是六面体单元的退化形式）。在四面体网格改进之后，ANSYS 从旧的集将属性重新分配给新的单元集。

注意 四面体网格改进对混合单元形状是可行的（与单元类型相反）。例如，前面提到的，会自动出现改进，在六面体和四面体界面之间生成过渡的棱锥，但是对混合网格只对四面体单元进行改进。

当载荷以下列方式出现时可以进行四面体网格改进：

- 当载荷加到体边界的单元表面或节点上。
- 当载荷只加到实体模型上（并已转到有限元网格上）。

当载荷以下列方式出现时不能进行四面体网格改进：

- 当载荷加到体内部的单元表面或节点上。
- 当载荷加到实体模型上（并已转到有限元网格上），但也加到了体内的单元表面或节点上。

注意 在后两种载荷情况，ANSYS 会出现一条警告信息通知用户想用四面体网格改进到必须除去载荷。

- 如果定义节点或单元组合时，用户将会被询问是否进行网格改进。如果选择了改进，则必须对受影响的组合进行更新。

四面体单元网格改进的其他性质

四面体网格改进的其他性质包括：

- 单元编号和节点编号也进行修改。
- 一般地，如果 ANSYS 遇到了错误或用户放弃操作，则网格没有改变。但是，在用户放弃操作并在 ANSYS 提示时确认了存盘，则 ANSYS 将会存储一个部分改进的网格。如果对多个体请求了改进（VIMP）。放弃只针对当前正在进行网格划分的体；所有已改进的体网格已保存（在多个体中第一个体改进之后发生错误情况相同）。可详见 TIMP 和 VIMP 命令的叙述。

4.7 一些提示和注意事项

4.7.1 注意事项

修平的或有过尖角的区域：修平的或有很尖内角的面和体经常造成网格划分失败。

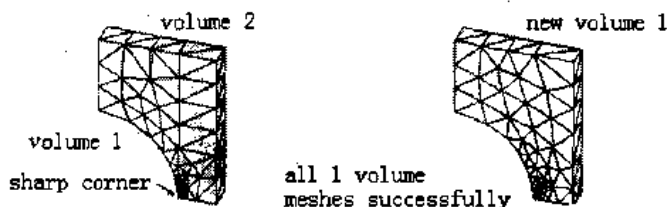


图 4-35 避免尖角

◆ 急剧单元尺寸过渡

如果指定了急剧变化的过渡单元尺寸可能造成单元质量不好。

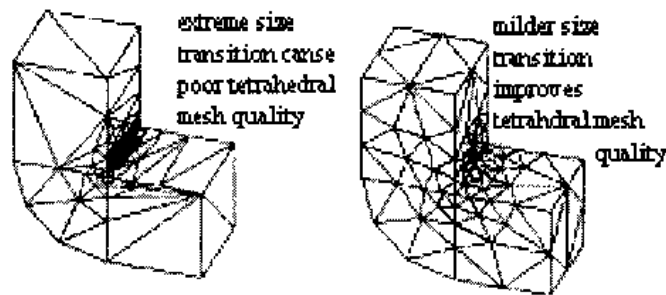


图 4-36 避免急剧的单元尺寸过渡

◆ 单元过度扭曲

当使用有边中节点结构的单元对曲边建模时，应当保证足够的网格密度以使单元的跨度在一个单元长度上不超过 15° 的弧。如果不需要曲边附近详细的应力结果，可沿曲边和表面生成直边单元 (MSHMID, 1) 的粗糙网格。在曲边单元可能会生成一个反向单元的地方，四面体网格划分器会自动将其改为直边单元并产生一个警告。

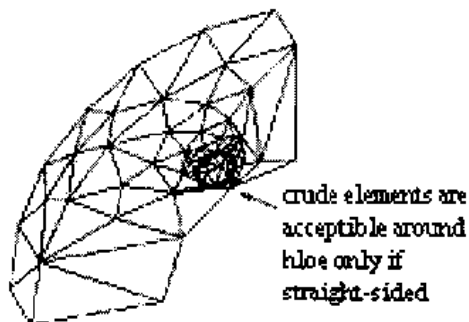


图 4-37 用 MSHMID, 1 强制生成直边单元

4.7.2 进一步的提示

四面体网格划分失败可能是相当耗时的。一种相对快捷的方式为可能的四面体网格划分失败作一个预先检查，用六节点三角形对体的表面划分网格。如果表面三角形网格不包含尺寸突变的过渡（公认通常是难以判断的），并且未产生扭曲或纵横比警告，四面体网格划分失败的可能性远比这些情况要小（要保证在使用分析模型前清除或不激活三角形单元）。

无论何时都要避免从模型中去掉已划分网格的图元。但是，如果去掉了已划分网格的图元并产生了不想要的网格，可通过清除网格来恢复图元并对其重新划分网格。

4.8 修改模型

4.8.1 简介

本节主要叙述各种修改模型的方法。主题包括：

- 局部网格细化

- 节点和单元的移动与拷贝
- 记录单元面和方向
- 修改已划分网格的模型：清除和删除
- 理解实体模型的相互对照检查

4.8.2 细化局部网格

通常在下面两种情形时，用户需要考虑对局部区域进行网格细化。

用户已经将一个模型划分了网格，但想在模型的指定区域内得到更好的网格。

用户已经完成分析，同时根据结果想在感兴趣的区域得到更为精细的解。对于所有由四面体组成的面网格和体网格，ANSYS 程序允许用户在指定的节点、单元、关键点、线或面的周围进行局部网格细化。由非四面体所组成的网格（例如六面体、楔形、棱锥）不能进行局部网格细化。

如何细化网格

必须按下面的两步来细化网格：

1. 选择图元（或一组图元）以便围绕着它们进行网格细化。
2. 指定细化的程度（换句话说，就是在细化区域相对于原始网格所想要的尺寸）。细化后的单元总是比原来的单元小；局部网格细化过程不能提供使网格变粗的功能（LEVEL）。

如果用户想在细化过程中进行更多的控制，可以对下列的高级选项进行参数设定：

根据已选定图元周围单元数指定网格细化区域的深度（DEPTH）。

在原始单元被分裂开后指定后处理的类型，后处理包括进行网格光滑和清理操作，只是光滑处理，或两者都没有（POST）。

指定在细化全是四边形的网格时是否可以将三角形引入网格。换句话说，用户可指定四边形单元是否一定要保留（RETAIN）。

使用下面 xREFINE 命令和菜单途径来选择要进行细化的图元并设置细化的控制。

围绕所选择的节点进行细化，使用下列方法：

命令：NREFINE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->Nodes

围绕所选择的单元进行细化，使用下列方法：

命令：EREFINE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->Elements

Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->All

围绕所选择的关键点进行细化，使用下列方法：

命令：KREFINE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->Keypoints

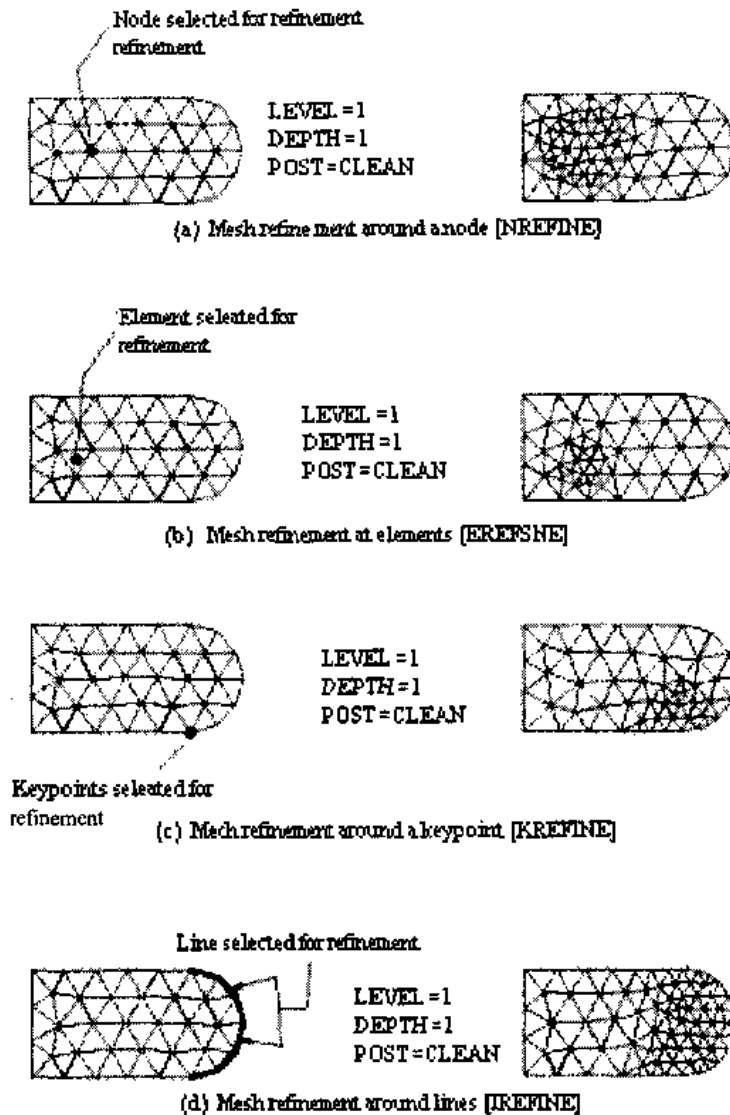


图 4-38 局部网格细化的例子

围绕所选择的线进行细化，使用下列方法：

命令：LREFINE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->Lines

围绕所选择的面进行细化，使用下列方法：

命令：AREFINE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Modify Mesh>-Refine At->Areas

图 4-38 显示了一些围绕着节点 (NREFINE)、单元 (EREFINE)、关键点 (KREFINE) 和线 (LREFINE) 进行网格细化的例子。

图 4-39 举例说明了用 AREFINE 命令围绕面的四面体网格细化。

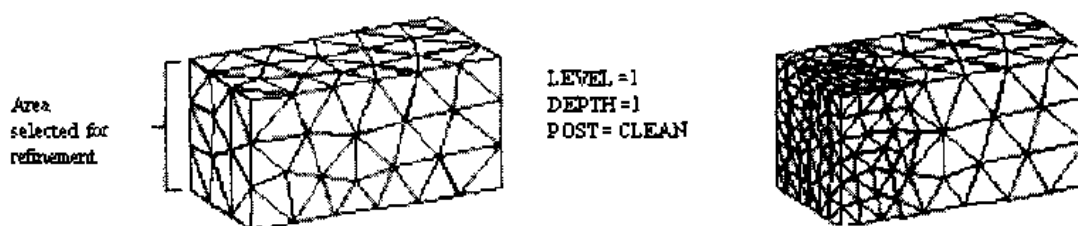


图 4-39 围绕面的四面体网格细化 (AREFINE)

使用 LEVEL 变量来指定细化应进行的程度。LEVEL 值必须是从 1 到 5 的整数，值 1 提供了最小程度的细化，值 5 提供了最大程度的细化。当 LEVEL=1 时，在细化区域所得到的单元边界长度大约是原单元边界长度的 1/2；当 LEVEL=5 时，所得到的单元边界长度大约是原单元边界长度的 1/9。表 4-4 列出了 LEVEL 所有可能的设置以及每一种设置所得边界的近似长度。

表 4-4 列出了 LEVEL 所有可能的设置以及每一种设置所得边界的近似长度

Value of LEVEL Argument	Approximate Edge Length
1	1/2
2	1/3
3	1/4
4	1/8
5	1/9

LEVEL 值从 1 到 5 提供了逐渐减少的单元边界长度。但是，应该知道当 RETAIN=ON 时，不同的 LEVEL 值可以提供同样的细化网格（要得到更多的信息，请看后面 RETAIN 变量的解释）。刚好在细化区域外面的那一层单元（也就是说在指定 DEPTH 之外）也可能被分开，目的是与细化单元过渡。

注意 所有的 LEVEL 值在细化区域都只生成较小的单元。局部网格细化过程不提供网格粗化功能。

缺省时，只对所选图元外面的一个单元进行细化（除了单元细化，它使用 DEPTH=0 作为缺省），而且单元被分裂一次（也就是单元边被平分成两半，因为缺省 LEVEL=1）。

作为细化过程的一部分，用户可指定在原始单元分裂后 ANSYS 还应做的后处理的类型。可以选择光滑和清理（缺省），只进行光滑操作，或两者都不选。

如果让 ANSYS 做光滑和清理的工作，设置 POST=CLEAN（或在 GUI 中选择 Cleanup&Smooth）。

如果只想让 ANSYS 只做光滑工作，设置 POST=SMOOTH（或在 GUI 中选择 Smooth）。

如果后处理两项都不想做，设置 POST=OFF（或在 GUI 中选择 OFF）。

◆ 光滑

缺省时，细化区域的节点将进行光滑处理（也就是它们的位置将被调整）以改善单元的形状。节点的位置遵循下列的约束进行调整：

- 节点在关键点上时不移动。
- 节点在线上时只在线上移动。
- 节点在面内时只在表面上移动。
- 如果网格已经从实体模型中分离出来了 Main Menu>Preprocessor> Checking Ctrls>Model Checking，光滑操作就不会进行了。

用户可对正在用的细化命令设置 POST=OFF，关闭对所有节点的光滑命令。（也可以这么做来关闭清理命令。）

◆ 清理

当清理选项是打开时（POST=CLEAN），ANSYS 程序会对所有与受到影响的几何图元相关联的单元进行清理操作（在二维模型中）。在三维模型中，ANSYS 程序只对那些在细化区域内或直接与细化区域相连接的单元执行清理命令。清理操作可以改善单元的质量。如果网格已经从实体模型中分离出来了（MODMSH, DETACH 或菜单途径 menu path Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrls>Model Checking），那么不会进行面网格的清理操作。但对于四面体网格这个命令还是会被执行。

当用户正在细化四边形网格时，清理命令会试着从细化过渡区域删除三角形网格。如果清理操作已经完成优化单元质量后，仍留有形状不好的四边形单元，ANSYS 就会把这些单元分裂成三角形。通设置 RETAIN=ON（缺省）就可以防止这种情况的发生。图 4-40 图示说明了一个全是四边形网格的清理操作。用户可通过对细化命令设置 POST=OFF 或 POST=SMOOTH 来关闭清理操作。

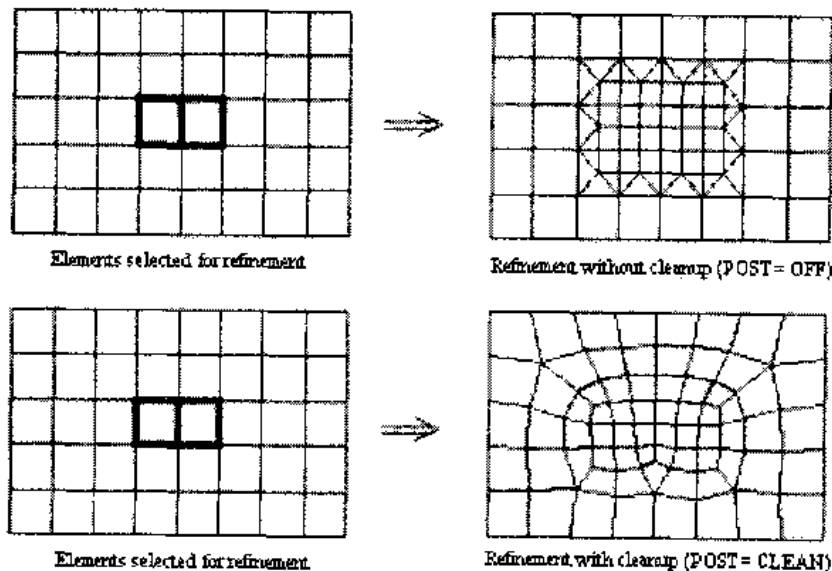


图 4-40 一个全是四边形网格的清理操作

当正在细化任何一个非四边形的网格时，ANSYS 会忽略 RETAIN 变量。缺省时，RETAIN=ON，这意味细化网格过程不会将三角形单元引入到全是四边形的网格中。当

RETAIN=OFF 和 POST=SMOOTH 或 OFF 时, 所得到的细化区域可能会包含三角形单元目的是保持连续过渡。当 RETAIN=OFF 和 POST=CLEAN 时, 三角形单元会达到最少; 但是, 它们不可能被完全删除掉 (极少量的三角形单元可以留在过渡区域), 目的是得到好的单元质量。

如果一个面是由四边形单元和三角形单元混合划分而成, 那么即使是当 RETAIN=ON 时细化区域内的四边形单元也不能被保留住。

因为四边形单元较三角形单元有更多的限制, 因此当 RETAIN=ON 时增加或减少 LEVEL 变量的值时不一定就能得到所想要的细化水平的增加或减少。另外, 即使是四边形单元可以被保留住, 它们中的一些单元的性态也可能很差, 特别是在 LEVEL 值较高时, 但是, 若通过设置 RETAIN=OFF 一些三角形单元就有可能被引入网格。这是所不希望得到的, 特别是在使用低阶单元时。可以通过做到以下几点来把三角形单元保持在所感兴趣的点以外:

- 用更大的 DEPTH 进行细化, 也就是说, 在所感兴趣点的更大的半径上细化。
- 用 POST=CLEAN 选项细化。这个 POST 变量的设置可使三角形单元的数量出现得最少。
- 使用另外的方法进行细化 (例如, 使用局部网格控制和重新划分网格)。

属性和载荷的转换

与“父”单元相关联的单元属性会自动地转换到所有的“子”单元上。这些属性包括单元类型、材料特性、实常数和单元坐标系 (若想对单元属性有更多的了解, 参见第7章)。

加在实体模型上的载荷和边界条件在求解开始时会自动地转换到节点和单元上, 或用 SBCTRAN 或 DTRAN 命令手工进行载荷转换。因此实体模型载荷会正确地加到在细化期间新生成的节点和单元上。但是, 加在节点和单元上的载荷和边界条件 (有限元载荷) 不能转换到在细化期间新生成的节点和单元上。如果在所选择的细化区域内有这样的载荷, 程序将不允许细化过程的进行除非是先删除载荷。所以, 如果用户预计要使用网格细化功能, 那么建议只将载荷加在实体模型上而不是直接加在节点和单元上。

因为实体模型加载对于显式动力分析 (也就是 ANSYS/LS—DYNA 产品) 是不可用的, 所以网格细化必须在这类分析的加载之前进行。

网格细化的其他特征

网格细化的其他特征包括以下几点:

- 细化生成新的单元和节点 (包括中间节点) 被投射到实体模型几何结构上 (见图4-41)。

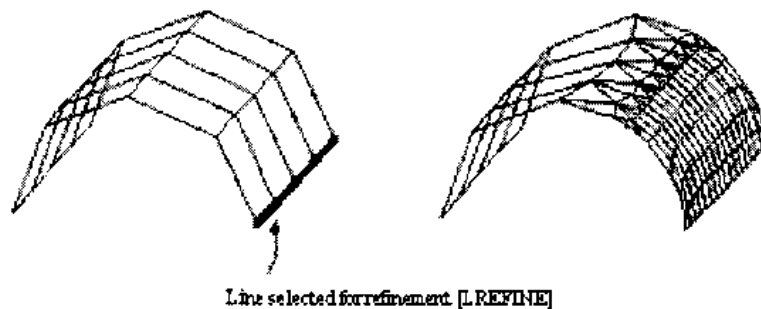


图 4-41 节点和单元投射到实体模型上

- 当使用选项围绕节点细化时[NREFINE]，忽略所选节点中的中间节点。
- 网格细化不会超过面和体的边界。也就是说，如果指定的 DEPTH 超过了面或体网格的边界后，邻接的面或体网格不会改变（见图 4-42）。但是，如果选择进行细化的图元（节点、单元、关键点或线）是在边界上，或所选图元在边界两边，那么细化就会延伸到邻接的面或体内。

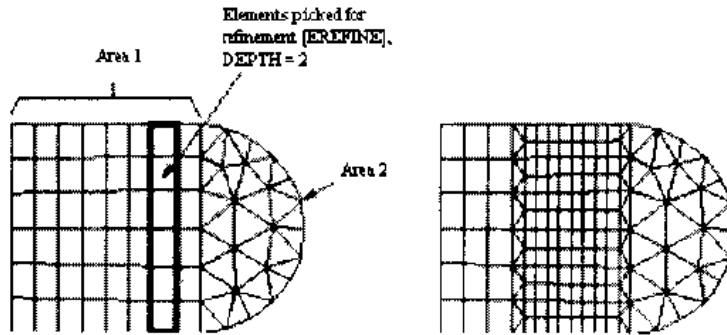


图 4-42 网格细化不超过面边界

- 网格细化只在当前所选定的单元内进行（见图 4-43）。

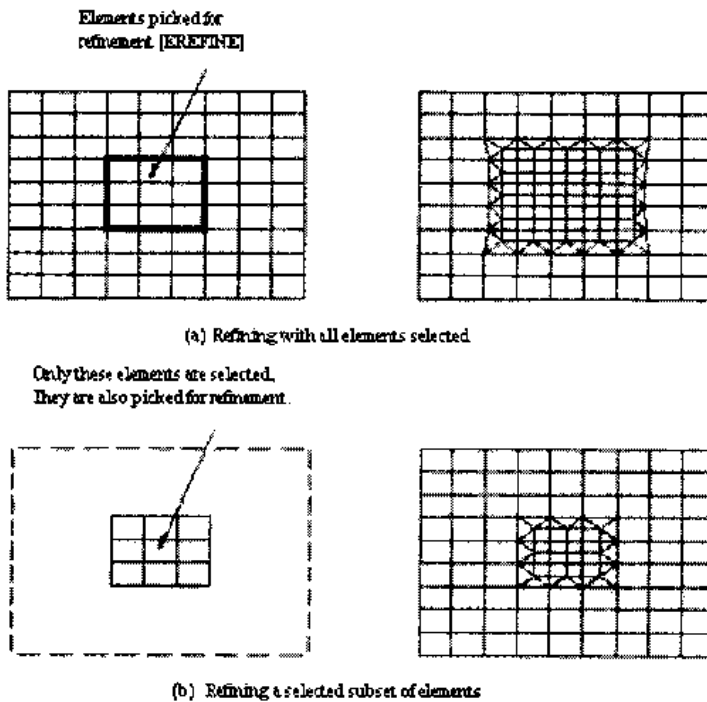


图 4-43 只细化被选择的单元

- 细化可以用在已从实体模型中分离出来的网格上 (MODMSH, DETACH 或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>CheckingCtrls>Model Checking)。在这种情况下，细化不会被面边界所终止。而且，节点和单元不会投射到实体模型上，指定 POST 变量的后处理选项一个也不能执行。
- 在细化一个四面体网格期间，当清理选项被打开时 (POST=CLEAN)，ANSYS 在细

化区域自动执行一个高水平的清理操作（也就是相当于 VEMP,,, 2 的水平）。如果用户在细化期间得到形状错误信息，就关掉形状检查选项（SHPP, OFF）再执行一次细化命令（xREFINE），然后再在最高级的水平之上（VIMP,,, 3）进行四面体单元的改进。

- 如果用户使用 LESIZE 命令指定线的分割数，这些线在随后的细化过程中将受到影响，ANSYS 将会改变那些受到影响的线的分割数（也就是说，线的分割数不仅增加，而且在随后的线列表中（LLIST）也可显示为负数）。

如果用户在后来清除网格（ACLEAR, VCLEAR 等命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>entity），则负号的存在将影响 ANSYS 如何处理线的分割数。如果线的分割数是正数，则在清除操作期间，ANSYS 不会删除线的分割数；若分割数是负的，ANSYS 就会删除线的分割数（在随后的线列表中分割数将显示为零）。

网格细化的限制

下面的限制针对网格细化：

- 尽管局部网格细化可被用在所有的面网格中，但它只能用在由四面体单元组成体网格上。包含非四面体单元的网格（例如，六面体、楔形体、棱锥）不能被局部细化。
- 如果模型在所选的细化区域内包含有接触单元，则不能使用局部网格细化。在这种情况下，应在定义接触单元前细化网格（或者删除接触单元，细化网格，然后再加接触单元）。
- 局部网格细化不支持已有的在自由表面上生成的单元（ESVRF）。对这些单元细化应先删掉表面单元，细化下面的单元，然后再生成表面单元。
- 如果已有梁单元存在于细化区域附近，则细化就不能进行。为了在这个面上细化，梁单元应先被删掉，细化命令执行完后再重新定义。
- 如果载荷直接加在模型的节点和单元上，细化就不能进行。在这种情况下，为了能细化网格必须删除载荷（为避免这种情况发生，建议用户将载荷加在实体模型上而不是加在有限元模型上）。
- 如果初始条件在节点（IC）、耦合节点上（CP 命令族），或模型中存在约束方程（CE 命令族），则局部网格细化不能进行。如果存在这些情况中的任一种，用户都应在细化之前先删除它们。
- 对于显式动力分析模型（当使用 ANSYS/LS—DYNA 时），不推荐使用局部网格细化，因为由细化所得到的单元会极度地减小时间步长。
- 不支持 KSCON 命令。对于任何用 KSCON 命令划分网格的面，当进行细化时边中节点将被放置在边界的中间。
- 如果已定义了单元或节点组元，程序会问是否继续细化。如果选择继续，就必须更新受到影响的组元。

4.8.3 节点和单元的移动与拷贝

在通常的实体建模过程中，用户在生成有限元网格前应先完成整个实体模型。但是，如

模型中存在重复性的几何特征，用户有时会发现下面的方法更为有效：只对模型中有代表性的一部分进行建模，划分网格，然后根据需要拷贝那个已划分了网格的区域若干次以完成模型（拷贝一个已存在的网格比生成一个新网格花费的时间要少得多）。如果用户要成功地完成这个程序，需预先计划好要拷贝的数量。

拷贝一个已划分了网格的区域的一般程序是使用命令来生成和转变面和体，这些将在下面叙述。当一个已划分了网格的实体模型图元用这些命令中的一个进行拷贝时，所有依附其上的低级图元，包括节点和单元网格，都将随同那个图元一起被拷贝。

从模板面中生成另外的面，使用下列方法：

命令：AGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Copy>Areas

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Areas

从模板体中生成另外的体，使用下列方法：

命令：VGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Copy>Volumes

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Volumes

用对称映像由一个模板面中生成另外的面，使用下列方法：

命令：ARSYM

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Reflect>Areas

用对称映像由一个模板体中生成另外的体，使用下列方法：

命令：VSYMM

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Reflect>Volumes

将模板面转换到另一个坐标系下，使用下列方法：

命令：ATRAN

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Transfer Coord>Areas

将模板体转换到另一个坐标系统下，使用下列方法：

命令：VTRAN

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Transfer Coord>Volumes

用户必须先计划好以确保拷贝的区域之间的接触面上的节点和节点相匹配。例如，如果用户对一个体进行自由网格划分，在右端的节点模式就不必与左端的节点模式相匹配。如果原始部分和它的拷贝正好是一部分的右端与另一部分的左端相连接起来，那么在两个不匹配接触面上就会生成一条不连续的线缝。

沿着面网格划分的边缘线制作匹配的节点模式较容易，只要指定原始部分的两边都有相同的线分割和分割间距即可。但是，对于体就没有这么简单了。在网格体的两个面上需用一个技巧生成相匹配的节点模式。在用体单元网格划分之前，用伪面单元对某一个匹配面进行网格划分，然后将划分完网格的面拷贝至另一匹配面（依赖于用户最初是如何创建体的，此时用户可以做一些清理工作，也可不做。如果用户清除了重复的重合面，就应根据新划分网格的面重定义体，同时删除最初的体。）然后，体就可以用实体单元进行网格划分了。在体网格划分完成后，应删去伪面单元（用户可通过使用选择 ACLEAR 命令或菜单路径 Main Menu>Preprocessor> -Modeling- Clear>Areas 非常干净地做到这一点）。

已经完成网格划分的区域在界面上将是相互匹配的，用户现在就可拷贝这个部分了，这样，重复的区域就会正好互相接触了。尽管这些区域在接触面上有相互匹配的节点，但这些节点的自由度仍然是独立的；也就是说，模型接触面上仍存在不连续的线缝。应运行 NUMMRG, ALL 来删除这个不连续的线缝。通常，在此命令后再跟着运行 NUMCMP 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor> Numbering Ctrl>Compress Numbers）是一个比较好的习惯。

4.8.4 记录单元面和方向

如果模型中包含壳单元，并且加的是面载荷，那么用户就需要了解单元面以便能对载荷定义正确的方向。通常，壳的表面载荷将加在单元的某一个面上，并根据右手法则（按 I, J, K, L 节点序列方向，如图 4-44 所示）确定正向。如果用户是用对实体模型面进行网格划分的方法生成壳单元的，那么单元的正方向将与面的正方向相一致，面的正方向可用命令 ALIST 来确定或执行菜单途径 Utility Menu>List>Areas；根据右手法则，定义面的线序列方向来定义面的法线方向。

有几种方法可用来进行图形检查：

- 可用执行 /NORMAL 命令（菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Shell Normals），接着再执行 EPLOT 命令（菜单途径 Utility Menu>Plot>Elements）的方法对壳单元的正法线方向进行一次快速的图形检查。
- 打开 PowerGraphics 的选项。PowerGraphics 将用不同的颜色来显示壳单元的“底”和“顶”。
- 用假定正确符号的表面载荷加到模型上，然后在执行 EPLOT 命令之前先打开显示表面载荷符号的选项（/PSF, Item, Comp, 2）以检验它们方向的正确性。

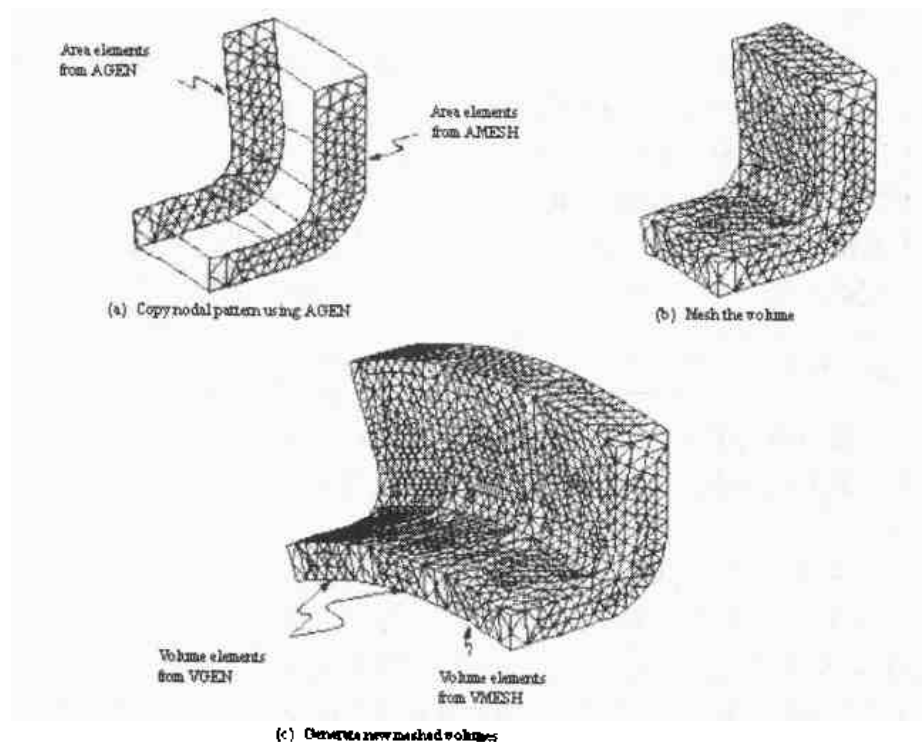


图 4-44 用在接触面上匹配节点模式的方法生成体网格

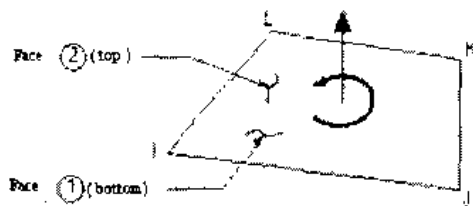


图 4-45 用右手法则定义正法线方向

模型中不一致的法线方向可能会导致出现问题。例如，如果相邻的壳单元有不一致的法向方向，那么用户在对应力和应变结果进行后处理时就会碰到困难。说得更明白一些，若用户模型的某一个表面既包含壳单元的顶面又包含壳单元的底面，那么节点的平均应力和应变就有可能是错误的。但是，PowerGraphics (/GRAPH, POWER) 考虑到法线方向的不匹配并且能生成正确的节点应力图（当 GUI 打开时 PowerGraphics 是缺省的）。

ANSYS 提供了各种不同的工具，用户可用它们来控制面、线和单元的法向：

命令：ENORM, ANORM, ENSYM, LREVERSE, AREVERSE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Elements-Shell Normals

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Areas-Area Normals

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Shells

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Lines

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Areas

下面的部分描述如何用这些工具完成一些操作：

- 对壳单元的法向重新进行定向以便它们能与指定的单元有相一致的定向（ENORM）。
- 对面的法向重新进行定向以便它们能与指定的面有相一致的定向（ANORM）。
- 将已有壳单元的法向反向（ENSYM）。
- 将已有线的法向反向（LREVERSE）。
- 将已有面的法向反向（AREVERSE）。

注：用户不能使用本节上述的工具来改变任何已经有了体载荷或面载荷的单元的法向。建议用户只有在已确信单元的法向方向是可接受的之后再加所有的载荷。

注意 实常量（例如非均匀的壳厚度和锥形梁常量）可能会由于单元反向命令而失效。

如果用户发现模型中的单元有不一致的正法向方向，则可将它们的方向重新定义以与某个指定的单元相一致的定向（单元坐标系，如果是由 I, J, L 节点定义的，则也可用这个操作来重定向）。

用命令的方法来重新定向壳单元的法向，发出命令 ENORM, ENOM:

- 使用 ENUM 变量来确定单元号以便重定向的单元能与此单元有一致的定向方向。

例如，命令 ENORM, 3 能使所有被选定的壳单元改变法向方向以便它们能与 3 号单元有一致的定向方向。查阅 ANSYS 命令参考手册中 ENORM 命令的描述可得到这个命令更详细的用法。

在 GUI 中，用户可通过选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move/

Modify>-Elements-Shell Normals 来重定向壳单元的法向方向。当重定向壳单元法向的拾取对话框出现时，拾取目标单元以便其他重定向单元能与它有一致的法向方向，然后点击 OK。

如果一组面有不一致的法向方向，用户可重定向它们的法向以与某一指定面的法向方向相一致。

用命令的方法来重定向面的法向，发出命令 ANORM, ANUM, NOEFLIP:

- 使用 ANUM 变量来确定面的编号以便使重定向的面能与此面有一致法向方向。
- 使用 NOEFLIP 变量来决定是否想改变已重定向面上已有单元的法向方向以便让它们能与新的面法向方向相一致。如果想让法向方向相一致就指定此变量为 0，否则为 1。

例如，命令 ANORM, 5, 0 能使所有被选的面改变法线方向以便让它们能与编号为 5 的面有一致的法向方向。若想了解详细的用法，参见 ANSYS 命令参考手册中的 ANORM 命令的叙述。

在 GUI 中，用户可通过选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Areas-Area Normals 来重定向面的法向方向。当重定向面的法向的拾取对话框出现时，拾取目标面以便使其他的重定向面能与它有一致的法向方向，点击 OK。然后在“令面法向一致”的对话框中，决定是否让已有面单元的法向与新的法向方向一致，最后在对话框中点击 OK。

用命令的方法来使已有壳单元的法向方向反向，发出命令 ENSYM,,, IEL1, IEL2, IEINC:

- 使用 IEL1, IEL2 和 IEINC 变量，在步长为 IEINC（缺省为 1），将单元号从 IEL1 到 IEL2（缺省为 IEL1）的单元的法向反向。

例如，命令 ENSYM,,, 1, 50 就会使从 1 到 50 的壳单元的法向反向。

在 GUI 中，用户可通过选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Shells 来使已有的壳单元的法向反向。当壳单元的法向反向的拾取对话框出现时，拾取要进行法向反向的壳单元然后点击 OK。

用命令的方法来使线的法向方向反向，发出命令 LREVERSE, LNUM, NOEFLIP:

- 使用 LNUM 来确定要进行线法向反向的线的号码。
- 使用 NOEFLIF 变量来指示是否想改变线上已有单元的法向方向以便让它们能与反向后的新法线方向相一致。如果想使法线方向一致，则指定这个变量为 0，否则为 1。

例如，命令 LREVERSE, 1, 1 将编号为 1 的线的法向反向，但没让线上的任何一个线单元的法向与新的方向相同。若想了解具体用法，参看 ANSYS 命令参考手册中 LREVERSE 命令的叙述。

在 GUI 中，用户可通过选择菜单途径 Main Menu>Preprocessor> -Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Lines 来使线的法向反向。当线法向反向的拾取对话框出现时，拾取要进行法向反向的线，点击 OK。然后在“令线法向一致”的对话框中，决定是否让已存有线单元法向与新的法向方向一致，最后在对话框中点击 OK。

将已有面的法向反向

用命令的方法来使面的法向方向反向时，发出命令 AREVERSE, ANUM, NOEFLIP:

- 使用 ANUM 变量来确定要进行面法向反向的面的号码。
- 使用 NOEFLIP 变量来指示是否想改变面上已有单元的法向方向以便让它们能与反向

后面的新法向方向一致。如果想使法线方向一致，则指定这个变量为 0，否则为 1。

例如，命令 AREVERSE, 7, 0 将编号为 7 的面的法向反向，同时面内已有单元的法向方向将与新法向方向相同。若想了解具体用法，参看 ANSYS 命令参考手册中 AREVERSE 命令的叙述。

在 GUI 中，用户可通过选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>Reverse Normals>of Areas 来使面的法向反向。当面法向反向的拾取对话框出现时，拾取要进行法向反向的面，点击 OK。然后在“面法向反向”的对话框中，决定是否让已有面单元的法向与新的法向方向一致，最后在对话框中点击 OK。

4.8.5 已划分网格模型的修改：清除和删除

因为 ANSYS 程序执行实体建模的交叉参照检查，用户就不能删除已划分网格的实体模型图元，也不能用 EDELE 或 NDELE 命令删除与实体模型图元有联系的单元和节点。为了能修改模型，通常需要用网格清除命令来清除实体模型图元上的网格。这些清除命令可以认为是网格生成命令的反过程。清除完模型后，就可以按需要对实体模型进行修改了。

网格清除命令删除与对应的实体模型图元相联系的节点和单元。当清除一个较高级的图元时，所有较低级的图元都被自动清除掉，除非这些较低级的图元本身已划分了网格。在图元边界上并与相邻图元所共享的节点在执行清除命令时不会被删去。

删除与所选定的关键点相联系的节点和单元。使用下列方法：

命令：KCLEAR

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>Keypoints

删除与所选定的线相联系的节点和线单元。使用下列方法：

命令：LCLEAR

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>Lines

删除与所选定的面相联系的节点和面单元，使用下列方法：

命令：ACLEAR

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>Areas

删除与所选定的体相联系的节点和体单元，使用下列方法：

命令：VCLEAR

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Clear>Volumes

在一个网格清除操作之后，程序会报告每一种图元有多少已经被清除掉了。如果图元的单元或节点已经被清除了，那么这个图元就可以认为被清除完了。

如果被删除的单元/节点正好是在单元/节点表的末尾，那么下一个可用的单元/节点的 ID 号也就会相应地被重新设置（用户也可用 MOPT, CLEAR, OFF 命令来压缩并重新设置 ID 号）。

如前所述，由命令 TYPE, REAL, MAT 和 ESYS 赋给实体模型的属性随着网格划分的命令（AMESH, VMESH 等）而成为单元属性，但网格清除命令会清除掉单元属性。在列表命令（ALIST, VLIST 等）输出结果中，这些可清除的属性用负的属性号来指出。网格清除命令不影响用与属性相联系的命令（AATT, VATT 等）所分配的属性。在任何情况下，发出新的与属性相联系的命令都会屏蔽先前同实体模型相联系的单元属性。

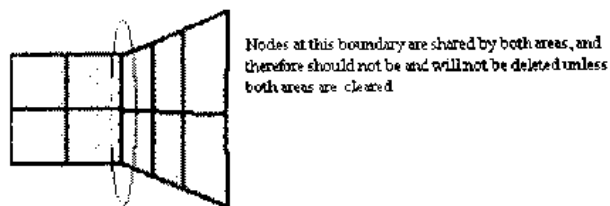


图 4-46 两个面的边界上的节点

有几种原因会使用户在划分网格之后想修改单元属性：在对属性赋值时发生了一个错误，需要改变设计，或要将模型从一个分析项目转换到另一个分析项目（例如在一系列的热应力分析中）。下面是可用的修改单元属性的技术：

用网格清除命令清除网格；用与属性相联系的命令和诸如 TYPE, REAL 等的命令设置新的属性；然后使用网格划分命令划分网格。因为重新划分网格有时是很费时间的，所以如果网格本身是可接受的。就应该避免使用这种方法。注意当网格清除命令被执行时会产生什么结果：由网格划分命令（在由 ALIST, VLIST 等命令产生的列表中用负的属性号标识）所设置的实体模型属性将会被删掉；由与属性相联系的命令（AATT, VATT 等）所设置的实体模型属性不会被改变。因而，如果用户最初是用属性相联系的命令对实体模型赋的值，那么由于与属性相联系的命令的级别比 TYPE, REAL, MAT 和 ESYS 命令高，因此用户就不能用 TYPE, REAL, MAT 和 ESYS 命令对实体模型的属性进行重新赋值（这时用户需重新发出一个与属性相联系的命令）。在重新划分网格时，同实体模型图元相联系的属性会被赋值到由这些图元所产生的单元上。

◆ 直接修改单元

单元属性也可以不必用费时的重新划分网格的方法来改变；用户可先选定那些要进行修改的单元；重新设置属性（在本程序中使用 TYPE, REAL, MAT 和 ESYS 命令）；运行 EMODIF 命令或菜单途径 Main Menu> Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Elements-Modify Attrib。本程序直接修改单元属性，而不影响相应的实体模型属性。本程序尽管很方便但也很危险，因为有限元模型中的单元属性将不再与实体模型中单元的属性相匹配，而且也有可能在不得到任何警告的情况下，将单元的属性改成一个不适当的值。由于这些原因，如果用户决定用直接修改单元的方法来试着改变单元的属性，那么就必须要小心地进行这一过程。

另一种直接修改指定单元的材料号的方法是使用 MPCHG 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Change Mat Num(MPCHG 不象其他的修改单元命令那样必须在 PREP7 内才有效，它在 PREP7 和 SOLUTION 内都有效。因而，这个命令可以被用来在两次求解之间改变单元特性)。

◆ 修改属性表

另一种可能的方法是在属性表中改变图元属性，但必须在网格划分后和进入 SOLUTION 前。如果 REAL 设置或 MAT 设置中包含有不能用的项目（例如，为梁单元设置的 REAL 特性被赋值给一个杆单元），程序就会发出一个警告。本程序不需要重新划分网格。

◆ 关于增加一删除中间节点的注意事项

对于任何这样的程序，如果用户要改变单元类型，用有中间节点的单元代替无中间

节点的单元，还需要使用下列方法来增加所要求的额外的中间节点：

命令：EMID

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Elements-Add Mid Nodes

EMID 必须在运行 MODMSH，DETACH 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>CheckingCtrls>Model Checking 之前运行。而且，为了删除中间节点，用户必须首先用 EMID，-1 命令把它们从中间节点单元中分离出来。

用户可用下面描述的图元删除命令来删除实体模型图元。如果较低级的图元依附于某个较高级的图元，那么它们就不能被单独地删除。因而，如果用户已经用几何体素命令创建了一个块，那么就不能选择删除同这个块相联系的关键点，除非首先以逐层递减的顺序先删除那个关键点所依附的所有较高级的图元（线、面和体）。

删除未进行网格划分的面，使用下列方法：

命令：ADELE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Area and Below

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Areas Only

删除未进行网格划分的关键点，使用下列方法：

命令：KDELE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Keypoints

删除未进行网格划分的线，使用下列方法：

命令：LDELE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Line and Below

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Lines Only

删除未进行网格划分的体，使用下列方法：

命令：VDELE

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Volume and Below

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Delete>Volumes Only

相反地，在 LDELE，ADELE 或 VDELE 命令中通过激活“扫掠”的选项（也就是设置 KSWP=1），用户就可以指示程序自动地删除所有相联系的较低级的图元（但是，如果有较低级的图元，同时还依附在另一个较高级的图元之上，那么它们就不能被删除）。例如，如果用户已决定要删除一个未进行网格划分的球体，那么就可以只发出一个命令 VDELE，同时，设置 KSWP=1，则就会删除体和体上所有的面、线和关键点。

用户可通过使用下列方法来改变模型的关键点的位置，从而改变实体模型的几何结构：

命令：KMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Keypoints-Set of KPs

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Move / Modify>-Keypoints-Single KP

任何依附在被修改的关键点上的已划分完网格的区域都将自动地清除节点和单元。然后所有依附在被修改的关键点上的线、面、体都将自动地用当前激活的坐标系来重新定义。

未划分网格的实体模型图元也可以由重新发出最初定义它们的命令来重新定义。例如，考虑下面的命令序列，其中第二个 K 命令被用来修改关键点：

```

CSYS,0
K,1,5.0,6.0,7.0      ! Create KP 1 at X=5.0, Y=6.0, Z=7.0
CSYS,1
K,1,5.0,6.0,7.0      ! Redefine KP 1 at R=5.0, =6.0, z=7.0
    
```

关键点 1 如果不属于任何较高级的图元那么它就只能用这种方法来重定义。线、面和体也可以用类似的方法重定义，条件也是它们不应属于任何较高级的图元。

用户可以使用下面所描述的操作来修改未网格划分的线。尽管这些面属于体，这些操作也将更新所属的未网格划分的面。

将单个的线分成两段或更多段的线，使用下列方法：

命令：LDIV

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Divide>

Line into 2 Ln's

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Divide>

Line into N Ln's

Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Divide>

Lines w/ Options

将相邻的线合并成一条线，使用下列方法：

命令：LCOMB

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Operate>-Booleans-Add>Lines

在两个相交线之间生成倒角线，使用下列方法：

命令：LFILLT

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Create>-Lines-Line Fillet

4.8.6 理解实体模型的相互对照检查

前几节已间接地提到了当用户修改已划分了网格的实体模型时会有几个条件的限制。这些限制的出现是由于 ANSYS 程序插入了相互对照检查以防止实体模型和有限元模型数据的掺混。它们可总结如下：

- 划分了网格的关键点、线、面或体不能被删除或移动。
- 同关键点、线、面或体相联系的节点和单元不能被移动。它们只能用网格清除命令删除。
- 包含在体内的面不能被删除或改变。
- 包含在面内的线不能被删除或改变（除非是前面所讨论的命令：LDIV，LCOMB，或 LFILLT）。
- 包含在线内的关键点不能被删除。它们只能用命令 KMODIF 移动，这个命令用来修改和清除（若已划分网格）关键点所依附的线、面和体。

这些规则背后的基本原因可以用下面的简图形象化地表示出来。图示中一个已完成的模型可以认为是一堆叠放在一起的方块，最底部的方块代表关键点，上面一个代表线，等等。如果要改变一个较低级的图元（例如一条线），就会打乱堆在它上面的图元（当然，这个图例有些过于简化了高级图元与低级图元之间的依赖关系）。

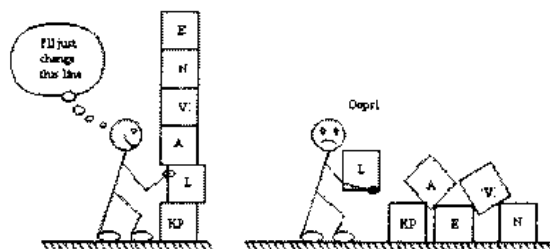


图 4-47 为什么实体模型要进行相互对照检查

这些规则并不象它们显示的限制得那样死。而且，对于很少的几个例子，当这些规则完全地限制用户执行一个所需的操作时，用户可以让它们无效，就象下面几段将要讨论的一样。但是要知道当使这些规则无效时，用户也就失去了它们所提供的保护，因此也就增大了对模型数据库产生不可挽回的损坏的危险。

实体模型的相互对照检查通常只提供帮助用户避免损坏模型数据库的服务。但是，当用户有很好的理由尝试一下本应禁止的操作时，程序还是提供了几个机会，MODMSH 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>CheckingCtrls>Model Checking）就是为这个目的而存在的，MODMSH 有三个选项：DETACH，NOCHECK 和 CHECK。

MODMSH，DETACH 命令将有限元模型从实体模型中分离出来，这样就允许使用节点和单元命令来修改有限元模型。这种分离保持数据库“干净”，在这个数据库里将不会再有数据库冲突。例如，考虑一个关键点和与它关联的节点。在 MODMSH，DETACH 命令之后，程序将不再认为这两个图元之间有相关性，因此现在就可以将节点移一个新的位置，而在数据库中不会产生冲突。一旦已经分离完模型，就再不能执行诸如根据实体模型选择或定义有限元模型，清除网格，或将实体模型的边界条件转换到有限元模型上去等操作了。

MODMSH，NOCHECK 是一个非常危险的命令。它使所有的相互对照检查失效，并且很容易使数据库受到很大的损害，以至于几乎任何的实体建模操作都将不可用。它的用处是允许用户使用诸如 EMODIF，NMODIF，EDELE，NDELE 等命令来修改由网格划分命令所生成的单元和节点。激活这个选项后，无论用户是开始求解还是发出 PFACT 或 SOLVE 等命令都会引起程序发出相互对照检查被跳过的警告。只有当用户非常确信他所做的一切的时候才可以使用这个选项，由于用户使用 NOCHECK 选项而可能对数据库产生的严重的破坏，将使 ANSYS 技术支持人员几乎不可能帮助用户从用户自己造成的麻烦中恢复过来。

MODMSH，CHECK 命令在相互对照检查被禁止后重新恢复它们。但是，由于在检查被关掉时，数据库完全有可能已被损坏了，因而无论用户是在开始计算还是在发出 PFACT 或 SOLVE 命令时，程序仍然还会发出警告。消除这个警告信息的唯一方法是用一个干净的模型重新开始。

4.9 网格直接生成

4.9.1 什么是直接生成

直接生成是一种直接定义节点和单元的方法，尽管 ANSYS 程序提供了许多方便的命令

用于节点和单元的拷贝、映像、缩放等操作，但用直接生成法构造模型是实体模型建模法构造同样模型的十倍数据量。

由直接生成法生成的模型严格按节点和单元的顺序定义组集而成，即使节点、单元生成操作可交替进行，单元必须在其节点全部生成后才能定义。

4.9.2 节点

本节叙述多种直接生成节点的方法，主题包括：

- 定义节点
- 从已有节点生成另外的节点
- 查看和删除节点
- 移动节点
- 旋转节点的坐标系
- 读、写包含节点数据的文本文件

利用下列方法定义节点：

在激活的坐标里定义单个节点，用下列方法：

命令：N

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>In Active CS

Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>On Working Plane

如果利用 ANSYS 交互功能，可定义一个工作平面的捕捉增量在图上通过拾取 (N, P) 生成节点（关于工作平面可参见第4章）。

在已有关键处定义节点，用下列方法：

命令：NKPT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>On Keypoint

移动一个节点到坐标系表面的一个交点，用下列方法：

命令：MOVE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>To Intersect

4.9.3 从已有节点生成另外的节点

一旦生成了初始模式的节点，可用下列方法生成另外的节点：

在已有两节点间的连线上生成节点，用下列方法：

命令：FILL

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Nodes>Fill between Nds

从一种模式的节点生成另外的节点，用下列方法：

命令：NGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Copy>-Nodes->Copy

从一种模式的节点生成缩放的节点集，用下列方法：

命令：NSCALE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Copy>Scale & Copy

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Scale & Move

Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Scale & Copy

Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Scale & Move

从二节点的二次线上生成节点，用下列方法：

命令：QUAD

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Nodes>Quadratic Fill

生成一映像节点集，用下列方法：

命令：NSYM

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Reflect>Nodes

将一种模式的节点转换到另一个坐标系，用下列方法：

命令：TRANSFER

GUI: Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Transfer Coord>Nodes

在弧线的曲率中心定义一个节点，用下列方法：

命令：CENTER

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>At Curvature Ctr

如果在弧的曲率中心定义了一个局部柱坐标系（CS），可用 FILL 命令 Main Menu>Preprocessor> Create>Nodes>Fill between Nds 在弧线上生成另外的节点。如果给定了曲率半径，在节点 NODE1、NODE2、NODE3 确定的平面上，沿 NODE1—NODE2 的中垂线方向中可自动计算其曲线中心。

利用下列方法查看和删除节点：

对节点列表，用下列方法：

命令：NLIST

GUI: Utility Menu>List>Nodes

Utility Menu>List>Picked Entities>Nodes

显示节点用下列方法：

命令：NPLOT

GUI: Utility Menu>Plot>Nodes

如已用/PNUM 命令（菜单途径 Utility Menu>Plot>Elements）激活了节点号显示，用 EPLLOT 命令（菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering）画单元时将标出节点号。

用下列方法删除节点：

命令：NDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Delete>Nodes

注意 删除节点也将删除包括节点在内的任何边界条件（如位移、力等）及任何耦合或约束方程。

4.9.4 移动节点

用下列方法移动节点：

- 用 N 命令（或其他任何生成节点的命令）通过屏蔽重新定义一节点。
- 修改一个（或所有）已定义节点的坐标（即将一个节点移动到一个新位置），用下列方法：

命令：NMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>By Angles

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>By Angles

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Set of Nodes

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Single Node

计算两节点间的距离：

命令：NDIST

GUI：Main Menu>Preprocessor>-Modeling-Check Geom>ND distances

用下列方法旋转节点的坐标系（缺省地与总体笛卡尔坐标系平行）：

将节点坐标系旋转成激活的坐标系，用下列方法：

命令：NROTAT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS->

To Active CS

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>-Rotate Node CS->

To Active CS

通过方向余弦旋转节点坐标系，用下列方法：

命令：NANG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>By Vectors

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>By Vectors

用 N 或 NMODIF 命令（本章前面叙述的）按一定角度旋转节点坐标系。

可以读入包含节点数据的文本文件。此功能对输入从另一个网格生成器、一个 CAD/CAM 程序或另一个 ANSYS 对话生成的 ASCII 节点数据有用处。还可以将这样一个 ASCII 文件写输出到另一程序（必须能读这个 ANSYS 文件）或另一个 ANSYS 对话中去。对于标准的 ANSYS 模型生成对话不需要读写节点数据。

指定从一节点文件读入节点数据用下列方法：

命令：NRRANG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Read Node File

从一文件读入节点，用下列方法：

命令：NREAD

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Read Node File

将节点写到一文件，用下列命令：

命令：NWRITE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Write Node File

4.9.5 单元

本节叙述多种直接生成单元的方法。主题包括：

- 定义单元的前提条件
- 组集单元表
- 指向单元表的项
- 定义单元
- 查看和删除单元
- 从已有单元生成另外的单元
- 利用特殊方法生成单元
- 读写包含单元数据的文本文件
- 通过改变节点修改单元
- 通过改变单元属性修改单元

定义一个单元之前需要做两件事：

1. 必须已定义该单元所需的最少节点。
2. 必须已指定合适的单元属性。

用下列方法和不同的坐标系命令组集单元属性表。

从单元库中定义一种单元类型，用下列方法：

命令：ET

GUI：Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

定义单元实常数用下列方法：

命令：R

GUI：Main Menu>Preprocessor>Real Constants

定义线性材料属性用下列方法：

命令：MP, MPDATA, MPTMP, etc.

GUI：Main Menu>Preprocessor>Material Props>option

激活一个数据表（对非线性材料属性）用下列方法：

命令：TB, TBDATA, etc.

GUI：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>option

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Mooney-Rivlin>option

一旦生成了单元属性表，可以指向单元表中的不同项。这些指针在生成单元时有效，ANSYS 程序把表中的属性赋给单元。

设置单元类型指针（TYPE）、单元实常数设置属性指针（REAL）、单元材料属性指针（MAT）或单元坐标系属性指针（ESYS），可用下列方法（这四个命令的 GUI 途径相同）：

命令：TYPE、REAL、MAI 或 ESYS

GUI：Main Menu > Preprocessor > -Modeling-Operate>Extrude/Sweep> Default Attribs

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Elem Attributes

通过下列方法查看单元表的内容：

对当前已定义单元类型的列表用下列方法：

命令: ETLIST

GUI: Utility Menu>List>Properties>Element Types

用下列方法列表实常数的设置:

命令: RLIST

GUI: Utility Menu>List>Properties>All Real Constants

Utility Menu>List>Properties>Specified Real Constants

用下列方法列表线性材料属性:

命令: MPLIST

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>List

Utility Menu>List>Properties>All Materials

Utility Menu>List>Properties>All Matls, All Temps

Utility Menu>List>Properties>All Matls, Specified Temp

Utility Menu>List>Properties>Specified Matl, All Temps

用下列方法列表数据表:

命令: TBLIST

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>List

Utility Menu>List>Properties>Data Tables

用下列方法列表坐标系:

命令: CSLIST

GUI: Utility Menu>List>Other>Local Coord Sys

一旦定义了必要的节点并设置了单元属性, 就可以定义单元了。利用下列方法, 可通过确定其节点定义单元, 必须输入的节点数和节点输入顺序由单元类型决定。例如, 二维梁单元 BEAM3 要求两个节点 (I, J), 三维块单元 SOLID45 要求 8 个节点 (第一个面 I、J、K、L 节点, 对面 M、N、O、P 节点)。节点输入顺序决定了单元法向方向。详见第 8 章“记录单元面和方向”。用下列方法定义单元:

命令: E

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>-Auto Numbered-Thru Nodes

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>-User Numbered-Thru Nodes

如果交互进行工作, 可用上面 GUI 途径在图上拾取 (节点) 生成单元。

如果用命令输入, 只有 8 节点可用 E 命令输入。对于需要超过 8 节点的单元类型, 用 EMORE 命令定义另外的节点。例如, 三维 20 节点块单元 SOLID95, 除 E 命令外还需要两个 EMORE 命令 (如果在图上拾取节点生成单元 EMORE 命令是不需要的)。

用下列方法操作单元:

用下列方法对单元列表:

命令: ELIST

GUI: Utility Menu>List>Elements

Utility Menu>List>Picked Entities>Elements

用下列方法显示单元

命令: EPLOT

GUI: Utility Menu>Plot>Elements

如果用/PNUM 命令（菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Numbering）打开单元号显示，在 EPLOT 命令显示单元时将显示单元号。多数情况下，程序会自动分配单元号，使用下一个未用的号码（第一个 E 命令定义单元号 1，第二个命令定义单元号 2，依次类推）。

用下列方法删除单元：

命令：EDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Delete>Elements

删除单元会在单元号序列中产生空白。尽管形成的空白编号是在单元编号序列的末尾，自动编号程序将不使用这些空白号码（如果定义了 10 个单元，然后将其全部删去，下一个 E 命令会定义单元号 11，编号 1~10 将保持空白）。可以通过编号控制命令（见第 11 章）或通过 EN 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Create>Elements）控制单元编号，将使用户能直接定义单元编号。

一旦定义了基本的单元，就可以用下列方法生成另外的单元：

从已有模式的单元生成单元，用下列方法：

命令：EGEN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Copy>Auto Numbered

从已有模式的单元通过对称映像生成单元，用下列方法：

命令：ESYM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>Auto Numbered

从已有模式单元（手工控制编号）生成单元，用下列方法：

命令：ENGEN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Copy>User Numbered

用对称映像（手工控制编号）生成单元，用下列方法：

命令：ENSYM

GUI: Main Menu>Preprocessor>Reflect>User Numbered

这些命令并不生成节点，必须事先生成必要的节点。而且，生成单元属性（MAT、TYPE、REAL 和 ESYS）依赖于原来模式的单元属性而不依赖于当前指定的设置。

有些特殊的单元可用下列特殊方法生成：

在已生成单元外表面上生成表面单元用下列方法：

命令：ESURF

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surface Effect>
On Nodes On Free Surf

在某些热分析中，可用 ESURF，XNODE 命令生成带有任选节点的 SURF19、SURF22、SRUF151 或 SURF152 单元。

要在已有面单元的边上生成重叠的表面单元并分配额外的节点作为最近的流体单元节点，用下列方法：

命令：LFSURF

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surface Effect>
Line to Fluid

在某些热分析中，用 LFSURF 命令生成带有任选节点的 SURF151 单元。

要在已有实体单元的表面上生成重叠的表面单元并分配额外的节点作为最近的流体单元节点，用下列方法：

命令：AFSURF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Surface Effect>
Area to Fluid

在某些热分析中，可用 AFSURF 命令生成带有可选节点的 SURF152 单元。

按下列方法用二维线单元（诸如间隙单元）连接重合的节点：

命令：EINTF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>At Coincid Nd

下列方法生成通用接触单元：

命令：GCGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>At ContactSrf

可以读或写一个包含单元数据的文本文件。这些命令用于和其他程序或另一个 ANSYS 程序交换数据。在标准的 ANSYS 模型生成中，不需要这些命令。

用下列方法指定从一单元文件中读入单元：

命令：ERRANG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Read Elem File

用下列方法从一文件中读单元：

命令：ERead

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Read Elem File

用下列方法将单元数据写到一文件：

命令：EWRITE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Write Elem File

如果生成了重复单元（即有相同节点和相同空间位置的单元）。则 ANSYS 中诸如图形、加面载荷、选择逻辑等操作可能不会象预期那样，最好避免使用重复单元，若不能避免的话，无论何时用到重复单元必须格外小心。

用不同节点重新定义单元，可用下列方法，注意将单元属性指针置成正确的值（执行这些命令将当前的单元类型、实常数、材料特性及某些类型单元的单元坐标系赋给修改后的单元）。

用下列方法修改已定义的单元：

命令：EMODIF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Modify Nodes

用下列方法通过定义编号和连接的节点重新定义单元：

命令：EN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Creatc>Elements>Thru Nodes

修改已生成单元属性有下述几种方法：

在前面处理 PREP7 或求解器 SOLUTION 中用下列方法修改指定单元的材料号：

命令：MPCHG

GUI：Main Menu>Preprocessor>Loads>Other>Change Mat Props>

Change Mat Num

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Change Mat Num

Main Menu>Solution>Other>Change Mat Props>Change Mat Num

在前处理器中 EMODIF 和 *REPEAT 命令提供了一种修改单元属性的通用方法。不能直接在 GUI 中得到 *REPEAT 命令。EMODIF 和 *REPEAT 命令的使用如下：

```
E,1,2           ! Element 1
REAL,3         ! REAL set pointer = 3
E,2,3         ! Element 2 (REAL=3)
EGEN,40,1,2    ! Generate 40 elements from el. 2 (all with REAL=3)
EMODIF,5,REAL,4 ! Redefine element 5 with REAL ser 4
*REPEAT,18,2   ! Redefine els. 7-39 in steps of 2 (with REAL=4)
```

参见 ANSYS 命令参考手册中 EGEN、EMDDIF 和 *PEPEAT 命令的叙述。

另外，在单元生成之后进入求解器 SOLUTION 之前，可改变其单元属性表中的项。如果实常数组或材料特性组中含有未使用的项（如把梁单元的实常数组赋给杆单元），则在屏幕上会出现警告信息。

修改单元属性的另一种方法（用 EDELE 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Delete>Elements）是删除单元，重新定义属性指针（再用 EN 命令或菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Thru Nodes）重新生成单元。

若需改变单元类型，用带有边中节点的单元代替无边中节点的单元时，可用 EMID 命令补加边中节点。而且为删除边中节点，必须首先从边中节点单元用 EMID, -1 命令除去边中节点：

命令：EMID

GUI：Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Add Mid Nodes

Main Menu>Preprocessor>Move / Modify>Remove Mid Nd

当用直接生成方法定义边中节点单元时（即 E、EN 及类似的命令），边中节点按下列方案生成和排列：

- 有些高阶单元允许去除边中节点，对这类单元，当定义高阶单元时边中节点用了 0 值（或空），相应的边中节点将从单元中去掉。结果单元的形函数中有些或全部二次项被忽略（取决于去掉边中节点号），因此使单元的边仍为直的。极端情况去掉单元的所有边中节点，单元会使用线性形函数，产生的结果与相似的低阶（无边中节点）单元类型的相近。
- 当定义了高阶单元，如果所用的边中节点号还未定义（N、NGEN、FIL1、NSYM 及类似命令），然后该节点会被自动地定义并给定几何位置，这就是计算的各自角点的中点（在笛卡尔坐标系下线性插值）。这种节点的旋转角也是由角节点的旋转角自动地进行线性插值而得到。这样可以方便地生成边中节点单元而不必明确地定义边中节点的几何位置在角点的中间。

注意 这种应用只适用于模型的直接生成方法，ANSYS 网格划分控制提供了对已划分网格模型控制边中节点的方法。

4.10 管路模型

4.10.1 管路命令简介

ANSYS/Multiphysics、ANSYS/mechanical、ANSYS/Structural 和 ANSYS/LinearPlus 产品提供了一组特殊的命令，使用户按规范的管路输入数据建立管路系统模型，而不必按照标准的 ANSYS 直接生成方法进行建模操作。当输入管路命令，ANSYS 程序内部将管路数据转换成直接生成模型的数据，并将转换的信息存到数据库里。一旦保存了这种信息，可用标准的直接生成命令，对其进行列表、显示、修改或重新定义等。

4.10.2 管路命令能做的工作

管路组件的一些特征：

- 利用直管 (PIPE16) 和弯管 (PIPE18) 单元生成管路网络的线模型。节点和单元的几何形状是以延伸长度的增量和弯曲半径而不是按绝对坐标来定义的。
- 自动计算弯曲的相切点。
- 建立标准的管路名称（如名义直径和规范）与几何值的关系。
- 将管路规格分配给单元实常数。
- 在生成适于每种单元类型的管路单元前，按给定管路组件的压力和温度计算并分配挠度和应力集中系数。如果管的压力或温度随后进行了修正，挠度系数不会自动地改变。
- 从压力与高度的关系确定拉压载荷。

4.10.3 用管路命令建立管路系统模型

用管路命令建立管路系统模型的三个主要步骤：

1. 指定工作名称和标题。
2. 建立基本的管路数据。
3. 定义管路系统的几何形状。

管路系统分析的进一步工作包括施加外载荷 (D, F) 等，获得求解结果及查看结果。

指定工作名称和标题

开始时执行这个步骤：

- 首先，指定随后分析生成的所有文件所用的工作名 (/FILENAME) (菜单途径 Utility Menu>File>Change Jobname)。
- 然后，写一个分析文件 (/TITLE) (菜单途径 Utility Menu>File>Change Title)。
- 最后，用 /UNITS 命令，为自己写一个想使用的单位制备备忘录 (从 GUI 中不能直接得到 /UNITS 命令)。记住 /UNITS 仅作为后来查看分析的记录；它并不把数据由一种单位改成另一种单位。

建立基本的管路数据

此步骤中应做的工作有：

用下列方法进入前处理 PREP7：

命令：/PREP7

GUI：Main Menu>Preprocessor

用下列方法为模型使用的所有材料定义材料属性：

命令：MP, MPTMP, etc.

GUI：Main Menu>Preprocessor>Material Props>material option

用下列方法选择一种单位制（如果不一致时）：

命令：PUNIT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Specifications

PUNIT 决定程序如何翻译由本章备忘录中叙述的 PDRAG、BRANCH、RUN、BEND、MITER、REDUCE、VALVE、BELLOW、FLANGE、PSPRNG、PGAP、PSPEC、PINSUL 和 PCORRO 命令输入的数据（注意 PUNIT 与/UNITS 的不同：PUNIT 命令影响程序的工作，而/UNITS 则不影响。）

定义管路规格，当用 RUN 命令生成单元时这些规则运用到单元上（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Pipe Run）。

——用下列方法定义管路材料和尺寸：

命令：PSPEC

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Specifications

注意 本节讨论的菜单途径与管路规格命令相同（PSPEC、PFLUID、PINSUL 和 PCORRO 等）

——用 PFLUID 命令相应的 GUI 途径定义管路中包含的流体密度。

——用 PINSUL 命令或相应的 GUI 途径定义管路外部绝热系数。

——用 PCORRO 命令或相应的 GUI 途径定义管路容许的外部侵蚀厚度。

用下列方法选择管路分析标准：

命令：POPT

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Specifications

在生成适于每种单元类型的管路单元前，程序按给定管路组件的压力和温度分布计算并分配弯管单元的挠度和应力集中系数。如果管路压力或温度随后进行了修正，挠度和应力集中系数不会随之改变。

选择管路载荷

——用下列方法定义管路的管壁温度：

命令：PTEMP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Loads

注意 本节所讨论的管路加载命令（PTEMP, PDRES 和 PDRAG）与菜单途径相同。

- 用 PPRES 命令或相应的 GUI 途径定义管流的内压。
- 用 PDRAG 命令或相应的 GUI 途径定义管流的外部流体拉载荷。

定义管路系统的几何尺寸

定义管路模型的基本框架布置：

首先用下列方法定义管路系统的起点：

命令：BRANCH

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>At Node

Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>At XYZ Loc

然后，用一系列的 RUN 命令（或 GUI）定义管路延伸的增量（管路单元在激活坐标下沿直线生成）。每一个 RUN 命令用 PUNIT 命令指定长度格式的尺寸生成一个节点和一个 PIPE16 单元（连同其实常数、材料属性和载荷）。

命令：RUN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Pipe Run

由两个或更多的已有管路单元共享的节点处插入弯管和其他组元（T 形管、阀门、节流器、法兰盘、波纹管 and 弹簧约束）。考虑到插入的组元程序会自动更新模型的外形尺寸。插入的管路组件从相邻的直管取得特性和载荷。

用下列方法定义弯管：

命令：BEND

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Elbow

用下列方法定义斜弯管：

命令：MITER

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Miter

用下列方法定义 T 形管：

命令：TEE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Pipe Tee

用下列方法定义管路阀门：

命令：VALVE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Valve

用下列方法定义管路的节流器：

命令：REDUCE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Reducer

用下列方法定义管路的法兰盘：

命令：FLANGE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Flange

用下列方法定义管路的波纹管：

命令：BELLOW

GUI：Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Bellows

用下列方法定义管流的弹簧约束：

命令: PSPRNG

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Spring Support

用下列方法定义管流中的弹簧间隙约束:

命令: PGAP

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Piping Models>Spring-Gap Supp

另一个 BRANCH 命令定义已定义的管路与另一段管路分叉的交叉点。后面的 RUN 命令, 从上一交叉点按递增方式定义另一段直管单元。BRANCH 和 RUN 命令及其 GUI 途径在本节之前有所叙述。

一旦完成了管路数据的输入, 就可用通常的列表和显示命令 (NLIST, NPLOT, ELIST, EPLOT, SFELIST, SFELTST, BFELIST 等) 查看保存在数据库内的信息。如果必要可用标准的修改模型和载荷的程序来修改数据。

4.10.4 输入示例

考查以下管路数据输入的示例:

```
! Sample piping data input
!
/FILNAM,SAMPLE
/TITLE,SAMPLE PIPING INPUT
/UNITS,BIN          ! A reminder that consistent units are British inches
!
/PREP7
! Define material properties for pipe elements
MP,EX,1,30e6
MP,ALPX,1,8e-6
MP,DENS,1,.283
PUNIT,1            ! Units will be read as ft+in+fraction and converted to
                   ! decimal inches
PSPEC,1,8,STD      ! 8-inch standard pipe
POPT,B31.1         ! Piping analysis standard: ANSI B31.1
PTEMP,200          ! Temperature = 200 deg
PFRES,1000         ! Internal pressure = 1000 psi
PDRAG,,,-.2       ! Drag = 0.2 psi in -Z direction at any height (Y)
BRANCH,1,0+12,0+12 ! Start first pipe run at (12",12",0")
RUN,,7+4           ! Run 7'-4" in +Y direction
RUN,9+5+1/2       ! Run 9'-5 1/2" in +X direction
RUN,,,-8+4        ! Run 8'-4" in -Z direction
RUN,,8+4          ! Run 8'-4" in +Y direction
/PNUM,NODE,1
/VIEW,1,1,2,3
EPLOT              ! Identify node number at which 2nd run starts
BRANCH,1,4        ! Start second pipe run at node 4
```



```

RUN,6+2+1/2      ! Run 6'-2 1/2" in +X direction
TEE,4,WT         ! Insert a tee at node 4
/PNUM,DEFA
/PNUM,ELEM,1
EPLLOT          ! Identify element numbers for bend and miter inserts
BEND,1,2,SR     ! Insert a "short-radius" bend between elements 1 and 2
MITER,2,3,LR,2  ! Insert a two-piece miter between elements 2 and 3
/PNUM,DEFA
/PNUM,NODE,1
! Zoom in on miter bend to identify nodes for spring hangers
/ZOOM, 1, 242.93 , 206.62 , -39.059 , 26.866
PSPRNG,14,TRAN,1e4,,0+12 ! Insert Y-direction spring at node 14
PSPRNG,16,TRAN,1e4,,0+12 ! Insert Y-direction spring at node 16
! List and display interpreted input data
/AUTO
/PNUM,DEFA
EPLLOT
NLIST
ELIST
SFELIST
BFELIST
    
```

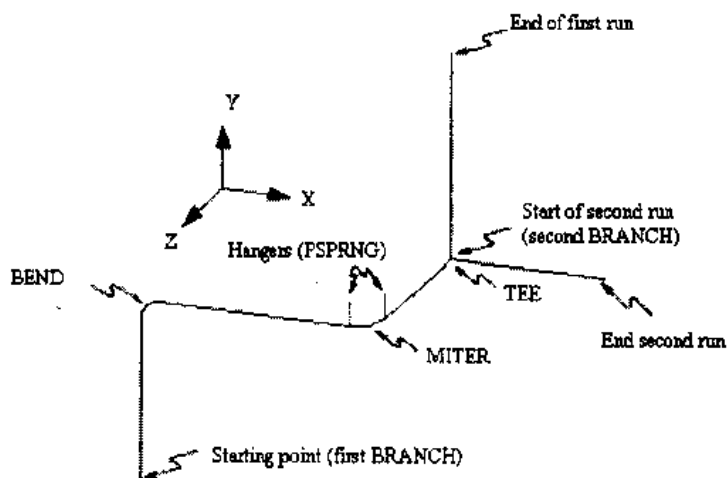


图 4-48 管路输入的 EPLLOT 示例

4.11 编号控制和单元重排序

4.11.1 编号控制

本章中叙述的命令和 GUI 途径用于关键点、线、面、体、单元、节点、单元类型、实常

数组、材料、耦合自由度集、约束方程和坐标系的编号控制。这种编号控制对于将模型的各个独立部分组合起来是相当有用和必要的。

注意 布尔运行输出图元的编号并非可以完全预估。在不同的计算机系统中，执行同样的布尔运算，其生成的编号有时也会不一样。在一种计算机里交互生成的输入流文件移到另一种计算机里去重新运行时，应该使用选择逻辑来标识所需的图元，避免在命令流里使用图元编号。

合并重复项

如果二个独立的图元，有相同的位置，可用下列方法将这两个图元合并成一个图元：

命令：NUMMRG

GUI：Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Merge Items

注意 NUMMRG 命令或其相应的 GUI 途径的使用并不引起模型外形尺寸的改变，只影响其拓扑结构。

例如，假定有两个独立但重合的节点，如果用命令 NUMMRG, NODE（或相应的 GUI 途径）合并节点，编号大的节点将被删除，并由编号小的重复节点代替，因此两重合节点将替代为一个节点。

如果连接两个已经划分好网格的区域，需要执行三次单独的合并操作。例如，用命令输入方法，首先执行命令（NUMMRG, NODE）合并节点，然后执行命令（NUMMRG, ELEM）合并单元，最后执行命令（NUMMRG, KP）合并所有的实体模型图元（或仅用 NUMMRG, ALL 按适当顺序合并所有选定的重合项。NUMMRG, ALL 还会合并诸如 MAT、CE 等非几何项）。

许多实体建模操作生成重合关键点、线和面，可用 NUMMRG, KP（或相应的 GUI 途径）合并这种重合项。关键点的位置是合并的基础。一旦合并了重复关键点，任何与关键点相连的其他高级实体图元（线、面和体）将自动进行合并。重复的定义将随所用公差而改变。缺省地，关键点之间的距离在下列准则内，将自动进行线上关键点的合并：

1. 相距 $1E-4$ 单位（见图 4-49）。
2. 为关键点间最长距离的 $1E-5$ 倍。

准则 1 是用 NUMMRG 描述条件公差域（TOLER）。TOLER 是条件公差。如果一关键点在另一关键点的条件公差域内，则这两关键点将被合并。如果当移动编号较高的关键点时，距离如果超过实体模型内部相对公差（准则 2），关键点将不被合并。线、面和体将以同样方式合并。准则 2 描述了缺省的实体模型内部相对公差，此公差设计用来防止由合并操作删除模型中的短线。只有两个准则都得到满足才能合并关键点。

内部相对公差（准则 2）可由 NUMMRG 命令定义的实体模型总体公差（GTOLER）选项所取代。GTOLER 是一个总体、绝对的公差，而不是相对公差。如果使用了 GTOLER，不再考虑与关键点相连的线的尺寸，可以相当容易地通过使用一较大的 GTOLER 值而使模型改变。在想合并时尤其是用 GTOLER 选项时应当保存数据库。

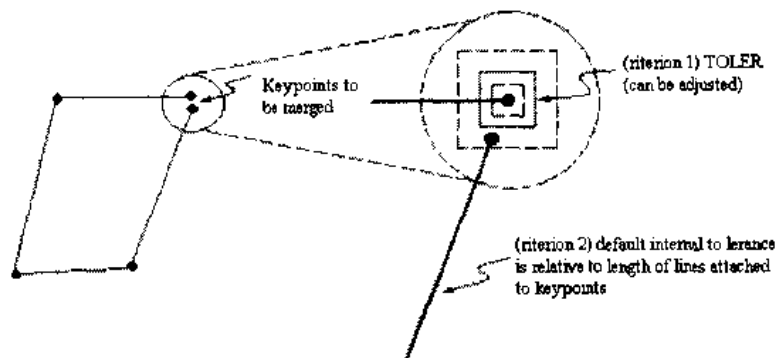


图 4-49 缺省的合并公差

下列为对应图 4-50 的例子，说明在合并图元中 NUMMRG 命令的使用：

```
PCIRC,...    ! Create a partial circle
RECTNG,...  ! Create a rectangle
NUMMRG,KP   ! Default merge tolerances used
```

对有重复关键点的模型，使用 NUMMRG 操作可能比 AGLUE（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Operate>Glue>Areas）命令更经济（即更快）。

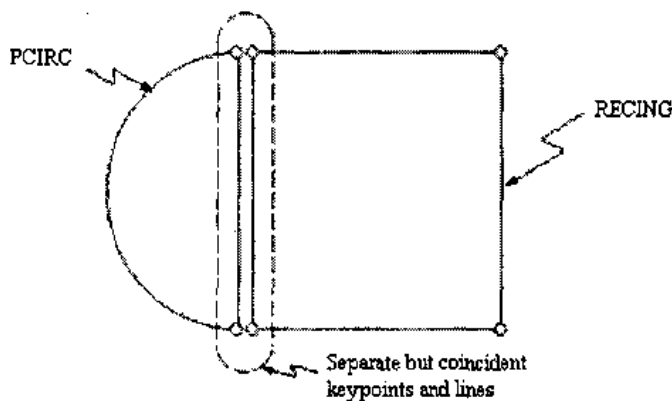


图 4-50 应用 NUMMRG 的例子

如果合并非常邻近的关键点，则连接这些关键点的短线也将同时被删除。如果关键点超过合并的范围，可用 LCOMB 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Operate> Add>Lines）删去这些短线。LCOMB 命令生成一条连续（但不一定光滑）的线。如合并的线有转折点，则不能用作拖拉的路径（ADRAG, VDRAG,），也不能用于任何布尔运算。

编号压缩

在构造模型时，由于删除、清除、合并或其他操作可能在编号中生成许多的空号。这些空号对于某些项（如单元号）可能仍为空的，但对于其他的项（如关键点）则可能变为非空。为保存数据存储空间（删除空号）和保持期望的编号顺序（强迫新生成的项，其编号大于已存在项的编号）。可用下列方法压缩编号，删除编号间的空隙：

命令：NUMCMP

GUI：Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Compress Numbers

对已选组（单元、关键点等）项或所有有效的项（用 NUMCMP, ALL）可有选择地重新执行编号压缩操作。

以下为应用 NUMCMP 命令的例子：

```
VMESH,...
VCLEAR,...      ! Node and element numbers will not be reused.
...
! Change meshing controls, element attributes, etc.
...
VMESH,...      ! Node and element numbering will contain "gaps"
NUMCMP,NODE    ! Optional step-NUMCMP can free up some computer memory
NUMCMP,ELEM    ! by eliminating gaps in numbering sequences.
```

参见 ANSYS 命令手册中关于 NUMCMP 命令的叙述。

设置起始编号

在生成新的自动编号项时，用户可能想使新生成的系列项的起始编号大于已有项所用的最大编号。这样做能保证新生成图元的连续编号，不占用已有编号序列中的空号。这样做的另一个理由是在生成模型的某个区域时可与其他区域保持独立，避免了将这些区域连接到一起时编号的冲突。可用下列方法指定起始编号：

命令：NUMSTR

GUI：Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Set Start Number

如果用命令输入，则必须对每一组（节点、单元、关键点等）项执行此命令。

下列说明了命令输入方法的应用：

```
! Create one portion of model:
...
...
! Create a separate, distinctly-numbered portion of your model:
NUMSTR,KP,100
NUMSTR,LINE,100
NUMSTR,AREA,100
NUMSTR,VOLU,100
```

编号偏差

在连接模型中两个独立的区域时，为避免编号冲突，可对当前已选取项的编号加一个偏差值来重新编号。可用下列方法：

命令：NUMOFF

GUI：Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Add Num Offset

必须对待重新编号的每一组（节点、单元、关键点等）项重新执行此命令。

CDWRITE 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Archive Model>Write）将所有已选取的有限元模型数据写成一个编码文件，执行该命令时会自动在文件的开始处写上一串

NUMOFF 命令以保证在读取该文件时与已存在的数据相互分离。可用 NUMCMP 命令将由 NUMOFF 命令产生的编号间隙去掉。

在 PREP7 中, 可用将实体模型数据 (IGES 格式) 写到一个编码文件中, 也可以将由外部生成的 IGES 文件的实体模型数据转到 ANSYS 数据库中去。

用下列方法将实体模型数据写到一个文件:

命令: IGESOUT

GUI: Utility Menu>File>Export

用下列方法将一个文件的 IGES 数据转成 ANSYS PREP7 数据:

命令: IGESIN

GUI: Utility Menu>File>Import

由 IGESIN 命令 (或 GUI 途径) 生成的新的实体模型图元 (在 AUX15 中) 会自动进行编号以避免与数据库中已有的其他实体模型图元编号发生冲突。读一个 IGES 文件到一空的 ANSYS 数据库时, 编号并不一定从 1 开始, 这是由于在传送过程中可能生成中间图元 (后被删去) 所致。参见第 6 章有关 IGES 接口的信息。

4.11.2 单元重排序

在直接波前求解开始之前, ANSYS 程序会自动对单元重新排序以减少最大波前数。这种操作对前后处理程序中数据库中的单元编号无影响。可以预见绝大多数用户都会允许程序自动对单元重新排序。如果不需要程序自动执行重新排序, 可用下列方法重新建立原单元的排序:

命令: NOORDER

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Reset Elem Order

希望人为控制单元排序的用户, 可用下列方法在 PREP7 中开始重新排序 (如果进行了这些操作, ANSYS 程序则不会用自动排序功能取代人工控制排序)。

用下列方法按几何性质开始对单元重新排序:

命令: WSORT

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Reorder by XYZ

用下列方法定义一初始波表:

命令: WSTART

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Define Wave List

用下列方法将更多的节点加进初始波表:

命令: WMORE

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Extend Wave List

用下列方法清除所有重排序波表:

命令: WERASE

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Erase Wave List

用下列方法开始重排序:

命令: WAVES

GUI: Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Element Reorder>Reorder by List

用下列方法对模型中按当前编号的最大波前数进行预估:

命令: WFRONT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Element Reorder>Est. Wavefront

如果用 WAVES 命令对单元重排序应当避免点单元(如 MASS21 和 MASS71)出现在单元的中间节点上, 否则 WAVES 命令可能会失败。

4.12 耦合和约束方程

4.12.1 概述

当生成模型时, 典型地是用单元去连接节点以建立不同自由度间的关系。但是, 有时需要能够刻划特殊的细节(刚性区域, 结构的铰链连接, 对称滑动边界、周期条件和其他特殊内节点连接等)。这些用单元不足以表达。可用耦合和约束方程来建立节点自由度间的特殊联系。利用这些技术能进行单元做不到的自由度连接。

4.12.2 什么是耦合

当需要迫使两个或多个自由度(DOFs)取得相同(但未知)值, 可以将这些自由度耦合在一起。耦合自由度集包含一个主自由度和一个或多个其他自由度。耦合只将主自由度保存在分析的矩阵方程里, 而将耦合集内的其他自由度删除。计算的主自由度值将分配到耦合集内的所有其他自由度中去。

典型的耦合自由度应用包括: 1) 部分模型包含对称; 2) 在两重复节点间形成销钉、铰链、万向节和滑动连接; 3) 迫使模型的一部分表现为刚体(见本章中对约束方程能适用于更通用刚体区域的讨论)。

4.12.3 如何生成耦合自由度集

用下列方法定义(或修改)耦合自由度集:

命令: CP

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Couple DOFs

在生成一个耦合节点集之后, 通过执行一个另外的耦合操作(保证用相同的参考编号集)将更多节点加到耦合集中来。也可用选择逻辑来耦合所选节点的全部耦合。可用 CP 命令输入负的节点号来删除耦合集中的节点。要修改一耦合自由度集(即增、删节点或改变自由度标记)可用 CPNGEN 命令(不能由 GUI 直接得到 CPNBGEN 命令)。

CPINTF 命令通过在每对重合节点上定义自由度标记生成一耦合集而实现对模型中重合节点的耦合。此操作对“扣紧”几对节点(诸如一条缝处)尤为有用。

命令: CPINTF

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Coincident Nodes

除耦合重复节点外, 还可用下列替换方法迫使节点有相同的表现方式:

如果对重复节点所有自由度都要进行耦合，通常用 NRMMRG 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Merge Items）将这些节点合并起来更方便。

可用 EINTF 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>At Coincid Nd）通过在重复节点之间生成 2 节点单元来连接它们。

用 CEINTF 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Coupling/Ceqn>Adjacent Regions）将两个有不相似网格模式的区域连接起来。这项操作使一个区域的选定节点与另一个区域的选定单元连接起来生成约束方程。

一旦有了一个或更多耦合集，可用这些方法生成另外的耦合集：

用下列方法以相同的节点号但与已有模式集不同的自由度标记生成新的耦合集。

命令：CPLGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Gen w/Same Nodes

用下列方法生成与已有耦合集不同（均匀增加的）节点编号但有相同的自由度标记的新的耦合集：

命令：CPSGEN

GUI：Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Gen w/Same DOF

用下列方法对耦合自由度集列表：

命令：CPLIST

GUI：Utility Menu>List>Other>Coupled Sets>All CP nodes selected

Utility Menu>List>Other>Coupled Sets>Any CP node selected

用下列方法删除耦合自由度集：

命令：CPDELE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Del Coupled Sets

这项操作删除全部的耦合集，必须用 CPNGEN 命令或 CP 命令（或其 GUI 途径）从耦合集中删除特定的节点。

4.12.4 耦合的其他条件

每个耦合的节点都在节点坐标系下进行的耦合操作。通常应当保持节点坐标系的一致性。

自由度是在一个集内耦合而不是集之间的耦合。不允许一个自由度出现在多于一个耦合集中。

接地的自由度（即由 D 或其它约束命令指定的自由度值）不能包括在耦合集中。

在减缩自由度分析中，如果主自由度要从耦合自由度集中选取，只有主要自由度才能被指定为主自由度（不能指定耦合集中的删除自由度为主自由度）。

在结构分析中，耦合自由度以生成一刚体区域有时会引起明显的平衡破坏。不重复的或不与耦合位移方向一致的一个耦合节点集会产生外加力矩但不出现在反力中。

4.12.5 什么是约束方程

线性约束方程提供了一种比简单耦合更通用的联系自由度值的方法。约束方程必须有如

下形式:

$$\text{Cons tan } t = \sum_{I=1}^N (\text{Coefficient}(I) * U(I))$$

这里 $U(I)$ 是自由度项 (I), N 是方程中项的编号。

4.12.6 如何生成约束方程

直接方法

可用下列方法直接生成约束方程:

命令: CE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Constraint Eqn

下面为一个典型的约束方程应用的例子, 力矩的传递是由 BEAM3 单元与 PLANE42 单元 (PLANE42 单元无平面转动自由度) 的连接来完成的:

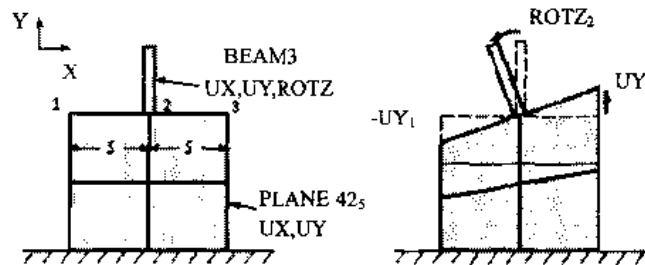


图 4-51 建立旋转和平移自由度的关系

在此例中, 如果不用约束方程则节点表现为一个铰链。可用下列方法传递梁和平面应力单元之间的力矩:

$$\text{ROTZ}_2 = (\text{UY}_3 - \text{UY}_1) / 10$$

此方程应当重写成要求的格式, 并代入程序:

$$0 = \text{UY}_3 - \text{UY}_1 - 10 * \text{ROTZ}_2$$

$$\text{CE}, 1, 0, 3, \text{UY}, 1, 1, \text{UY}, -1, 2, \text{ROTZ}, -10$$

方程中第一个独特的自由度按方程中所有其他自由度的方式删除。一个独特的自由度是不在任何其他约束方程、耦合节点集、给定位移集或主自由度集中定义的自由度。应将方程的第一项作为自由度删除。尽管在理论上可在多于一个方程中指定相同的自由度, 用户必须小心避免重定义。还必须小心以保证模型中每个节点和自由度的存在 (记住对出现在一个节点上的自由度, 那个节点必须与一个提供了必要自由度的单元相连)。

在分析中, 值得利用反对称或周期性域的变化以限制模型规模。可通过耦合未知的节点值或写约束方程来实现。这两种功能可在 ANSYS/EMAG 程序中分别用 CP 和 CE 命令得到。

周期性条件是指边界既不保持与流动方向平行也不垂直, 而是在一点处的势与另一点大小相等但符号相反。这种情况出现在对发动机的对称扇区分析中, 例如, 两分开的极距点上的位势大小相等符号相反。如图 4-52, 假定对称扇区的外边界节点 129 按以上与相反极距上

的节点 363 约束起来。

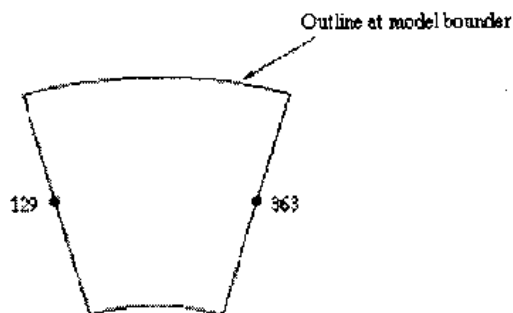


图 4-52 定义周期性条件的例子

约束方程如下：

$$A_{129} = -A_{363}$$

$$0 = A_{129} + A_{363}$$

用 CE 命令输入约束方程形式如下：

```
CE,1,0,129,MAG,1,363,MAG,1
```

对二维磁场分析，用 PERBC2D 宏命令自动施加周期性边界条件组（CP 和 CE 命令）

命令：PERBC2D

GUI：Main Menu>Preprocessor>Loads>Apply>Periodic BCs

Main Menu>Solution>Apply>Periodic BCs

注意 周期性边界条件也出现在结构分析中（例如涡轮叶片模型）。用 CP 命令加到旋转到柱坐标系下的节点上。

修改约束方程

用下列方法在 PREP7 或 SOLUTION 中修改约束方程中的常数项：

命令：CECMOD

GUI：Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Modify ConstrEqn

Main Menu>Preprocessor>Loads>Other>Modify ConstrEqn

Main Menu>Solution>Other>Modify ConstrEqn

如果要修改约束方程中的其他项，必须在求解前在 PREP7 中使用 CE 命令（或相应 GUI 途径）。

直接与自动生成约束方程的对比

前面提到一个例子说明如何用 CE 命令直接生成约束方程，每次只能生成一个。

下面介绍三种自动生成多约束方程的操作。

CERIG 命令通过写约束方程定义一个刚性区域。通过连接一保留的（或主）节点到许多待去掉（或从）节点定义刚性线。（此操作中的主要自由度项与减缩自由度分析的主自由度是不同的。）

命令：CERIG

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Rigid Region

将 CERIG 命令的 Ldof 设置为 ALL (缺省), 此操作将为每对二维空间的约束节点生成三个方程。这三个方程在总体笛卡尔空间确定三个刚体运动 (UX、UY、ROTZ)。为在二维模型上生成一个刚性区域, 必须保证 X-Y 平面为刚性平面, 并且在每个约束节点有 UX、UY 和 ROTZ 三个自由度。类似地, 此操作也可在三维空间为每对约束节点生成六个方程, 在每个约束节点上必须有 UX、UY、UZ、ROTX、ROY 和 ROTZ 六个自由度。

输入其他标记的 Ldof 域将有不同的作用。如果此区域设置为 UXYZ, 程序在二维 (X, Y) 空间将写两个约束方程, 而在三维空间 (X、Y、Z) 将写三个约束方程。这些方程将写成从节点的平移自由度和主节点的平移和转动自由度。类似地, RXYZ 标记允许生成忽略从节点的平移自由度的部分方程。其他标记的 Ldof 将生成其他类型的约束方程。

总之, 从节点只需要由 Ldof 标记的自由度, 但主节点必须有所有的平移和转动自由度 (即二维的 UX、UY 和 ROTZ; 三维的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ)。对由没有转动自由度单元组成的模型, 应当考虑增加一个虚拟的梁单元以在主节点上提供旋转自由度。

可将一个区域的已选节点与另一个区域的已选单元用 CEINTF 命令 (菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Adjacent Regions) 连起来生成约束方程。这项操作将不相似网格形式的区域“系”在一起。在两区域的交界处, 从网格稠密的区域选择节点 A, 从网格粗糙区域选择单元 B, 用区域 B 单元的形函数。在相关的区域 A 和 B 界面的节点处写约束方程。ANSYS 允许这些节点位置使用两公差准则。节点在单元之外超过第一公差就认为节点不在界面上。节点贴近单元表面的距离小于第二公差则将节点移到表面上。

对 CEINTF 命令有些限制: 应力或热通量可能会不连续地穿过界面。界面区域的节点不能指定位移。可用每节点有六个自由度的单元接合 6 自由度实体。

可用 CESGEN 命令从已有约束方程集生成约束方程。那么已有约束方程集内的节点编号将增加以生成另外的约束方程集。另外约束方程集的标记和系数保持与原集的一致。

命令: CESGEN

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn >Gen w/same DOF

约束方程的列表和删除

可以列表和删除约束方程。

用下列方法对约束方程列表:

命令: CELIST

GUI: Utility Menu>List>Other>Constraint Eqns>All CE nodes selected

用下列方法删除约束方程:

命令: CEDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Del Constr Eqn

4.12.7 约束方程的其他注意事项

所有的约束方程都以小旋转理论为基础。因此, 它应用在大旋转分析中 (NLGEOM) 应当限制在约束方程所包含的自由度方向无重大变化的情况。

约束方程的出现将产生不可预料的反力和节点力结果。

4.13 模型的合并和归档

4.13.1 合并模型

如果你建立模型的一部分，而另外的人建立同一模型的不同部分，就需要将两个或更多的单个模型进行合并。或者也许用户将一个较大的模型任务细分为若干小的独立任务，生成几个独立模型。如果保留了输入文件的拷贝，可将所有输入（命令）合并在一起而实现模型的合并。但这种方法可能引发冲突，由于不同文件中的图元可能共享相同的编号、材料属性可能发生重叠等。

一种替代的方法是用 CDWRITE 命令写出 ASCII 文件，可用 CDREAD 命令进行合并：

用下列方法写出一个 ASCII 文件：

命令：CDWRITE

GUI：Main Menu>Preprocessor>Archive Model>Write

用下列方法读入文件：

命令：CDREAD

GUI：Main Menu>Preprocessor>Archive Model>Read

这种方法的优点在于读写操作合并，对生成的每一个文件自动地写适当的 NUMOFF 命令避免数据发生冲突。当读入这些文件时，NUMOFF 命令为防止数据编号冲突对已有数据编号加一个偏差值，而即将读入的数据仍保留其编号。可用 NUMCMP 命令（菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Compress Numbers）去掉由 NUMOFF 操作产生的空值编号。

对大模型，为节省时间可只写出模型中待合并的部分。例如，用 CDWRITE 操作，可只输出实体模型信息或数据库信息。数据库信息由没有实体模型和实体模型载荷信息的有限元模型组成。如果计划将两个未划分网格的实体模型合并，可用 CDWRITE 操作只保存实体模型信息。然后用 CDREAD 操作读入实体模型文件。

4.13.2 模型归档

什么是保存或归档已构造完成或已执行完分析模型的最好方法呢？可以通过保存 log 文件、数据库文件和由写操作（CDWRITE）生成的文件保存模型、一个载荷工况和一系列求解选项集。多步求解和后处理步骤可由保存 log 文件而归档。每种文件的优点和缺点叙述如下。

Log 文件(File.LOG)

◆ pros

此文件就紧凑性来说是最好的文件。而且这个文件是用来生成模型所用命令的记

录，可以识别所用的步骤，及为什么以一个特定顺序进行操作。而且，由于此文件是以文本文件格式（主要为 ASCII），可用 E-mail 等方式将其由一台机器传到另一台机器。并且，可用任何文本编辑器对其进行修改，可通过修改此文件来修改模型，并可增加/COM 命令（注释线）表明输入。这有助于理解后面的输入数据。用 log 文件可对参数模型（用于优化分析的模型）进行归档。最后，这个文件对于提供给帮助用户解决问题的人是最好的文件。

注意 File.LOG 在 ANSYS 使用中自动生成。如果这个文件丢失或损坏了，可从当前 ANSYS 数据库中用 LGWRITE 命令（菜单途径 Utility Menu>File>Write DB Log File）写出一个命令 log 文件。关于 LGWRITE 的使用参见 ANSYS 操作指南。

◆ Cons

必须重新执行输入文件才能得到数据库。由于图元编号、网格等将随硬件系统和 ANSYS 版本的不同而有所差异，用户将需要重新执行在相同版本的 ANSYS 程序下已生成模型的输入文件。而且，如果交互地生成模型，运行此文件以批处理方式重新生成模型可能会遇到问题。如果在输入中有错误，就会终止批处理运行，这就意味着不能完成建模。如果遇到这种问题，用 /INPUT 命令（Utility Menu>File>Read>Read Input from）交互地运行输入文件。

数据库文件 (File.DB)

◆ Pros

数据库文件可以在生成该文件的 ANSYS 版本内恢复 (RESUME)。只要在与生成模型时相同版本的 ANSYS 程序内恢复文件，就不必对该文件进行任何操作和修改。

◆ Cons

大模型会生成大规模的数据库文件，很快会使磁盘空间不够用了。而且，文件是以二进制格式 (IEEE) 保存的，从一台机器转移到另一台机器上有时要比文本文件困难得多。

CDWRITE 文件

◆ Pros

由 CDWRITE 操作生成相对紧凑的文本文件（带有.cdb 扩展名）。由于 CDWRITE 是以几何和有限元图元（而不是生成模型的命令）形式保存当前模型，所以它对硬件平台或程序版本无依赖性。CDWRITE 文件典型地用来在任何硬件平台和任何向上兼容的程序版本中重新生成模型。而且，由于这些文件可用一文件编辑器修改，可以在文件中加入描述性的注释以有助于以后的识别和理解。用来输入模型的文件不必保存。

如果将数据写到一个新文件中，选择 BLOCKED 格式以更快的读该文件。如果正在将先前 ANSYS 生成文件的数据用到另一个应用中去，当写到.cdb 文件以备另一个应用时选择 UNBLOCKED 项，或按适合于 BLOCKED 格式修改应用。

◆ Cons

由 CDWRITE 生成的文件是数据库以文本格式的必然转储。当 ANSYS 命令（可能有 IGES 信息）包含在数据库文件中，可能不是用来生成模型的相同命令，且可能不是所用命令的相同顺序。正因为如此，当想修改模型时，对该文件的修改是困难的（建议不要这么做）。参数模型信息不存储，因此，通过修改参数值来修改模型是行不通的。因此，不能用 CDWRITE 存储模型以进行优化分析。而且，为重新生成模型，必须用 CDREAD 命令读该文件，对于大模型它的耗时处于中等水平。

如果正在将先前在 ANSYS 生成文件的数据做另外的应用，必须用 UNBLOCKED 格式写 .cdb 文件以适于该应用，或将该应用按适合于 BLOCKED 的格式进行改变。

4.14 ANSYS 与其他程序的接口

4.14.1 什么是接口软件

接口软件是指允许 ANSYS 程序与其他应用程序进行数据交换的软件。该软件可以做成独立的软件包或加入应用程序中。

本节对当前可用的接口软件予以简要介绍。

4.14.2 与计算机辅助设计 (CAD) 程序的接口

许多 CAD 程序与 ANSYS 程序有直接的接口，是由 ANSYS 公司或 CAD 供应商编写的软件。由 ANSYS 公司可以得到下列程序的译码器：AutoCAD、CADAM、CADKEY 和 Pro/ENGINEER。

值得注意的是 ANSYS-Pro/ENGINEER 接口，因为它提供了以执行部件为基础的参数化优化设计的功能。该功能允许由部件为基础的参数化 Pro/ENGINEER 模型开始，用 ANSYS 程序对其进行优化，并以一个优化的 Pro/ENGINEER 模型结束，且仍是以部件为基础的参数化模型。

4.14.3 与其他有限元分析 (FEA) 程序的接口

ANSYS/NASTRAN 译码程序提供 ANSYS 和 MSC/NASTRAN 输入文件的双向转换。程序可将静态和模态分析中的有限元模型数据和加载工况信息进行转化。

4.14.4 其他接口

可得下列范围的接口软件：

- 运动学
- 计算流体动力学 (CFD)。使用 FLOTRAN CFD 模块，可在 ANSYS 程序中得到完全集成的 CFD 功能。
- 图形学和出版

- 前处理和后处理
- 注塑成型分析
- 声学 and 减噪
- 实验模态分析
- 断裂和疲劳
- 多体系统
- 碰撞分析和金属成型
- 动力学

第 5 章

结构静力分析

5.1 结构分析概述

结构分析的定义：结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；海洋结构，如船舶结构；航空结构，如飞机机身等；同时还包括机械零部件，如活塞，传动轴等等。

在 ANSYS 产品家族中有七种结构分析的类型。结构分析中计算得出的基本未知量（节点自由度）是位移，其他的一些未知量，如应变、应力和反力可通过节点位移导出。

静力分析——用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触面和蠕变。

模态分析——用于计算结构的固有频率和模态。

谐波分析——用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。

瞬态动力分析——用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可计及上述提到的静力分析中所有的非线性性质。

谱分析——是模态分析的应用推广，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变。

曲屈分析——用于计算曲屈载荷和确定曲屈模态。ANSYS 可进行线性（特征值）和非线性曲屈分析。

显式动力分析——ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

此外，前面提到的七种分析类型还有如下特殊的分析应用：

- 断裂力学
- 复合材料
- 疲劳分析
- p-Method

结构分析所用的单元：绝大多数的 ANSYS 单元类型可用于结构分析，单元型从简单的杆单元和梁单元一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元。

5.2 结构线性静力分析

◆ 静力分析的定义

静力分析计算在固定不变的载荷作用下结构的效应，它不考虑惯性和阻尼的影响。可是，静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷。

◆ 静力分析中的载荷

静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定：即假定载荷和结构的响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括：

- 外部施加的作用力和压力
- 稳态的惯性力（如中力和离心力）
- 位移载荷
- 温度载荷

◆ 线性静力分析和非线性静力分析

静力分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有的非线性类型：大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触（间隙）单元、超弹性单元等。本节主要讨论线性静力分析，非线性静力分析在下一节中介绍。

◆ 线性静力分析的求解步骤

1. 建模
2. 施加载荷和边界条件，求解
3. 结果评价和分析

5.3 结构非线性静力分析

◆ 非线性结构的定义

在日常生活中，会经常遇到结构非线性。例如，无论何时用钉书针钉书，金属钉书针将永久地弯曲成一个不同的形状（看图 5-1 (a)）。如果你在一个木架上放置重物，随着时间的迁移它将越来越下垂（看图 5-1 (b)）。当在汽车或卡车上装货时，它的轮胎和下面路面间接触将随货物重量的变化而变化（看图 5-1 (c)）。如果将上面例子所载荷变形曲线画出来，你将发现它们都显示了非线性结构的基本特征-变化的结构刚性。

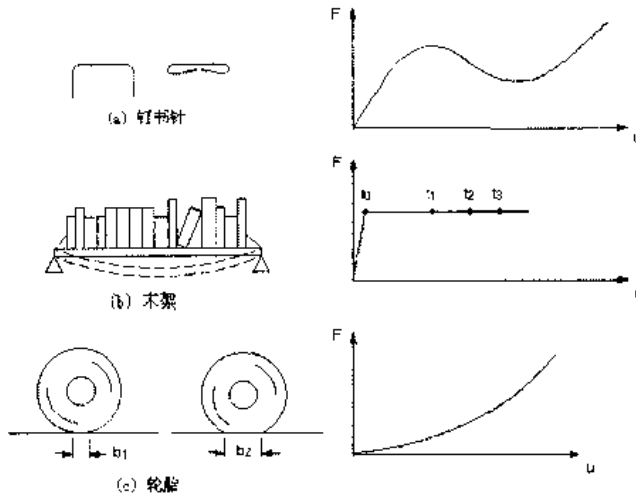


图 5-1 非线性结构行为的普通例子

◆ 非线性行为的原因

引起结构非线性的原因很多，它可以被分成三种主要类型：

● 状态变化（包括接触）

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为，例如，一根只能拉伸的电缆可能是松散的，也可能是绷紧的。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。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。ANSYS 程序中单元的激活与杀死选项用来给这种状态的变化建模。

接触是一种很普遍的非线性行为，接触是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集。

● 几何非线性

如果结构经受大变形，它变化的几何形状可能会引起结构的非线性地响应。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以致于动力臂明显减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。

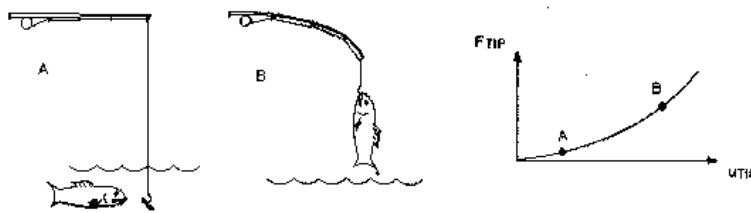


图 5-2 钓鱼杆示范几何非线性

● 材料非线性

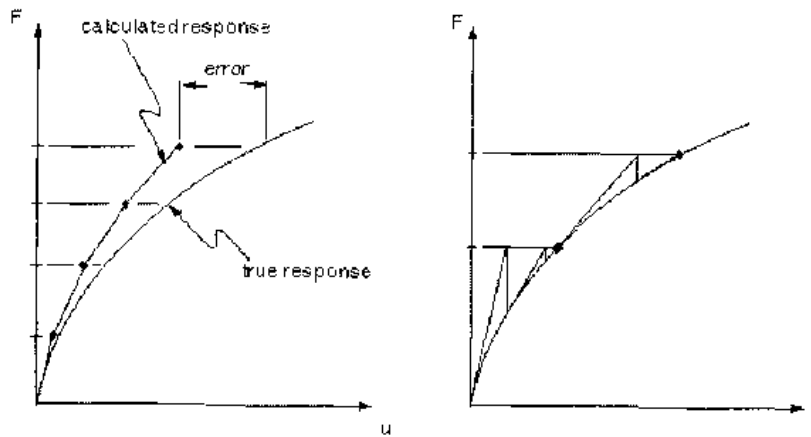
非线性的应力——应变关系是结构非线性名的常见原因。许多因素可以影响材料的应力——应变性质，包括加载历史（如在弹——塑性响应状况下），环境状况（如温度），加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）。

◆ 牛顿—拉森方法

ANSYS 程序的方程求解器计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而，非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示。需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

◆ 逐步递增载荷和平衡迭代

一种近似的非线性求解是将载荷分成一系列的载荷增量。可以在几个载荷步内或者在一个载步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可避免地随着每一个载荷增量积累误差，导致结果最终失去平衡，如图 5-3 (a) 所示。



(a) 纯粹增量式解

(b) 全牛顿—拉普森迭代求解 (2 个载荷增量)

图 5-3 纯粹增量近似与牛顿—拉普森近似的关系

ANSYS 程序通过使用牛顿—拉普森平衡迭代克服了这种困难，它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛（在某个容限范围内）。图 5-3 (b) 描述了在单自由度非线性分析中牛顿—拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，NR 方法估算出残差矢量，这个矢量是回复力（对应于单元应力的载荷）和所加载荷的差值。程序然后使用非平衡载荷进行线性求解，且核查收敛性。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，自动载荷步及二分等，可被激活来加强问题的收敛性，如果不能得到收敛，那么程序或者继续计算下一个载荷前或者终止（依据你的指示）。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析，如果你仅仅使用 NR 方法，正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵，导致严重的收敛问题。这样的情况包括独立实体从固定表面分离的静态接触分析，结构或者完全崩溃或者“突然变成”另一个稳定形状的非线性弯曲问题。对这样的情况，你可以激活另外一种迭代方法，弧长方法，来帮助稳定求解。弧长方法导致 NR 平衡迭代沿一段弧收敛，从而即使当正切刚度矩阵的倾斜为零或负值时，也往往阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 5-4 中。

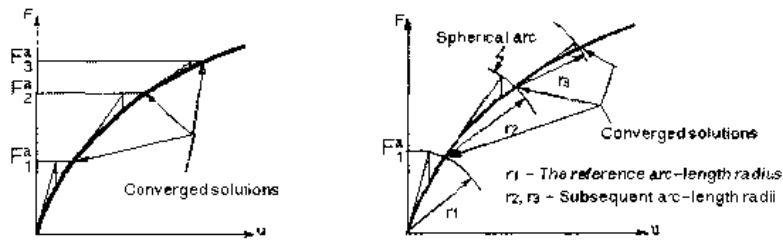


图 5-4 传统的 NR 方法与弧长方法的比较

◆ 非线性求解的组织级别

非线性求解被分成三个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。

“顶层”级别由在一定“时间”范围内你明确定义的载荷步组成。假定载荷在载荷步内是线性地变化的。

在每一个载荷步内，为了逐步加载可以控制程序来执行多次求解（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 5-5 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。

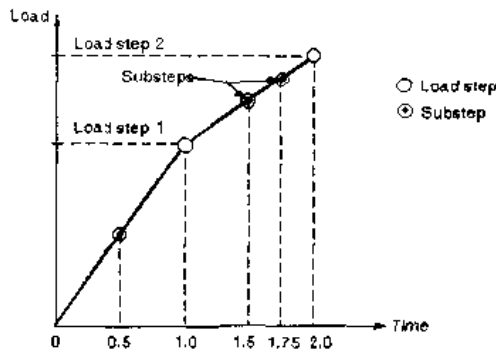


图 5-5 载荷步、子步及“时间”

◆ 收敛容限

当你对平衡迭代确定收敛容限时，你必须答这些问题：

你想基于载荷、变形、还是联立二者来确定收敛容限。

既然径向偏移（以弧度度量）比对应的平移小，你是不是想对这些不同的条目建立不同的收敛准则。

当你确定收敛准则时，ANSYS 程序会给你一系列的选择：你可以将收敛检查建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题，你同样也有收敛准则的选择问题。

当你确定你的收敛准则时，记住以力为基础的收敛提供了收敛的绝对量度，而以位移为基础的收敛仅提供了表观收敛的相对量度。因此，你应当总是使用以力为基础（或以力矩为基础的）收敛容限。如果需要可以增加以位移为基础（或以转动为基础的）收敛检查，但是通常不单独使用它们。

图 5-6 说明了一种单独使用位移收敛检查导致出错的情况。在第二次迭代后计算出的位移很少可能被认为是收敛的解，尽管问题仍旧远离真正的解。要防止这样的错误，应当使用

力收敛检查。

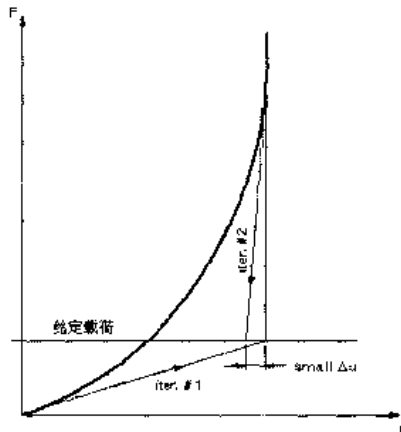


图 5-6 完全依赖位移收敛检查有时可能产生错误的结果

◆ 保守行为与非保守行为：过程依赖性

如果通过外载输入系统的总能量当载荷移去时复原，我们说这个系统是保守的。如果能量被系统消耗（如由于塑性应变或滑动摩擦），我们说系统是非保守的，一个非守恒系统的例子显示在图 5-7 中。

一个保守系统的分析是与过程无关的：通常可以任何顺序和以任何数目的增量加载而不影响最终结果。相反地，一个非保守系统的分析是与过程相关的：必须紧紧跟随系统的实际加载历史，以获得精确的结果。如果对于给定的载荷范围，可以有多个的解是有效的（如在突然转变分析中），这样的分析也可能是过程相关的。过程相关问题通常要求缓慢加载（也就是，使用许多子步）到最终的载荷值。

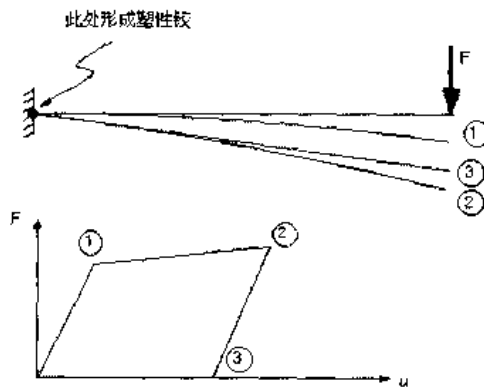


图 5-7 非守恒（过程相关的）过程

◆ 子步

当使用多个子步时，你需要考虑精度和代价之间的平衡；更多的子步骤（也就是小的时间步）通常导致较好的精度，但以增多的运行时间为代价。ANSYS 提供两种方法来控制子步数：

- 子步数或时间步长

我们即可以通过指定实际的子步数也可以通过指定时间步长控制子步数。

- 自动时间步长

ANSYS 程序，基于结构的特性和系统的响应，来调查时间步长。

- ◆ 子步数

如果你的结构在它的整个加载历史期间显示出高度的非线性特点，而且你对结构的行为有足够的了解，那么你也也许能够自己确定多小的时间步长是必需的，且对所有的载荷步使用同一时间步（务必允许足够大的平衡迭代数）。

- ◆ 自动时间分步

如果你预料你的结构的行为将从线性到非线性变化，你也也许想要在系统响应的非线性部分期间变化时间步长。在这样一种情况下，你可以激活自动时间分步以便随需要调整时间步长，获得精度和代价之间的美好平衡。同样地，如果你不确信你的问题将成功地收敛，你也也许想要使用自动时间分步来激活 ANSYS 程序的二分特点。

二分法提供了一种对收敛失败自动矫正的方法。无论何时只要平衡迭代收敛失败，二分法将把时间步长分成两半，然后从最后收敛的子步自动重启动，如果已二分的时间步再次收敛失败，二分法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或到达最小时间步长。

- ◆ 载荷和位移方向

当结构经历大变形时应该考虑到载荷将发生了什么变化。在许多情况下，无论结构如何变形，施加在系统中的载荷仍保持恒定的方向。而在另一些情况下，力将改变方向，随着单元方向的改变而变化。

ANSYS 程序对这两种情况都可以建模，依赖于所施加的载荷类型。加速度和集中力将不管单元方向的改变而保持它们最初的方向，表面载荷作用在变形单元表面的法向，且可被用来模拟“跟随”力。图 5-8 说明了恒力和跟随力。

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。

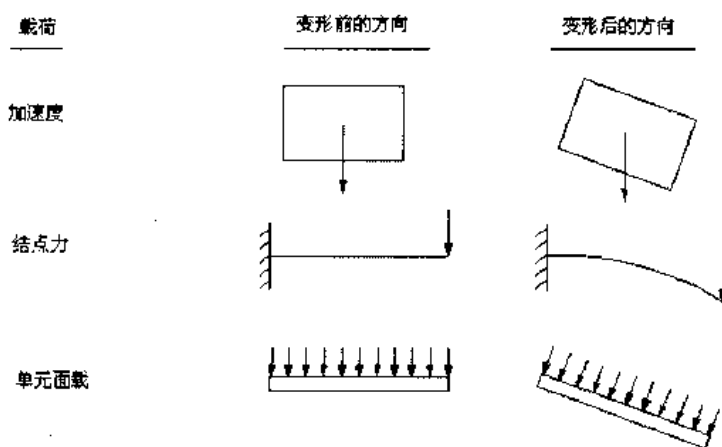


图 5-8 变形前后载荷方向

- ◆ 非线性瞬态过程的分析

用于分析非线性瞬态行为的过程，与对线性静态行为的处理：相似以步进增量加载，

◆ 选项：新的分析 (ANTYPE)

一般情况下会使用 New Analysis (新的分析)。

◆ 选项：分析类型：静态 (ANTYPE)

选择 Static (静态)。

◆ 选项：大变形或大应变选项 (GEMO)

并不是所有的非线性分析都将产生大变形。参看：“使用几何非线性”对大变形的进一步讨论。

◆ 选项：应力刚化效应 (SSTIF)

如果存在应力刚化效应选择 ON。

◆ 选项：牛顿-拉普森选项 (NROPT)

仅在线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切矩阵。你可以指定这些值中的一个。

- 程序选择 (NROPT, ANTO)：程序基于你模型中存在的非线性种类选择用这些选项中的一个。在需要时牛顿-拉普森方法将自动激活自适应下降。
- 全 (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。如果自适应下降是关闭的，程序每一次平衡迭代都使用正切刚度矩阵（我们一般不建议关闭自适应下降，但是你或许发现这样做可能更有效）。如果自适应下降是打开的（缺省），只要迭代保持稳定（也就是，只要残余项减小，且没有负主对角线出现）程序将仅使用正切刚度阵。如果在一次迭代中探测到发散倾向，程序抛弃发散的迭代且重新开始求解，应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代回到收敛模式时，程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对复杂的非线性问题自适应下降通常将提高程序获得收敛的能力。
- 修正的 (NROPT, MODI)：程序使用修正的牛顿-拉普森方法，在这种方法中正切刚度矩阵在每一子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。
- 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较不易发散，但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。它不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。

◆ 选项：方程求解器

对于非线性分析，使用前面的求解器（缺省选项）。

3. 在模型上加载，记住在大变形分析中惯性力和点载荷将保持恒定的方向，但表面力将“跟随”结构而变化。

4. 指定载荷步选项。这些选项可以在任何载荷步中改变。下列选项对非线性静态分析是可用的：

◆ 普通选项

普通选项包括下列：

- Time(TIME)

ANSYS 程序借助在每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步和子步。使用

TIME 命令来定义受某些实际物理量（如先后时间，所施加的压力等）。限制的 TIME 值。程序通过这个选项来指定载荷步的末端时间。

注意 在没有指定 TIME 值时，程序将依据缺省自动对每一个载荷步按 1.0 增加 TIME（在第一个载荷步的末端以 TIME=1.0 开始）。

- 时间步的数目 (NSUBST)
- 时间步长 (DELTIM)

非线性分析要求在每一个载荷步内有多个子步（或时间步，这两个术语是等效的）从而 ANSYS 可以逐渐施加所给定的载荷，得到精确的解。NSUBST 和 DELTIM 命令都获得同样的效果（给定载荷步的起始最小及最大步长）。NSUBST 定义在一个载荷步内将被使用子步的数目，而 DELTIM 明确地定义时间步长。如果自动时间步长是关闭的，那么起始子步长用于整个载荷步。缺省时是每个载荷步有一个子步。

- 渐进式或阶跃式的加载

在与应变率无关的材料行为的非线性静态分析中通常不需要指定这个选项，因为依据缺省，载荷将为渐进式的阶跃式的载荷 (KBC, 1) 除了在率-相关材料行为情状下（蠕变或粘塑性），在静态分析中通常没有意义。

- 自动时间分步 (AUTOTS)

这一选项允许程序确定子步间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步（子步）长。缺省时是 OFF（关闭）。

你可以用 AUTOTS 命令打开自动时间步长和二分法。通过激活自动时间步长，可以让程序决定在每一个载荷步内使用多少个时间步。

在一个时间步的求解完成后，下一个时间步长的大小基于四种因素预计：

- 在最近过去的时间步中使用的平衡迭代的数目（更多次的迭代成为时间步长减小的原因）
- 对非线性单元状态改变预测（当状态改变临近时减小时间步长）
- 塑性应变增加的大小
- 蠕变增加的大小
- ◆ **非线性选项**

程序将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则（或者直到达到允许的平衡迭代的最大数 (NEQIT)），我们可以用缺省的收敛准则，也可以自己定义收敛准则。

- 收敛准则 (CNVTOL)

- ◆ **缺省的收敛准则**

依据缺省，程序将以 VALUE * TOLER 的值对力（或者力矩）进行收敛检查。VALUE 的缺省值是在所加载荷（或所加位移，Newton-Raphson 回复力）的 SRSS，和 MINREF（其缺省为 1.0）中，取值较大者。TOLER 的缺省值是 0.001，你应当几乎总是使用力收敛检查。可以添加位移（或者转动）收敛检查。对于位移，程序将收敛检查建立在当前 (i) 和前面 (i-1) 次迭代之间的位移改变上。

注意 如果你明确地定义了任何收敛准则 (CNVTOL), 缺省准则将“失效”。因此, 如果你定义了位移收敛检查, 你将不得不再定义力收敛检查 (使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则)。

用户收敛准则

你可以定义用户收敛准则, 替代缺省的值。

使用严格的收敛准则将提高你的结果的精度, 但要以更多次的平衡迭代为代价。如果你想严格(加放松)你的准则, 你应当改变 TOLER 两个数量级。一般地, 你应当继续使用 VALUE 的缺省值; 也就是, 通过调整 TOLER, 而不是 VALUL 改变收敛准则。你应当确保 MINREF=1.0 的缺省值在你的分析范围内有意义。

在单一和多 DOF 系统中检查收敛

要在单自由度 (DOF) 系统中检查收敛, 你对这一个 DOF 计算出不平衡力, 然后对照给定的收敛准则 (VALUE*TOLER) 参看这个值 (同样也可以对单一 DOF 的位移 (和旋度) 收敛进行类似的检查。) 然而, 在多 DOF 系统中, 你也许想使用不同的比较方法。

ANSYS 程序提供三种不同的矢量规范用于收敛核查。

- 无限规范在你模型中的每一个 DOF 处重复单一 DOF 核查。
- L1 规范将收敛准则同所有 DOFS 的不平衡力 (力矩) 的绝对值的总和相对照。
- L2 规范使用所有 DOFS 不平衡力 (或力矩) 的平方总和的平方根进行收敛检查。

实例

对于下面例子, 如果不平衡力 (在每一个 DOF 处单独检查) 小于或等于 5000×0.0005 (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 10×0.001 (也就是 0.01), 子步将认为是收敛的。

```
CNVTOL, F, 5000, 0.005, 0
```

```
CNVTOL, U, 10, 0.001, 2
```

- 平衡迭代的最大次数 (NEQIT)

使用这个选项来对在每一个子步中进行的最大平衡迭代次数实行限制 (缺省=25)。如果在这个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。如果二分法是不可能的, 那么, 分析可能终止, 或者进行下一个载荷步, 依据你在 NCVN 命令中发出的指示。

- 求解终止选项 (NCNV)

这个选项处理五种不同的终止准则:

- 如果位移“太大”它建立一个用于终止分析和程序执行的准则
- 它对累积迭代次数设置限制
- 它对整个时间设置限制
- 它对整个 CPU 时间设置限制
- 弧长选项 (ARCLEN)

如果你预料结构在它的载荷历史内在某些点将变得物理意义上不稳定 (也就是, 结构的载荷-位移曲线的斜度将为 0 或负值), 你可以使用弧长方法来帮助稳定数值求解。

注意 当合适时，你可以和弧长方法一起使用许多其他的分析和载荷步选项。然而，你不应该和弧长方法一起使用下列选项：不要使用线搜索 [LNSRCH]，时间步长预测 [PRED]，自适应下降 [NROPT, , ON]，自动时间步长 [AUTOTS, TIME, DELTIM]，或打开时间一积分效应 (TIMINT)。

激活弧长方法的典型的系列命令显示在这里：

- 时间步长预测——纠正选项 (PRED)

对于每一个子步的第一次平衡迭代你可以激活和 DOF 求解有关的预测。这个特点加速收敛且如果非线性响应是相对平滑的，它特别有用。在包含大转动或粘弹的分析中它并不是非常有用。

- 线搜索选项 (LNSRCH)

这个选项是对自适应下降的替代。当被激活时，无论何时发现硬化响应。这个收敛提高工具用程序计算出的比例因子（具有 0 和 1 之间的值）乘以计算出的位移增量。因为线搜索算法是用来对自适应下降选项 (NROPT) 进行的替代，如果线搜索选项是开，自适应下降不被自动激活。不建议你同时激活线搜索和自适应下降。

当存在强迫位移时，直到迭代中至少有一次具有一个的线搜索值运算才会收敛。ANSYS 调节整个 DU 矢量，包括强迫位移值；否则，除了强迫 DOF 处一个小的位移值将随处发生。直到迭代中的某一次具有 1 的线搜索值，ANSYS 才施加全部位移值。

- 蠕变准则 (CRPLIM, CRCR)

如果结构表现出蠕变行为，可以指定蠕变准则用于自动时间步调整。（如果自动时间步长 [AUTOTS] 不是打开的，这个蠕变准则将无效。）程序将对所有单元计算蠕变增量（在最近时间步中蠕变的变化）对弹性应变的比值。如果最大比值比判据大，程序将减小下一个时间步长；如果小，程序或许增加下一个时间步长。（同样地程序将把自动时间步长建立在平衡迭代次数，即将发生的单元状态改变，以及塑性应变增量的基础上，时间步长将被调整到对应这些项目中的任何一个所计算出的最小值。）如果比值高于 0.25 的稳定界限，且如果时间增量不能被减小，解可能发散且分析将由于错误信息而终止。这个问题可以通过使最小时间步长足够小来避免 (DELTIM, NSUBST)。

- 激活和杀死选项

在 ANSYS/Mechanical 和 ANSYS/LS-DYNA 产品中，你可以去杀死和激活单元来模拟材料的消去和添加。

程序通过用一个非常小的数（它由 ESTIF 命令设置）乘以它的刚度从总质量矩阵消去它的质量“杀死”一个单元。对无活性单元的单元载荷（压力、热通量、热应变等）同样设置为零。你需要在前处理中定义所有可能的单元；你不可能在 SOLUTION 中产生新的单元。

要在你分析的后面阶段中“出生”的那些单元，在第一个载荷步前应当被杀死，然后在适当的载荷步的开始被重激活，当单元被重激活时，它们具有零应变状态，且（如果 NLGEOM, ON）它们的几何（开头长度，面积等）被修改来与它们的现偏移位置相适应。

- 杀死 (EKILL)

- 激活 (EALIVE)
- 改变材料性质参考号 (MPCHG)

另一种在求解期间影响单元行为的办法是来改变它的材料性质参考号。这个选项允许你在载荷步间改变一个单元的材料性质。

EKILL 适用于大多数单元类型。MPCHG 适用于所有单元类型。

◆ 输出控制选项

输出控制选项包括下列：

- 打印输出 (OUTPR)

使用这个选项来在输出文件 (Jobname.out) 中包括进你所想要的结果数据。

- 结果文件输出 (OUTRES)

这个选项控制结果文件中的数据 (Jobname.rst)。

OUTPR 和 OUTRES 用来控制结果被写入这些文件的频率。

- 结果外推 (ERESX)

这个选项，依据缺省，拷贝一个单元的积分点应力和弹性应变结果到结点而替代外推它们，如果在单元中存在非线性（塑性，蠕变，膨胀）的话。积分点非线性变化总是被拷贝到结点。

注意 对输出使用下列警告：

- 恰当使用多个 OUTRES 或 OUTPR 命令有时可能有一点小的技巧。
 - 依据缺省，在非线性分析中只有最后一个子步被写入结果文件。要写入所有子步，设置 OUTRES 中的 FREQ 域为 ALL。
 - 依据缺省，只有 1000 个结果集（子步）可以被写入结果文件。如果超过了这个数目（基于你的 OUTRES 指定），程序将由于错误而终止。使用命令 /CONFIG, NRES 来增加这个界限。
5. 存储基本数据的备份副本于另一文件。
命令：SAVE
GUI：Utility Menu>File>Save As
 6. 开始求解计算。
命令：SOLVE
GUI：Main Menu>Solution>-Solve-Current LS
 7. 如果你需要定义多个载荷步，对每一个其余的载荷步重复步骤 3 至 6。
 8. 离开 SOLUTION 处理器
命令：FINISH
GUI：关闭 Solution 菜单。

◆ 步骤 3：考察结果

来自非线性静态分析的结果主要由位移、应力、应变以及反作用力组成。可以用 POST1，通用后处理器，或者用 POST26，时间历程后处理器来考察这些结果。记住，用 POST1 一次仅可以读取一个子步，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 控制哪一个子步的结果被存储入 Jobname.rst)。典型的 POST1 后处理顺序将在下面描述。

要记住的要点:

- 用 POST1 考察结果, 数据库中的模型必须与用于求解计算的模型相同
- 结果文件 (Jobname.rst) 必须是可用的

用 POST1 考察结果:

1. 检查你的输出文件 (Jobname.out) 是否在所有的子步分析都收敛。
 - 如果不收敛, 你可能不想后处理结果, 而是想确定为什么收敛失败。
 - 如果你的解收敛, 那么继续进行后处理。
2. 进入 POST1。如果用于求解的模型现在不在数据中, 发出 RESUME。

命令: POST1

GUI: Main Menu>General Postproc

3. 读取需要的载荷步和子步结果, 这可以依据载荷步和子步号或者时间来识别, 然而不能依据时间识别出弧长结果。

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>Read Results-Load step

同样地你可以使用 SUBSET 或者 APPEND 命令来只对选出的部分模型读取或者合并结果数据。这些命令中的任何一个中的 LIST 参数列出结果文件中可用的解。你同样地可以通过 INRES 命令限制从结果文件到基本数据被写的的数据总量。另外可以用 ETABLL 命令对选出的单元进行存后处理。

注意 如果你指定了一个没有结果可用的 Time 值, ANSYS 程序将进行线性内插来计算出 Time 处的结果。认识到在非线性分析中这种线性内插通常将导致某些精度损失 (参看图 5-9)。因此, 对于非线性分析, 通常你应当在一个精确地对应于要求子步的 TIME 处进行后处理。

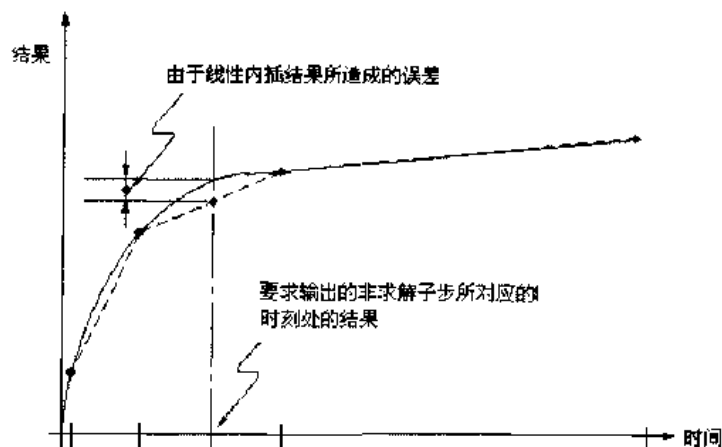


图 5-9 非线性结果的线性内插可能引起某些误差

4. 使用下列任意选项显示结果。

选项：显示已变形的形状

命令：PLDISP

GUI：Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shapes

在大变形分析中，一般优先使用真实比例显示（IDSCALE,, 1）。

选项：等值线显示

命令：PLNSOL 或者 PLESOL

GUI：Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu 或者 Element Solu

使用这些选项来显示应力、应变、或者任何其他可用项目的等值线。如果邻接的单元具有不同材料行为（可能由于塑性或多线性弹性的材料性质，由于不同的材料类型，或者由于邻近单元的死活属性不同而产生），你应当注意避免你的结果中的结点应力平均错误。

同样地你可以绘制单元表数据和线单元数据的等值线：

命令：PLETAB, PLLS

GUI：Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot Element Table

Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Line Elem Res

使用 PLETAB 命令（GUI 路径 Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot *

Element Table)来绘制单元表数据的等值线，用 PLLS（GUI 路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Line Elem Res）来绘制线单元数据的等值线。

选项：列表

命令：

PRNSOL（结点结果）

PRESOL（结果）

PRRSOL（反作用力数据）

PRETAB

PRITER（子步总计数据）等

NSORT

ESORT

GUI：Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solution

Main Menu>General Postproc>List Results>Element Solution

Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solution

使用 NSORT 和 ESORT 命令在将数据列表前对它们进行排序。

其他的性能

许多其他的后处理函数——在路径上映射结果。记录、参量列表等——在 POST1 中是可用的。对于非线性分析，载荷工况组合通常是无效的。

用 POST26 考察结果

同样地你可以使用 POST26，时间—历程后处理器考察非线性结构的载荷——历程响应。使用 POST26 比较一个 ANSYS 变量对另一个变量的关系。例如，你可以用图形表示某一结点处的位移与对应的所加载荷的关系，或者你可以列出某一结点处的塑性应变和对应的

TIME 值之间的关系。典型的 POST26 后处理顺序可以遵循这些步骤：

1. 根据你的输出文件 (Jobname.OUT) 检查是否在所有要求的载荷步内分析都收敛。你不应当将你的设计决策建立在非收敛结果的基础上。
2. 如果你的解是收敛的，进入 POST26，如果现与你的模型不在数据库内，发出 RESUME 命令。

命令：POST26

GUI：Main Menu>Time Hist Postpro

3. 定义在后处理期间使用的变量。

命令：

NSOL

ESOL

RFORCL

GUI：Main Menu>Time Hist Postproc>Define Variables

4. 图形或者列表显示变量。

命令：

PLVAR (图形表示变量)

PRVAR

EXTREM (列表变量)

GUI：Main Menu>Time Hist Postprac>Graph Variables

Main Menu>Time Hist Postproc>List Variables

Main Menu>Time Hist Postproc>List Extremes

其他的性能

许多其他的后处理函数可用于 POST26。

◆ 终止正在运行的工作，重启动

你可以通过产生一个“abort”文件 (Jobname.abt) 停止一个非线性分析。一旦求解成功地完成，或者收敛失败发生程序也将停止分析。

如果一个分析在终止前已成功地完成了一次或多次迭代，你可以屡次重启动它。

5.4 静力分析实例(一)

5.4.1 问题描述

在本实例中将研究铣削力对铣刀主轴的静力学方面的影响，铣刀主轴见图 5-10，铣刀主轴的结构见图 5-11。

图 5-10 是数控自动万能铣头的简图，其结构分为两部分，即 I 部分和 II 部分。I 部分固定在滑枕上，II 部分通过轴 E 左端的锥柄和 I 部分的主轴的右端锥孔相联结，可以快速更换。主电机驱动主轴实现主切削旋转运动，通过两对伞齿轮传动，改变主轴的方向；控制电机则通过一对齿轮驱动中间轴套，控制整个 II 部分围绕轴线 E 的旋转运动，另有一液压部件驱动

铣刀主轴和主轴座部分围绕轴线 F 旋转，这两个运动的合成实现了五面体加工。

相关参数：杨氏模量=200e9pa，泊松比=0.3，密度=7800kg/m³。

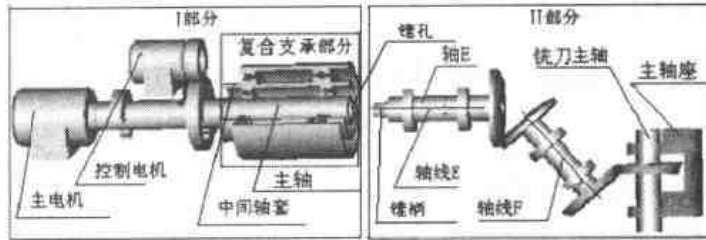


图 5-10 数控自动万能铣头的简化结构图

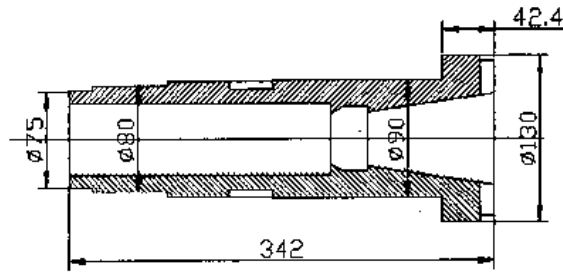


图 5-11 铣刀主轴

5.4.2 计算铣削力

铣削模型见图 5-12，该铣削为顺铣。点 P 为铣削时刀齿与工件的瞬时接触点， F_r 为点 P 处铣削力（即激振力）的径向分力。

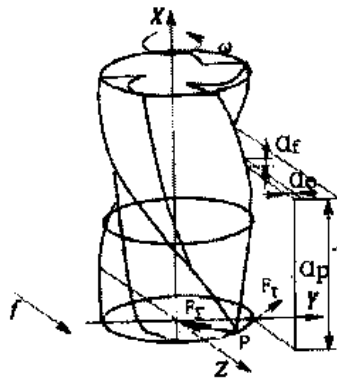


图 5-12 铣削模型

下面就求 P 点的切向力 F_t 和径向力 F_r 。切向力 F_t 的公式如下：

$$F_t = C_F \alpha_e^{0.88} \alpha_f^{0.72} d^{-0.88} a_p Z \quad (5-1)$$

C_F —铣削力系数； α_f —每齿进给量； Z —铣刀齿数； d —铣刀直径；

α_e —铣削宽度（垂直于铣刀轴线测量的切削层尺寸）；

α_p —铣削深度（平行于铣刀轴线测量的切削层尺寸）。

α_r 、 α_p 和 α_c 见图中所示。

该公式的试验条件为： $\gamma_o=5^\circ$ 、 $k_r=75^\circ$ 、 $\lambda_s=5^\circ$ 、 $\alpha_o=6^\circ$ 、 $k_r'=15^\circ$ 、 $\beta \leq 30^\circ$ 。

r_o —铣刀前角； k_r —主偏角； λ_s —刃倾角； α_o —铣刀后角； k_r' —副偏角； β —铣刀螺旋角。

下面确定精铣时的铣削力，以加工碳钢为例，则取 $C_F=669$ ，圆柱铣刀直径取 $d=40\text{mm}$ ，铣削深度取 $\alpha_p=20\text{mm}$ ，铣刀齿数取 $Z=6$ ， $F_T/F_r=0.85$ 。

$$F_T = 669 * \alpha_c^{0.88} * \alpha_f^{0.72} * 40^{-0.88} * 20 * 6 = 3124.6 * \alpha_c^{0.88} * \alpha_f^{0.72} \quad (5-2)$$

$$F_r = F_T * 0.85 \quad (5-3)$$

当铣削宽度取 $\alpha_c=0.5\text{mm}$ ，每齿进给量取 $\alpha_f=0.05\text{mm}$ 。则求出切向力 $F_T=196.40\text{N}$ 和径向力 $F_r=166.94\text{N}$ 。

5.4.3 GUI 方式分析过程

第 1 步：指定分析标题并设置分析范畴

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Change Title。
2. 输入文字“Static analysis of a axis”，然后单击 OK。
3. 选取菜单 Main Menu>Preference。
4. 单击 Structure 选项使之为 ON，单击 OK。

第 2 步：定义单元类型

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。
2. Element Types 对话框出现。
3. 单击 Add。Library of Element Type 对话框出现。
4. 在左边的滚动框中单击“Structural Solid”。
5. 在右边的滚动框中单击“Quad 4node 42”。
6. 单击 Apply。
7. 在右边的滚动框中单击“Brick 8node 45”。
8. 单击 OK。
9. 单击 Element Type 对话框中的 Close 按钮。

第 3 步：指定材料性能

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，对话框出现，见图 5-13。

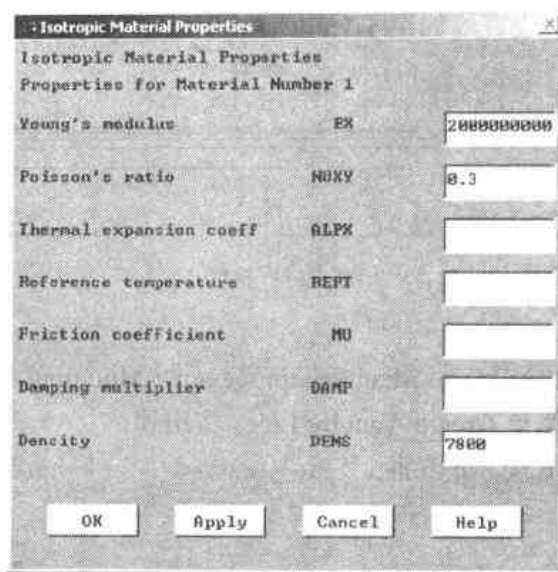


图 5-13 指定材料性能

2. 在对话框中分别单击 Isotropic 和 Density。分别输入 EX 为 200e9, DENS 为 7.8X10e3, NUXY 为 0.3。

第 4 步: 在给定的位置生成关键点

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>Keypoints>In Active CS。
2. 输入图 5-14 中的关键点。

NO.	X,Y,Z LOCATION	NO.	X,Y,Z LOCATION
1	0.000000 0.275000E-01 0.000000	21	0.300000 0.275000E-01 0.000000
2	0.000000 0.360000E-01 0.000000	22	0.300000 0.360000E-01 0.000000
3	0.200000E-01 0.275000E-01 0.000000	23	0.300000 0.400000E-01 0.000000
4	0.200000E-01 0.360000E-01 0.000000	24	0.300000 0.425000E-01 0.000000
5	0.200000E-01 0.400000E-01 0.000000	25	0.300000 0.437500E-01 0.000000
6	0.000000E-01 0.275000E-01 0.000000	26	0.300000 0.450000E-01 0.000000
7	0.000000E-01 0.360000E-01 0.000000	27	0.300000 0.650000E-01 0.000000
8	0.000000E-01 0.400000E-01 0.000000	28	0.342000 0.275000E-01 0.000000
9	0.000000E-01 0.425000E-01 0.000000	29	0.342000 0.360000E-01 0.000000
10	0.126000 0.275000E-01 0.000000	30	0.342000 0.400000E-01 0.000000
11	0.126000 0.360000E-01 0.000000	31	0.342000 0.425000E-01 0.000000
12	0.126000 0.400000E-01 0.000000	32	0.342000 0.437500E-01 0.000000
13	0.126000 0.425000E-01 0.000000	33	0.342000 0.450000E-01 0.000000
14	0.126000 0.437500E-01 0.000000	34	0.342000 0.650000E-01 0.000000
15	0.180000 0.275000E-01 0.000000	35	0.000000 0.000000 0.000000
16	0.180000 0.360000E-01 0.000000	36	0.342000 0.000000 0.000000
17	0.180000 0.400000E-01 0.000000		
18	0.180000 0.425000E-01 0.000000		
19	0.180000 0.437500E-01 0.000000		
20	0.180000 0.450000E-01 0.000000		

图 5-14 关键点

第 5 步: 在关键点间生成直线

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>-Lines-Lines>Straight Line。拾取 (Picking Menu) Create Straight Lines 将出现。

2. 在关键点间生成直线如图 5-15。

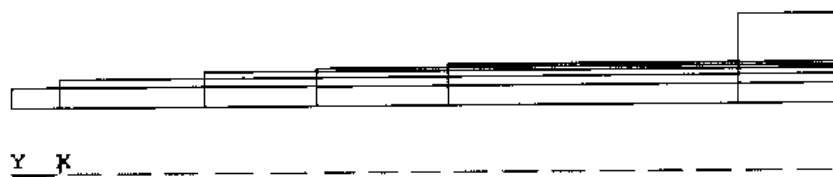


图 5-15 直线

第 6 步：生成截面

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>-Areas-Arbitrary>By Lines。拾取菜单 Create Area by Lines 将出现。
2. 生成如图 5-16 所示的截面。



图 5-16 截面

第 7 步：设置线被划分的段数，并进行网格划分

1. 采用手工划分，在轴向大概 20mm 一份，周向（围绕 X 轴的旋转方向）每 100 一份，径向主要根据台阶来划分，对实体模型进行离散，得到结构的有限元网格。这样可以使得扇形单元近似于 SOLID45，可以使得单元规则，同时限制单元的个数，从而提高计算机的计算速度和计算精度。
2. 选取菜单途径 Main Menu >Preprocessor >-Meshing-Size&Ctrls >-ManualSize-Line-PickedLines。如图 5-17 所示的 Element Size on Picked Lines 对话框将出现。

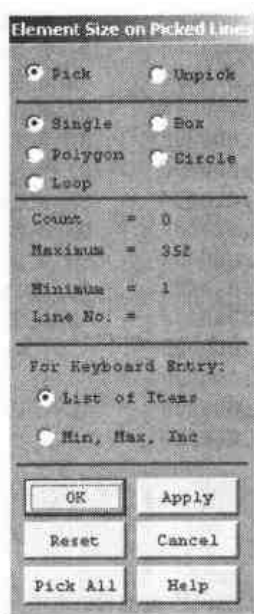


图 5-17 Element Size on Picked Lines 对话框

3. 在对应的直线上输入如图 5-18 所示的段数。
4. 选取菜单途径 Mail Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Areas-Free. Mesh Area 对话框出现。单击 Pick All。即可得到图 5-18 所示的网格图。

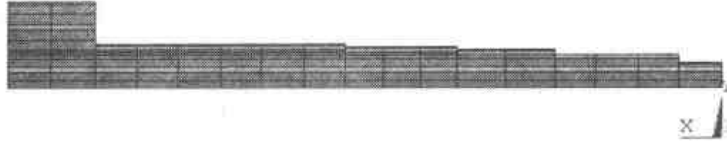


图 5-18 网格划分后的平面单元

第 8 步：将带网格的面旋转成带网格的体

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define Attributes. Meshing Attributes 对话框将出现。在 Element type number 中输入 2。

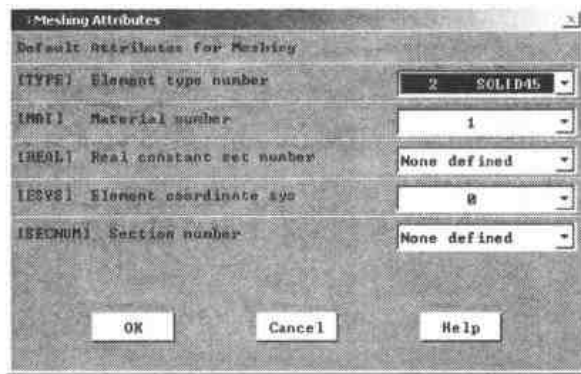


图 5-19 Meshing Attributes 对话框

2. 选取菜单途径 Mail Menu >Preprocessor >-Modeling-Operate >Extrude >-Areas-Around Axis。出现如图 5-20 所示的对话框。

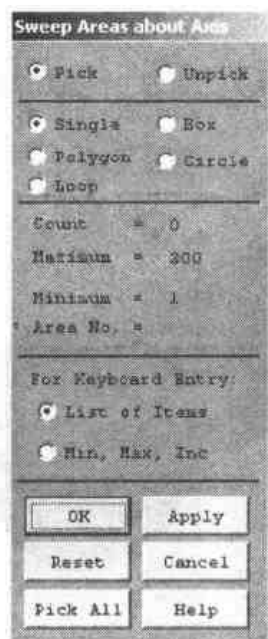


图 5-20 Sweep Areas about Axis 对话框

- 单击 Pick All 按钮，出现选择旋转轴的对话框，选择旋转轴。得到如图 5-21 所示的网格划分图。



图 5-21 网格划分图

第 9 步：对模型施加约束

- 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Applly>-Structural-Displacement>-On Nodes。拾取对话框 Apply U, ROT on Nodes 对话框出现。
- 为了根据实际结构情况尽量准确建模，将它简化为一端固定，一端滑动的简支梁支承结构。如图 5-22，距右端 79.2mm 的 B 处上直径为 90mm 的 16 个节点加上 UX、UY、UZ 三个约束，距左端 55mm 的 A 处上直径为 80mm 的 16 个节点加上 UY、UZ 两个约束。加约束后的网格图见图 5-23。

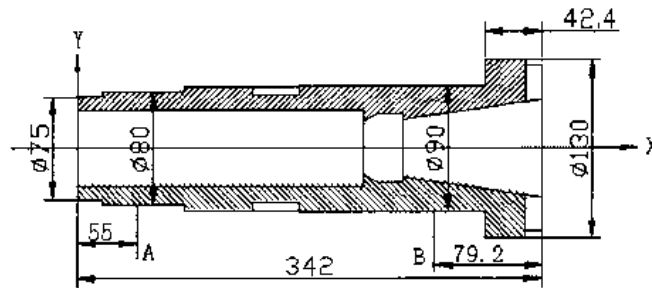
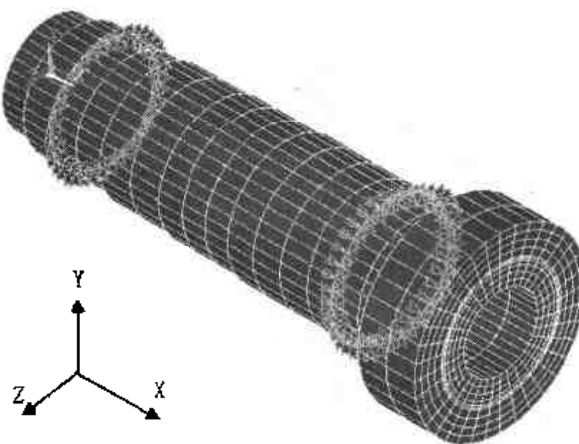


图 5-22 铣刀主轴的约束面



```

ANSYS 5.5.1
JUN 15 2000
08:58:59
ELEMENTS
TYPE NUM
U
XV =1
YV =1
ZV =1
DIST=.183567
XF =.171
Z-BUFFER
    
```

图 5-23 网格划分和加约束后的铣刀主轴

第 10 步：加载

在铣削主轴的大头加上径向力 $F_r=166.94\text{N}$ 。选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads->Apply>-Structure-Force/Moment>On nodes。选取加载的节点，见图 5-24。

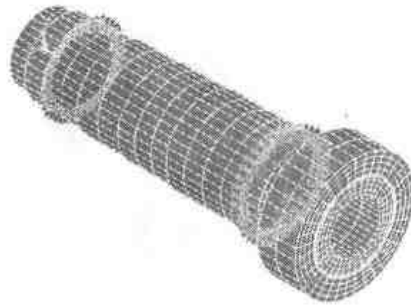


图 5-24 铣刀主轴的加载图

第 11 步：求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type- New Analysis...，选取 Static 项。
2. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。
3. 当“Solution is done”对话框出现，求解结束。

第 12 步：后处理

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu....，出现如图 5-25 所示的对话框。

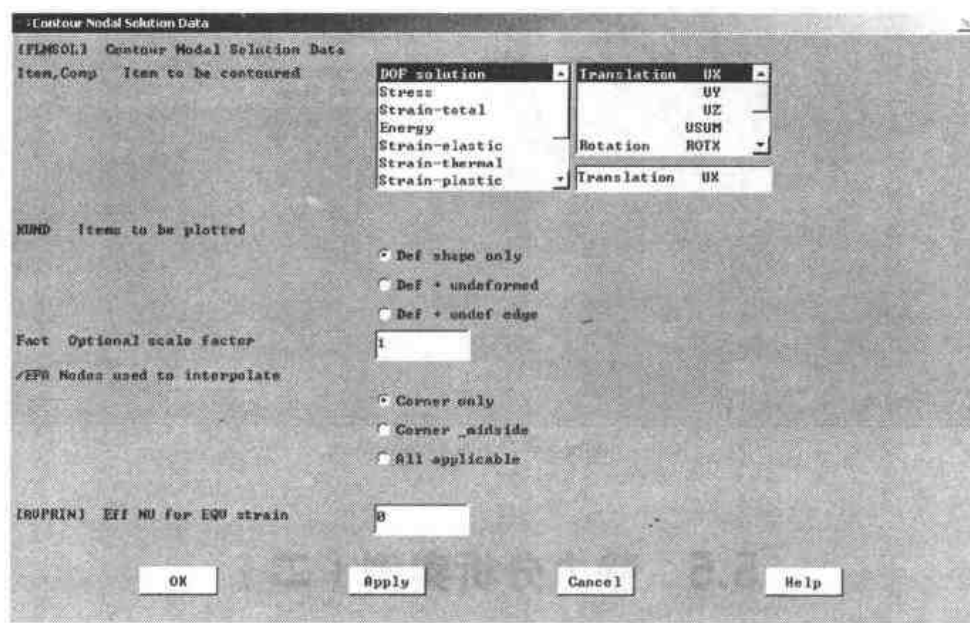


图 5-25 Contour Nodal Solution Data 对话框

2. 在 Contour Nodal Solution Data 对话框中选取 DOF solution 对应的 Translation UY，单击 OK。Y 方向的位移见图 5-26。

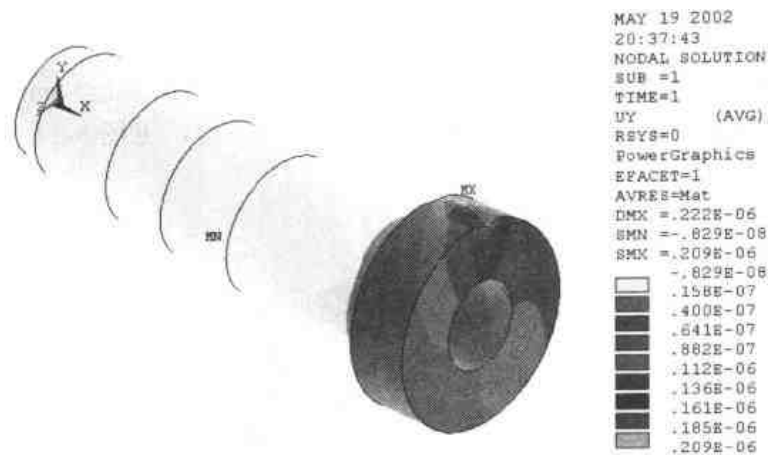


图 5-26 铣削主轴的 Y 方向的位移图

3. 也可以观看动画。选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。出现如图 5-27 所示的对话框。选择相应的选项，单击 OK，即可观看动画。

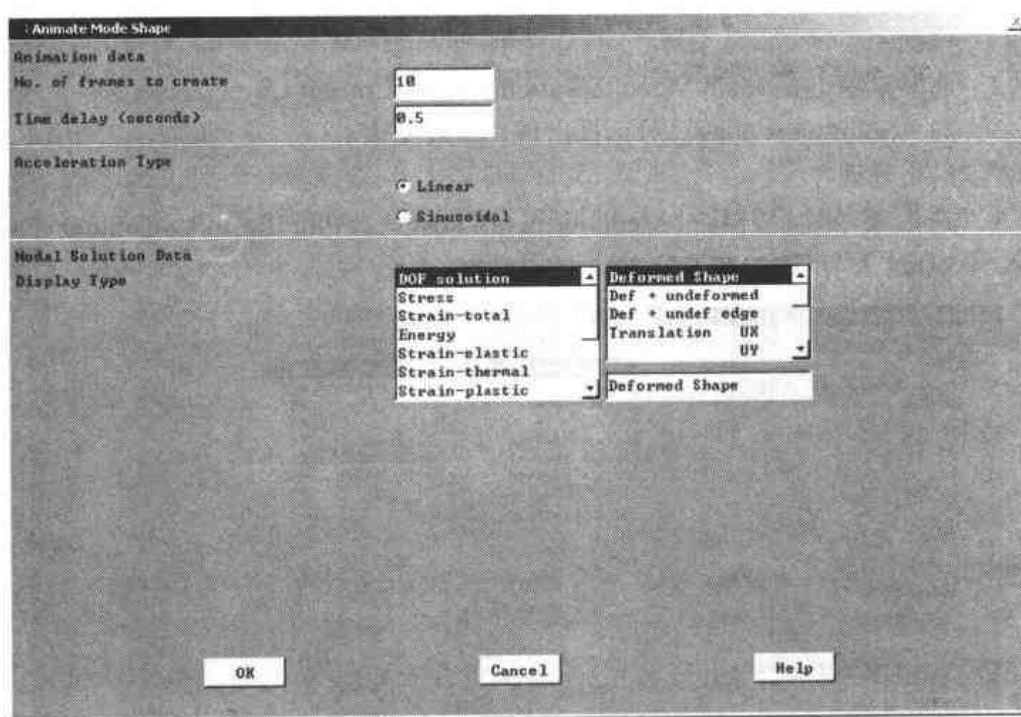


图 5-27 动画对话框

5.5 静力分析实例（二）

5.5.1 问题描述

下面对床身做静力学分析。床身是加工中心的基础件，要求具有较高的静、动刚度和精度保持性。床身设计受机床总体设计的制约，在满足总体设计要求的前提下，应尽可能做到

结构合理、肋板布置适当，又要保证良好的加工工艺性。

研究的对象是五轴加工中心的床身（4m×2m）。

相关参数：杨氏模量=200e9pa，泊松比=0.3，密度=7.8×10e3kg/m³。

5.5.2 GUI 方式分析过程

第1步：指定分析标题并设置分析范畴

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Chang Title。
2. 输入文字“Static analysis of a chuangshen”，然后单击 OK。
3. 选取菜单 Main Menu>Preference。
4. 单击 Structure 选项使其为 ON，单击 OK。

第2步：定义单元类型

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。
2. Element Types 对话框出现。
3. 单击 Add。Library of Element Type 对话框出现。
4. 在左边的滚动框中单击“Structural Solid”。
5. 在右边的滚动框中单击“Quad 4node 92”。
6. 单击 OK。

第3步：指定材料性能

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，对话框出现。
2. 在对话框中分别单击 Isotropic 和 Density。分别输入 EX 为 200e9，DENS 为 7.8X10c3，NUXY 为 0.3。

第4步：导入实体模型

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Import>Iges...，出现对话框。
2. 单击 OK。
3. 双击对应的 IGES 文件，单击 OK。
4. 实体模型见图 5-28。

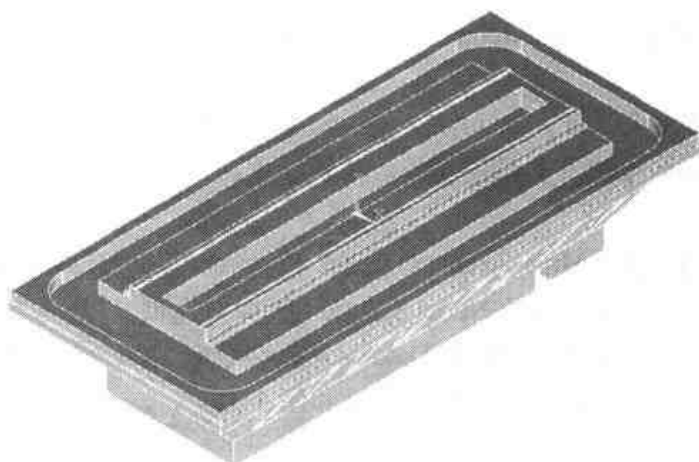


图 5-28 底座的实体模型图

第 5 步：指定网格划分密度并网格划分

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Ctrls> -SmartSize-Basic。
2. 在出现的对话框中选择 10 (Coarse)。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volume- Free。
4. 在出现的对话框中选择 Pick All, 单击 OK。

第 6 步：对模型施加约束

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply> -Structural -Displacement>-On Node。Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单将会出现。
2. 点中 BOX 选项, 选择节点, 单击 OK。
3. 单击 “All DOF”。

第 7 步：加载

在底座的中心头加上力 $F=100000\text{N}$ 。选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads->Apply>-Structure-Force/Moment>On nodes。选取加载的节点, 见图 5-29。

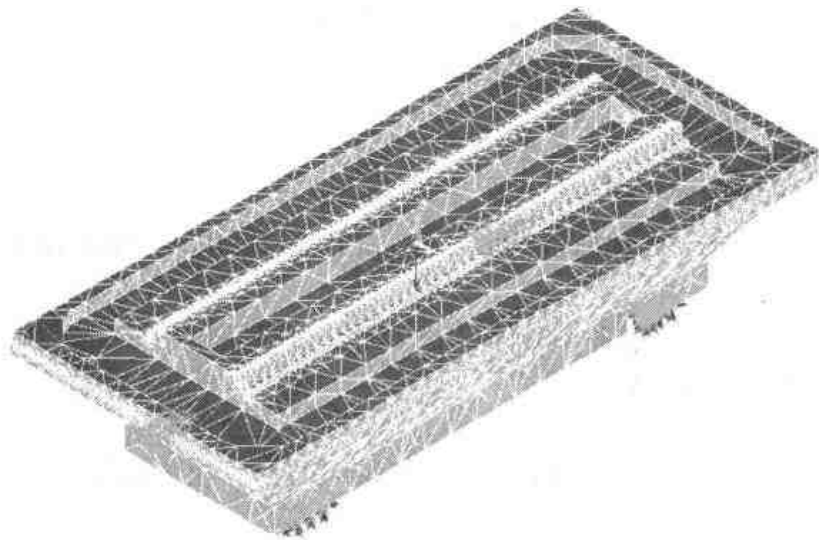


图 5-29 底座的有限元模型图

第 8 步：求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type- New Analysis..., 选择 Static 项。
2. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。
3. “Solution is done” 对话框出现, 求解结束。

第 9 步：后处理

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu..., 出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。
2. 在 Contour Nodal Solution Data 对话框中选取 DOF solution 对应的 Translation USUM, 单击 OK, 位移见图 5-30 和图 5-31。

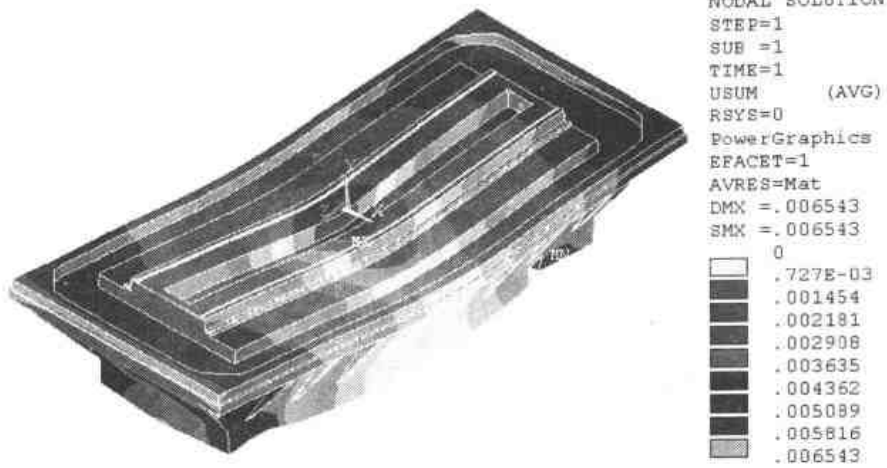


图 5-30 等效位移图

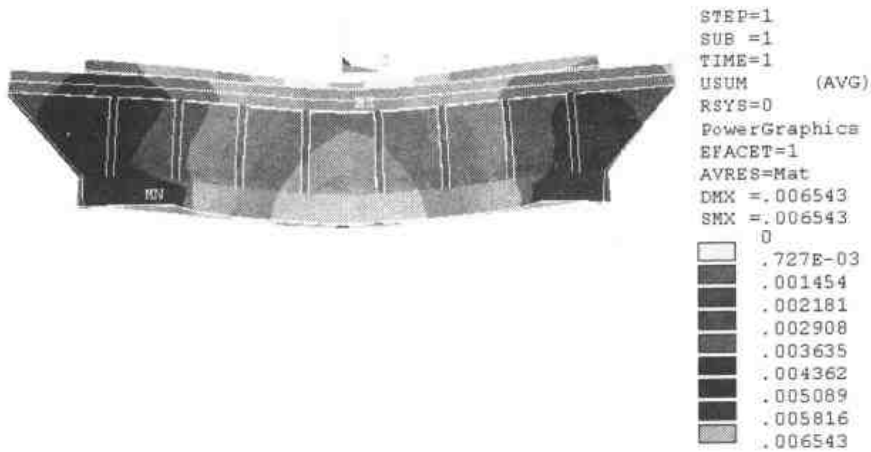


图 5-31 等效位移图

3. 也可以观看动画。选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。出现对话框。选择相应的选项，单击 OK，即可观看动画。

5.5.3 结果分析

从上面底座的等效位移图可以看出最大位移为 0.006mm，即 $6\mu\text{m}$ 。可以通过改进支承的位置，来减少变形量。

第 6 章

ANSYS 动力学分析

6.1 模态分析

6.1.1 模态分析简介

模态分析用于确定设计中的结构或机器部件的振动特性（固有频率和振型），也是瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析的起点。

模态分析过程由四个主要步骤组成：建模、加载及求解、扩展模态和检查结果。

6.1.2 建模

建模过程和其他类型的分析类似，但应注意以下两点：

(1) 在模态分析中只有线性行为是有效的。如果指定了非线性单元，将作为线性的单元来对待。

(2) 材料性质可以是线性的或非线性的、各向同性的或正交各向异性的、恒定的或和温度相关的。在模态分析中必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS。

6.1.3 加载及求解

(1) 指定分析类型和分析选项。用于模态分析的选项如表 6-1 所示。

表 6-1

选 项	命 令	GUI 途 径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis
Analysis Type: Modal	ANTYPE	Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis>Modal
Mode Extracion Method	MODOPT	Main Menu>Solution>-Analysis Options
Number of Modes to Extract	MODOPT	Main Menu>Solution>-Analysis Options
Number of Modes to Expand	MXPAND	Main Menu>Solution>-Analysis Options

(续上表)

选 项	命 令	GUI 途 径
Mass Matrix Formulation		Main Menu>Solution>-Analysis Options
Prestress Effects Calculation	PSTRES	Main Menu>Solution>-Analysis Options

选项: New Analysis: Modal[ANTYPE]

指定分析类型为模态分析。

选择下面列出的模态提取方法中的一种。

1) Subspace 法

Subspace (子空间) 法适用于大型对称特征值求解问题, 可以用几种求解控制选项来控制子空间迭代过程。

2) Block Lanczos 法

Block Lanczos (分块的兰索斯) 法适用于大型对称特征值求解问题。

3) Power Dynamics 法

Power Dynamics 法使用于非常大的模型 (100000 个自由度以上)。此法特别适合于只求解结构前几阶模态, 以了解结构将如何响应的情形, 选择适合的提取方法求最终的解。

4) Reduced Householder 法

Reduced 法比 Subspace 法快, 但此法的精度较底。

5) Unsymmetric 法

Unsymmetric 法用于系统矩阵为非对称矩阵的问题。

6) Damped 法

Damped 法用于阻尼不可忽略的问题。

在大多数分析过程中将选用 Subspace 法、Reduced Householder 法、Block Lanczos 法和 Power Dynamics 法。Unsymmetric 法和 Damped 法只在特殊情形下才会用到。

在指定某种模态提取方法后, ANSYS 会自动选择合适的方程求解。

选项: Number of Modes to Extract[MODEPT]

该选项对除 Reduced 法以外的所有模态提取方法都是必须设置的。

选项: Number of Modes to Expand[MXPAND]

此选项只在采用 Reduced 法、Unsymmetric 法和 Damped 法时设置。如果想得到单元求解结果, 不论采用何种模态提取方法都需要打开 “Calculate elem results” 项。

选项: Mass Matrix Formulation[LUMPM]

建议在大多数应用中采用缺省形成方式。使用该选项, 可以选定缺省的质量矩阵形成方式或者集中质量矩阵近似方式。

选项: Prestress Effects Calculation[PSTRES]

选用该选项可以计算有预应力结构的模态。

完成了模态分析选项 (Modal Analysis Option) 的定义后, 单击 OK, 一个相应于指定的模态提取方法的对话框将会出现。

域: FREQB, FREQE

指定模态提取的频率范围。

域: PRMODE

要输出的缩减模态数。

域: Nrmkey

关于振型归一化的设置。可选择是相对于质量矩阵 M 还是单位矩阵 I 进行归一化处理。如果准备在模态分析后进行谱分析, 应该选择相对于质量矩阵 M 进行归一化处理。

域: RIGID

用子空间迭代法提取已知有刚体运动结构的零频率模态。

域: SUBOPT

指定多种子空间迭代选项。

域: CEkey

用于指定处理约束方程的方法。可选的方法有 Direct elimination method(直接消去法), Lagrange multiplier (quick) method(快速拉格朗日乘法), Lagrange multiplier (accurate) method(精确拉格朗日乘法)。

(2) 定义主自由度。只有在采用 Reduced 模态提取法时有效。

主自由度 (MDOF) 指能描述结构动力学特性的“重要的”自由度。MDOF 选取的规则是选择至少是感兴趣的模态阶数的一倍数目的 MDOF。建议用命令 [M, MGEN] 根据对结构的动力学特性的了解定义可能多的 MDOF, 并用命令 [TOTAL] 让程序按照刚度 / 质量比选取一些附加的主自由度。用命令 [MLIST] 可以列出定义的 MDOF, 用命令 [MDELE] 可以删除无关的 MDOF。

Command: M

GUI: Main Menu>Solution>Master DOFs>-User Selected-Define

(3) 在模型上加载。在典型的模态分析中唯一有效的“载荷”是零位移约束。如果在某个 DOF 处指定了一个非零位移约束, 程序将以零位移约束替代在该 DOF 处的设置。载荷可以加在实体模型上或加在有限元模型上。

在分析过程中, 可以施加、删除载荷或进行载荷列表、载荷间计算。表 6-2 列出了在模态分析中可以用来加载的命令, 每个命令均通过一系列下拉菜单选取, 如在一条直线上加载用 GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement>On Lines。

表 6-2 模态分析中的加载命令

载荷方式	实体或 FE 模型	图素	施加	删除	列表	运算	加载设置
Displacement	实体模型	关键点	DK	DKDELE	DKLIST	DTRAN	
	实体模型	线	DL	DLDELE	DLLIST	DTRAN	
{ }	实体模型	面	DA	DADELE	DALIST	DTRAN	
	FE 模型	节点	D	DDELE	DLIST	DSCALE	DSYM DCUM

(4) 指定载荷步选项。表 6-3 列出了在模态分析中可用的载荷选项。

表 6-3 载荷步选项

选 项	命 令	GUI 途 径
阻尼选项	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
	恒定阻尼比	DMPART Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Damping
	材料阻尼比	MP,DAMP Main Menu>Solution>-Load Step Opts-other>Change Mat Props>-Temp Dependent-Polynomial
输出控制选项	OUTPR	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrl>Solu Printout

(5) 将数据备份。

(6) 开始求解计算。

Command: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current Ls

求解器的输出内容主要是固有频率,固有频率被写到输出文件 Jobname.OUT 及振型文件 Jobname.MODE 中。

(7) 退出求解器。

6.1.4 扩展模态

若在 POST1 中观察结果,必须先扩展振型,即将振型写入结果文件。扩展时振型文件 Jobname.MODE、文件 Jobname.EMAT、文件 Jobname.ESAV 及文件 Jobname.TRI (如果采用 Reduced 法)必须存在,而且数据库中必须包含和解算模态时所用模型相同的分析模型,其步骤如下:

(1) 再次进入 ANSYS 求解器。在扩展处理前必须明确地离开 SOLUTION 并重新进入 SOLUTION。

(2) 激活扩展处理及相关选项。ANSYS 提供的扩展处理选项如表 6-4 所示。

表 6-4 扩展处理选项

选 项	命 令	GUI 途 径
Expansion Pass On/Off	EXPASS	Main Menu>Solution>-Analysis Type-ExpansionPass
Number of Modes to Expand	MXPAND	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes
Freq.Range for Expansion	MXPAND	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes
Stress Calc.On/Off	MXPAND	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes

选项: Expansion Pass On/Off [EXPASS]

选择 ON (打开)。

选项: Number of Modes to Expand [MXPAND, NMODE]

指定要扩展的模态。

选项: Frequency Range for Expansion [MXPAND, FREQB, FREQE]

该选项是另外一种控制要扩展的模态数的方法。如果指定了一个频率范围,那么只有指定的频率范围内的模态会被扩展。

选项: Stress Calculations On/Off [MXPAND, ELCALC]

谱分析时,要对谱的应力和力计算时,应该打开该选项。缺省为不计算应力。

(3) 指定载荷选项。模态扩展处理中唯一有效的选项是输出控制。

1) Printed Output

此选项用来设置在输出文件中包含所有的结果数据。

Command: OUTPR

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>Solu Printout

2) Database and results file output

该选项用来控制结果文件中包含的数据。

Command: OUTPR

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>DB/Results File

(4) 开始扩展处理。

扩展的输出包括已扩展的振型,而且还可以要求包含各阶模态的相对应力分布。

Command: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>Current LS

(5) 如须扩展另外的模态(如不同频率范围的模态),请重复步骤(2)、(3)和(4)。每一次扩展处理在结果文件中存储为单独的载荷。

(6) 退出 SOLUTION。

6.1.5 观察结果

模态分析的结果(即模态扩展处理的结果)被写入到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。结果包括:固有频率、已扩展的振型和相应的应力分布。

在 POST1 即普通后处理中观察模态分析的结果。

(1) 观察结果数据

1) 读入合适子步的结果数据。每阶模态在结果文件中被存为一个单独的子步,比如扩展了5阶模态,结果文件中将有由5个子步组成的一个载荷步。

Command: SET, SBSTEP

GUI: Main Menu>General Postproc>-Read Results-substep

2) 执行想做的 POST1 操作。常见的模态分析 POST1 操作如下:

选项: Listing All Frequencies 用于列出所有已扩展模态对应的频率。

Command: SET, LIST

GUI: Main Menu>General Postproc>-List Results>Results Summary

选项: Display Deformed Shape

Command: PLDISP

GUI: Main Menu>General Postproc>-Plot Results>Deformed Shape

用 PLDISP 命令的 KUND 域可以设置将未变形的形状迭加在显示结果中。

选项: List Master DOF

Command: MLIST, ALL

GUI: Main Menu>Solution>Master DOFs>List ALL

选项: Line Element Results

Command: ETABLE

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table

对线单元、梁和管子, 可以用 ETABLE 命令获得数据。

选项: Contour Displays

Command: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu 或 Element Solu

也可以绘制单元表数据和线单元数据的等值线:

Command: PLETAB, PLIS

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot Element Table

Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot-Line Elem Res

选项: Tabular Listings

Command: PRNSOL, PRESOL, PRRSOL

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>Solution Option

Main Menu>General Postproc> List Results >-Stored Listing-Sort Nodes 或 Sort Elems

用 NSOPT 和 ESORT 命令可在列表之前对数据进行排序。

(2) 其他功能

许多其他的后处理功能, 如将结果映象到一个路径上、加载工况间的组合等, 在 POST1 中均可使用。

6.2 模态分析实例(一)

6.2.1 引言

数控铣床日益向高速度、高刚度的方向发展, 要使高速铣头安全可靠地工作, 保证所加工零件的高精度, 高速铣头就必须具有良好的动态特性。因此, 必须对高速铣头进行动力学研究。虚拟动力学研究是一种先进的新方法, 具有其他方法无法比拟的优点, 如节省投资、缩短产品开发周期等。高速铣头的虚拟动力学研究包含两个方面: 固有振动特性分析和响应特性分析。所谓固有振动特性分析, 本文是通过研究无阻尼的自由振动, 得到振动系统的固有特性, 即固有频率和振型及振动应力。响应特性分析是用于确定结构在承受随时间按正弦

规律变化的载荷时的稳态响应，目的是计算出结构的动力响应，并得到响应位移和响应应力。

下面以数控自动万能铣头为例，进行虚拟动力学研究。见图 5-10，该数控自动万能铣头的关键的轴类零件为三根轴。本章将对图中的复合支承部分中的主轴进行固有振动特性研究。所有这些工作都是应用 ANSYS 通用有限元分析软件，在 Windows 2000 操作系统下完成的。ANSYS 建模首先要确定合适的单元类型，下面结合具体单元阐述三维有限元的基本理论。

6.2.2 三维有限元的基本理论

对主轴均选用 SOLID45 单元进行离散分网，此单元是分析弹性结构空间问题中应用较广的一种元素。由于采用了八节点的单元，那就能利用更复杂的形状函数，并因而达到结构对实际变形的一个更好程度的表达，计算精度较高。SOLID45 单元是三维 8 节点等参元，所谓三维 8 节点等参元是指 8 个节点的六面体的等参基本单元（图 6-1a）映射成 8 节点的等参实际单元（图 6-1b）。

在映射过程中，位移函数和描述几何形状坐标变换式取相同的形状函数，且节点数相同。将它的局部坐标的原点取在单元的形心上，由于坐标轴的方向与直角坐标方向是一致的，故局部坐标与直角坐标的关系为：

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{a}(x - x_0) & x_0 &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_i \\ \eta &= \frac{1}{b}(y - y_0) & y_0 &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 y_i \\ \zeta &= \frac{1}{c}(z - z_0) & z_0 &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 z_i \end{aligned} \quad (6-1)$$

其中 2a、2b、2c 分别表示六面体的边长，相对节点编号为 1、2、3、...8。

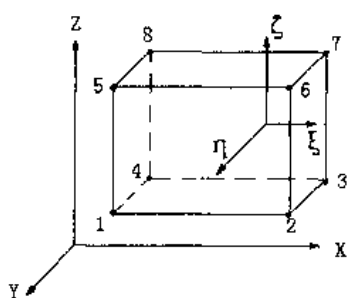


图 6-1a 等参基本单元

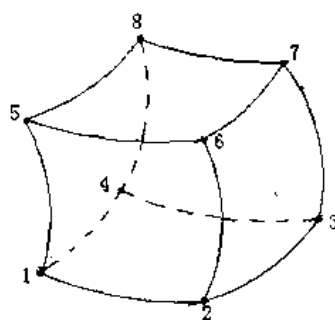


图 6-1b 等参实际单元

图 6-1 三维 8 节点等参元

利用节点位移分量进行函数插值，在局部坐标系中构造单元的位移函数。单元中任意一点的位移可用节点位移表示如下：

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) u_i \\ v &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) v_i \\ w &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) w_i \end{aligned} \right\} \quad (6-2)$$

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (6-3)$$

其中, ξ_i, η_i, ζ_i 表示节点 i 的局部坐标, $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ 是形状函数, 是局部坐标的函数。形函数矩阵为:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

坐标变换式为:

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i \\ y &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i \\ z &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i \end{aligned} \right\} \quad (6-5)$$

式中的 x_i, y_i, z_i 分别是 i 节点的坐标在 x, y, z 方向的分量。

应变与位移关系的表达式为:

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yx} \\ \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

将 (6-3) 式代入 (6-5) 式中, 简写成

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (6-7)$$

式中 $\{\delta\}^e = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \dots \quad u_8 \quad v_8 \quad w_8]^T$ 表示单元的节点位移值。

几何矩阵 $[B] = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_8]$, 其中:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}^T \quad (i=1,2,\dots,8) \quad (6-8)$$

应力与应变之间的关系为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\} \quad (6-9)$$

式中,

$\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]^T$ 表示应力列阵

$\{\varepsilon_0\} = [\varepsilon_{x0} \ \varepsilon_{y0} \ \varepsilon_{z0} \ \gamma_{xy0} \ \gamma_{yz0} \ \gamma_{zx0}]^T$ 表示初应变列阵

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix} \quad \text{表示弹性矩阵} \quad (6-10)$$

$$[D_1] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\nu & \lambda & \lambda \\ \lambda & \lambda + 2\nu & \lambda \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\nu \end{bmatrix} \quad [D_2] = \begin{bmatrix} \nu & 0 & 0 \\ 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

$$\text{其中: } \lambda = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad \nu = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比。

单元刚度矩阵的表达式为:

$$[k]^e = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dV = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (6-12)$$

式中 $|J|$ 是三维雅可比行列式。 J 称为三维的雅可比矩阵, 它表示总体坐标与局部坐标之间的关系。

上面已经将结构离散成若干个形状简单的 SOLID45 单元, 通过单元分析, 建立联系应变与节点位移分量的方程和联系应力与节点位移分量的方程, 同时研究了单元的节点力与节点位移之间的关系。在 ANSYS 软件中, 进行整体分析, 利用平衡条件和连续条件, 将各个单元拼装成整体结构。

6.2.3 结构材料性能参数

主轴的结构简图见图 6-2。

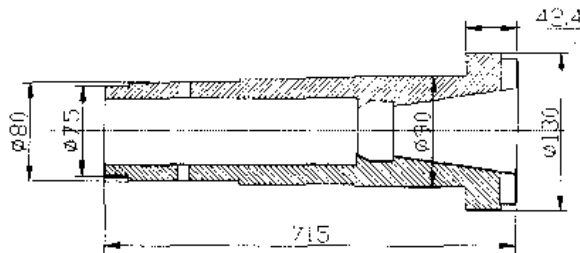


图 6-2 主轴结构简图

主轴采用 40Cr 钢。40Cr 钢是机械制造业使用最广的钢种之一，经调质后具有良好的综合力学性能，它的切削加工性和淬透性尚好，经碳氮共渗和高频淬火后，可作受载荷较大及要求耐磨又不受很大冲击的零件。三根轴的材料系数为：杨氏模量 $E=210 \times 10^9 \text{ pa}$ ，密度 $\rho=7820 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu=0.3$ 。

6.2.4 结构的建模和分网

有限元分析的最终目的是要还原一个实际工程系统的数学行为特征，换句话说分析必须是针对一个物理原型的准确的数学模型。广义上讲，模型包括所有的节点、单元、材料属性、边界条件，以及其他用来表现这个物理系统的特征。在 ANSYS 术语中，模型生成一般狭义地指用节点和单元表示空间体域及实际系统连接的生成过程。

通常的 ANSYS 建模过程应该遵循以下要点：

- (1) 开始确定分析方案。在开始进入 ANSYS 之前，首先确定分析目标，决定模型采取什么样的基本形式，选择合适的单元类型，并考虑如何能建立适当的网格密度。
- (2) 进入前处理 (PREP7) 开始建立模型。多数情况下，将利用实体建模创建模型。
- (3) 利用几何元素和布尔运算操作生成基本的几何形状。
- (4) 用布尔运算将各个独立的实体模型域适当地连接在一起。
- (5) 设置网格划分控制以建立想要的网格密度。网格划分密度很重要，如果网格过于粗糙，那么结果可能包含严重的错误，如果网格过于细致，将花费过多的计算时间，浪费计算机资源，而且模型可能过大以致于不能在你的计算机系统上运行，为避免这类问题的出现，在生成模型前应当考虑网格密度问题。
- (6) 通过对实体模型划分网格来生成节点和单元。
- (7) 存储模型数据。
- (8) 退出前处理。

根据上述步骤对主轴进行有限元建模。它的结构具有如下特点：它的轴端装铣刀；它的下端装有三个轴承，它的上端装有两个轴承。

在 ANSYS 软件提供的前处理模块里建立实体模型。GUI 方式分析过程如下：

第 1 步：指定分析标题并设置分析范畴

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Chang Title。
2. 输入文字“Modal analysis of a axis”，然后单击 OK。
3. 选取菜单 Main Menu>Preference。
4. 单击 Structure 选项使其为 ON，单击 OK。

第2步：定义单元类型

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。
2. Element Types 对话框出现。
3. 单击 Add。Library of Element Type 对话框出现。
4. 在左边的滚动框中单击“Structural Solid”。
5. 在右边的滚动框中单击“Quad 4node 42”。
6. 单击 Apply。
7. 在右边的滚动框中单击“Brick 8node 45”。
8. 单击 OK。
9. 单击 Element Type 对话框中的 Close 按钮。

第3步：指定材料性能

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，对话框出现，见图 6-3。

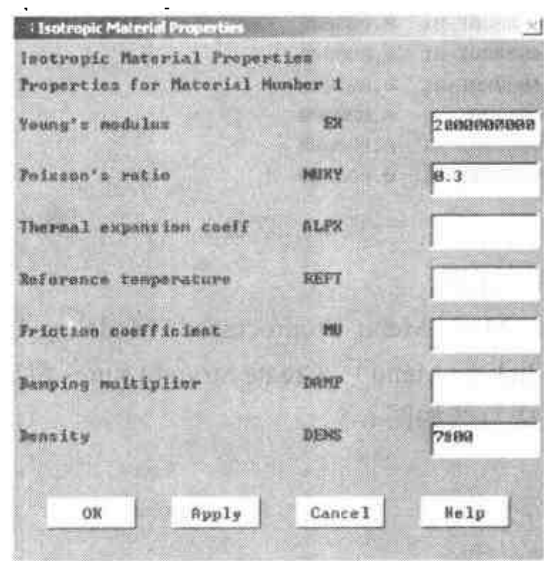


图 6-3 指定材料性能

2. 在对话框中分别单击 Isotropic 和 Density，分别输入 EX 为 200e9，DENS 为 7.8 × 10e3，NUXY 为 0.3。

第4步：在给定的位置生成关键点

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>Keypoints>In Active CS。
2. 输入图 6-4 中的关键点。

第7步：设置线被划分的段数，并进行网格划分

1. 采用手工划分，在轴向大概 20mm 一份，周向（围绕 X 轴的旋转方向）每 100 一份，径向主要根据台阶来划分，对实体模型进行离散，得到结构的有限元网格。这样可以使得扇形单元近似于 SOLID45，可以使得单元规则同时限制单元的个数，从而提高计算机的计算速度和计算精度。
2. 选取菜单途径 Main Menu > Preprocessor > -Meshing-Size&Ctrls > -Manual Size-Line-Picked Lines。如图 6-7 所示的 Element Size on Picked Lines 对话框将出现。

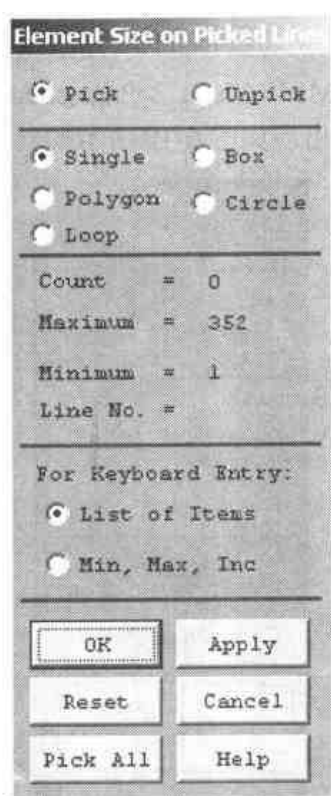


图 6-7 Element Size on Picked Lines 对话框

3. 在对应的直线上输入如图 6-8 所示的段数。
4. 选取菜单途径 Mail Menu > Preprocessor > -Meshing-Mesh > -Areas-Free。Mesh Area 对话框出现。单击 Pick All。即可得到图 6-8 所示的网格图。



图 6-8 网格划分后的平面单元

第8步：将带网格的面旋转成带网格的体

1. 选取菜单途径 Main Menu > Preprocessor > -Attributes-Define Attributes。Meshing Attributes 对话框将出现。在 Element type number 输入 2。

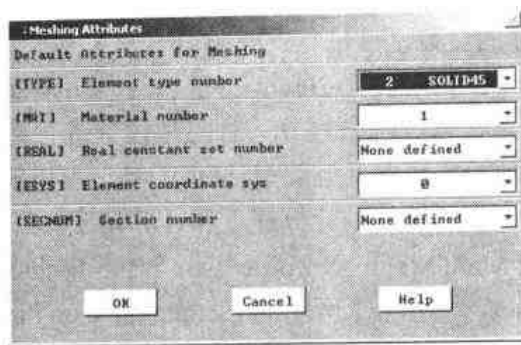


图 6-9 Meshing Attributes 对话框

2. 选取菜单途径 Mail Menu >Preprocessor >Modeling-Operate >Extrude >-Areas-About Axis。出现如图 6-10 所示的对话框。

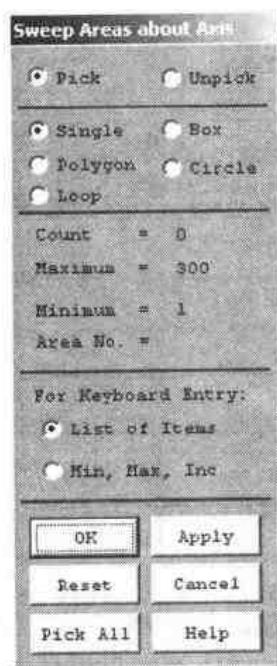


图 6-10 Sweep Areas about Axis 对话框

3. 单击 Pick All 按钮，出现选择旋转轴的对话框，选择旋转轴。得到如图 6-11 所示的网格划分图。

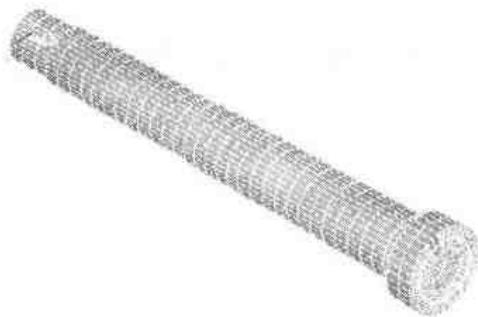


图 6-11 网格划分图

6.2.5 加载及求解

为了根据实际结构情况尽量准确建模，将它简化为一端固定，一端滑动的简支梁支承结构。

GUI 方式分析过程如下：

第 1 步：进入求解器并指定分析类型和选项

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。New Analysis 对话框出现，如图 6-12。

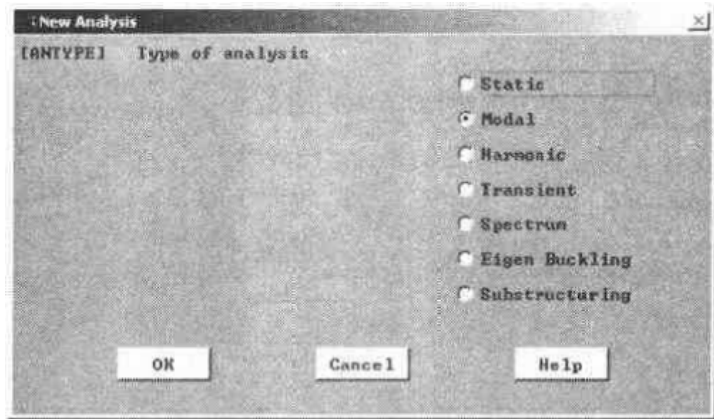


图 6-12 New Analysis 对话框

2. 选中 Modal，然后单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Options, Modal Analysis 对话框将出现，如图 6-13。

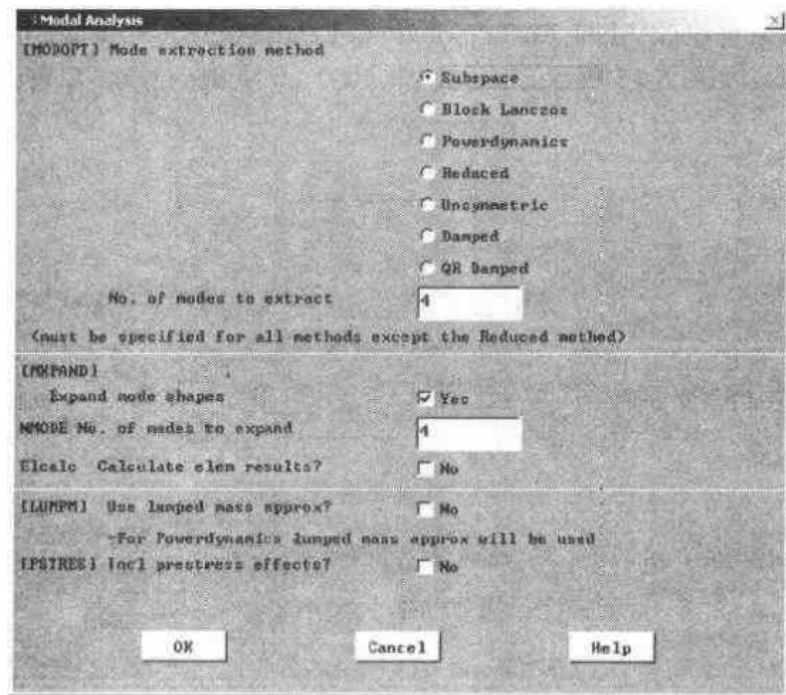


图 6-13 Modal Analysis 对话框

4. 选中 Subspace 模态提取法。
5. 在 No. of modes to extract 处输入 4。
6. 单击 OK，Subspace Modal Analysis 对话框将出现，如图 6-14。

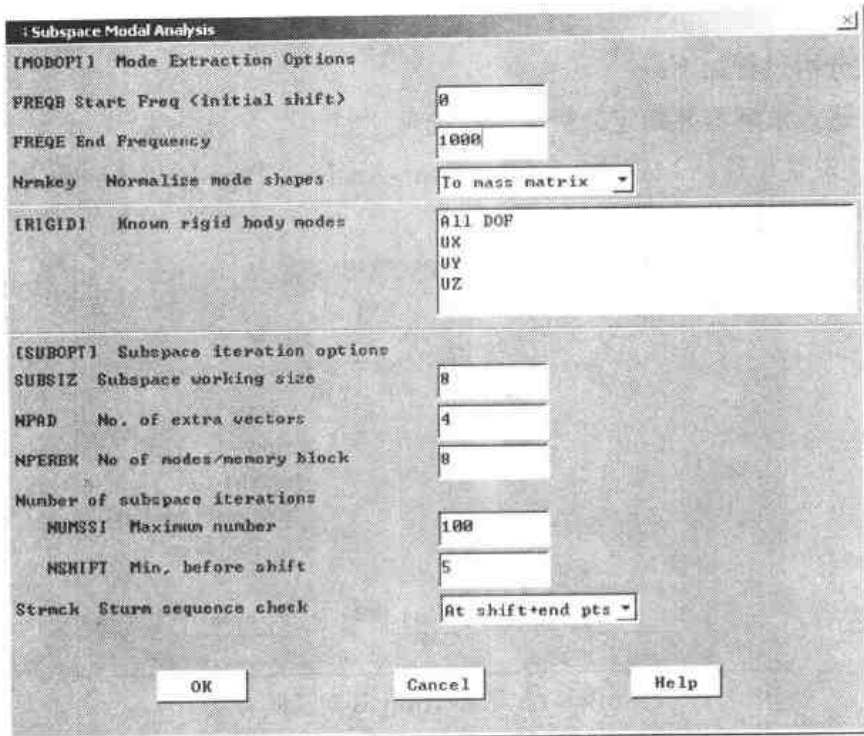


图 6-14 Subspace Modal Analysis 对话框

7. 单击 OK 接收缺省值。

第 2 步：对模型施加约束

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement>-On Node。如图 6-15 所示的 Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单将会出现。

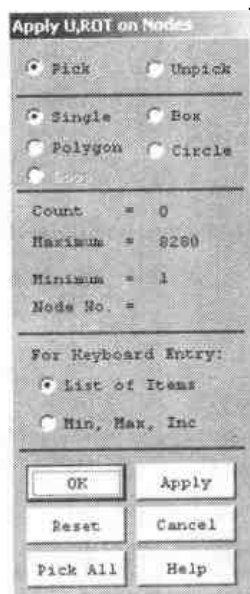


图 6-15 Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单

2. 点中 BOX 选项, 选择轴承处的节点, 单击 OK。
3. 单击“All DOF”。
4. 加约束后的模型图见图 6-16。

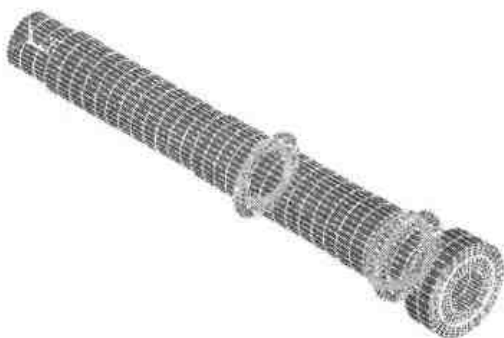


图 6-16 加约束后的模型图

第 3 步: 指定要扩展的模态数并求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes。如图 6-17 所示的 Expand Modes 对话框将出现。

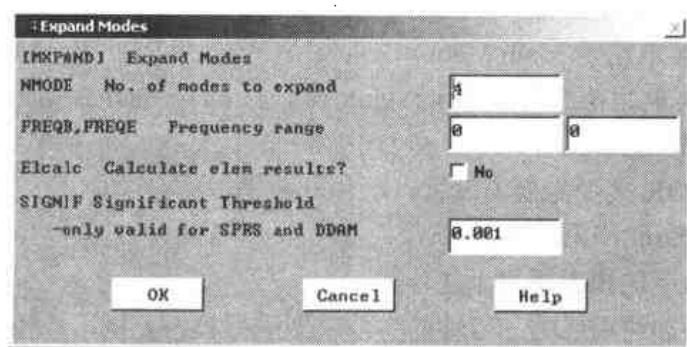


图 6-17 Expand Modes 对话框

2. 在 No. of modes to expand 处输入 4, 单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。浏览出现的信息, 然后关闭该对话框。
4. 单击 OK。
5. 在出现两次警告时, 都单击“Yes”。
6. 求解过程结束后, 单击 Close。

第 4 步: 列出固有频率

选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Results Summary。浏览对话框中的信息, 然后用 File>Close 关闭对话框。

第 5 步: 观察解的四阶模态

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-First Set。
2. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。如图 6-18 所示的 Animate Mode Shape 对话框将出现。

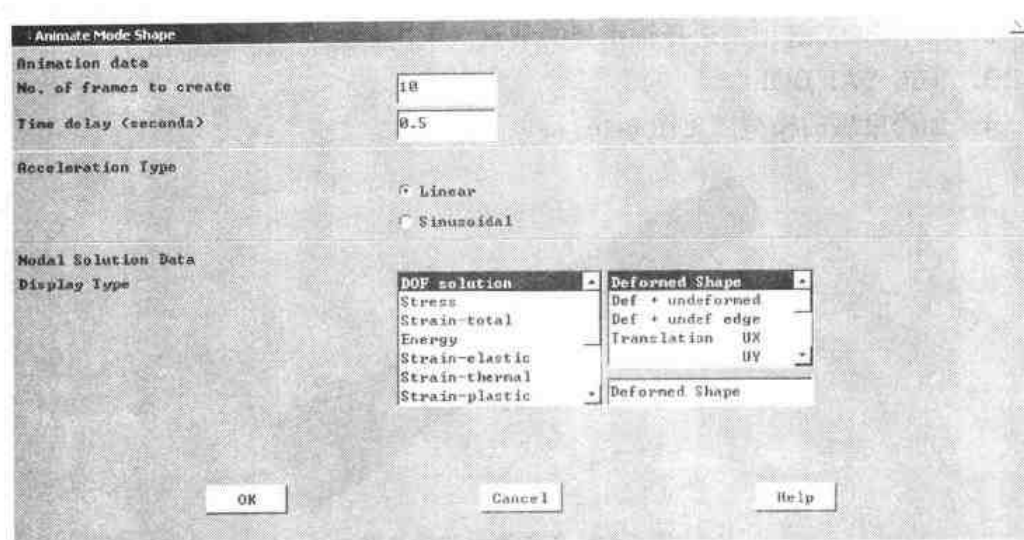


图 6-18 Animate Mode Shape 对话框

3. 在 Time delay 处输入 0.5，该单位为秒。
4. 单击 OK，Animation Controller 对话框将会出现，动画开始播放。
5. 单击 Stop 停止动画播放。
6. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-Next Set。
7. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape 对话框将出现。
8. 单击 OK 接受先前的设置，动画开始播放。
9. 单击 Stop 停止动画播放。
10. 对余下的模态重复上述步骤。

对网格划分和加约束后的三号轴的实体模型进行模态分析，该模态分析使用 ANSYS 的求解模块，使用 Subspace 法，也就是子空间迭代法。子空间迭代法是近年发展起来的求解广义特征值问题的有效方法。它的特点是能充分利用[K]及[M]的稀疏带状性质而且能在一次求出前几个模最大的广义特征值和对应的特征向量。在求解大型结构的少数特征对时，子空间迭代法是很有效的方法。

求出主轴的前四阶固有频率为：398.47Hz、398.47Hz、2132.9Hz、2132.9Hz。三号轴的固有频率和振型见表 6-5。从软件显示的动画，可以看出，一阶固有频率和二阶固有频率分别为 Y 方向和 Z 方向的一弯，三阶固有频率和四阶固有频率分别为 Y 方向和 Z 方向的两弯，对应的振型分别见图 6-19、图 6-20、图 6-21 和图 6-22。

表 6-5 三号轴的固有振动频率(Hz) 和振型

阶次	1	2	3	4
频率	398.47	398.47	2132.9	2132.9
振型	一弯	一弯	二弯	二弯

由表 6-5 可以看出三号轴的前两阶固有振动频率相等，而且它们的振型也表现为正交，因此可将其视为重根。

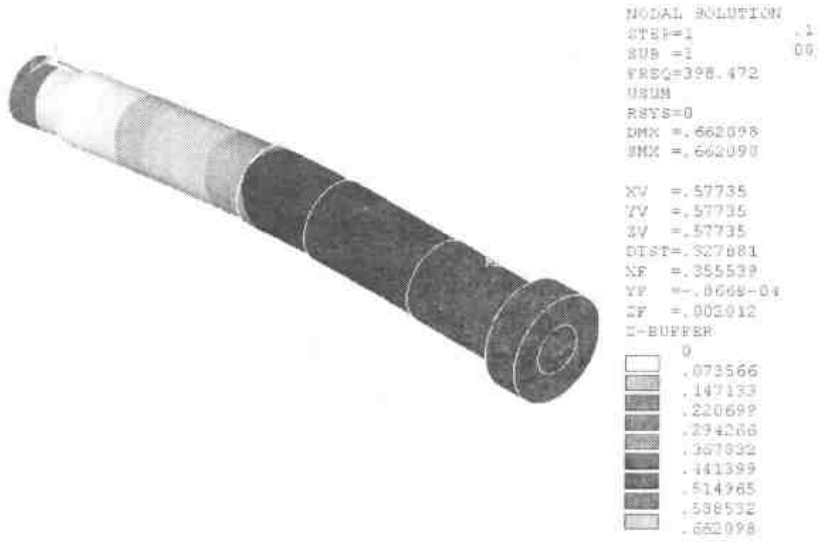


图 6-19 固有振动频率为 398.47Hz 时的振型

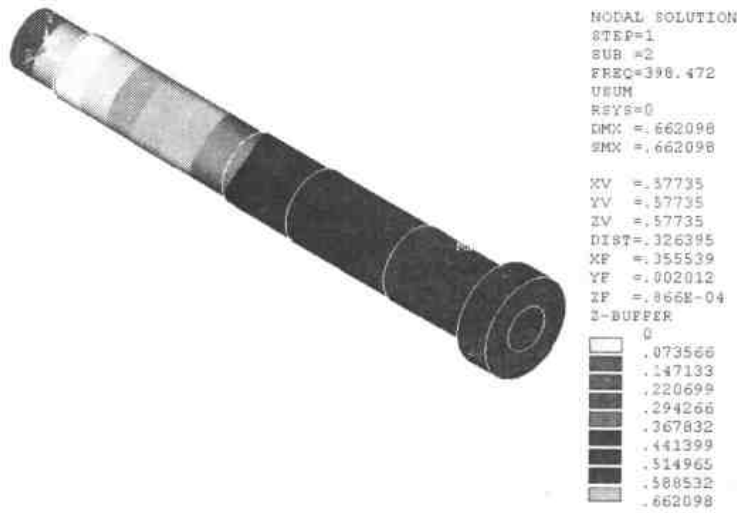


图 6-20 固有振动频率为 398.47Hz 时的振型

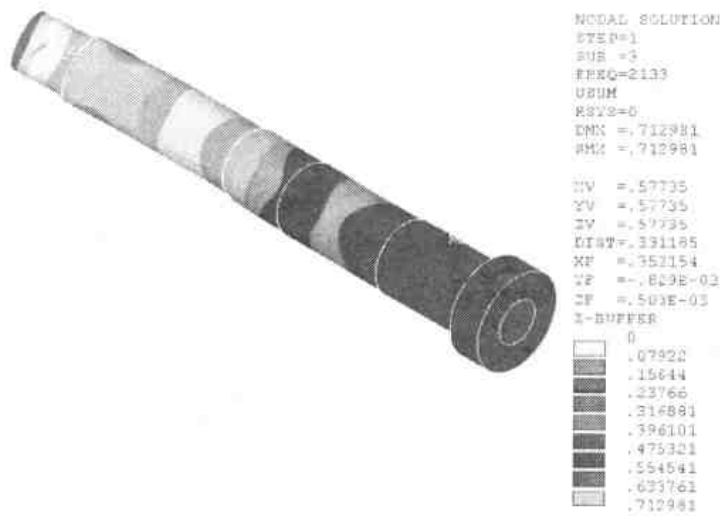


图 6-21 固有振动频率为 2132.9Hz 时的振型

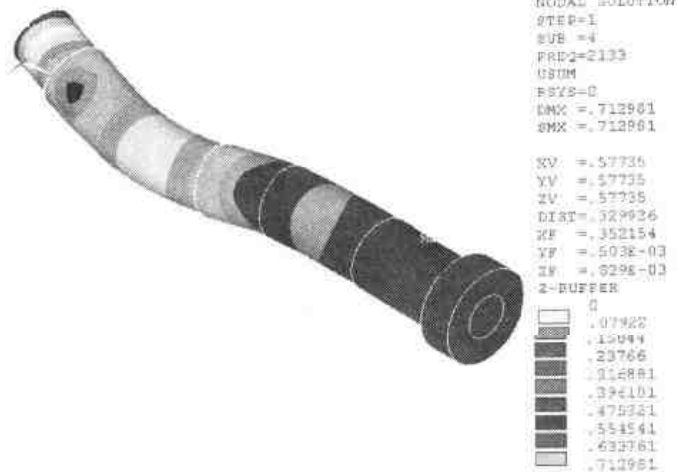


图 6-22 固有振动频率为 2132.9Hz 时的振型

6.2.6 临界转速分析

下面讨论光轴的临界转速。

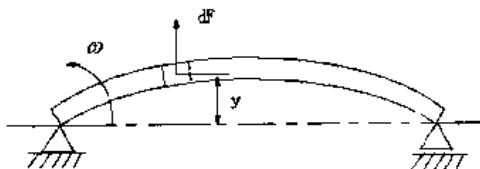


图 6-23 光轴微元段的受力情况

如图 6-23，光轴旋转时，在某一微元段上的离心力为 $m_1 y \omega^2 dx$ (m_1 为单位轴长度的质量， y 为该微元段处的挠度)。把离心力作为分布载荷 q ，则由材料力学知：

$$\frac{d^2}{dx^2} (EJ \frac{d^2 y}{dx^2}) = q = m_1 \omega^2 y \quad (6-13)$$

对于等截面的均质轴， EJ 为常数，故得：

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{m_1 \omega^2}{EJ} y = a^4 y \quad (6-14)$$

其中 $a^4 = \frac{m_1 \omega^2}{EJ}$ ，上面方程的解有两类：(1) $y=0$ ，即在任何转速下无挠度；(2) 在特定转速下，其挠度可为任意值，但各点的挠度之间有一定的关系，既形成一条弹性线。这个特定转速就是临界转速。可求出一系列的临界转速值为：

$$\omega_c = a^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_1}} = \frac{(al)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJg}{Ay}} \quad (6-15)$$

此处， $al = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$ ， A 为轴横截面面积， γ 为材料密度。

当轴以临界转速旋转时，轴的挠度将达到最大值，到达“临界”状态，轴将强烈振动，导致轴寿命的下降，甚至破坏轴。

对于等截面简支梁，其横向振动的固有频率与轴旋转状态下的临界转速值是相同的，尽管其物理模态不同。在结构上，主轴与理想的等截面简支梁有一定的差别。这里将主轴近似为等截面简支梁，这将使得算出的临界转速偏高。

下面分析主轴的临界转速。转速和频率的关系为：

$$n=60*f \quad (6-16)$$

其中， n 为转速（转/分）， f 为频率（Hz），即每秒振动的次数。将主轴的固有频率转化为临界转速，见表 6-6。

表 6-6 主轴的临界转速

阶次	1	2	3	4
频率	398.47	398.47	2132.9	2132.9
临界转速(rpm)	23908.2	23908.2	106674	106674

主轴的工作转速都为 6000rpm。由表 6-6 可以看出，三根轴的工作转速均大大低于临界转速。

6.3 模态分析实例(二)

6.3.1 引言

上面对主轴（复合支承部分的主轴）进行固有振动特性分析时，将主轴简化为支承在刚性的支承上，但根据实际结构情况，主轴轴的支承并非刚性的，而应该考虑中间轴套的弹性影响。

为了对主轴在数控自动万能铣头中的位置和功能有一个深刻的了解，下面结合数控自动万能铣头作实际的介绍。

数控自动万能铣头的简图见图 5-10，其结构分为两部分，即 I 部分和 II 部分。I 部分固定在滑枕上，II 部分通过轴 E 左端的锥柄和 I 部分的主轴的右端锥孔相联结，可以快速更换。主电机驱动主轴实现主切削旋转运动，通过两对伞齿轮传动，改变主轴的方向；控制电机则通过一对齿轮驱动中间轴套，控制整个 II 部分围绕轴线 E 的旋转运动，另有一液压部件驱动铣刀主轴和主轴座部分围绕轴线 F 旋转，这两个运动的合成实现了五面体加工。

铣头中的复合支承部分的示意图如图 6-24 所示。它由主轴、中间轴套和内外轴承组成，中间轴套用轴承 1 和轴承 2 支承，主轴则用轴承 3 和轴承 4 支承，主轴的转速为 6000rpm，中间轴套则以很低的转速摆动。中间轴套的弹性将直接影响主轴的动态特性，最终将影响铣床的加工精度。因此必须在考虑中间轴套的弹性影响下对主轴进行固有振动特性分析。

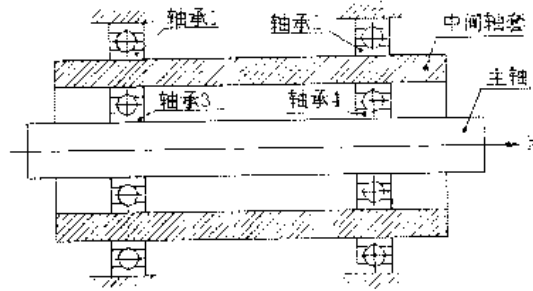


图 6-24 复合支承示意图

6.3.2 模态分析

如图 5-2，由于主轴以轴承 3 和轴承 4 支承在中间轴套上，要考虑中间轴套的弹性对主轴的固有振动特性的影响，可将中间轴套的弹性影响引入到支承的两个轴承上。

主轴的建模与分网和前面的是完全相同的，只在原刚性支承的 M1、M2 处（如图 6-25 所示）代以两个弹性支承以模拟中间轴套的弹性对主轴支承的影响，假设每个弹性支承均由四个均布的弹簧组成（如图 6-26 所示）。

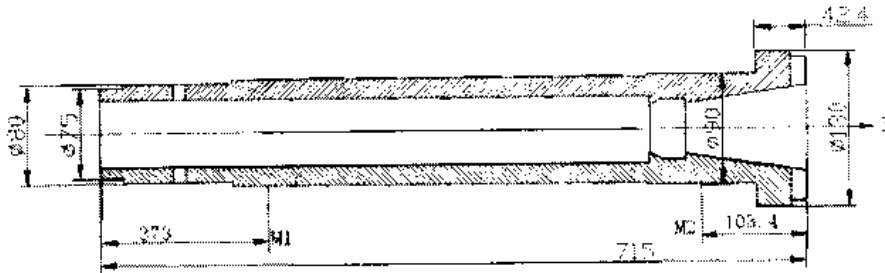


图 6-25 主轴的支承位置图

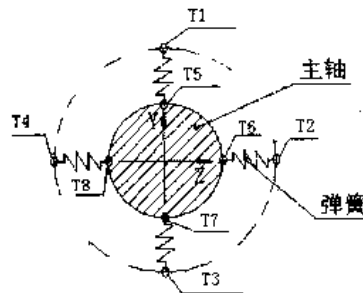


图 6-26 弹簧的分布示意图

在 ANSYS 分析软件中每个弹簧用一个弹簧单元 Combin14 模拟，为了限制主轴 X 轴方向的移动，在截面 M2 上与弹簧相连接的 4 个主轴上的节点（即图 6-26 中的 T5、T6、T7、T8 四个节点）加上 UX 约束。在弹簧的另外一端（即图 6-26 中的 T1、T2、T3、T4 四个节点）为完全固接。

GUI 方式分析过程：

第 1 步：导入数据文件

1. 建立一个新的文件夹，将前面的分析实例的 DB 文件拷到该目录下面。

2. 启动 ANSYS，在出现的对话框中选中该文件夹，并给一个名字。
3. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Chang Title。
4. 输入文字“Static analysis of a axis”，然后单击 OK。
5. 选取菜单 Main Menu>Preference。单击 Structure 选项使其为 ON，单击 OK。
6. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Resume from...，出现如图 6-27 所示的 Resume Database 对话框。

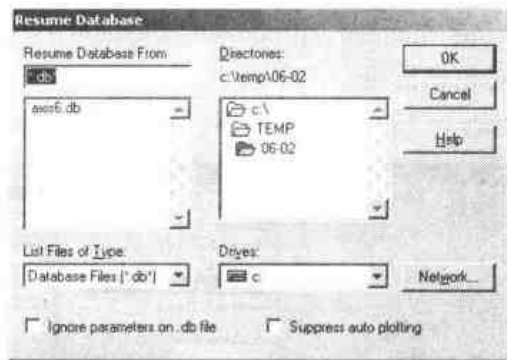


图 6-27 Resume Database 对话框

7. 选择刚才拷的 DB 文件，单击 OK。单击工具栏中的 SAVE_DB，已经成功导入数据文件。

第 2 步：删除原来的约束

1. 选取菜单途径 Main Menu > Solution>-Loads-Delete> -Structural- Displacement> On Nodes。出现如图 6-28 所示的对话框。

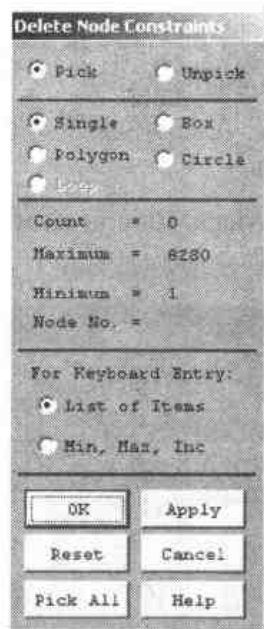


图 6-28 Delete Node Constraints 对话框

2. 单击 Pick All，出现如图 6-29 所示的对话框。选中 All DOF，单击 OK 按钮，原来的约束已经被删除。

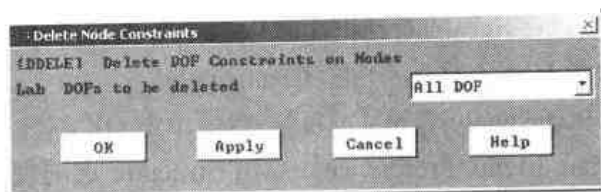


图 6-29 Delete Node Constraints 对话框

第 3 步：添加弹簧单元 Combin14

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。
2. Element Types 对话框出现。
3. 单击 Add。Library of Element Type 对话框出现，如图 6-30。

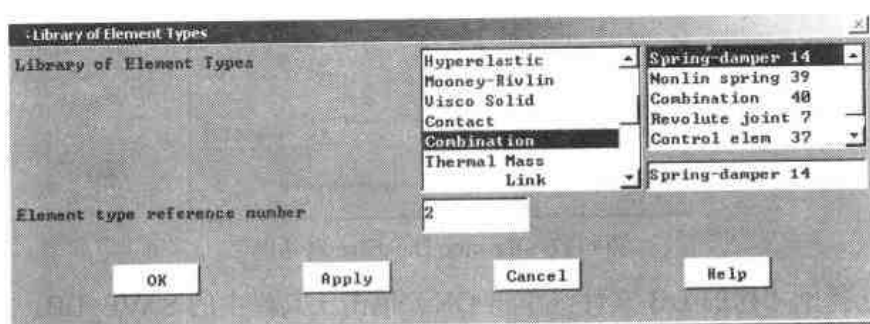


图 6-30 Library of Element Type 对话框

4. 在左边的滚动框中单击“Combination”。
5. 在右边的滚动框中单击“Spring Damper14”。
6. 单击 OK。
7. 单击 Element Type 对话框中的 Close 按钮。

第 4 步：划分弹簧单元 Combin14 的网格

1. 参照前面的弹簧分布图，在支承位置的外面添加八个节点。并将它们分别与模型上的对应点连接成直线。
2. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs。Meshing Attributes 对话框出现，如图 6-31。

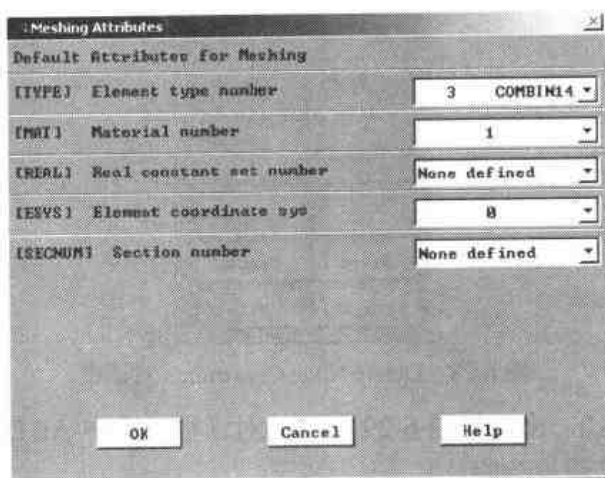


图 6-31 Meshing Attribs 对话框

3. 在 Element type number 处选择 3，对应的单元为 COMBIN 14。
4. 划分网格，如图 6-32。

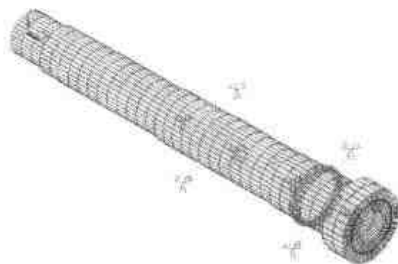


图 6-32 考虑弹性支承时上轴网格划分和加约束后的有限元模型图

第 5 步：设置 COMBIN 14 单元的特性

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete。出现如图 6-33 所示的 Real Constants 对话框。

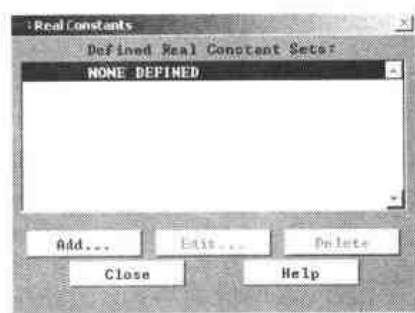


图 6-33 Real Constants 对话框

2. 单击 Add，出现如图 6-34 所示的 Element Type for Real Constants 对话框。

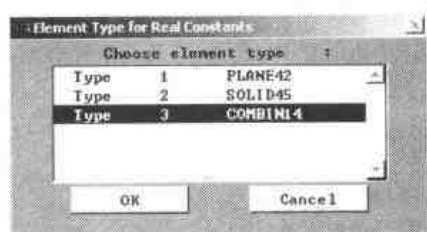


图 6-34 Element Type for Real Constants 对话框

3. 选中 COMBIN14，单击 OK。
4. 在出现的对话框中输入 COMBIN14 单元的刚度，如图 6-35。

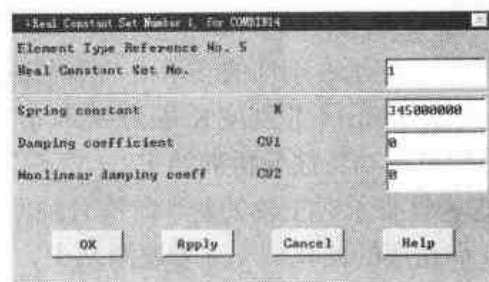


图 6-35 COMBIN 14 单元的刚度

第 6 步：施加约束

1. 如图 6-32，施加约束。
2. 保存文件。

第 7 步：指定要扩展的模态数并求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes。Expand Modes 对话框将出现。
2. 在 number of modes to expand 处输入 4，单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS，浏览出现的信息，然后关闭该对话框。
4. 单击 OK。
5. 在出现两次警告时，都单击 YES。
6. 求解过程结束后，单击 Close。

第 8 步：列出固有频率

选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Results Summary。浏览对话框中的信息，然后用 File>Close 关闭对话框。

第 9 步：观察解的四阶模态

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-First Set。
2. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape 对话框将出现。
3. 在 time delay 处输入 0.5，该单位为秒。
4. 单击 OK，Animation Controller 对话框将会出现，动画开始播放。
5. 单击 Stop 停止动画播放。
6. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-Next Set。
7. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape 对话框将出现。
8. 单击 OK 接受先前的设置，动画开始播放。
9. 单击 Stop 停止动画播放。
10. 对余下的模态重复上述步骤。

要研究主轴考虑弹性支承时的固有振动特性，关键是确定弹簧单元 Combin14 的刚度 K ，它的单位是 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。Combin14 的刚度是很难确定的，它与中间轴套的材料、形状等因素有关。

为了研究弹簧刚度对轴横向固有振动的影响，将弹簧单元 Combin14 的刚度 K 依次取为 $3.45 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $3.45 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $3.45 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $3.45 \times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。在上一节中对主轴进行固有振动特性分析时，二号轴是支承在刚性的支承上，求得第一阶固有频率都为 398.47Hz，这两个固有频率就是弹簧单元 Combin14 的刚度 K 取为 $\infty \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ （即弹簧单元 Combin14 的刚度 K 为无穷大）时二号轴的固有振动特性分析的结果。

从表 6-7 可以看出，考虑弹性支承时主轴的基本阶固有频率明显降低。Combin14 单元的 K 的取值是以 10 倍递增时，而相应的固有频率递增逐渐减少。当 Combin14 单元的刚度值增加到 $3.45 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 时，第一阶固有振动频率为 373.67Hz，Combin14 单元的刚度值再增加时，第一阶固有振动频率增加将不明显。

表 6-7 弹簧单元的刚度取不同值时主轴的基本固有振动频率

K(N.m ⁻¹)	基本阶固有频率(Hz)
3.45X10 ⁷	243.79
3.45X10 ⁸	331.08
3.45X10 ⁹	368.31
3.45X10 ¹⁰	373.67
∞	398.47

6.4 谐响应分析

6.4.1 谐响应分析的三种求解方法

谐响应分析用于分析持续的周期载荷在结构系统中产生的持续的周期响应（谐响应），以及确定线性结构承受随时间按正弦（简谐）规律变化的载荷时稳定响应的一种技术。谐响应分析技术是一种线性分析，但也可以分析有预应力结构。

谐响应分析采用三种方法：Full（完全法）、Reduced（缩减法）、Mode Superposition（模态叠加法）（第四种方法是将简谐载荷指定为有时间历程的载荷函数而进行的瞬间动力学分析）。ANSYS/Linear Plus 中只允许采用模态叠加法。

1. Full 法

Full 法是三种方法中最容易使用的方法，它采用完整的系统矩阵计算响应（没有矩阵缩减），矩阵可以是对称的或是非对称的，Full 法的优点是：

- (1) 同意使用，因为不必关心如何选取主自由度或振型。
- (2) 使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似。
- (3) 允许有非对称矩阵，这种矩阵在声学或轴承问题中很典型。
- (4) 用单一处理过程计算出所有的位移和应力。
- (5) 允许施加各种类型的载荷：节点力，外加的（非零）位移、单元载荷（压力和温度）。
- (6) 允许采用实体模型上所加的载荷。

Full 法的一个缺点是预应力选项不可用。在采用 JCG 求解或 ICCG 求解时，Full 法的效率很高。

2. Reduced 法

Reduced 法通过采用主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处的位移计算出来后，解可以被扩展到初始的完整的 DOF 集上。Reduced 法的优点是：

- (1) 在采用 Frontal 求解器时比 Full 法更快，且开销小。
- (2) 可以考虑预应力效果。

Reduced 法的缺点是：

- (1) 初解只计算出主自由度的位移。要得到完整的位移、应力和力的解则需执行被称为扩展处理的进一步处理（扩展处理在某些分析应用中是可选操作）。

- (2) 不能施加单元载荷 (压力、温度等)。
- (3) 所有载荷必须施加在用户定义的主自由度上。

3. Mode Superposition 法

Mode Superposition 法通过对模态分析得到的振型 (特征向量) 乘上参与因子并求和来计算结构的响应。Mode Superposition 法的优点是:

- (1) 对于许多问题, 此法比 Reduced 或 Full 法更快, 且开销小。
- (2) 在模态分析中施加的载荷可以通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析中。
- (3) 可以使解按结构的固有频率聚集, 这样便可产生更平滑、更精确的响应曲线图。
- (4) 可以包含预应力效果。
- (5) 允许考虑振型阻尼 (阻尼系数为频率的函数)。

Mode Superposition 法的缺点是:

- (1) 不能施加非零位移。
- (2) 在模态分析中使 PowerDynamics 用法时, 初始条件中不能有预加的载荷。

4. 三种方法共同的局限性是:

- (1) 所有载荷必须随时间按正弦规律变化。
- (2) 所有载荷必须有相同的频率。
- (3) 不允许有非线性特性。
- (4) 不计算瞬间效应。

6.4.2 谐响应分析的步骤

下面 Full 法以为例说明谐响应分析的步骤, Full 法谐响应分析由三个步骤组成: ①建模; ②加载并求解; ③观察结果。

1. 建模

建模过程和其他类型的分析类似, 但要注意两点:

- (1) 只有线性行为是有效的。如果有非线性单元, 它们将被按线性单元处理。
- (2) 必须指定弹性模量 EX (或某种形式的刚度) 和密度 DENS (或某种形式的质量), 材料特性可以是线性的、各向同性的或各向异性的、恒定的或温度相关的, 非线性材料特性将被忽略。

2. 加载并求解

在这一步中, 要定义分析的类型和选项, 加载, 指定荷步选项, 并开始有限元求解。

注意 峰值响应发生在力的频率和结构的固有频率相等时, 在得到谐响应分析解之前, 应该首先做一下模态分析以确定结构的固有频率。

- (1) 进入 ANSYS 求解器。
- (2) 定义分析类型和分析选项。ANSYS 提供了如表 6-8 所示用于谐响应分析的选项, 各选项的解释如下:

选项: New Analysis[ANTYPE]

选 New Analysis (新分析)。在谐响应分析中 Restart 不可用。

选项 Analysis Type:Harmonic Response[ANTYPE]

选项分析类型为 Harmonic Response (谐响应分析)。

选项: Solution Method[HROPT]

选择的求解方法为 Full 法、Reduced 法和 Mode Superposition 中的一种。

选项: Solution Listing Format[HROPT]

此选项确定在输出文件 Jobname.Out 中谐响应分析的位移解如何列出。可选的方式有“real and imaginary (实部与虚部)”(缺省)形式、“amplitudes and angles (幅值与相位角)”形式。

表 6-8 分析类型与分析选项

选 项	命 令	CUI 途径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis
Analysis Type:Harmonic Response	ANTYPE	Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis>Harmonic Response
Solution Method	HROPT	Main Menu>Solution>-Analysis options
Solution Listing Format	HROPT	Main Menu>Solution>-Analysis options
Mass Matrix Formulation	LUMPM	Main Menu>Solution>-Analysis options
Equation Solver	EQSLV	Main Menu>Solution>-Analysis options

选项: Mass Matrix Formulation[LUMPM]

此选项用于指定是采用缺省的质量阵列形成方式(取决于单元类型)还是用集中质量阵近似,建议在大多数应用中采用缺省形成方式。但对于某些包含“薄膜”结构的问题,如细长梁或非常薄的壳,采用集中质量矩阵。在设置完成此选项后,单击 OK,可以看到一个名为 Harmonic Analysis 的对话框,此对话框用于选择方程求解器。

选项: Equation Solver[EQSLV]

可选的求解器有: Frontal 求解器(缺省)、Jacobi Conjugate Gradient (JCG) 求解器及 Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (ICCG) 求解器,建议对大多数结构模型采用 Frontal 求解器。

(3) 加载。

根据定义,谐响应分析假定所施加的所有载荷随时间按简谐(正弦)规律变化,指定一个完整的简谐载荷需要输入三条信息: Amplitude (副值)、Phase angle (相位角)和 Forcing frequency range (强制频率范围)。

Amplitude (副值)指载荷的最大值,可用表 6-9 中所示的命令指定。

Phase angle (相位角)指载荷滞后(或领先)于参考时间的量度,在复平面上,相位角是以实轴为起始的角度。存在多个互相间有相位差的载荷时,要求指定相位角。相位角不能直接指定,而是应该用加载命令的 VALUE 和 VALUE2 域来指定有相位角载荷的实部和虚部。Forcing frequency range 是简谐载荷(以周/单位时间为单位)的频率范围(见后面载荷步选项命令 HARFRQ)。

注意 可谐响应分析不能计算频率不同的多个强制载荷同时作用时的响应。这种情形的实例是两个具有不同转速的机器同时运转时的情形。在 POST1 中可以对两种载荷状况进行叠加以得到总体响应。

表 6-9 概括了谐响应分析中可施加的载荷。除惯性载荷外，可以在实体模型（由关键点、线、面组成）或有限元模型（由节点和单元组成）上定义载荷。

表 6-9 谐响应分析中可施加的载荷

载 荷 形 式	范 畴	命 令 族	GUI 途 径
Displacement (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)	约束	D	Main Menu>Solution>Loads-Apply>Structural-Displacement
Force, Moment (FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)	力	F	Main Menu>Solution>Loads-Apply>Structural-Force/Moment
Pressure (PRES)	面载荷	SF	Main Menu>Solution>Loads-Apply>Structural-Pressure
Temperature(TEMP) Fluence(FLUE)	体载荷	BF	Main Menu>Solution>Loads-Apply>Structural-Temperature
Gravity, Spinning 等	惯性载荷		Main Menu>Solution>Loads-Apply>Structural-Other

在分析过程中，可以施加、删除载荷，对载荷进行操作或列表（见表 6-10）。

表 6-10 谐响应分析中的加载命令

载荷类型	实体模型 /FE	因素	施加	删 除	列 表	操 作	施加设置
Displacement	实体模型	关键点	DK	DKDELE	DKLIST	DTRAN	
	实体模型	线	DL	DLDELE	DLLIST	DTRAN	
	实体模型	面	DA	DADELE	DALIST	DTRAN	
	FE	节点	D	DDELE	DLIST	DSCALE	DSYM DCUM
Force	实体模型	关键点	FK	FKDELE	FKLIST	FTRAN	
	FE	节点	F	FDELE	FLIST	FSCALE	FCUM
Pressure	实体模型	线	SFL	SFLDELE	SFLLIST	SFTRAN	SFGRAD
	实体模型	面	SFA	SFADELE	SFALIST	SFTRAN	SFGRAD
	FE	节点	SF	SFDELE	SFLIST	SFSCALE	SFGRAD SFCUM
	FE	单元	SFE	SFEDELE	SFELIST	SFSCALE	SFGRAD SFBEAM SFFUN SFCUM

(续上表)

载荷类型	实体模型 /FE	因素	施加	删除	列表	操作	施加设置
Temperature	实体模型	关键点	BFK	BFKDELE	BFKLIST	BFKTRAN	
	FE	节点	BF	BFDELE	BFLIST	BFASCALE	BFCUM
	FE	单元	BFE	BFEDELE	BFELIST	BFSCALE	BFCUM

所有的载荷操作都可通过一系列等效的 GUI 方式实现。从 Solution 菜单中选择操作（施加、删除等），然后载荷类型（位移、力等），最后选择定义载荷的对象（关键点、线节点等）。

例如，要在一条线上施加位移载荷，可用如下 GUI 途径：

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement>On Lines

(4) 指定载荷选项。谐响应分析可用的选项如表 6-11 所示。

表 6-11 载荷选项

选 项		命 令	GUI 途径
普通选项	Number of Harmonic Solutions	NSUBST	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequency>Freq & Substeps
	Stepped or Ramped Loads	KBC	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequency>Time & Time Step/Freq&Substeps
动力学选项	Forcing Frequency Range	HARFRQ	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequency>Freq & Substeps
	Damping	ALPHAD BETAD DMPART	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequency>Damping
输出控制选项	Printed Output	OUTPR	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>Solu Printout
	Database and Result File Output	OUTRES	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>DB/Results File
	Extrapolation of Results	ERESX	Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>Integration Pt

1) 普通选项

普通选项包括以下各项：

Number of Harmonic Solutions[NSUBST]

可用此选项请求计算任何数目的谐响应解。解将均布在指定的频率范围内[HARFRQ]。

例如，如果在 30~40Hz 范围内求出 10 个解，程序将计算出在频率为 31, 32, ..., 39 和 40Hz 处的响应，而不计算频率范围低端处（30Hz）的响应。

Stepped or Ramped Loads[KBC]

载荷可以是 Stepped 或 Ramped 方式变化的。缺省方式为 Ramped。

2) 动力学选项

动力学选项有:

Forcing Frequency Range[HARFRQ]

在谐响应分析中必须指定强制频率范围, 然后要指定在此频率范围内要计算出解的数目。

Damping

必须指定某种形式的阻尼, 否则在共振处的响应将无限大。命令 ALPHAD 和 BETAD 指定的是和频率相关的阻尼系数, 而 DMPRAT 指定的是对所有频率为恒定值的阻尼比。

(5) 将数据备份。

(6) 开始求解。

(7) 如果有另外的载荷和频率范围, 重复第 (3) ~ (6) 步。如果要做时间历程后处理, 则一个载荷和另外一个载荷步的频率范围间不能存在重叠。还有一种用于处理多步载荷的方法, 它允许将载荷步保存到文件中, 然后用一个宏进行一次性求解。

(8) 退出 SOLUTION。

3. 观察结果

谐响应分析的结果被保存到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。文件中包含下述数据, 所有数据在解所对应的强制频率处按简谐规律变化。

通常的处理顺序是首先用 POST26 找到临界强制频率 (模型中所关注的点中产生最大位移 (或应力) 时的频率), 然后用 POST1 在这些临界强制频率处处理整个模型。

(1) 使用 POST26

POST26 要用到结果项 / 频率对应关系表, 即 Variables (变量)。每个变量都有一个参考号, 1 号变量被内定为频率。

1) 用以下选项定义变量:

Command: NSOL 用于定义基本数据 (节点位移)

ESOL 用于定义派生数据 (单元解数据, 如应力)

RFORC 用于定义反作用力数据

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables

2) 绘制变量对频率或其他变量的关系曲线, 然后用 PLCPLX 指定是用幅值 / 相位角方式, 还是实部 / 虚部方式表示解。

Command: PLVAR 或 PLCPLX

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variable

Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>Graph

3) 对变量进行列表。如果只要求出极值, 可用 EXTREM 命令, 然后用 PLCPLX 指定是用幅值 / 相位角方式, 还是实部 / 虚部方式表示解。

Command: PRVAR 或 EXTREM 或 PRCPLX

GUI: Main Menu>TimeHist Postpro>List Variables/List Extremes

Main Menu>TimeHist Postpro>Setting>List

(2) 使用 POST1

1) 读入所需谐响应分析结果。可用 SET 命令来读入结果, 只能将它读入实部或者虚部, 不能同时将两者都读入。结果的实际大小由实部和虚部的平方和取平方根给出, 在 POST26

中可得到模型中的指定点处的真实结果。

2) 显示结构的边形状、应力、应变等的等值线或者向量的向量图。要得到数据的列表表格, 用 PRNSOL, PRESOL, PRRSOL 等。

选项: Display Deformed Shape

Command: PLDISP

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape

选项: Contour Displays

Command: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu 或 Element Solu

选项: Vector Plot

Command: PLVECT

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Vector Plot-Predefined

选项: Tabular Listings

Command: PRNSOL 或 PRESOL 或 PRRSOL

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solution 或 Element Solution
或 Reaction Solution

在数据列表之前, 可用 NSORT 和 ESORT 命令对数据进行排序。

6.5 谐响应分析实例

6.5.1 引言

在铣刀的每一个刀齿切削工件时, 会有周期性的激振力作用在铣头主轴上。当激振力的频率与主轴的固有振动频率相同时, 就会发生共振。这不仅不能保证铣削的加工精度, 也会对铣头以致铣床造成严重破坏, 这是一定要避免的。因此, 在进行高速铣头的虚拟动力学研究时, 必须研究高速铣头主轴的动力响应。高速铣头的主轴动力响应是评价高速铣头的动态性能的一个重要指标。

下面仍以数控自动万能铣头为例, 进行虚拟动力学研究中的响应分析。

分析系统动力响应实际上是解一个完整的动力方程, 它实际上是一个二阶常系数线性微分方程:

$$[M] \cdot \ddot{\{x(t)\}} + [C] \cdot \dot{\{x(t)\}} + [K] \cdot \{x(t)\} = \{P(t)\} \quad (6-17)$$

其中矩阵 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。 $\ddot{\{x(t)\}}$ 、 $\dot{\{x(t)\}}$ 和 $\{x(t)\}$ 分别为系统中节点的加速度、速度和位移向量, 它们均为时间的函数。 $\{P(t)\}$ 为激振力向量, 也是时间的函数。

二阶常系数线性微分方程组 (6-17) 原则上可用解常系数微分方程组的标准方法来求解。当矩阵阶数很高时, 常采用直接积分和振型叠加法求解。本文在分析动力响应特性时采用了

振型叠加求解方法。

6.5.2 激振力的确定

通过第3章的计算分析,已知主轴(第3章中的三号轴)的固有振动特性。本章将在此基础上进一步研究主轴的响应特性,即分析其动力响应。

这章所说的响应分析,都是指谐响应分析。谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。分析的目的是计算出结构在激振力频率下的响应即响应位移与响应应力,并得到系统的动力响应与系统振动频率的曲线,称为幅频曲线。ANSYS 软件中,谐响应分析的过程由三个主要步骤组成:建模,加载并求解和分析结果。

所以要进行谐响应分析,就必须首先确定随时间按正弦规律变化的载荷,也就是确定激振力。

一个完整的激振力由幅值、相位角和强迫振动频率组成,即:

$$P(t) = p_1 \cos(\omega t + \phi) \quad (6-18)$$

上式中 P_1 、 ω 和 ϕ 分别为幅值、强迫振动频率和相位角。

对主轴作用的激振力来自铣刀的铣削力。铣削力的确定与前面的静力学分析中的一样。

下面确定精铣时的激振力,以加工碳钢为例,则取 $C_F=669$,圆柱铣刀直径取 $d=40\text{mm}$,铣削深度取 $\alpha_p=20\text{mm}$,铣刀齿数取 $Z=6$, $F_r/F_t=0.85$ 。

$$F_t = 669 * \alpha_e^{0.88} * \alpha_f^{0.72} * 40^{-0.88} * 20 * 6 = 3124.6 * \alpha_e^{0.88} * \alpha_f^{0.72} \quad (6-19)$$

$$F_r = F_t * 0.85 \quad (6-20)$$

当铣削宽度取 $\alpha_e=0.5\text{mm}$,每齿进给量取 $\alpha_f=0.05\text{mm}$,则求出切向力 $F_t=196.40\text{N}$ 和径向力 $F_r=166.94\text{N}$ 。

在铣削时,径向力 F_r 对于每一个刀齿,都相当于频率为 $\frac{6 * n_1}{60}$ (Hz) (n_1 为主轴的工作转速,转/分;6代表铣刀的6个刀齿;*代表乘号,以下*都代表乘号)的脉冲力。将式(6-17)中的激振力按傅立叶级数展开得:

$$P(t) = P_0 + P_1 \cos(\omega t + \phi_1) + P_2 \cos(2\omega t + \phi_2) + P_3 \cos(3\omega t + \phi_3) + \dots \quad (6-21)$$

如不考虑高阶项的影响,只取主项, ϕ_1 近似取为零值,则有:

$$P(t) = P_1 \cos \omega t \quad (6-22)$$

上式中取 $P_f = F_f = 166.94\text{N}$, 激振力的频率为: $\frac{6 * n_1}{60} = 600\text{Hz}$ 。

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{\pi}{30} n \quad (6-23)$$

可以求得: $\omega = \frac{\pi}{30} * (6000 * 6) = 1200\pi$ (弧度/秒)。

激振力的幅值为 166.94N , 强制频率为 600Hz 。激振力已经完全确定。

由于铣刀和铣头主轴都是以 6000rpm 的转速旋转, 所以铣削力的径向分力 F_f 在铣头主轴上的作用点作周期变化。

响应特性分析的关键点为图 6-36 中的截面 A、截面 B 和截面 C, 图中的 H1 面和 H2 面为轴的约束位置。截面 B 在两支承之间, 截面 C 在铣头主轴的最左端, 截面 A、截面 B 和截面 C 都在图 6-36 中所示的 xoy 平面上。铣刀装在铣头主轴的下端的锥孔内, 所以在图 6-36 所示的截面 A 处加载激振力。

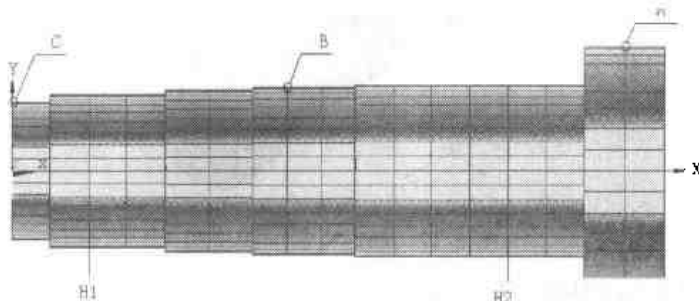


图 6-36 激振力加载的截面 A 的位置

6.5.3 响应特性分析

GUI 方式分析过程如下:

第 1 步: 导入数据文件

1. 建立一个新的文件夹, 将静力学分析实例的 DB 文件拷到该目录下。
2. 启动 ANSYS, 在出现的对话框选中该文件夹, 并给一个名字。
3. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Chang Title。
4. 输入文字 “Harmonic analysis of a axis”, 然后单击 OK。
5. 选取菜单 Main Menu>Preference。单击 Structure 选项使之 ON, 单击 OK。
6. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Resume from..., 出现 Resume Database 对话框。
7. 选择刚才拷的 DB 文件, 单击 OK。单击工具栏中的 SAVE_DB, 已经成功导入数据文件。

第 2 步: 进入求解器并指定分析类型和选项

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。New Analysis 对话框出现。
2. 选中 Modal, 然后单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Options, Modal Analysis 对话框将

出现。

4. 选中 Subspace 模态提取法。
5. 在 Number of modes to extract 处输入 4。
6. 单击 OK, Subspace Modal Analysis 对话框将出现。
7. 单击 OK 接收缺省值。

第 3 步: 对模型施加约束

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement>-On Node. Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单将会出现。
2. 点中 BOX 选项, 选择轴承处的节点, 单击 OK。
3. 单击 “All DOF”。
4. 加约束后的模型图见图 6-37。

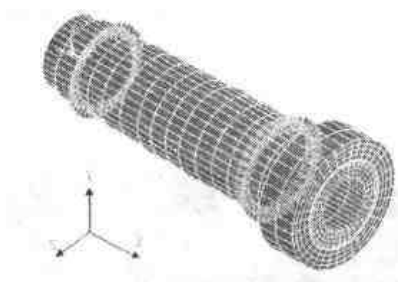


图 6-37 加约束后的模型图

第 4 步: 指定要扩展的模态数并求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes. Expand Modes 对话框将出现。
2. 在 number of modes to expand 处输入 4, 单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS. 浏览出现的信息, 然后关闭该对话框。
4. 单击 OK。
5. 在出现两次警告时, 都单击 YES。
6. 求解过程结束后, 单击 Close。

第 5 步: 列出固有频率

选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Results Summary. 浏览对话框中的信息, 然后用 File>Close 关闭对话框。

第 6 步: 观察解的四阶模态

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-First Set。
2. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape. Animate Mode Shape 对话框将出现。
3. 在 time delay 处输入 0.5, 该单位为秒。
4. 单击 OK, Animation Controller 对话框将会出现, 动画开始播放。
5. 单击 Stop 停止动画播放。
6. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-Next Set。

7. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape 对话框将出现。
8. 单击 OK 接受先前的设置，动画开始播放。
9. 单击 Stop 停止动画播放。
10. 对余下的模态重复上述步骤。

第7步：谐响应分析

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。弹出 New Analysis 对话框。
2. 单击选中“Harmonic”，单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu> Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc> Freq&Substeps。出现如图 6-38 所示的频率范围对话框。

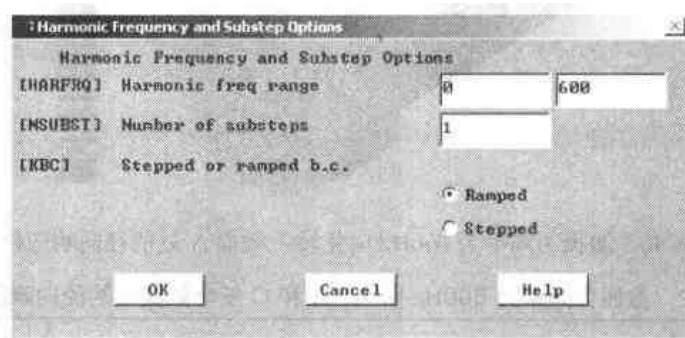


图 6-38 频率范围对话框

4. 在 Harmonic frequency range 处输入 0 和 600。单击 OK。
5. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structure -Force /Moment> On Nodes。弹出 Apply F/M On Nodes 窗口。
6. 在图形窗口中拾取截面 A 一个节点 M，单击 OK。弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，如图 6-39。

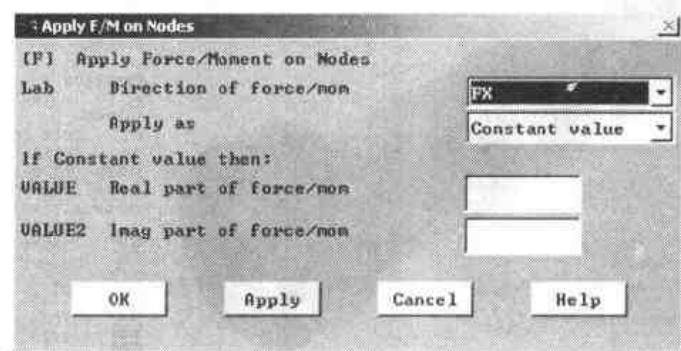


图 6-39 Apply F/M on Nodes 对话框

7. 选 Directon of force/mom 滚动框中的“FY”，在 Real part of force/mom 处输入 166.94。单击 Apply，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口。
8. 拾取节点 M，单击 OK，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口。
9. 选 Directon of force/mom 滚动框中的“FZ”，在 Real part of force/mom 处输入 0，在 Image part of force/mom 输入 166.94。单击 OK。

10. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。

11. 当求解完成时出现一个 Solution is done 提示对话框, 单击 Close。

主轴的径向响应位移分布图见图 6-40。主轴上 A、B 和 C 三个截面处的径向响应位移见表 6-12。

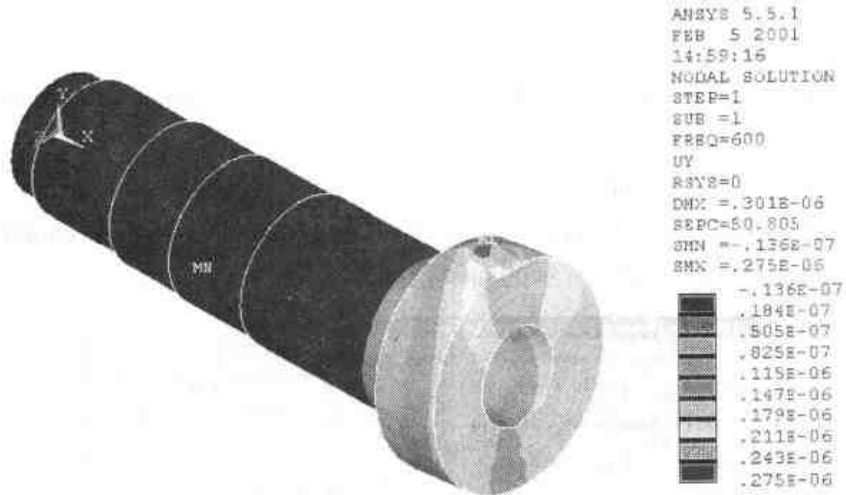


图 6-40 激振力频率为 600Hz 时主轴上截面 A 处的径向响应位移

表 6-12 激振力频率为 600Hz 时 A、B 和 C 三个截面处的径向响应位移

位 置	截 面 A	截 面 B	截 面 C
响应位移 (m)	-0.348×10^{-7}	0.140×10^{-8}	-0.108×10^{-8}

可以看出主轴上的截面 A 在径向上有最大位移为 $0.348 \times 10^{-7} \text{m}$ 。

主轴上径向响应应力分布图见图 6-41。主轴上 A、B 和 C 三个截面处的径向响应应力见表 6-13。

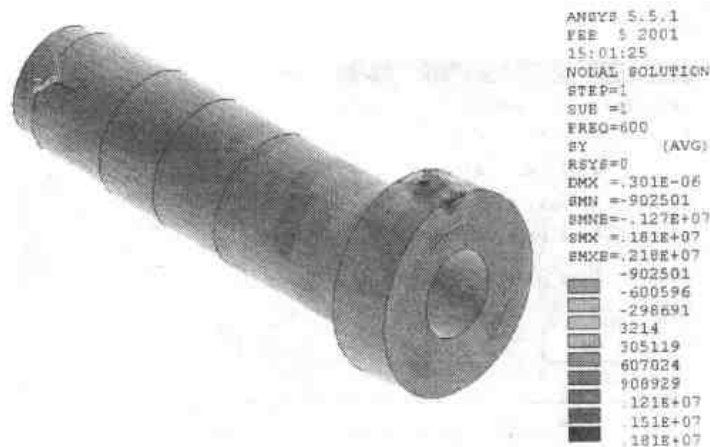


图 6-41 激振力频率为 600Hz 时主轴上截面 A 处的径向响应应力

表 6-13 激振力频率为 600Hz 时 A、B 和 C 三个截面处的径向响应应力

位 置	截 面 A	截 面 B	截 面 C
响应应力(pa)	0.181×10^7	305119	3214

第 6 章 ANSYS 动力学分析

下面研究一阶固有振动频率 3381.8Hz 附近的响应特性, 取激振力的幅值为 166.94N, 激振力的频率为一个范围: 3100Hz~3600Hz, 分为 6 步, 分别进行响应分析, 得出主轴上截面 A 处的径向响应位移对频率的曲线图, 见图 6-42。

激振力的频率为 3100Hz、3200Hz、3300Hz、3400Hz、3500Hz、3600Hz 时, 主轴上截面 A 的径向响应位移见表 6-14。

从图 6-42 和表 6-14 可以看出, 当激振力的频率从 3300Hz 增加到 3400Hz 时, 轴上截面 A 处的径向响应位移急剧增加, 激振力的频率再增加到 3500Hz 时, 轴上截面 A 处的径向响应位移急剧下降。可以进一步确定, 共振发生在 3400Hz 的附近, 即一阶固有频率 3381.8Hz 附近。主轴在工作转速为 6000rpm 时, 不会发生共振。

激振力的频率为 3400Hz 时, 主轴上截面 A 处的径向响应位移为 4.5×10^{-6} m, 是激振力的频率为 600Hz 时对应的响应位移 (0.348×10^{-7} m) 的 129 倍。

激振力的频率为 3400Hz 时, 主轴上截面 A 处的径向响应应力见图 6-43。从图 6-43 可以看出, 此时最大应力点不是在截面处, 而是在支承 H2 处。也就是说, 当轴发生共振时, 支承 H2 处是危险点, 容易产生裂纹, 至断裂。

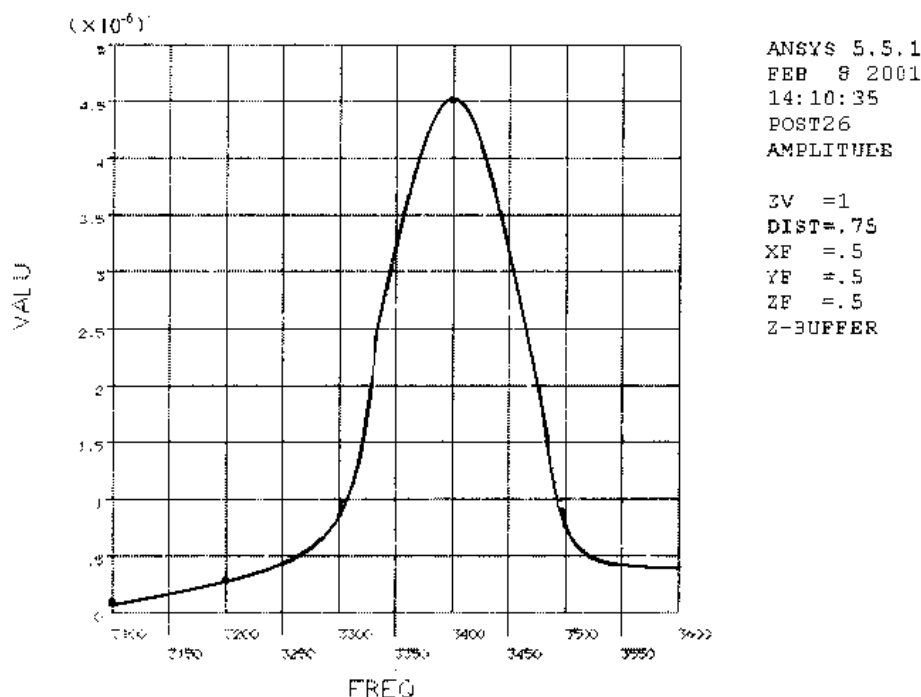


图 6-42 主轴上截面 A 的径向响应位移对频率的曲线图

表 6-14 主轴上截面 A 处的径向响应位移

频率 (Hz)	3100	3200	3300	3400	3500	3600
响应位移(m)	0.12×10^{-6}	0.28×10^{-6}	0.8×10^{-6}	4.5×10^{-6}	0.75×10^{-6}	0.35×10^{-6}

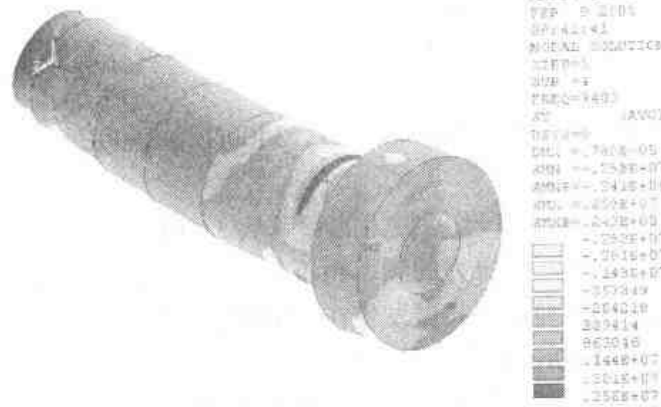


图 6-43 激振力频率为 3400Hz 时主轴上截面 A 处的径向响应应力

6.5.4 加工精度分析

从上面可以看出，在精铣时（在前面所取的切削条件下），主轴上点 A 产生的响应位移为 $0.348 \times 10^{-7} \text{m}$ 。精铣时铣刀的位置如图 6-44，铣刀尖距主轴端长度为 L_1 ，在主轴的 X 轴上有一点 M、点 N 和点 Q。点 M 在支承面 H2 上，点 N 为点 A 在 X 轴上的投影点，点 Q 为刀尖点。

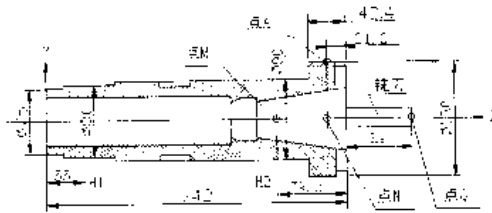


图 6-44 铣刀的装配位置图

假设铣刀的刚性良好且没有变形，点 N 的响应位移和点 A 的响应位移 Δa 相同，点 M 的位移为零。刀尖点 Q 的位移图见图 6-45。

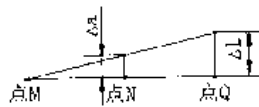


图 6-45 刀尖点 Q 的位移图

则刀尖的位移 ΔL 可近似为：

$$\Delta L = 0.348 \times 10^{-7} * \frac{(79.2 - 21.2) + L_1}{(79.2 - 21.2)} \quad (6-22)$$

当 $L_1 = 3 * (79.2 - 21.2) = 178 \text{mm}$ 时，则 $\Delta L = 1.4 * 10^{-7} \text{m} = 0.14 \mu\text{m}$ 。也就是说，铣削时，由于主轴的振动将使工件产生误差 $0.14 \mu\text{m}$ 。所以 ΔL 在一定程度上反映了铣床的加工精度。

6.6 基础件的动力学分析

6.6.1 引言

前面对铣头的几根关键的主轴的动静特性做了分析，铣头的动静特性直接影响到铣削性能。但影响铣削性能的因素很多，如床身、工作台和立柱等基础件。下面就以立柱为例对基础件进行动力学分析，由于基础件的模型复杂，使用 ANSYS 做动力学分析前，首先用其他 3d 软件先建模，导出为 iges 文件，再导进 ANSYS 中进行分析。

6.6.2 动力学分析

立柱动力学分析的 GUI 方式分析过程如下：

第 1 步：指定分析标题并设置分析范畴

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Chang Title。
2. 输入文字“Dynamic analysis of lizhu”，然后单击 OK。
3. 选取菜单 Main Menu>Preference。
4. 单击 Structure 选项使之成为 ON，单击 OK。

第 2 步：定义单元类型

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。
2. Element Types 对话框出现。
3. 单击 Add。Library of Element Type 对话框出现。
4. 在左边的滚动框中单击“Structural Solid”。
5. 在右边的滚动框中单击“10node 92”。
6. 如图 6-46，单击 OK。

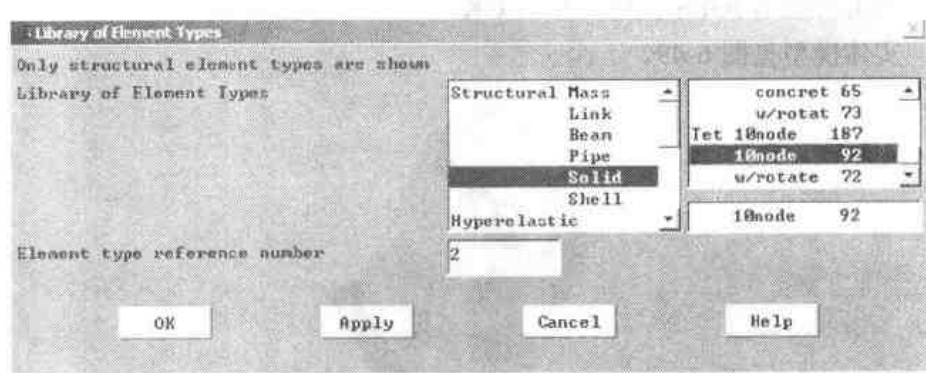


图 6-46 Library of Element Type 对话框

7. 单击 Element Type 对话框中的 Close 按钮。

第 3 步：导入实体模型

1. 选取菜单途径 Utility Menu>File>Import>Iges...，出现如图 6-47 所示的对话框。

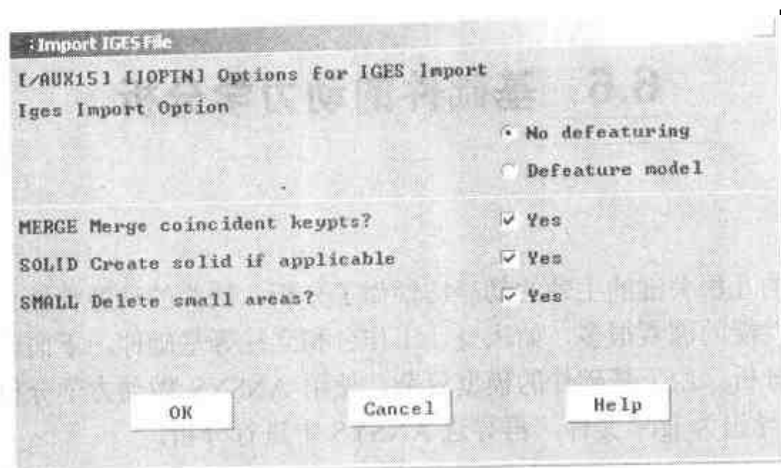


图 6-47

2. 单击 OK。出现如图 6-48 所示的对话框。

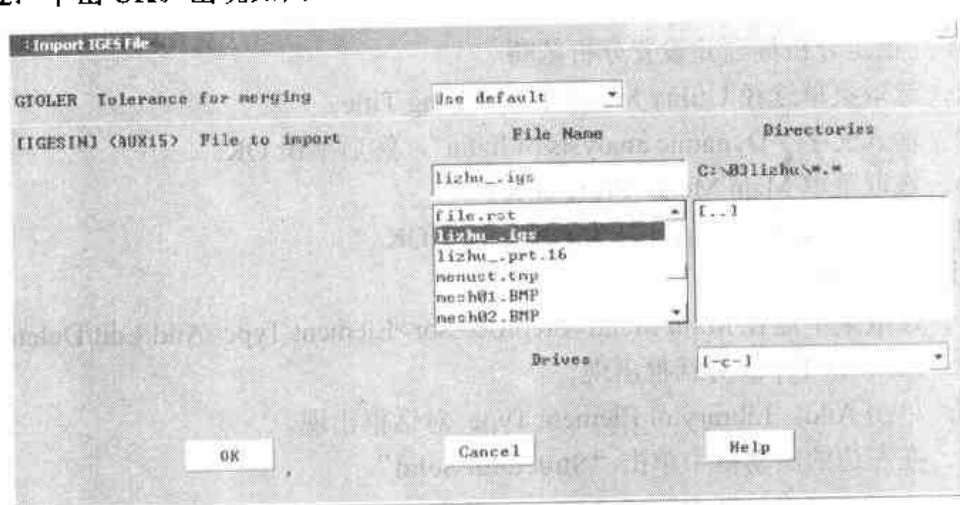


图 6-48 Import IGES File 对话框

3. 双击对应的 IGES 文件，单击 OK。
4. 实体模型见图 6-49。

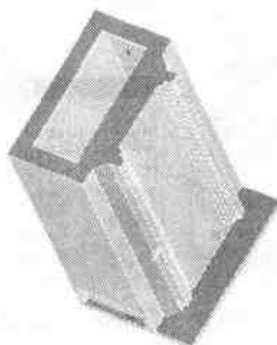


图 6-49 实体模型图

第 4 步：指定网格划分密度并网格划分

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Size Ctrl>-SmartSize-Basic。
2. 在出现的对话框中选择 10 (Coarse)，见图 6-50。

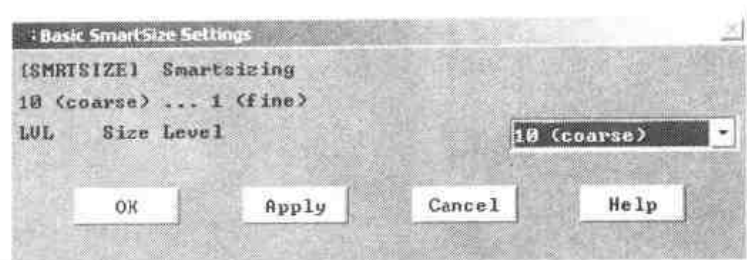


图 6-50 网格划分密度对话框

3. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Volume- Free。
4. 在出现的对话框中选择 Pick All，单击 OK。
5. 网格划分后的模型图见图 6-51。



图 6-51 网格划分后的模型图

第 5 步：指定材料性能

1. 选取菜单途径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，对话框出现。
2. 在对话框中分别单击 Isotropic 和 Density。分别输入 EX 为 200e9，DENS 为 $7.8 \times 10e3$ ，NUXY 为 0.3。

第 6 步：进入求解器并指定分析类型和选项

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。New Analysis 对话框出现。
2. 选中 Modal，然后单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Options，Modal Analysis 对话框将出现。
4. 选中 Subspace 模态提取法。
5. 在 Number of modes to extract 处输入 6。
6. 单击 OK，Subspace Modal Analysis 对话框将出现。
7. 单击 OK 接收缺省值。

第 7 步：对模型施加约束

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply> -Structural -Displacement>-On Node。Apply U, ROT on Nodes 拾取菜单将会出现。
2. 点中 BOX 选项，选择节点，单击 OK。
3. 单击“All DOF”。
4. 加约束后的模型图见图 6-52。



图 6-52 加约束后的模型图

第 8 步：指定要扩展的模态数并求解

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Expansion Pass> Expand Modes。Expand Modes 对话框将出现。
2. 在 number of modes to expand 处输入 6，单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。浏览出现的信息，然后关闭该对话框。
4. 单击 OK。
5. 在出现两次警告时，都单击 YES。
6. 求解过程结束后，单击 Close。

第 9 步：列出固有频率

选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>Results Summary。浏览对话框中的信息，然后用 File>Close 关闭对话框。

Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	45.238	1	1	1
2	104.81	1	2	2
3	163.07	1	3	3
4	214.25	1	4	4
5	249.82	1	5	5
6	250.80	1	6	6

图 6-53 结果对话框

第 10 步：观察 6 阶模态

1. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-First Set。
2. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape 对话框将出现。
3. 在 time delay 处输入 0.5，该单位为秒。
4. 单击 OK，Animation Controller 对话框将会出现，动画开始播放。
5. 单击 Stop 停止动画播放。
6. 选取菜单途径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-Next Set。
7. 选取菜单途径 Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Mode Shape。Animate Mode Shape

对话框将出现。

8. 单击 OK 接受先前的设置，动画开始播放。
9. 单击 Stop 停止动画播放。
10. 对余下的模态重复上述步骤。

第 11 步：谐响应分析

1. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。弹出 New Analysis 对话框。
2. 单击选中“Harmonic”，单击 OK。
3. 选取菜单途径 Main Menu> Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc> Freq&Substeps。出现频率范围对话框。
4. 在 Harmonic frequency range 处输入 0 和 300，在 number of substeps 中输入 10。单击 OK。
5. 选取菜单途径 Main Menu> Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc> Damping。出现 Damping Specification 对话框。
6. 在 Mass matrix multiplier 处输入 5，单击 OK。
7. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply> -Structure -Force /Moment> On Nodes。弹出 Apply F/M On Nodes 窗口。
8. 在图形窗口中拾取一个节点 M，单击 OK。弹出 Apply F/M on Nodes 对话框。

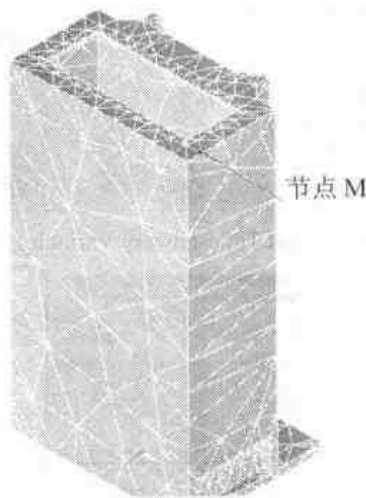


图 6-54 节点 M

9. 选 Direction of force/moment 滚动框中的“FX”，在 Real part of force/moment 处输入 100。单击 Apply，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口。
 10. 拾取节点 M，单击 OK，弹出 Apply F/M on Nodes 拾取窗口。
 11. 选 Direction of force/moment 滚动框中的“FZ”，在 Real part of force/moment 处输入 0，在 Image part of force/moment 输入 100。单击 OK。
 12. 选取菜单途径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。
 13. 当求解完成时出现一个 Solution is done 提示对话框，单击 Close。
- 第 12 步：POST26 观察结果（节点 M 的位移时间历程结果）

1. 选取菜单途径 Main Menu> TimeHist Postproc>Define Variables.Define Time-History

Variables 对话框出现，见图 6-55。

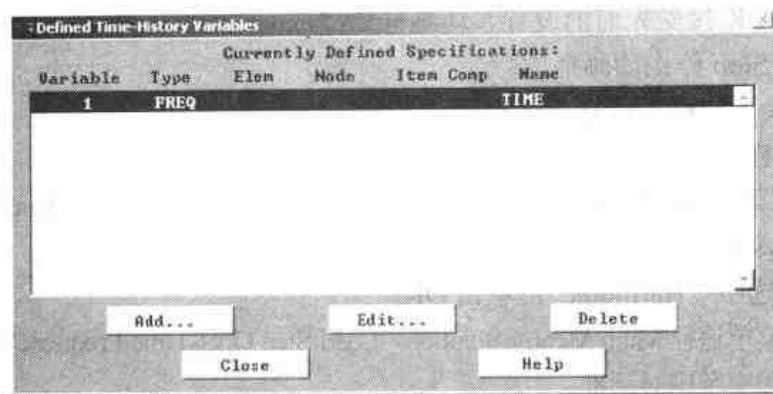


图 6-55 Define Time-History Variables 对话框

- 单击 Add，弹出 Add Time-History Variables 对话框，见图 6-56。接受缺省选项 Nodal DOF Result，单击 OK，弹出 Define Nodal Data 拾取对话框见图 6-57。

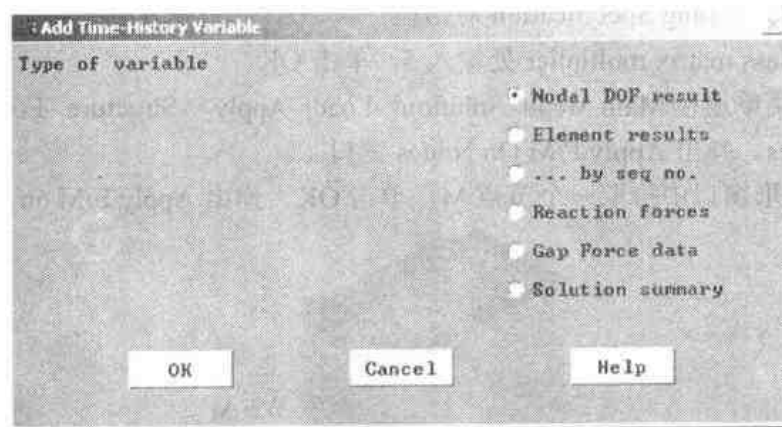


图 6-56 Add Time-History Variables 对话框

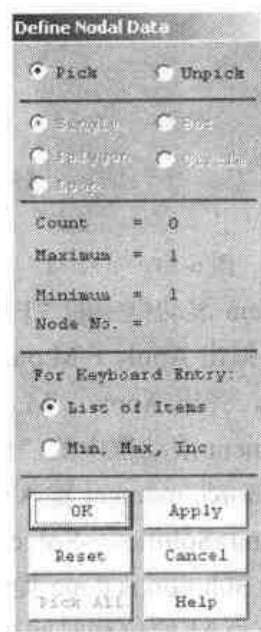


图 6-57 Define Nodal Data 拾取对话框

3. 在图形窗口中取节点 M, 单击 OK, 弹出 Define Nodal Data 对话框, 见图 6-58。

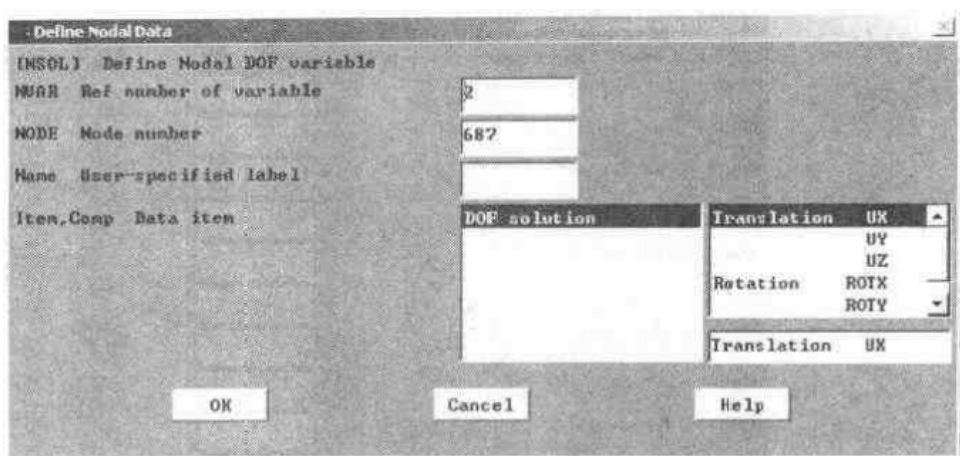


图 6-58 Define Nodal Data 对话框

4. 在 User-specified label 处输入 UX; 在右边的滚动框中的“Translation UX”上单击一次使其高亮度显示, 单击 OK。
5. 在 Defined Time-History Variables 对话框中单击 Add, 弹出 Add Time-History Variable 对话框。
6. 接受缺省选项 Nodal DOF Result, 单击 OK, 弹出 Define Nodal Data 拾取对话框。
7. 在图形窗口中取节点 M, 单击 OK, 弹出 Define Nodal Data 对话框。
8. 在 User-specified Label 处输入 UY; 在右边的滚动框中的“Translation UY”上单击一次使其高亮度显示, 单击 OK。
9. 在 Defined Time-History Variables 对话框中单击 Add, 在弹出 Add Time-History Variable 对话框。
10. 接受缺省选项 Nodal DOF Result, 单击 OK, 弹出 Define Nodal Data 拾取对话框。
11. 在图形窗口中取节点 M, 单击 OK, 弹出 Define Nodal Data 对话框。
12. 在 User-specified Label 处输入 UZ; 在右边的滚动框中的“Translation UZ”上单击一次使其高亮度显示, 单击 OK。单击 Close。
13. 选取菜单途径 Main Menu>TimeHist Postproc>Graph Variables, 弹出 Graph Time-History Variables 对话框。
14. 在 Type of grid 滚动框中选中“X and Y lines”, 见图 6-59, 单击 OK。

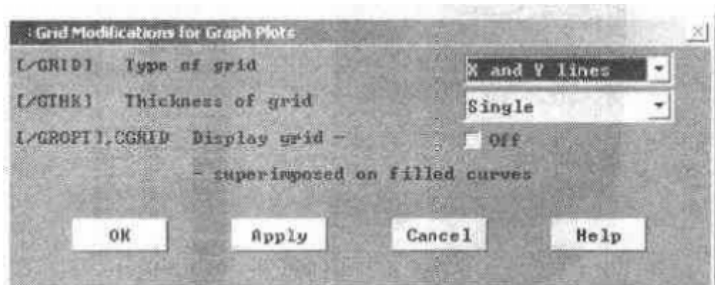


图 6-59 Graph Time-History Variables 对话框

15. 选取菜单途径 Main Menu>TimeHist Postproc>Graph Variables, 弹出 Graph

Time-Histoy Variables 对话框，见图 6-60。

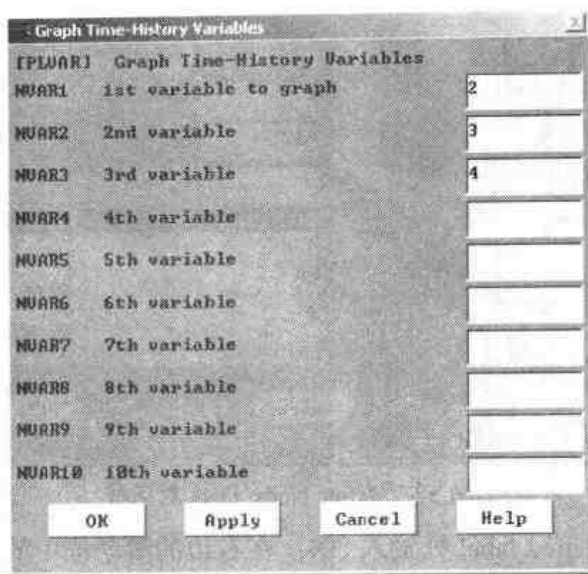


图 6-60 Graph Time-Histoy Variables 对话框

16. 在 1st Variable to graph 处输入 2；2nd Variable 处输入 3；3rd Variable 处输入 4。
单击 OK，图形窗口中将出现一个曲线图。

第 12 步：退出 ANSYS

1. 在 ANSYS Toolbar 中单击 Quit。
2. 选择要保存的选项，然后单击 OK。

6.6.3 结果分析

从上述结果，可知立柱的前 6 阶固有频率为 45.230 Hz, 104.81 Hz, 163.07 Hz, 214.25 Hz, 249.82 Hz 和 250.80Hz。对应的前面的三阶振型分别见图 6-61，图 6-62 和图 6-63。

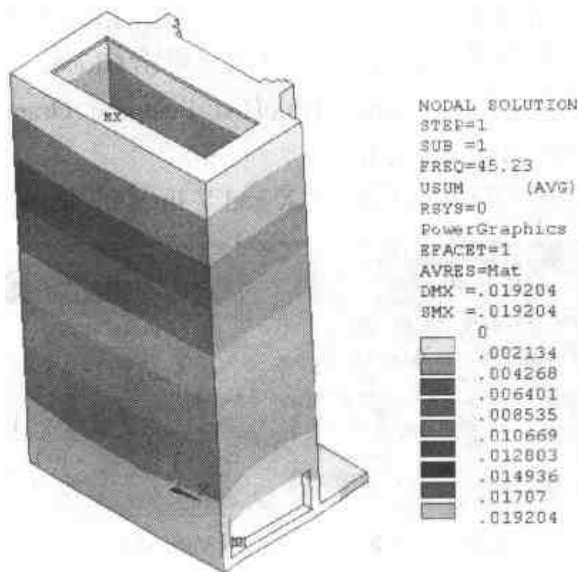


图 6-61 固有频率为 45.230 Hz 时的振型

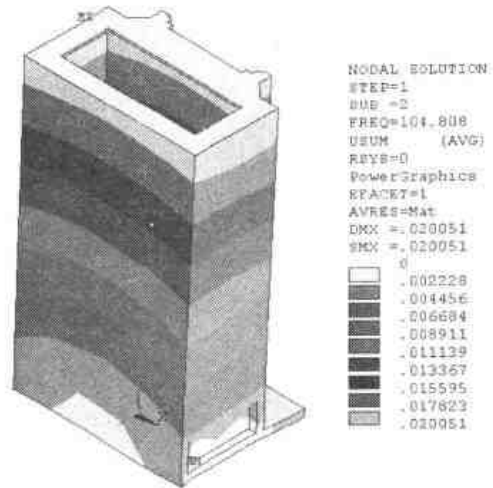


图 6-62 固有频率为 104.81 Hz 时的振型

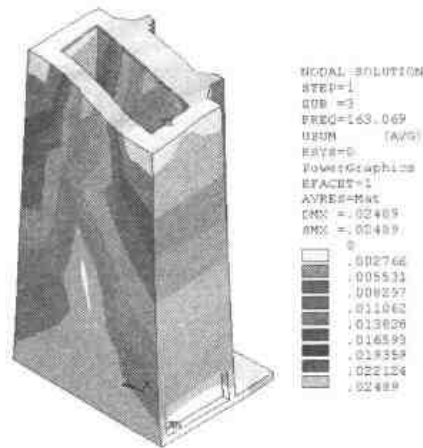


图 6-63 固有频率为 163.07 Hz 时的振型

当固有频率为 45.230 Hz 时，立柱的振型近似为绕底面的摆动。

当固有频率为 104.81 Hz 时，立柱的振型近似为大平面的弯曲运动。这可以通过加上加强筋来减少这种振动。

当固有频率为 163.07 Hz 时，立柱的振型已经非常复杂，近似扭曲运动。

第 7 章

ANSYS 热力学分析

7.1 热分析的基础知识

7.1.1 符号与单位

表 7-1

项 目	国 际 单 位	英 制 单 位	ANSYS 代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	Kg	lbm	
温度	°C	°F	
力	N	lbf	
能量 (热量)	J	BTU	
功率 (热流率)	W	BTU/sec	
热流密度	W/m ²	BTU/sec-ft ²	
生热速率	W/m ³	BTU/sec-ft ³	
导热系数	W/m-°C	BTU/sec-ft-°F	KXX
对流系数	W/m ² -°C	BTU/sec-ft ² -°F	HF
密度	Kg/m ³	lbm/ft ³	DENS
比热	J/Kg-°C	BTU/lbm-°F	C
焓	J/m ³	BTU/ft ³	ENTH

7.1.2 传热学经典理论回顾

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律：

- 对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

式中： Q ——热量；

W ——做功；

ΔU ——系统内能；

ΔKE ——系统动能；

ΔPE ——系统势能；

- 对于大多数工程传热问题： $\Delta KE = \Delta PE = 0$ ；
- 通常考虑没有做功： $W = 0$ ，则： $Q = \Delta U$ ；
- 对于稳态热分析： $Q = \Delta U = 0$ ，即流入系统的热量等于流出的热量；
- 对于瞬态热分析： $q = \frac{dU}{dt}$ ，即流入或流出的热传递速率 q 等于系统内能的变化。

7.1.3 热传递的方式

1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅立叶定律： $q'' = -k \frac{dT}{dx}$ ，式中 q'' 为热流密度 (W/m^2)， k

为导热系数 ($W/m \cdot ^\circ C$)，“-”表示热量流向温度降低的方向。

2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述： $q'' = h(T_s - T_f)$ ，式中 h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等）， T_s 为固体表面的温度， T_f 为周围流体的温度。

3. 热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。

它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬—波尔兹曼方程来计算： $q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$ ，式中 q 为

热流率， ε 为辐射率（黑度）， σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数，约为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ， A_1 为辐射面 1 的面积， F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数， T_1 为辐射面 1 的绝对温度， T_2 为辐射面 2 的绝对温度。由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

4. 稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量： $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$ ，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）

$$[K]\{T\} = \{Q\}$$

式中： $[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

$\{T\}$ 为节点温度向量；

$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成；

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 以及 $\{Q\}$ 。

5. 瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为（以矩阵形式表示）：

$$[C]\{T^{\dot{}}\} + [K]\{T\} = \{Q\}$$

式中： $[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

$[C]$ 为比热矩阵，考虑系统内能的增加；

$\{T\}$ 为节点温度向量；

$\{T^{\dot{}}\}$ 为温度对时间的导数；

$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

6. 线性与非线性

如果有下列情况产生，则为非线性热分析：

- 材料热性能随温度变化，如 $K(T)$ ， $C(T)$ 等；
- 边界条件随温度变化，如 $h(T)$ 等；
- 含有非线性单元；
- 考虑辐射传热；

非线性热分析的热平衡矩阵方程为：

$$[C(T)]\{T^{\dot{}}\} + [K(T)]\{T\} = [Q(T)]$$

7. 边界条件、初始条件

ANSYS 热分析的边界条件或初始条件可分为七种：温度、热流率、热流密度、对流、辐射、绝热、生热。

8. 热分析误差估计

- 仅用于评估由于网格密度不够带来的误差；
- 仅适用于 SOLID 或 SHELL 的热单元（只有温度一个自由度）；
- 基于单元边界的热流密度的不连续；
- 仅对一种材料、线性、稳态热分析有效；
- 使用自适应网格划分可以对误差进行控制。

7.2 稳态热分析

7.2.1 稳态传热的定义

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析以前，进行稳态热分析用于确定初始温度分布。

稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。

7.2.2 热分析的单元

热分析涉及到的单元有大约 40 种，其中纯粹用于热分析的有 14 种：

线性	LINK32	二维二节点热传导单元
	LINK33	三维二节点热传导单元
	LINK34	二节点热对流单元
	LINK31	二节点热辐射单元
二维实体	PLANE55	四节点四边形单元
	PLANE77	八节点四边形单元
	PLANE35	三节点三角形单元
	PLANE75	四节点轴对称单元
	PLANE78	八节点轴对称单元
三维实体	SOLID87	六节点四面体单元
	SOLID70	八节点六面体单元
	SOLID90	二十节点六面体单元
壳 点	SHELL57	四节点
	MASS71	

7.2.3 ANSYS 稳态热分析的基本过程

ANSYS 热分析可分为三个步骤：

- 前处理：建模
- 求解：施加载荷计算
- 后处理：查看结果

1. 建模

- (1) 确定 jobname、title、unit；
- (2) 进入 PREP7 前处理，定义单元类型，设定单元选项；

(3) 定义单元实常数;

(4) 定义材料热性能参数, 对于稳态传热, 一般只需定义导热系数, 它可以是恒定的, 也可以随温度变化;

(5) 创建几何模型并划分网格。

2. 施加载荷计算

(1) 定义分析类型

- 如果进行新的热分析:

Command: ANTYPE, STATIC, NEW

GUI: Main menu>Solution>-Analysis Type->New Analysis>Steady-state

- 如果继续上一次分析, 比如增加边界条件等:

Command: ANTYPE, STATIC, REST

GUI: Main menu>Solution>Analysis Type->Restart

(2) 施加载荷

可以直接在实体模型或单元模型上施加五种载荷(边界条件):

a、恒定的温度

通常作为自由度约束施加于温度已知的边界上。

Command Family: D

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Temperature

b、热流率

热流率作为节点集中载荷, 主要用于线单元模型中(通常线单元模型不能施加对流或热流密度载荷), 如果输入的值为正, 代表热流流入节点, 即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上则 ANSYS 读取温度值进行计算。

注意 如果在实体单元的某一节点上施加热流率, 则此节点周围的单元要密一些, 在两种导热系数差别很大的两个单元的公共节点上施加热流率时, 尤其要注意。此外, 尽可能使用热生成或热流密度边界条件, 这样结果会更精确些。

Command Family: F

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Heat Flow

c、对流

对流边界条件作为面载施加于实体的外表面, 计算与流体的热交换, 它仅可施加于实体和壳模型上, 对于线模型, 可以通过对流线单元 LINK34 考虑对流。

Command Family: SF

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Convection

d、热流密度

热流密度也是一种面载。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOTTRAN CFD 计算得到时, 可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果输入的值为正, 代表热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。热流密度与对流可以施加在同一外表面, 但 ANSYS 仅读取最后施加的面载进行计算。

Command Family: F

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Heat Flux

e. 生热率

生热率作为体载施加于单元上，可以模拟化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。

Command Family: BF

GUI: Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Heat Generat

(3) 确定载荷步选项

对于一个热分析，可以确定普通选项、非线性选项以及输出控制。

a. 普通选项

- 时间选项：虽然对于稳态热分析，时间选项并没有实际的物理意义，但它提供了一个方便的设置载荷步和载荷子步的方法。

Command: TIME

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time-Time Step/Time and Substps

- 每载荷步中子步的数量或时间步大小：对于非线性分析，每一载荷步需要多个子步。

Command: NSUBST

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time and Substps

Command: DELTIM

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time-Time Step

- 递进或阶越选项：如果定义阶越 (stepped) 选项，载荷值在这个载荷步内保持不变；如果为递进 (ramped) 选项，则载荷值由上一载荷步值到本载荷步值随每一子步线性变化。

Command: KBC

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time-Time Step/Time and Substps

b. 非线性选项

- 迭代次数：本选项设置每一子步允许的最多的迭代次数。默认值为 25，对大多数热分析问题足够。

Command: NEQIT

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Nolinear>Equilibrium Iter

- 自动时间步长：对于非线性问题，可以自动设定子步间载荷的增长，保证求解的稳定性和准确性。

Command: AUTOTS

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time-Time Step/Time and Substps

- 收敛误差：可根据温度、热流率等检验热分析的收敛性。

Command: CNVTOL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Nolnearly>Convergence Crit

- 求解结束选项: 如果在规定的迭代次数内, 达不到收敛, ANSYS 可以停止求解或到下一载荷步继续求解。

Command: NCNV

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Nolnearly>Criteria to Stop

- 线性搜索: 设置本选项可使 ANSYS 用 Newton-Raphson 方法进行线性搜索。

Command: LNSRCH

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Nolnearly>Line Search

- 预测矫正: 本选项可激活每一子步第一次迭代对自由度求解的预测矫正。

Command: PRED

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Nolnearly>Predictor

c. 输出控制

- 控制打印输出: 本选项可将任何结果数据输出到*.out 文件中。

Command: OUTPR

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>Solu Printout

- 控制结果文件: 控制*.rth 的内容。

Command: OUTRES

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Output Ctrls>DB/Results File

(4) 确定分析选项

a. Newton-Raphson 选项 (仅对非线性分析有用)

Command: NROPT

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

b. 选择求解器: 可选择如下求解器中一个进行求解:

- Frontal solver (默认)
- Jacobi Conjugate Gradient (JCG) solver
- JCG out-of-memory solver
- Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (ICCG) solver
- Pre-Conditioned Conjugate Gradient Solver (PCG)
- Iterative (automatic solver selection option)

Command: EQSLV

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

注意 热分析可选用 Iterative 选项进行快速求解, 但如下情况除外:

- 热分析包含 SURF19 或 SURF22 或超单元;
 - 热辐射分析;
 - 相变分析;
 - 需要 restart an analysis。
- c. 确定绝对零度: 在进行热辐射分析时, 要将目前的温度值换算为绝对温度。如果使用

的温度单位是摄氏度，此值应设定为 273；如果使用的是华氏度，则为 460。

Command: TOFFST

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

(5) 保存模型：点击 ANSYS 工具条 SAVE_DB

(6) 求解

Command: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>Current LS

3. 后处理

ANSYS 将热分析的结果写入 *.rth 文件中，它包含如下数据：

基本数据：

- 节点温度

导出数据：

- 节点及单元的热流密度
- 节点及单元的热梯度
- 单元热流率
- 节点的反作用热流率
- 其他

对于稳态热分析，可以使用 POST1 进行后处理。

进入 POST1 后，读入载荷步和子步：

Command: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>-Read Results-By Load Step

可以通过如下三种方式查看结果：

- 彩色云图显示

Command: PLNSOL, PLESOL, PLETAB 等

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Nodal Solu, Element Solu, Elem Table

- 矢量图显示

Command: PLVECT

GUI: Main Menu>General Postproc>Plot Results>Pre-defined or Userdefined

- 列表显示

Command: PRNSOL, PRESOL, PRRSOL 等

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solu, Element Solu, Reaction Solu

7.3 瞬态热分析

7.3.1 瞬态传热分析的定义

瞬态热分析用于计算一个系统的随时间变化的温度场及其他热参数。在工程上一般用瞬

态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。

瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似。主要的区别是瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。为了表达随时间变化的载荷，首先必须将载荷~时间曲线分为载荷步。载荷~时间曲线中的每一个拐点为一个载荷步，如下图 7-1 所示。

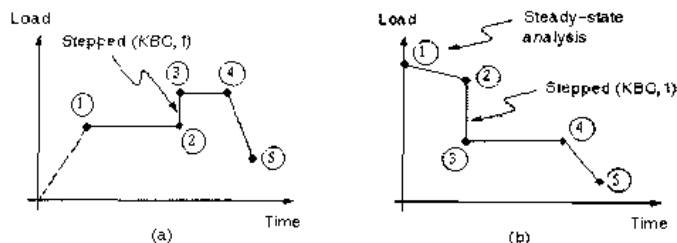


图 7-1 载荷—时间曲线图

对于每一个载荷步，必须定义载荷值及时间值，同时必须选择载荷步为渐变或阶越。

7.3.2 瞬态热分析中的单元及命令

瞬态热分析中使用的单元与稳态热分析相同。

7.3.3 ANSYS 瞬态热分析的主要步骤

- 建模
- 加载求解
- 后处理

7.3.4 建模

- 确定 jobname、title、units，进入 PREP7；
- 定义单元类型并设置选项；
- 如果需要，定义单元实常数；
- 定义材料热性能：一般瞬态热分析要定义导热系数、密度及比热；
- 建立几何模型；
- 对几何模型划分网格。

7.3.5 加载求解

1. 定义分析类型

- 如果第一次进行分析，或重新进行分析

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis>Transient

Command: ANTYPE, TRANSIENT, NEW

- 如果接着上次的分析继续进行（例如增加其他载荷）

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Type>Restart

Command: ANTYPE, TRANSIENT, REST

2. 获得瞬态热分析的初始条件

(1) 定义均匀温度场

如果已知模型的起始温度是均匀的，可设定所有节点初始温度

Command: TUNIF

GUI: Main Menu> Solution>-Loads->Settings>Uniform Temp

如果不在对话框中输入数据，则默认为参考温度，参考温度的值默认为零，但可通过如下方法设定参考温度：

Command: TREF

GUI: Main Menu> Solution>-Loads->Settings>Reference Temp

注意 设定均匀的初始温度，与如下的设定节点的温度（自由度）不同

Command: D

GUI: Main Menu>Solution>-Loads->Apply>-Thermal->Temperature>On Nodes

初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效；而设定节点温度将保持贯穿整个瞬态分析过程，除非通过下列方法删除此约束：

Command: DDELE

GUI: Main Menu> Solution>-Loads->Delete>-Thermal-Temperature>On Nodes

(2) 设定非均匀的初始温度

在瞬态热分析中，节点温度可以设定为不同的值：

Command: IC

GUI: Main Menu> Solution>Loads>Apply>-Initial Condit'n>Define

如果初始温度场是不均匀的且又是未知的，就必须首先作稳态热分析确定初始条件：

- 设定载荷（如已知的温度、热对流等）
- 将时间积分设置为 OFF：

Command: TIMINT, OFF

GUI: Main Menu> Preprocessor>Loads>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time Integration

- 设定一个只有一个子步的，时间很小的载荷步（例如 0.001）：

Command: TIME

GUI: Main Menu> Preprocessor>Loads>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time and Substps

- 写入载荷步文件：

Command: LSWRITE

GUI: Main Menu> Preprocessor>Loads>Write LS File

- 或先求解：

Command: SOLVE

GUI: Main Menu> Solution>Solve>Current LS

注意 在第二载荷步中，要删去所有设定的温度，除非这些节点的温度在瞬态分析与稳态分析相同。

3. 设定载荷步选项

(1) 普通选项

- 时间：本选项设定每一载荷步结束时的时间：

Command: TIME

GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts-Time/Frequenc>Time and Substps

- 每个载荷步的载荷子步数，或时间增量

对于非线性分析，每个载荷步需要多个载荷子步。时间步长的大小关系到计算的精度。步长越小，计算精度越高，同时计算的时间越长。根据线性传导热传递，可以按如下公式估计初始时间步长：

$$ITS = \delta^2 / 4\alpha$$

其中 δ 为沿热流方向热梯度最大处的单元的长度， α 为导温系数，它等于导热系数除以密度与比热的乘积 ($\alpha = k/\rho c$)。

Command: INSUBST or DELTIM

GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time and Substps

如果载荷在这个载荷步是恒定的，需要设为阶越选项；如果载荷值随时间线性变化，则要设定为渐变选项：

Command: KBC

GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time and Substps

(2) 非线性选项

- 迭代次数：每个子步默认的次数为 25，这对大多数非线性热分析已经足够。

Command: NEQIT

GUI: Main Menu> Solution>-Load step opts>Nonlinear>Equilibrium Iter

- 自动时间步长：本选项为 ON 时，在求解过程中将自动调整时间步长。

Command: AUTOTS

GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time and Substps

- 时间积分效果：如果将此选项设定为 OFF，将进行稳态热分析。

Command: TIMINT

GUI: Main Menu> Solution>-Load Step Opts->Time/Frequenc>Time Integration

(3) 输出选项

- 控制打印输出：本选项可将任何结果数据输出到 *.out 文件中

Command: OUTPR

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts->Output Ctrl>Solu Printout

- 控制结果文件：控制 *.rth 的内容

Command: OUTRES

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts->Output Ctrl>DB/Results File

(4) 存盘求解

7.3.6 后处理

ANSYS 提供两种后处理方式:

- POST1, 可以对整个模型在某一载荷步 (时间点) 的结果进行后处理。
Command: POST1
GUI: Main Menu>General Postproc.
- POST26, 可以对模型中特定点在所有载荷步 (整个瞬态过程) 的结果进行后处理。
Command: POST26
GUI: Main Menu>TimeHist Postproc

1. 用 POST1 进行后处理

- 进入 POST1 后, 可以读出某一时间点的结果:

Command: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>Read Results>By Time/Freq

如果设定的时间点不在任何一个子步的时间点上, ANSYS 会进行线性插值。

- 此外还可以读出某一载荷步的结果:

GUI: Main Menu>General Postproc>Read Results>By Load Step

然后就可以采用与稳态热分析类似的方法, 对结果进行彩色云图显示、矢量图显示、打印列表等后处理。

2. 用 POST26 进行后处理

- 首先要定义变量:

Command: NSOL or ESOL or RFORCE

GUI: Main Menu>TimeHist Postproc>Define Variables

- 然后就可以绘制这些变量随时间变化的曲线:

Command: PLVAR

GUI: Main Menu>TimeHist Postproc>Graph Variables

或列表输出:

Command: PRVAR

GUI: Main Menu>TimeHist Postproc>List Variables

此外, POST26 还提供许多其他功能, 如对变量进行数学操作等。

7.3.7 相变问题

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题, 例如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态的问题:

- 相变问题需要考虑熔融潜热, 即在相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热 (如图 7-2 所示)。

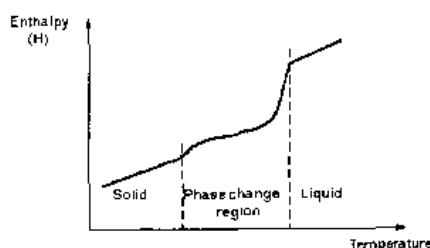


图 7-2 熔融潜热

焓的单位是 J/m^3 ，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int \rho c(T) dT$$

- 求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON。
- 选用低阶的热单元，例如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，请将单元选项 KEYOPT(1) 设置为 1：

Command: keyopt(1)=1

GUI: Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete>Options>-Specific heat matrix->Diagonalized

- 在设定瞬态积分参数时，请将 THETA 值设置为 1（默认为 0.5）：

Command: TINTP

GUI: Main Menu>Solution>-Load and Step Opts->Time/Frequency>Time intergration>THETA

- 线性搜索将有助于加速相变问题的求解。

Command: LNSRCH

GUI: Main Menu>Solution>-Load and Step Opts->Nonlinear>Line Search

7.4 热力学分析实例

7.4.1 引言

在本实例中将对主轴发热情况做分析计算。一个机床新产品的开发研制按传统的方式要经过产品设计，样机制造，性能实验，样机评价和修改设计等几个阶段。这种设计方法开发研制周期长，做实体样机投资大。对于高速五轴加工中心这样结构复杂、运动自由度多、性能要求高的机床产品可能要经过几个循环才能得到满意的结果投入生产。虚拟制造技术是将虚拟现实技术应用于机床新产品的设计开发，在计算机上设计出满足视觉动感效果的三维动态机床虚拟样机模型，对模型进行仿真性能实验和样机评价，其结果直接反馈修改设计样机。对实体机床的实验和评价过程可以完全在计算机上进行，节约了大量样机试制投资，也缩短了开发时间。

五轴加工中心的虚拟制造技术分为虚拟样机的建模和仿真实验。仿真实验包括运动学、

动力学和热力学等。高速化是近年来机床技术发展的重要趋势，速度高，发热也就严重，热力学仿真就显得非常重要。主轴作为机床的心脏部件，集中地反映了机床的高速能力。主轴转速越高，它的发热也就越严重，可能烧伤轴承，咬死主轴。因此，为了保证加工中心的可靠性，必须在设计阶段对主轴进行虚拟仿真热性能分析。借助于有限元技术，可对机床的主要结构部件进行比较精确的分析计算，得到机床高速时发热的温度变化和温度场分布等。

五轴联动加工中心，自动实现五轴联动，自动进行任意角度的加工，进行四面和五面加工，可加工具有非常复杂轮廓、型腔的工件，可加工其他铣头无法加工的部位，广泛适用于模具，航空航天，船舶工业，汽车等制造领域。具有五面加工和五轴联动功能的铣头大大扩展了数控铣床的加工范围，提高了数控铣床的使用价值。

本文讨论的是两个旋转自由度集中在主轴模块上的五轴加工中心，分为两部分，即旋转头和铣头。旋转头部分固定在滑枕头上，铣头部分通过锥柄和旋转头部分相联结，可以快速更换。主电机驱动主轴实现主切削旋转运动，通过两对伞齿轮传动，改变主轴的方向；控制电机驱动中间轴套，控制整个铣头部分围绕轴线 E 旋转运动，另外有一液压部件驱动主轴和主轴座部分围绕轴线 F 旋转，这两个运动的合成实现 A (B) 轴联动。由于该机构采用机械传动，主电机转速为 6000rpm，在这样高的转速下工作，发热是比较严重的问题。当发热量过大或温升超过一定值时，主轴不能在设定的转速下工作，轻则影响精度，发热严重则烧坏轴承。因此，必须对主轴发热情况做分析计算。

7.4.2 建立有限元模型

有限元法是将研究对象离散成有限个单元体，通过分析得到一组代数方程进而求得近似解。有限元建模和分析技术为各专业建立分析模型，共享数据提供了有效途径，尤其是各种软件包大大简化了对具体问题的分析过程，其中的热分析模块更是热分析的便利工具和有效手段。

分析的对象为数控自动万能铣头的简化结构图中的复合支承部分中的主轴，所采用的建模方法与静力学分析实例中的建模方法一样。对所分析的主轴取材料系数：弹性模量 $E=200 \times 10^3 \text{Mpa}$ ，密度 $\rho=7800 \text{kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu=0.3$ ，使用 PLANE55 单元和 SOLID70 单元。采用由面旋转成体的方法建立三维图形。网格划分时，采用手工划分，在轴向 20mm 一份，周向每 10° 一份，径向主要根据台阶来划分。轴承内圈处网格划分为每个轴承轴向划分为四等分，见图 7-3。这样可以使得单元近似于 SOLID45，可以使得单元更规则，同时限制单元的个数，从而提高计算机的计算速度和计算精度。

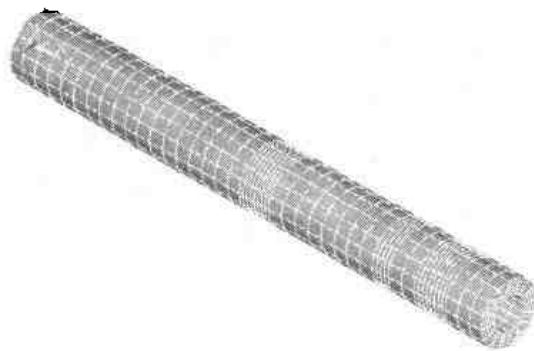


图 7-3 铣刀主轴的网格图

7.4.3 求取热力学系数

轴承的产生热量和传导热量的过程是非常复杂的。在建立热模型时,需要进行一些假设和简化。假设轴承转动时产生的热量来自于轴承滚动摩擦产生的热量。热流率是由轴向预紧力、转速和摩擦系数(取 0.0015)决定的,计算公式如下:

$$F_r = F_Q / \sin 15^\circ \text{ (N)}$$

$$M = \mu F_r d / 2 \text{ (N.m)}$$

$$P = M \omega \text{ (W)}$$

F_r ——径向载荷; F_Q ——轴载荷; M ——摩擦力矩

P ——功率损耗; d ——轴承内径; μ ——摩擦系数

该主轴使用微预紧,轴向预紧力为 167N。当轴向预紧力为 167N,摩擦系数为 0.0015 时,求出每个轴承功率损耗,见表 7-2。将每个轴承功率损耗平分到轴承内圈的节点上。

表 7-2 求功率损耗

轴承型号	轴向载荷	径向载荷	摩擦力矩	功率损耗
7017C	167N	645.3N	0.0411N	25.81W

对流换热系数由自然对流传热的经验公式求得。具体公式如下:

$$G_r P_r = \beta g d^3 t / \nu^2$$

$$N_u = C(G_r P_r)^n$$

$$\alpha = N_u \lambda / d$$

G_r ——格拉晓夫准数; P_r ——普朗特准数; d ——轴外径;

C, n ——为常数,和流动性质、面朝向有关

α ——对流换热系数; N_u ——自然对流传热准数

由于计算得到的 $G_r P_r$ 值在 $10^4 \sim 10^9$ 之间,可以断定主轴的表面流态为层流,常数 $C=0.53, n=0.25$,将求得自然对流传热准数(N_u)代入公式,求得对流换热系数为 $7.397\text{W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。导热系数取为 $59.5\text{W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。

7.4.4 加载并求解

热分析模块用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数,热分析基于能量守恒原理的热平衡方程,用有限元计算各节点的温度,并导出其他物理参数。

将对流换热系数和导热系数加到轴的热分析计算模型上,使用 ANSYS 的热模块进行求解:

1. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Loads-Apply, 出现如图 7-4 所示的菜单。



图 7-4 热加载菜单

2. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Temperature, 在节点上加上恒定的温度 25°C 。
3. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Heat Genera, 在节点上加上生热率。
4. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Loads-Apply> -Thermal-Convection, 在节点上加上对流换热系数。
5. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Loads-Apply>-Thermal-Heat Flow, 在节点上加上导热系数。加载后的模型图见图 7-5。
6. 选取菜单途径 Main Menu: Solution>-Solve-Current LS。等 Solution is done 出现, 求解结束。

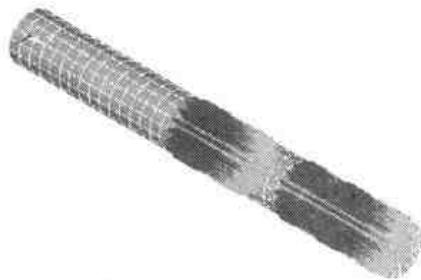


图 7-5 加载后的模型图

7. 选取菜单途径 Main Menu:General Postproc>Query Results>Subgrid Solu, 点击要查找的节点, 求得的温度场分布如图 7-6。

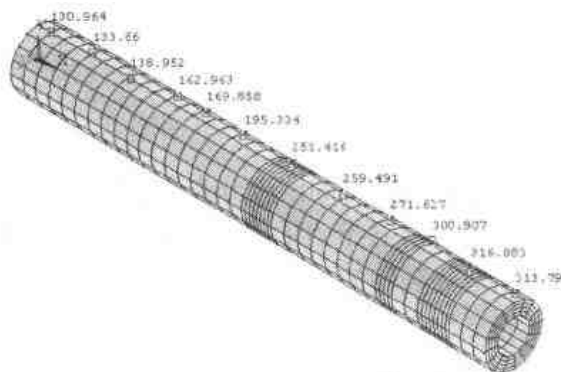


图 7-6 主轴的温度场分布

7.4.5 计算结果分析与改进措施

当采用普通轴承 7017C, 转速达到 6000rpm, 脂润滑时, 其虚拟计算的主轴发热和温度分布如图 7-6 所示, 轴承支称处的最高温度为 316°C。随着转速的提高, 发热增加的两个主要原因: ①作用在轴承滚珠上的离心力和陀螺力矩增加, 使摩擦力增加; ②温度升高使轴承膨胀, 从而增加了预紧力, 使摩擦力矩增加。忽略轴承小范围内的温度变化, 发热温升和摩擦系数与主轴转速基本上成线性关系, 见图 7-7。

7017C 的极限转速为 4500rpm (脂润滑) 和 5600rpm (油润滑), 而 H701917C 的极限转速为 12500rpm。可知将 7017C 换成 H701917C 后, 可提高速度近 3 倍, 高速轴承的油润滑极限转速比脂润滑极限转速提高 40%, 由于加上预紧力后, 其极限转速只能达到理论值的 50-60%。

根据计算结果, 当采用 7017C 轴承, 转速为 1000rpm 时, 温度基本符合要求。采用高速轴承 H701917C 时, 在脂润滑状态可达 3000rpm, 油润滑状态可达 4500rpm, 而机床设计的最高转速为 6000rpm, 仍达不到设计要求。

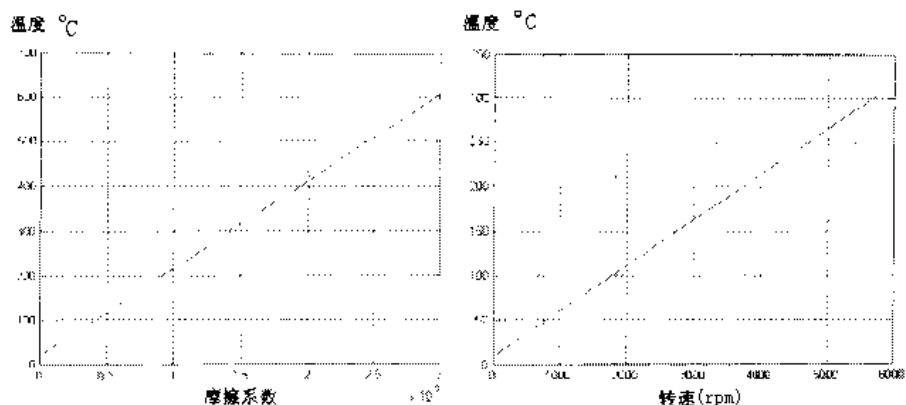


图 7-7 摩擦系数和转速与温度的关系图

为满足设计指标, 可以采用下述方法: ①采用进口精密轴承。由经验数据可知, 可提高转速 20%, 因此在油润滑状态下可基本上满足 6000rpm。②采用陶瓷轴承。与钢制角接触球轴承相比, 陶瓷球轴承的主要优点有: 作用在滚珠上的离心力及陀螺力矩较小; 滚珠的热膨胀系数较小、轴承在运转中预紧力变化缓慢; 滚珠的纵弹性系数较大, 轴承的刚度增大。同型号的陶瓷轴承可提高 20% 转速。缺点是成本过高。③采用变预紧力方法。这是一种根据温度变化而自动改变预紧力的方法。因正在研究中, 本文不做过多讨论。

其他方法也可满足设计要求, 如油雾润滑和油气润滑, 但成本较高, 这里不宜采用。

采用虚拟仿真技术, 在设计阶段可得到所开发的新产品的特征参数, 用虚拟实验来验证设计是否满足设计指标。本文对主轴发热和温升所做的虚拟仿真, 比较准确的得出了近似实际情况的结果, 指出了切实可行的改进措施。

虚拟现实技术应用于复杂机床的新产品开发, 显示出了巨大的优越性, 本文的研究结果也证明了这一点。但必须指出, 虚拟现实和现实很可能存在差距, 仿真逼近真实情况的程度直接影响计算精度。

采用虚拟现实的机床虚拟制造技术使机床产品的设计开发出现了观念性的变化, 无疑会

取代传统的设计方法成为今后产品设计的主要手段。对虚拟样机的仿真实验是机床质量的重要保证。本文所做的工作仅仅是热力学仿真的一小部分，还有待进一步研究。

7.5 热辐射

7.5.1 什么是热辐射

辐射是一种通过电磁波传递能量的方式。电磁波以光速传播且无需任何介质。热辐射仅为电磁波谱中的一小段。因为由于热辐射引起的热流与物体表面绝对温度的四次方成正比，因此热辐射分析是高度非线性的。

7.5.2 分析热辐射问题

ANSYS 提供了三种方法分析热辐射问题：

- 用 LINK31，辐射线单元，分析两个点或多对点之间的热辐射；
- 用表面效应单元 SURF19 或 SURF22，分析点对面的热辐射；
- 用 AUX12，热辐射矩阵生成器，分析面与面之间的热辐射。

以上三种方法既可用于稳态热分析，也可用于瞬态热分析。

热辐射分析要注意温度的单位制，因为计算热辐射使用的温度单位是绝对温度。如果在加载时使用的是华氏温度，就要设置 460 的差值；如果为摄氏温度，差值为 273。

Command: TOFFST

GUI: Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Options

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

7.5.3 使用 LINK31——辐射线单元

LINK31 是一个两节点非线性线单元，用于计算由辐射引起的两点之间的热传递。此单元要求输入如下的实常数：

- 有效的热辐射面积
- 形状系数
- 辐射率
- Stefan-Boltzmann 常数

7.5.4 使用表面效应单元

表面效应单元可以方便地分析点与面之间的辐射传热。SURF19 用于二维模型，SURF22 用于三维模型。单元应设置为包含辐射 KEYOPT (9)。

7.5.5 使用 AUX12——辐射矩阵生成器

此方法用于计算多个辐射面之间的辐射传热。这种方法生成辐射面之间形状系数矩阵，

并将此矩阵作为超单元用于热分析。

AUX12 方法由三个步骤组成：

- 定义辐射面
- 生成辐射矩阵
- 在热分析中使用辐射矩阵

1. 定义辐射面

- (1) 在 PREP7 中建模、划分网格。辐射面往往是 3D 模型中的面或 2D 模型中的边。
- (2) 在辐射表面用 SHELL57 (3D) 或 LINK32 (2D) 划分网格。最好的方法是先选择辐射表面的节点，然后用如下方法创建 SHELL57 或 LINK32 单元：

Command: ESURF

GUI: Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>On Free Surf

注意 辐射面上的 SHELL57 或 LINK32 单元与节点必须与实体单元相吻合，否则计算的结果是不正确的。

生成的 SHELL57 或 LINK32 单元的取向也很重要。AUX12 假定辐射的方向是 SHELL57 的+Z 向或 LINK32 的+Y 向。因此在生成 SHELL57 或 LINK32 单元时要注意节点的排列顺序。

- (3) 如果所分析的系统是开放的，即一个面所辐射的热能未被模型中其他的面吸收，则必须定义一个空间节点，用于吸收损失的辐射热量。这个节点的位置是任意的。对于封闭的系统，不应定义空间节点。

2. 生成辐射矩阵

- (1) 进入 AUX12：

Command: /AUX12

GUI: Main Menu>Radiation Matrix

- (2) 选择组成辐射面的节点和单元。比较方便的方法是根据单元类型选择单元，并选择单元上的节点。

- (3) 确定模型是 3D 还是 2D。

Command: GEOM

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Other Setting

AUX12 用不同的算法计算 2D 或 3D 模型的形状系数。AUX12 默认为 3D。2D 分为纯平面或轴对称，默认为纯平面。

- (4) 定义每个辐射面的辐射率（默认为 1）。

Command: EMIS

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Emissivities

- (5) 定义 Stefan-Boltzmann 常数（默认为英制单位 $0.199\text{E}-10\text{Btu/hr-in}^2\text{-R}^4$ ）：

Command: STEF

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Other Settings

- (6) 确定用什么方式计算形状系数。

Command: VTYPE

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Write Matrix

选择是隐藏还是非隐藏方法:

- 非隐藏方法计算每两个单元之间的形状系数, 无论它们之间有无障碍;
- 隐藏方法(默认)用一种隐藏线算法判断两辐射面之间是否“可见”, 如果可见则计算形状系数。

(7) 如为开放系统, 定义空间节点:

Command: SPACE

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Other Settings

(8) 计算辐射矩阵并写入 jobname.sub 文件:

Command: WRITE

GUI: Main Menu>Radiation Matrix>Write Matrix

如果要打印此矩阵, 在执行上述命令之前输入 MPRINT, 1。

(9) 选择所有的节点和单元。

3. 在热分析中使用辐射矩阵

(1) 重新进入 PREP7, 定义一个新的单元类型 MATRIX50 (超单元):

(2) 将单元类型指向超单元:

Command: TYPE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>Elements>Elem Attributes

(3) 读入超单元矩阵:

Command: SE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>Elements>-Superelements-From .SUB File

(4) 不选择或删除用于生成辐射矩阵的 SHELL57 或 LINK32 单元:

Command: EDELE

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Delete>Elements

(5) 进入/SOLUTION 施加其他热载荷并求解。

第 8 章

ANSYS 高级分析技术

8.1 优化设计

8.1.1 基本概念

优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术。所谓“最优设计”，指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且所需的支出（如重量、面积、体积、应力、费用等）最小。也就是说，最优设计方案就是一个最有效率的方案。

设计方案的任何方面都是可以优化的，比如说：尺寸（如厚度），形状（如过渡圆角的大小）、支撑位置、制造费用、自然频率、材料特性等。实际上，所有可以参数化的 ANSYS 选项都可以作优化设计。

ANSYS 程序提供了两种优化的方法，这两种方法可以处理绝大多数的优化问题。零阶方法是一个很完善的处理方法，可以很有效地处理大多数的工程问题。一阶方法基于目标函数对设计变量的敏感程度，因此更加适合于精确的优化分析。

对于这两种方法，ANSYS 程序提供了一系列的分析——评估——修正的循环过程。就是对于初始设计进行分析，对分析结果就设计要求进行评估，然后修正设计。这一循环过程重复进行直到所有的设计要求都满足为止。

除了这两种优化方法，ANSYS 程序还提供了一系列的优化工具以提高优化过程的效率。例如，随机优化分析的迭代次数是可以指定的。随机计算结果的初始值可以作为优化过程的起点数值。

在介绍优化设计过程之前，我们先给出一些基本的定义：设计变量、状态变量、目标函数、合理和不合理的设计、分析文件、迭代、循环、设计序列等。我们看以下一个典型的优化设计问题：

在以下的约束条件下找出如下矩形截面梁的最小重量：

- 总应力 σ 不超过 σ_{\max} [$\sigma \leq \sigma_{\max}$]
- 梁的变形 δ 不超过 δ_{\max} [$\delta \leq \delta_{\max}$]
- 梁的高度 h 不超过 h_{\max} [$h \leq h_{\max}$]

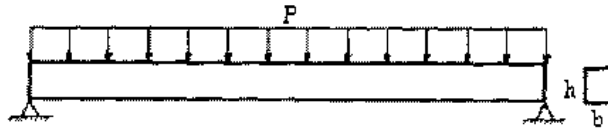


图 8-1 梁的优化设计示例

设计变量 (DV_s) 为自变量, 优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限, 它定义了设计变量的变化范围。在以上的问题里, 设计变量很显然为梁的宽度 b 和高度 h 。 b 和 h 都不可能为负值, 因此其下限应为 $b, h > 0$, 而且, h 有上限 h_{\max} 。ANSYS 优化程序允许定义不超过 60 个设计变量。

状态变量 (SV_s) 是约束设计的数值。它们是“因变量”, 是设计变量的函数。状态变量可能会有上下限, 也可能只有单方面的限制, 即只有上限或只有下限。在上述梁问题中, 有两个状态变量: σ (总应力) 和 δ (梁的位移)。在 ANSYS 优化程序中用户可以定义不超过 100 个状态变量。

目标函数是要尽量减小的数值。它必须是设计变量的函数, 也就是说, 改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在以上的问题中, 梁的总重量应该是目标函数。在 ANSYS 优化程序中, 只能设定一个目标函数。

设计变量, 状态变量和目标函数总称为优化变量。在 ANSYS 优化中, 这些变量是由用户定义的参数来指定的。用户必须指出在参数集中哪些是设计变量, 哪些是状态变量, 哪是目标函数。

设计序列是指确定一个特定模型的参数的集合。一般来说, 设计序列是由优化变量的数值来确定的, 但所有的模型参数 (包括不是优化变量的参数) 组成了一个设计序列。

一个合理的设计是指满足所有给定的约束条件 (设计变量的约束和状态变量的约束) 的设计。如果其中任一约束条件不被满足, 设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计 (如果所有的设计序列都是不合理的, 那么最优设计是最接近于合理的设计, 而不考虑目标函数的数值)。

分析文件是一个 ANSYS 的命令流输入文件, 包括一个完整的分析过程 (前处理, 求解, 后处理)。它必须包含一个参数化的模型, 用参数定义模型并指出设计变量, 状态变量和目标函数。由这个文件可以自动生成优化循环文件 (Jobname.LOOP), 并在优化计算中循环处理。

一次循环指一个分析周期 (可以理解为执行一次分析文件)。最后一次循环的输出存储在文件 Jobname.OPO 中。优化迭代 (或仅仅是迭代过程) 是产生新的设计序列的一次或多次分析循环。一般来说, 一次迭代等同于一次循环。但对于一阶方法, 一次迭代代表多次循环。

优化数据库记录当前的优化环境, 包括优化变量定义, 参数, 所有优化设定和设计序列集合。该数据库可以存储 (在文件 Jobname.OPT), 也可以随时读入优化处理器中。

上述的许多概念可以用图解帮助理解。图 1-2 示出了优化分析中的数据流向。分析文件必须作为一个单独的实体存在, 优化数据库不是 ANSYS 模型数据库的一部分。

8.1.2 优化设计的步骤

共有两种方法实现 ANSYS 优化设计: 批处理方法和通过 GUI 交互式地完成。这两种方法的选择取决于用户对于 ANSYS 程序的熟悉程度和是否习惯于图形交互方式。

如果对于 ANSYS 程序的命令相当熟悉，就可以选择用命令输入整个优化文件并通过批处理方式来进行优化。对于复杂的需用大量机时的分析任务来说（如非线性），这种方法更有效率。

而另一方面，交互方式具有更大的灵活性，而且可以实时看到循环过程的结果。在用 GUI 方式进行优化时，首要的是要建立模型的分析文件，然后优化处理器所提供的功能都可以交互式的使用，以确定设计空间，便于后续优化处理的进行。这些初期交互式的操作可以帮助用户缩小设计空间的大小，使优化过程得到更高的效率。

优化设计通常包括以下几个步骤，这些步骤根据用户所选用优化方法的不同（批处理 GUI 方式）而有细微的差别。

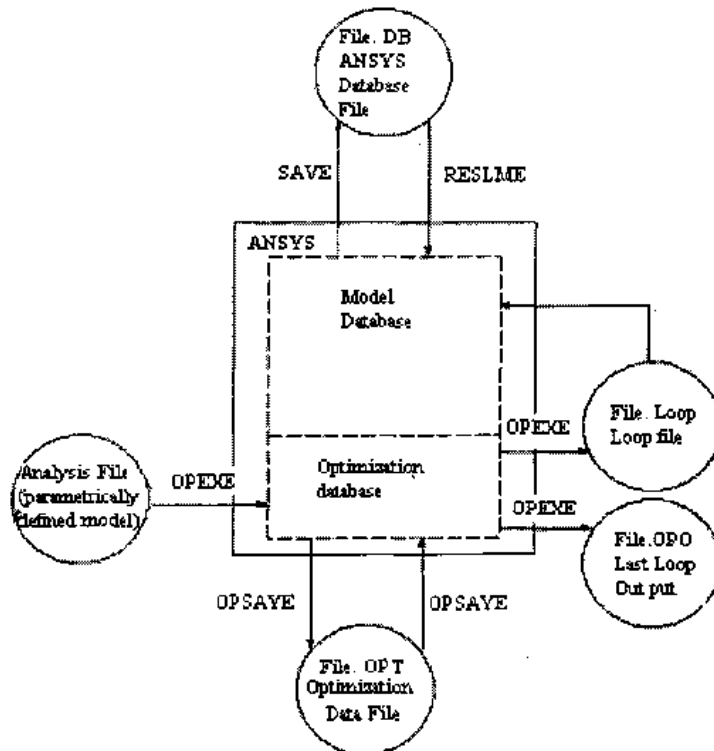


图 8-2 优化数据流向

1. 生成循环所用的分析文件。该文件必须包括整个分析的过程，而且必须满足以下条件：
 - a. 参数化建立模型（PREP7）。
 - b. 求解（SOLUTION）。
 - c. 提取并指定状态变量和目标函数（POST1/POST26）。
2. 在 ANSYS 数据库里建立与分析文件中变量相对应的参数。这一步是标准的做法，但不是必须的（BEGIN 或 OPT）。
3. 进入 OPT，指定分析文件（OPT）。
4. 声明优化变量。
5. 选择优化工具或优化方法。
6. 指定优化循环控制方式。
7. 进行优化分析。
8. 查看设计序列结果（OPT）和后处理（POST1/POST26）。

优化设计步骤的细节在下面列出。批处理方式和交互方式的区别也同时指出。

第一步：生成分析文件

分析文件生成是 ANSYS 优化设计过程中的关键部分。ANSYS 程序运用分析文件构造循环文件，进行循环分析。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的任意分析类型（结构、热、电磁等，线性或非线性）。（注：ANSYS/LS-DYNA 的显式分析不能进行优化。）

在分析文件中，模型的建立必须是参数化的（通常是优化变量为参数），结果也必须用参数来提取（用于状态变量和目标函数）。优化设计中只能使用数值参数（参数和 ANSYS 参数化设计语言（APDL）在 ANSYS Modeling and Meshing Guide 中有所细述）。

用户的任务是建立分析文件并保证其正确性。分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简练的，不是必须的语句（如完成图形显示功能和列表功能的语句等）应当从分析文件中省略掉。只有在交互过程中希望看到的显示[EPLODT 等]可以包含在分析文件中，或者将其定位到一个显示文件中[/SHOW]。请注意分析文件是要多次执行的，与优化分析本身无关的命令都会不必要的耗费机时，降低循环效率。

建立分析文件有两种方法：1) 用系统编辑器逐行输入；2) 交互式地完成分析，将 ANSYS 的 LOG 文件作为基础建立分析文件。这两种方式各有优缺点。

用系统编辑器生成分析文件同生成其他分析时的批处理文件方法是一样的。这种方法使得用户可以通过命令输入来完全地控制参数化定义。同样，本方法可以省去了删除多余命令的麻烦。但是，如果对于 ANSYS 命令集不熟悉的话，这种方法是不方便的。

对于这类用户来说，第二种方法相对容易一些。但是，在最后生成分析文件的过程中，ANSYS 的 LOG 文件要做较大的修改才能适合循环分析。

不论采用哪种方法，分析文件需要包括的内容都是一样的。以下说明建立分析文件的步骤：

◆ 参数化建立模型

用设计变量作为参数建立模型的工作是在 PREP7 中完成的。在给出的梁的例子中，设计变量是 B（梁的宽度）和 H（梁的高度），因此单元的实参是由 B 和 H 来表示的：

```
...
/PREP7
! 初始化设计变量:
B=2.0
H=3.0
!
ET, 1, BEAM3           ! 2-D 梁单元
AREA=B*H              ! 梁的横截面面积
IZZ= (B* (H**3)) /12  ! 绕 Z 轴的转动惯量
R, 1, AREA, IZZ, H    ! 以设计变量表示的单元实参
!
! 模型的其他部分
MP, EX, 1, 30E6       ! 杨氏模量
N, 1                  ! 结点
N, 11, 120
```

```

FILL,
E, 1, 2          ! 单元
EGEN, 10, 1, -1
FINISH          ! 退出 PREP7

```

前面提到，可以对设计的任何方面进行优化：尺寸、形状、材料性质、支撑位置、所加载荷等，唯一要求就是将其参数化。

设计变量（例如 B 和 V）可以在程序的任何部分初始化，一般是在 PREP7 中定义。这些变量的初值只是在设计计算的开始用得到，在优化循环过程中会被改变。

注意 如果用 GUI 模式完成输入，可能会遇到直接用鼠标拾取 (picking) 的操作。有些拾取操作是不允许参数化输入的。因此，应当避免在定义设计变量，状态变量和目标函数时使用这些操作，应该用可以参数化的操作来代替。

◆ 求解

求解器用于定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定载荷步，完成有限元计算。分析中所用到的数据都要指出：凝聚法分析中的主自由度，非线性分析中的收敛准则，谐波分析中的频率范围等。载荷和边界条件也可以作为设计变量。

梁的例子中，SOLUTION 部分的输入大致如下：

```

...
/SOLU
ANTYPE, STATIC          ! 静力分析 (缺省)
D, 1, UX, 0., 11, 10, UY ! UX=UY=0, 梁两端结点固定
SFBEAM, ALL, 1, PRES, 100 ! 施加压力
SOLVE
FINISH                  ! 退出 SOLUTION

```

这一步骤不仅仅限于一次分析过程。比如，可以先进行热分析再进行应力分析（在热应力计算中）。

◆ 参数化提取结果

在本步中，提取结果并赋值给相应的参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。

提取数据的操作用 *GET 命令 (Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data) 实现。通常用 POST1 来完成本步操作，特别是涉及到数据的存储，加减或其他操作。

在梁的例题中，梁的总重量是目标函数。因为重量与体积成比例（假定密度是均匀的），那么减小总体积就相当于减小总重量。因此可以选择总体积为目标函数。在本例中，状态变量选择为总应力和位移。这些参数可以用如下方法定义：

```

...
/POST1
SET, ...
NSORT, U, Y             ! 以 UY 为基准对结点排序
*GET, DMAX, SORT,, MAX ! 参数 DMAX=最大位移

```

```

!
! 线单元的推导数值由 ETABLE 得出
ETABLE, VOLU, VOLU           ! VOLU=每个单元的体积
ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1     ! SMAX_I=每个单元 I 结点处应力的
                             最大值
ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3     ! SMAX_J=每个单元 J 结点处应力的最
                             大值
!
SSUM                          ! 将单元表中每列的数据相加
*GET, VOLUME, SSUM,, ITEM, VOLU
                             ! 参数 VOLUME=总体积
ESORT, ETAB, SMAX_I,, 1      ! 按照单元 SMAX_I 的绝对值大小排序
*GET, SMAXI, SORT,, MAX      ! 参数 SMAXI=SMAX_I 的最大值
ESORT, ETAB, SMAX_J,, 1      ! 按照单元 SMAX_J 的绝对值大小排序
*GET, SMAXJ, SORT,, MAX      ! 参数 SMAXJ=SMAX_J 的最大值
SMAX=SMAXI>SMAXJ            ! 参数 SMAX=最大应力值
FINISH
...

```

请查阅*GET 和 ETABLE 命令以得到更详细的说明。

◆ 分析文件的准备

到此为止，我们已经对于分析文件的基本需求做了说明。如果是用系统编辑器来编辑的批处理文件，那么简单地存盘进入第二步即可。如果是用交互方式建模的话，用户必须在交互环境下生成分析文件。可以通过两种方式完成本步操作：数据库命令流文件或程序命令流文件。

数据库命令流文件——可以通过 LGWRITE 命令 (Utility Menu>File>Write DB Log File) 生成命令流文件。LGWRITE 将数据库内部的命令流写到文件 Jobname.LGW 中。内部命令流包含了生成当前模型所用的所有命令。

程序命令流文件——obname.LOG 包含了交互方式下用户输入的所有命令。如果用 Jobname.LOG 作为分析文件时，用户必须用系统编辑器删除文件中所有不必要的命令。因为交互方式下所有的操作都记录在 LOG 文件中，编辑工作会比较烦琐。而且，如果分析是在几个过程中完成的，就必须将几个 LOG 文合在一起编辑生成一个完整的分析文件。

第二步：建立优化过程中的参数

在完成了分析文件的建立以后，就可以开始优化分析了（如果是在系统中建立的分析文件的话，就要重新进入 ANSYS）。如果在交互方式进行优化的话，最好（但不是必须）从分析文件中建立参数到 ANSYS 数据库中来（在批处理方式下除外）。

做这一步有两个好处。初始数值可能作为一阶方法的起点，而且，对于各种优化过程来说，参数在数据库中可以在 GUI 下进行操作，便于定义优化变量。建立数据库参数可以选择下列任一种方法：

- 读入与分析文件相联的数据库文件 (Jobname.DB)。这样可以在 ANSYS 中建立整个模型的数据库。读入数据库文件可以用如下方法：

Command: RESUME

GUI: Utility Menu>File>Resume Jobname.db

Utility Menu>File>Resume from

- 将分析文件直接读入 ANSYS 进行整个分析。这样将重新建立整个数据库，但对于大模型来说要耗费大量的机时。要读入分析文件，可以选择下列方法之一：

Command: /INPUT

GUI: Utility Menu>File>Read Input from

- 仅从存储的参数文件中读参数到 ANSYS 中，参数文件是用 PARSAV 命令或由 Utility Menu>Parameters>Save Parameters 存储的。读入参数可以用下列方法之一：

Command: PARRES

GUI: Utility Menu>Parameters>Restore Parameters

- 重新定义分析文件中存在的参数。不过，这样做需要知道分析文件中定义了那些参数。用以下任一方式：

Command: *SET or "=" command

GUI: Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters

可以选择使用以上任意一种方式，然后用 OPVAR 命令（菜单路径 Main Menu>Design Opt>Design Variables）来指定优化变量。

在优化过程中，ANSYS 数据库不一定要同分析文件一致。模型的输入是在优化循环过程中由分析文件中自动读入的。

第三步：进入 OPT，指定分析文件（OPT）

以下的步骤是由 OPT 处理器来完成的。首次进入优化处理器时，ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列 1。这些参数值假定是一个设计序列。进入优化处理器可以用如下方式：

Command: /OPT

GUI: Main Menu>Design Opt

在交互方式下，用户必须指定分析文件名。这个文件用于生成优化循环文件 Jobname.LOOP。分析文件名无缺省值，因此必须输入。指定分析文件名，可以用下列方式之一：

Command: OPANL

GUI: Main Menu>Design Opt>Assign

在批处理方式下，分析文件通常是批命令流的第一部分，从文件的第一行到命令 /OPT 第一次出现。在批处理方式中，缺省的分析文件名是 Jobname.BAT（它是一个临时性的文件，是批处理输入文件的一个拷贝）。因此，在批处理方式下通常不用指定分析文件名。但是，如果出于某种考虑将批文件分成两个部分（一个用于分析，另一个用于整个优化分析），那么就必须在进入优化处理器后指定分析文件[OPANL]。

注意 在分析文件中，/PREP7 和 /OPT 命令必须出现在行的第一个非零字符处（即，不允许有诸如 \$ 等符号出现在有这些命令的行中）。这一点在生成优化循环文件时很关键。

第四步：声明优化变量

下一步是声明优化变量，即指定哪些参数是设计变量，哪些参数是状态变量，哪个参数是目标函数。以上提到，允许有不超过 60 个设计变量和不超过 100 个状态变量，但只能有一个目标函数。声明优化变量可以用如下的方法：

Command: OPVAR .

GUI: Main Menu>Design Opt>Design Variables

Main Menu>Design Opt>State Variables

Main Menu>Design Opt>Objective

对于设计变量和状态变量可以定义最大和最小值。目标函数不需要给定范围。每一个变量都有一个公差值，这个公差值可以由用户输入，也可以选择由程序计算得出。

如果用 OPVAR 命令定义的参数名不存在，ANSYS 数据库中将自动定义这个参数，并将初始值设为零。

用户可以在任意时间简单地通过重新定义参数的方法来改变已经定义过的参数，也可以删除一个优化变量[OPVAR, Name, DEL]。这种删除操作并不真正删除这个参数，而是不将它继续作为优化变量而已。

第五步：选择优化工具或优化方法

ANSYS 程序提供了一些优化工具和方法。缺省方法是单次循环。指定后续优化的工具和方法用下列命令：

Command: OPTYPE

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

优化方法是使单个函数（目标函数）在控制条件下达到最小值的传统化的方法。有两种方法是可用的：零阶方法和一阶方法。除此之外，用户可以提供外部的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法。使用其中任何一种方法之前，必须先定义目标函数。

- 零阶方法（直接法）：这是一个完善的零阶方法，使用所有因变量（状态变量和目标函数）的逼近。该方法是通用的方法，可以有效的处理绝大多数的工程问题。
- 一阶方法（间接法）：本方法使用偏导数，即使用因变量的一阶偏导数。此方法精度很高，尤其是在因变量变化很大，设计空间也相对较大时。但是，消耗的机时较多。
- 用户提供的优化方法：外部的优化程序（USEROP）可以代替 ANSYS 优化过程。

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。因为求最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出。但是，必须要指定设计变量。下面是可用的优化工具：

- 单步运行：实现一次循环并求出 FEA 解。可以通过一系列的单次循环，每次求解前设定不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。
- 随机搜索法：进行多次循环，每次循环设计变量随机变化。用户可以指定最大循环次数和期望合理理解的数目。本工具主要用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。
- 等步长搜索法：以一个参考设计序列为起点，本工具生成几个设计序列。它按照单一步长在每次计算后将设计变量在变化范围内加以改变。对于目标函数和状态变量的整体变化评估可以用本工具实现。

- 乘子算法：是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组合的设计序列。这种技术与称之为经验设计的技术相关，后者是用二阶的整体和部分因子分析。主要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。
- 最优梯度法：对用户指定的参考设计序列，本工具计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度。使用本工具可以确定局部的设计敏感性。
- 用户提供的优化工具：可以用外部过程（USEROP）替代 ANSYS 优化工具。

用户可以通过 USEROP 过程将自己的方法和工具补充进去。

第六步：指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，比如最大迭代次数等。所有这些控制参数的设定都在同一个路径下：

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

以下列出设定控制参数的命令：

- 设定零阶方法的控制参数：
Command: OPSUBP 和 Command: OPEQN
- 设定一阶方法的控制参数：
Command: OPFRST
- 设定随机搜索法的控制参数：
Command: OPRAND
- 设定等步长搜索法的控制参数：
Command: OPSWEEP
- 设定乘子算法的控制参数：
Command: OPFACT
- 设定最优梯度法的控制参数：
Command: OPGRAD
- 设定用户优化工具的控制参数：
Command: OPUSER

程序还提供了几个总体控制来设定优化过程中数据的存储方法：

- 指定优化数据的存储文件名（缺省为 Jobname.OPT）：

Command: OPDATA

GUI: Main Menu>Design Opt>Controls

- 用下列方法激活详细的结果输出：

Command: OPPRNT

GUI: Main Menu>Design Opt>Controls

- 确定最佳设计系列的数据是否存储，用下列方法（缺省是数据库和结果文件存储最后一个设计系列）：

Command: OPKEEP

GUI: Main Menu>Design Opt>Controls

用户还可以控制几个循环特性，包括分析文件在循环中如何读取。可以从第一行读取（缺省），也可以从第一个/PREP7 出现的位置开始读取；设定为优化变量的参数可以忽略（缺省），

也可以在循环中处理。而且，用户可以指定循环中存储哪种变量：只存储数值变量还是存储数值变量和数组变量。这个功能可以在循环中控制参数的数值（包括设计变量和非设计变量）。用下列方法设定这些循环控制特性：

Command: OPLOOP

GUI: Main Menu>Design Opt>Controls

OPLOOP 命令中的 Parms 变量控制在循环中存储哪个参数。在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不设置，除非是数组变量在分析文件外定义，而在循环中需要保存的情况。

第七步：进行优化分析

所有的控制选项设定好以后，就可以进行分析了。用下列方法开始分析：

Command: OPEXE

GUI: Main Menu>Design Opt>Run

在 OPEXE 执行时，优化循环文件（Jobname.LOOP）会根据分析文件生成。这个循环文件对用户是透明的，并在分析循环中使用。循环在满足下列情况时终止：收敛；中断（不收敛，但最大循环次数或是最大不合理的数目达到了）；分析完成。

如果循环是由于模型的问题（如网格划分有问题，非线性求解不收敛，与设计变量数值冲突等）中断时，优化处理器将进行下一次循环。如果是在交互方式下，程序将显示一个警告信息并询问是继续还是结束循环。如果是在批处理方式下，循环将自动继续。NCNV 命令（Main Menu>Solution>Nonlinear>Criteria to Stop）是控制非线性分析的，在优化循环中将被忽略。中断循环的设计序列是存盘的，但参数的数据有可能非常大，不符合实际情况。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件(Jobname.OPT)中。最多可以存储 130 组这样的序列。如果已经达到了 130 个序列，那么其中数据最“不好”的序列将被删除。

对于上述梁的例子，优化部分的输入大致如下：

```

/OPT                                !进入优化处理器
OPANL, ...                           !分析文件名（批处理方式不需要）
!
! 声明优化变量
OPVAR, B, DV, .5, 16.5                !B 和 H 为设计变量
OPVAR, H, DV, .5, 8
OPVAR, DMAX, SV, -0.1, 0             !DMAX 和 SMAX 为状态变量
OPVAR, SMAX, SV, 0, 20000
OPVAR, VOLUME, OBJ                    !VOLUME 为目标函数
!
!指定优化类型和控制
OPTYPE, SJBP                          !零阶方法
OPSUBP, 30                             !最大迭代次数
OPEXE                                  !开始优化循环

```

不同的优化过程可以系列地完成。比如，可以在零阶方法的分析结束后再做等步长搜索。

下面的命令对最佳设计序列做等步长搜索：

```
OPTYPE, SWEEP           !扫描评估工具
OPSWEEP, BEST, 5       !最佳设计序列每个设计变量 5 次评估
OPEXE                   !开始优化循环
```

请查阅/OPT, OPANL, OPTYPE, OPSUBP, OPSWEEP 和 OPEXE 命令以得到更详细的说明。

第八步：查看设计序列结果

优化循环结束以后，可以用本部分介绍的命令或相应的 GUI 路径来查看设计序列。这些命令适用于任意优化方法和工具生成的结果。

列出指定序列号的参数值：

```
Command: OPLIST
GUI: Main Menu>Design Opt>List
```

可以选择列出所有参数的数值，也可以只列出优化变量。

用图显示指定的参数随序列号的变化，可以看出变量是如何随迭代过程变化的。用以下方法实现：

```
Command: PLVAROPT
GUI: Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables
```

将图的 X 轴由序列号换成别的参数：

```
Command: XVAROPT
GUI: Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables
```

对于 PLVAROPT 和 PRVAROPT 操作，设计序列将自动按照 XVAROPT 中参数以升序排列。

对于等步长，乘子和梯度工具有一些特别的查看结果的方法。对于等步长搜索，用 OPRSW 命令列出结果，用 OPLSW 命令图示结果。对于乘子工具，用 OPRFA 命令列出结果，用 OPLFA 命令图示结果。对于梯度工具，用 OPRGR 命令列出结果，用 OPLGR 命令图示结果（相应的路径在后面对命令的详细叙述中提及）。

另一个得到优化数据的方法是用 STATUS 命令 (Main Menu>Design Opt>Status)。在优化处理器中使用本命令，将得到另外一些关于当前优化任务的信息，如分析文件名，优化技术，设计序列数，优化变量等。用 STATUS 命令可以方便地查看优化环境，验证需要的设定是否全部输入优化处理器。

除了查看优化数据，用户可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。缺省情况下，最后一个设计序列的结果存储在文件 Jobname.RST (或.RTH 等，视分析类型而定) 中。如果在循环运行前将 OPKEEP 设为 ON，最佳设计序列的数据也将存储在数据库和结果文件中。“最佳结果”在文件 Jobname.BRST (.BRTH 等) 中，“最佳数据库”在文件 Jobname.BDB 中。

8.1.3 优化设计的关键点

◆ 操作设计序列

查看数据以后，可能需要对其做一些操作。比如说，在随机搜索后，用户可能希望将所有的不合理设计序列删除，以合理的设计序列为数据点来进行后面的优化。这

里提供了几种改变设计序列的方法。

下面两个命令可以删除不需要的序列：

- 用下列命令选择最佳设计序列或所有合理的序列：

Command: OPSEL

GUI: Main Menu>Design Opt>Select/Delete

(所有没有用 OPSEL 命令选择的设计序列将永久地从优化数据库中删除)

- 删除指定范围内的设计序列：

Command: OPDEL

GUI: Main Menu>Design Opt>Select/Delete

对于这两个命令，剩余设计序列的原始序列号将不变（优化数据库可以存储 130 个设计序列）。

下列命令也可以对设计序列进行操作：

- 将两个现存的序列相加形成一个新的设计序列（可以有比例系数）：

Command: OPADD

GUI: Main Menu>Design Opt>Combine

- 用当前的数值参数值（没有在分析循环中运行）生成一个新的设计序列：

Command: OPMAKE

GUI: Main Menu>Design Opt>Create

◆ 多层优化计算

在很多情况下要做多于一次优化计算的分析。比如，在一次优化后没有找到需要的优化结果，或是用一种优化工具开始计算然后做随后的优化分析（例如，先进行随机搜索，然后用零阶方法）。从第一次较少次数的循环中得到的结果可以作为修改设计空间并进行以后优化分析的依据。

如果用户在同一次 ANSYS 运行中执行所有的优化时，这个过程是很顺利的。在一次执行以后，简单的重新定义所有的优化输入，然后开始下一步分析。用下列命令开始下一步分析：

Command: OPEXE

GUI: Main Menu>Design Opt>Run

如果在执行完一次优化以后退出了 ANSYS，可以用以后叙述的方法开始后续的分析。

◆ 重新开始执行优化分析

要重新开始优化分析，通过如下命令读入优化数据库文件（Jobname.OPT）：

Command: OPRESU

GUI: Main Menu>Design Opt>Resume

数据读入后，指定优化类型，控制等，然后开始循环（对应于数据库的分析文件必须可用以完成优化）。用下列方法开始循环：

Command: OPEXE

GUI: Main Menu>Design Opt>Run

标准的重新启动大致如下：

```

...
...
/OPT
OPRESU, ..... !读入文件(缺省为 Jobname.OPT)
OPSEL, 10      !选择 10 个最佳设计
OPTYPE, ..... !指定优化工具或方法
...           !指定其他优化输入
OPEXE         !开始优化循环

```

请查阅/OPT、OPRESU、OPSEL、OPTYPE 和 OPEXE 命令以得到更详细的说明。

注意 除了优化数据，ANSYS 工作文件名将存储在优化数据库文件中 (Jobname.OPT)。

因此，如果优化数据文件被读入，该文件名将覆盖当前的文件名[/FILENAME]。

在交互方式下可以用 OPRESU 命令 (Main Menu>Design Opt>Resume) 读入批处理方式下生成的优化数据，这样便于交互的查看批处理优化的数据。

如果在读入数据前优化数据库中有数据的话，应当首先清除优化数据库。在这个过程中，所有的设置将恢复其缺省值，所有的设计序列将被删除。用下列方式清除数据库：

Command: OPCLR

GUI: Main Menu>Design Opt>Clear&Reset

因为 ANSYS 数据库是不受 OPCLR 命令影响的，所以在读入一个新的优化数据库前应该清除 ANSYS 数据库。用下列方法清除 ANSYS 数据库：

Command: /CLEAR

GUI: Utility Menu>File>Clear&Start New

与 OPRESU 命令相对应的是 OPSAVE 命令 (Main Menu>Design Opt>Save)，其功能是将优化数据写入指定的文件中 (缺省为 Jobname.OPT)。优化数据在每次优化循环结束的时候自动存储 (见 OPDATA 命令)，但用户也可以随时用 OPSAVE 命令存储优化数据。

◆ 优化技术

理解计算机程序的算法总是很有用的，尤其是在优化设计中。在这一部分中，将提供对下列方法的说明：零阶方法、一阶方法、随机搜索法、等步长搜索法、乘子计算法和最优梯度法。

◆ 零阶方法

零阶方法之所以称为零阶方法是由于它只用到因变量而不用到它的偏导数。在零阶方法中有两个重要的概念：目标函数和状态变量的逼近方法，由约束的优化问题转换为非约束的优化问题。

◆ 逼近方法

本方法中，程序用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间的关系。这是通过用几个设计变量序列计算目标函数然后求得各数据点间最小平方实现的。该结果曲线 (或平面) 叫做逼近。每次优化循环生成一个新的数据点，目标函数就完成一次更新。实际上是逼近被求解最小值而并非目标函数。

状态变量也是同样处理的。每个状态变量都生成一个逼近并在每次循环后更新。

用户可以控制优化近似的逼近曲线。可以指定线性拟合，平方拟合或平方差拟合。缺省情况下，用平方差拟合目标函数，用平方拟合状态变量。用下列方法实现该控制功能：

Command: OPEQN

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

OPEQN 同样可以控制设计数据点在形成逼近时如何加权；见 ANSYS Theory Reference。

◆ 转换为非约束问题

状态变量和设计变量的数值范围约束了设计，优化问题就成为约束的优化问题。

ANSYS 程序将其转化为非约束问题，因为后者的最小化方法比前者更有效率。转换是通过对目标函数逼近加罚函数的方法计入所加约束的。

搜索非约束目标函数的逼近是在每次迭代中用 Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) 实现的。

◆ 收敛检查

在每次循环结束时都要进行收敛检查。当前面的设计是合理的而且满足下列条件之一时，问题就是收敛的。

- 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允差。
- 最后两个设计之间的差值应小于目标函数允差。
- 从当前设计到最佳合理设计所有设计变量的变化值应小于各自的允差。
- 最后两个设计所有设计变量的变化值应小于各自的允差。

用下列方法指定目标函数和设计变量允差：

Command: OPVAR

GUI: Main Menu>Design Opt>Design Variables

Main Menu>Design Opt>Objective

收敛并不代表实际的最小值已经得到了，只说明以上四个准则之一满足了。因此，用户必须确定当前设计优化的结果是否足够。如果不足的话，就要另外做附加的优化分析。

有时候求解过程会在收敛前终止，这是因为发生下列情况之一：

- 指定的循环次数达到了。
- 连续的不合理设计达到了指定的值 (OPSUBP 命令的 NINFS 域)。缺省值为 7。

◆ 零阶方法的特殊问题

由于目标函数和状态变量都是使用逼近的，因此优化设计和逼近数值具有同样的精确度。下面给出了一些得到较好的逼近的建议。

- 对于零阶方法，优化处理器开始通过随机搜索建立状态变量和目标函数的逼近。由于是随机搜索，收敛的速度可能很慢。用户有时可以通过给出多个合理的起始设计来加速收敛。只简单地运行一系列的随机搜索并删除所有不合理的设计。用下列方法之一运行随机搜索：

Command: OPTYPE,RAND

GUI: Main Menu>Design Opt>method/Tool

用下列方法删除所有不合理设计：

Command: OPSEL

GUI: Main Menu>Design Opt>Select/Delete

也可以运行多次单独的循环，并在每次运行前指定新的设计变量序列来生成起始设计序列。用下列方法：

Command: OPTYPE,RUN

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

(如果对问题的特性有些认识的话，后一种方法更好些)

做一些小的设计分析将有利于收敛。但如果设计之间差别不大，也就是说设计数据点“堆积”在一起时，用户就要指定优化处理器沿一个指定的路径分析，以避免丢掉好的设计。

- 如果零阶方法生成了许多不合理的设计的话，可能说明状态变量的近似不能良好的反映状态变量的实际情况。在这种情况下，可以处理如下：

增加连续不合理设计的允许值，然后进行附加的零阶方法分析（如果合理的设计好象要达到了）。用下列方法：

Command: OPSUBP, NINFS

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

在连续的逼近中不断选择最佳设计，可以得到更好的曲线拟合。用下列方法实现：

Command: OPSEL

GUI: Main Menu>Design Opt>Select/Delete

在状态变量逼近时选择交叉项。用下列方法：

Command: OPEQN, KFSV

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

◆ 一阶方法

同零阶方法一样，一阶方法通过对目标函数添加罚函数将问题转换为非约束的。但是，与零阶方法不同的是，一阶方法将真实的有限元结果最小化，而不是对逼近数值进行操作。

一阶方法使用因变量对设计变量的偏导数。在每次迭代中，梯度计算（用最大斜度法或共轭方向法）确定搜索方向，并用线搜索法对非约束问题进行最小化。

因此，每次迭代都有一系列的子迭代（其中包括搜索方向和梯度计算）组成。这就使得一次优化迭代有多次分析循环。

OPFRST 命令（Main Menu>Design Opt>Method/Tool）有两个输入域可以用来改善一阶方法的收敛。用户可以指定计算梯度的设计变量范围变化程度，也可以指定线搜索步长的范围。一般来说，这两个输入值的缺省数值就足够了。

◆ 收敛检查

一阶方法在收敛或中断时结束。当当前的设计序列相对于前面的和最佳序列满足下面任意一种情况时，问题就称为收敛：

- 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允差。
- 从当前设计到前面设计目标函数的变化值应小于允差。

同时要求最后的迭代使用最大斜度搜索，否则要进行附加的迭代。

用下列方法指定目标函数允差：

Command: OPVAR

GUI: Main Menu>Design Opt>Objective

问题在收敛之前可能中断。在用 OPFRST 命令 NITR 域指定的最大迭代次数达到的情况下出现。

◆ 一阶方法的特殊情况

与零阶方法相比，一阶方法计算量大且结果精确。但是，精确度高并不能保证最佳求解。下面是一些注意点：

- 一阶方法可能在不合理的设计序列上收敛。这时可能是找到了一个局部最小值，或是不存在合理设计空间。如果出现这种情况，可以使用零阶方法，因其可以更好地研究整个设计空间。也可以先运行随机搜索确定合理设计空间（如果存在的话），然后以合理设计序列为起点重新运行一阶方法。
- 一阶方法更容易获得局部最小值。（见后面“局部和全局最小值”的说明。）这是因为一阶方法从设计空间的一个序列开始计算求解，如果起点很接近局部最小值的话，就会选择该最小值而找不到全局最小值。如果怀疑得到的是局部最小值，可以用零阶方法或随机搜索验证，如上所述。
- 目标函数允差过紧将会引起迭代次数很多。因为本方法计算实际有限元解（而非逼近），在计算过程中会根据给定的允差尽量找到确切的结果。

◆ 随机搜索法

对于随机搜索法[OPTYPE, RAND]，程序完成指定次数的分析循环，并在每次循环中使用随机搜索变量值。用户可以用 OPRAND 命令（Main Menu>Design Opt>Method/Tool）指定最大迭代次数和最大合理设计数。如果给出了最大合理设计数，在达到这个数值时循环将终止，而忽略最大迭代次数是否达到。

随机搜索法往往作为零阶方法的先期处理。它也可以用来完成一些小的设计任务。例如可以做一系列的随机搜索，然后通过查看结果来判断当前设计空间是否合理。

◆ 等步长搜索法

等步长搜索法[OPTYPE, SWEEP]用于在设计空间内完成扫描分析。将生成 $n \cdot \text{NSPS}$ 个设计序列， n 是设计变量的个数，NSPS 是每个扫描中评估点的数目（由 OPSWEEP 命令指定）。对于每个设计变量，变量范围将划分为 $\text{NSPS}-1$ 个相等的步长，进行 NSPS 次循环。问题的设计变量在每次循环中以步长递增，其他的设计变量保持其参考值不变。设计序列中设计变量的参考值用 OPSWEEP 命令的 Dset 指定（Main Menu>Design Opt>Method/Tool）。

◆ 图示和列表显示等步长搜索结果

用下列方法图示设计变量数值和响应变量的数值关系：

Command: OPLSW

GUI: Main Menu>Design Opt>Tool Results>Sweeps

纵坐标表示目标函数或状态变量的实际数值。横坐标表示正交化（0 到 1）的设计变量，正交范围为设计变量的最大最小值[OPVAR]。

用下列方法生成列表的结果：

Command: OPRSW

GUI: Main Menu>Design Opt>Tool Results>Print

正交化的响应数据值和正交化的设计变量值将列出。目标函数和状态变量的结果与参考

设计序列数值正交[OPSWEEP, Dset]。对于设计变量, 0 相应于最小值, 1 相应于最大值。

◆ 乘子计算法

本工具[OPTYPE, FACT]用二阶技术生成设计空间上极值点上的设计序列数值(这个二阶技术在每个设计变量的两个极值点上取值)。可以用 OPFACT 命令(Main Menu>Design Opt>Method/Tool)指定是完成整体的还是部分的评估。对于整体评估, 程序进行 2^n 次循环, n 是设计变量的个数。 $1/2$ 部分的评估进行 $2^{n/2}$ 次循环, 依此类推。

◆ 图示和列表显示乘子计算结果

可以用棒式图和表格显示目标函数或状态变量的某些方面。例如, 可以图示每个设计变量对目标函数的主要作用。用户同样可以查看两个和三个变量之间的互相作用。

用下列命令显示棒式图:

Command: OPLFA

GUI: Main Menu>Design Opt>Tool Results>Factorial

用下列命令对目标函数或状态变量的作用列表:

Command: OPRFA

GUI: Main Menu>Design Opt>Tool Results>Print

◆ 最优梯度法

最优梯度法[OPTYPE, GRAD]计算设计空间中某一点的梯度。梯度结果用于研究目标函数或状态变量的敏感性。用下列方式指定在哪个设计序列计算梯度:

Command: OPGRAD

GUI: Main Menu>Design Opt>Method/Tool

本工具做的循环次数等于设计变量的数目。

◆ 图示和列表显示最优梯度法的结果

用户可以用图显示设计变量和响应变量的数值。纵坐标表示目标函数或状态变量的实际数值。横坐标表示设计变量一个小的(1%)变化值。用下列方法列表表示结果:

Command: OPRGR

GUI: Main Menu>Design Opt>Tool Results>Print

1%的变化值是相对于设计变量的变化范围(由 OPVAR 命令中 MAX-MIN 数值确定), 而不是相对于当前的设计变量数值的。

◆ 选择优化变量的一些说明

下面列出了许多如何定义设计变量, 状态变量和目标函数的建议。

◆ 选择设计变量

设计变量往往是长度, 厚度, 直径或模型坐标等几何参数。其必须是正值。关于设计变量要记住的几点如下:

- 使用尽量少的的设计变量。选用太多的设计变量会使得收敛于局部最小值的可能性增加, 在问题是高度非线性时甚至会引起不收敛。显而易见, 越多的设计变量需要越多的迭代次数, 从而需要更多的机时。一种减少设计变量的做法就是将其中的一些

变量用其他的设计变量表示。这通常叫做设计变量合并。

设计变量合并不能用于设计变量是真正独立的情况下。但是，可以根据模型的结构判断是否允许某些设计变量之间可以逻辑的合并。例如，如果优化形式是对称的，可以用一个设计变量表示对称部分。

- 给设计变量定义一个合理的范围 (OPVAR 命令中的 MIN 和 MAX)。范围过大可能不能表示好的设计空间，而范围过小可能排除了好的设计。记住只有正的数值是可以的，因此要设定一个上限。
- 选择可以提供实际优化设计的设计变量。例如，可以只用一个设计变量 X1 对图 8-3a 的悬臂梁进行重量优化。但是，这排除了用曲线或变截面得到更小的重量的可能。为了包括这种设计，需要选择四个设计变量 X1 到 X4 (图 8-3c)。也可以用另外一种设计变量选择方法完成该优化设计，见图 8-3d。同时，要避免选择产生不实际结果或不需要的的设计。

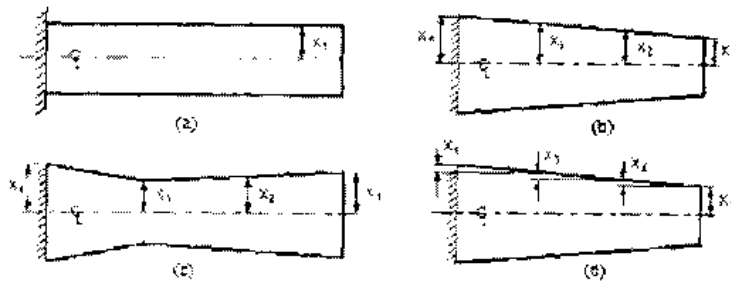


图 8-3 阶梯型悬臂梁的设计变量选择

◆ 选择状态变量

状态变量通常是控制设计的因变量数值。状态变量的例子有应力、温度、热流率、频率、变形、吸收能、消耗时间等。状态变量必须是 ANSYS 可以计算的数值；实际上任何参数都能被定义为状态变量。选择状态变量的一些要点为：

- 在定义状态变量[OPVAR 命令]时，在 MIN 域中输入空值表示无下限。同样，在 MAX 域中输入空值表示无上限。在这两个域中输入 0 值表示以 0 为限。如：

```
OPVAR, SIG, SV, , 1000      !SIG 小于等于 1000
OPVAR, SIG, SV, 0, 1000    !SIG 大于等于 0 且小于等于 1000
```

- 选择足够约束设计的状态变量数。如在应力分析中，只选择最大应力数值为状态变量不好，因为在不同循环中，最大应力位置是变化的。同样也要避免另一个极端如选择每个单元中的应力都为状态变量。比较好的方法是定义几个关键位置的应力为状态变量。
- 在零阶方法中，如果可能的话，选择与设计变量为线性或平方关系的参数为状态变量。例如，状态变量 $G=Z1/Z2$ 且 $G<C$ ($Z1$ 和 $Z2$ 是设计变量， C 是常数)可能不会得到 G 的较好的逼近，因为 G 与 $Z2$ 是反比关系。如果将状态变量表示为 $G=Z1-(C*Z2)$ 且 $G<0$ ，状态变量逼近就准确了。
- 如果状态变量有上下限时，给定一个合理的限制值[OPVAR 命令的 MIN 和 MAX 域]。应避免过小的范围，因为此时合理设计可能不存在。如 500 到 1000psi 的应力范围要比 900 到 1000psi 的范围好。

- 如果要指定相同的约束数值（如频率为 386.4HZ），定义两个相同数值的状态变量将实际值包含起来，如下所示：

```

...
*GET, FREQ, ACTIVE, , SET, FREQ      !参数 FREQ 等于计算频率
FREQ1=FREQ
FREQ2=FREQ
...
/OPT
OPVAR, FREQ1, SV, , 387              !上限 FREQ1=387
OPVAR, FREQ2, SV, 386                !下限 FREQ2=386

```

合理区域现为 386 到 387，但每个状态变量有足够宽的范围以加速逼近（见 OPVAR 命令）。

- 在定义参数前用选择功能避免在奇异点处（如集中载荷）附近选择状态变量。

◆ 选择目标函数

目标函数是设计要最小化或最大化的数值。选择目标函数要记住以下几点：

- ANSYS 程序总是最小化目标函数。如果要最大化数值 x ，就将问题转化为求数值 $x1=C-x$ 或 $x1=1/x$ 的最小值，其中 C 是远大于 x 的数值。定义 $C-x$ 的方法比用 $1/x$ 的方法要好，因为后者是反比关系，在零阶方法中不能得到准确的逼近。
- 目标函数值在优化过程中应为正值，因为负值将会引起数据问题。为了避免负值出现，可以将一个足够大的正值加到目标函数上（大于目标函数的最大值）。

◆ 生成分析文件

前面在“准备分析文件”一部分中提到，通过交互方式建模后有两种方式生成分析文件：用内部数据库命令流[LGWRITE]（Utility Menu>File>Write DB Log File），或通过过程命令流文件（Jobname.LOG）。用内部数据库命令流有几个优点：

LGWRITE 命令有一个选项（Kedit 域）删除不重要的命令，或将其作为评论行写到文件中。该选项会自动对命令流文件做自动处理，但用户仍应做一下查看以确保文件适合优化。而且，内部数据库命令流包括整个模型的数据库，因此不需要几个文件拼凑起来。数据库命令流是存储在数据库文件中（Jobname.DB）的，读入的数据库将包含其完整的数据库命令流。（见 ANSYS Operations Guide。）

注意 推荐在 LGWRITE 命令 Kedit 域中使用 Kedit=COMMENT 而不用 Kedit=REMOVE。有些被 Kedit 过滤的命令有可能在后面 *GET 操作中用到（如 EXREM 和 PLNSOL）。这些命令在 Jobname.LGW 的最后编辑中不能作为备注行。

/CLEAR 命令将数据库从内存中清除，同时也清除了数据库命令流。在每次优化循环的开始将运行一个 /CLEAR 命令。如果 /LGWRITE 命令是在优化循环以后输入的，那么结果文件将是不完整的命令流。一般，数据库命令流文件是在优化循环开始前写的。

前面说过，在定义优化变量时不能用鼠标拾取的操作。如果因为拾取较方便而使用了这种操作，那么特殊的 GUI 生成命令（如 FLST 和 FITEM）将写入命令流中。这些命令在 ANSYS Commands Reference 中有叙述。但是在最后处理命令流文件时将这些命令转化为参数形式将

非常烦琐。

◆ 执行后修改设计变量序列

在执行了一次或多次优化分析后[OPEXE], 用户可能要删除一些设计变量[OPVAR, Name, DEL]然后进行下面的分析。通常, 用户需要这些参数的数值保持不变(在最后优化过程的数值或用户指定的数值), 而不要恢复回分析文件中的数值。假定在循环文件中没有重定义设计变量值, 可以用下列方法修正“删除”了的设计变量数值:

- 在分析文件中, 在/PREP7 命令前初始化设计变量数值(只有后来要修改的参数才出现在/PREP7 命令前)。
- 在下一个优化前, 输入 OPLOOP, PREP (Main Menu>Design Opt>Controls) 从第一个/PREP7 处读入分析文件。

如果不做上面两步操作, 在以后的优化分析中设计变量将设为其初始值。

在下面的例子中, 我们从两个设计变量 AREA1 和 AREA2 开始进行优化。然后 AREA2 被“删除”(不再是设计变量)保持其当前值。

```

AREA1=5.00                !AREA1 是第一个面积
AREA2=5.00                !AREA2 是第二个面积
/PREP7                    !进入 PREP7 前处理器
!用 AREA1 和 AREA2 建立参数化模型
...
...
FINISH
/SOLVE
!施加载荷等并求解
...
FINISH
/POST1
SET, ...
...
*GET, SIG1, ...           !定义用做状态变量和目标函数的参数
*GET, SIG2, ...
*GET, SIG3, ...
...
FINISH
/OPT                      !进入优化分析模块
OPVAR, AREA1, DV, ...     !定义参数 AREA1 和 AREA2 为设计变量
OPVAR, AREA2, DV, ...
OPVAR, SIG1, SV, ...     !指定状态变量
OPVAR, SIG2, SV, ...
OPVAR, TVOL, OBJ         !指定目标函数
OPTYPE, SUBP             !零阶方法
OPEXE                    !执行优化
OPVAR, AREA2, DEL        !删除设计变量 AREA2

```

STATUS	!验证当前优化变量
OPLOOP, PREP	!从第一个/PREP7 位置读入分析文件
OPTYPE, ...	!指定优化类型
...	!指定其他优化控制
OPEXE	!执行优化
FINISH	

请参阅 OPVAR, OPTYPE, OPEXE 和 OPLOOP 命令以得到更详细的解释。

◆ 执行后修正优化变量

优化变量可以在优化执行之间修改, 此时使用[OPVAR]命令 (Main Menu>Design Opt>Design Variables)。例如, 用户可能想修改目标函数的允差, 状态变量的上下限, 或删除一个设计变量, 定义一个新的设计变量。不论是哪种情况, 只要优化变量在一次优化分析后修改了, 程序将自动对优化数据库进行部分的修改。这将不影响现存的设计序列和优化设定选项。只有与优化计算有关的信息将被清除。这样做是为了清除不适合于修改后的优化变量序列的数据。

◆ 局部最小值和全局最小值

有些情况下, 求解过程将终止于得到一个局部最小值而非全局最小值。要验证这种情况是否存在, 可以用一个不同的初始设计序列 (即不同的初始设计变量值) 重新进行分析。

◆ 最小重量和最小体积

如果当前分析不需要时, 应避免指定材料密度。因为不计算质量矩阵, 可以节省机时。因为重量=密度*体积, 所以可以通过这种方式参数化地计算重量, 而把体积作为最小化的目标 (假定模型密度是均匀的)。

◆ 网格密度

在形状优化问题中, 循环之间有限元网格是变化的, 因此验证网格精度是否足够很重要。通过用参数方式指定网格划分数或网格大小, 可以在每次循环中正确的改变之。

而且, 在线性应力或热分析中, 可以用能量法则列出每次循环的误差率。一个更加有趣的扩展方式是在设计优化循环中进行一次自适应网格循环来保证网格划分误差不超过一个定值。用下列方法列出误差率:

Command: PRERR

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>Percent Error

Utility Menu>List>Results>Percent Error

◆ 使用子结构

如果模型只有一部分在优化设计中改变的话, 可以考虑把不变的部分作成子结构。优化运行将只在使用部分 (和扩展部分, 如果必须的话) 进行循环, 从而大大节省机时。

8.1.4 优化分析的示例 (GUI 方法)

在本例中, 用一阶方法进行优化分析。

◆ 问题描述

一个有三根杆组成的桁架承受纵向和横向载荷。桁架的重量在最大应力不超过 400psi 最小化（因此重量为目标函数）。三根梁的横截面面积和基本尺寸 B 在指定范围内变化。

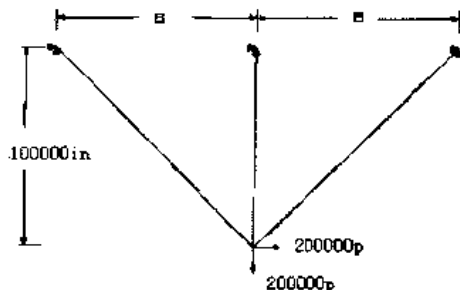


图 8-4 桁架结构图

结构的重量初始设计为 109.10 磅。缺省允差（由程序计算）为初始重量的 1%（11 磅）。但是，为了便于收敛，一阶方法的优化分析中将目标函数的允差定为 2.0。

◆ 问题参数

分析中使用如下材料特性：

$E=2.1E6\text{psi}$

$RHO=2.85E-4\text{lb/in}^3$ （比重）

最大许用应力=400psi

分析中使用如下几何特性：

横截面面积变化范围=1 到 1000in^2 （初始值为 1000）

基本尺寸 B 变化范围=400 到 1000in（初始值为 1000）

◆ 问题简图

第一步：指定文件名

1. Utility Menu>File>Change Jobname，打开文件名对话框。
2. “truss”为工作文件名。
3. 单击 OK 关闭对话框。

第二步：指定分析题目

1. 选择 Utility Menu>File>Change Title，打开更改分析题目对话框。
2. 输入“Optimization of a Three-Bar Truss”作为分析题目。
3. 单击 OK 关闭对话框。

第三步：定义参数初始值

1. 选择 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters，打开数值参数对话框。在选择区域中输入下列内容：

B=1000	按 ENTER 键
A1=1000	按 ENTER 键
A2=1000	按 ENTER 键
A3=1000	单击 OK。

参数将在菜单中显示出来。

2. 在数值参数对话框中单击 OK。

第四步：定义单元类型

1. 选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete, 打开单元类型对话框。
2. 在单元类型库对话框中单击 Add。
3. 在左边列中单击 Structural Link。
4. 在右边列中单击 2D Spar 1。
5. 在单元参考号区域键入 1。
6. 在单元类型库对话框中单击 OK。
7. 在单元类型对话框中单击 Close。

第五步：定义实参

1. 选择 Main Menu>Preprocessor>Real Constants, 打开实参对话框。
2. 单击 Add, 打开实参对话框中单元类型。
3. 单击 OK, 打开 LINK1 实参对话框。
4. 在实参序列号区域中键入 1。
5. 在横截面区域中键入 A1。
6. 单击 Apply。这将确认 LINK1 的实参并将 1000 输入实参 1 的横截面区域。
7. 在实参序列号区域键入 2。
8. 在横截面面积区域键入 A2。
9. 单击 Apply。这将确认 LINK1 的实参并将 1000 输入实参 1 的横截面区域。
10. 在实参序列号区域键入 3。
11. 在横截面面积区域键入 A3。
12. 在 LINK1 实参对话框中单击 OK。
13. 在实参对话框中单击 Close。

第六步：定义材料特性

1. 选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>-Constant->Isotropic, 打开各项同性材料特性对话框。
2. 在材料号区域中输入 1。
3. 单击 OK 打开第二个各项同性材料特性对话框。
4. 在杨氏模量对话框输入 2.1E6。
5. 单击 OK 并关闭对话框。

第七步：生成结点

1. 选择 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Nodes>In Active CS, 打开在活动坐标系中生成结点对话框。
2. 在结点号区域中输入 1。
3. 在活动坐标域, 第一个域中输入 -B, 第二个域中输入 0, 第三个输入 0。
4. 单击 Apply。结点 1 将出现在 ANSYS 图形窗口。
5. 在结点号码域中输入 2。

6. 在活动坐标域, 第一个域中输入 0, 第二个域中输入 0, 第三个输入 0。
7. 单击 Apply。结点 2 将出现在 ANSYS 图形窗口。
8. 在结点号码域中输入 3。
9. 在活动坐标域, 第一个域中输入 B, 第二个域中输入 0, 第三个输入 0。
10. 单击 Apply。结点 2 将出现在 ANSYS 图形窗口。
11. 在结点号码域中输入 3。
12. 在活动坐标域, 第一个域中输入 0, 第二个域中输入-1000, 第三个输入 0。
13. 单击 OK 关闭在活动坐标系生成结点对话框。结点 4 将出现在 ANSYS 图形窗口中。所有 4 个结点都出现在 ANSYS 图形窗口中。
14. 打开结点号码。选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Window Controls>Window Options 打开窗口选项对话框。
15. 在结点号码框上单击 OFF (将切换为 ON)。
16. 单击 OK 关闭对话框。
17. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Window Controls>Windows Options 打开窗口对话框。
18. 在坐标位置处选取不显示选项。
19. 单击 OK 关闭对话框。

第八步: 生成单元

1. 选择菜单 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Elements>-Auto Numbered->Thru Nodes 打开结点对话框的单元项。
2. 在图形窗口, 拾取结点 1 和 4 (按照该顺序)。在选择 的结点周围将出现一个小框。
3. 在该对话框中单击 OK 关闭对话框。ANSYS 图形窗口中 1 和 4 结点之间将出现一个线单元 1。
4. 选择菜单 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Elements>Elem Attributes 打开单元特性对话框。
5. 在实参序列号中输入 2。
6. 在单元特性对话框中单击 OK。
7. 选择菜单 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Elements>-Auto Numbered->Thru Nodes 打开结点对话框的单元项。
8. 在图形窗口, 拾取结点 2 和 4 (按照该顺序)。
9. 在该对话框单击 OK 关闭对话框。ANSYS 图形窗口中 3 和 4 结点之间将出现一个线单元 2。
10. 选择菜单 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Elements>Elem Attributes 打开单元特性对话框。
11. 在实参序列号中输入 2。
12. 在单元特性对话框中单击 OK。
13. 选择菜单 Main Menu>Preprocessor>-Modeling->Create>Elements>-Auto Numbered->Thru Nodes 打开结点对话框的单元项。

14. 在图形窗口, 拾取结点 2 和 4 (按照该顺序)。
15. 在该对话框单击 OK 关闭对话框。ANSYS 图形窗口中 3 和 4 结点之间将出现一个线单元 3。

第九步: 施加位移约束和载荷

1. 选择菜单 Main Menu>Solution>-Loads->Apply>-Structural->Displacement>On Nodes 打开 Apply U, ROT on Nodes 的对话框。
2. 在 ANSYS 图形窗口, 拾取结点 1, 2 和 3。
3. 单击 OK 关闭对话框并打开第二个 Apply U, ROT on Nodes 的对话框。
4. 在要约束的自由度菜单上单击 ALL DOF 选项。
5. 单击 OK 关闭对话框。
6. 选择菜单 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Force/Moment>On Nodes 打开 Apply F/M on Nodes 对话框。
7. 在 ANSYS 图形窗口, 拾取结点 4。
8. 在对话框中单击 OK 关闭该对话框并打开第二个 Apply F/M on Nodes 对话框。
9. 将 Force/Mom 方向设为 FX。
10. 在 Force/Moment Value 域输入 200000。
11. 单击 OK 关闭对话框。在结点 4 上将出现一个横向箭头表示施加的载荷。
12. 选择菜单 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Strutural-Force/Moment>On Nodes 打开 Apply F/M on Nodes 对话框。
13. 在 ANSYS 图形窗口, 单击结点 4。
14. 在对话框中单击 OK 关闭并打开第二个 Apply F/M on Nodes 对话框。
15. 将 Force/Mom 方向设为 FX。
16. 在 Force/Moment Value 域输入-200000。
17. 单击 OK 关闭对话框。在结点 4 上将出现一个垂直箭头表示施加的载荷。

第十步: 求解模型

1. 选择菜单 Main Menu>Solution>-Solve->Current LS 打开 Solve Current Load Step 对话框。求解目标和载荷步选项出现在状态窗口。
2. 查看状态窗口中的目标信息并在菜单条上单击 Close 关闭。
3. 在该对话框中单击 OK。
4. 求解完毕后, 将出现信息框告诉用户求解完毕。单击 Close 关闭对话框。

第十一步: 进入后处理器并读出单元总体积

1. 选择菜单 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 打开 Element Table Data 对话框。
2. 单击 Add 定义单元表格并打开 Define Additional Elementary Table Items 对话框。
3. 在 User Label 域中输入 EVOL。
4. 在 Item, Comp Results Data Item 菜单的左列单击 Geometry, 在右列单击 Elem Volume VOLU。
5. 单击 OK 关闭对话框。

6. 在 Element Table Data 对话框中单击 Close。
7. 选择菜单 Main Menu>General Postproc>Element Table>Sum of Each Item 打开 Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框。
8. 单击 OK 计算总和。SSUM 命令窗口将显示总和为 0.382842E+07。
9. 单击菜单条上的 Close 关闭 SSUM 命令窗口。
10. 选择菜单 Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data 打开 Get Scalar Data 对话框。
11. 在 Type of Data to be Retrieved 菜单左列单击 Results Data, 在右列单击 Elem Table Sums。
12. 单击 OK 关闭对话框并打开 Get Element Table Sum Results 对话框。
13. 在 Name of Parameter to be Defined 域输入 VTOT。
14. 单击 OK 关闭对话框。
15. 选择菜单 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters 打开 Scalar Parameters 对话框。
16. 在 Selection 域输入 $RHO=2.85E-4$ 并按 ENTER 键。本信息应显示在菜单上。
17. 在 Selection 域输入 $WT=RHO*VTOT$ 并按 ENTER 键。总的体积将计算并显示在菜单中。重量应为 1091.10173。
18. 单击 Close 关闭对话框。

第十二步：读出轴向应力

1. 选择菜单 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 打开 Element Table Data 对话框。
2. 单击 Add 打开 Define Additional Element Table Items 对话框。
3. 在 User Label for Item 域键入 SIG。
4. 在 Item, Comp Results Data Item 菜单左列单击 By Sequence Num, 在右列单击 LS。
5. 在 Selection 域, 在“LS”后键入 1 (表示序列号为 1)。
6. 单击 OK 关闭对话框。
7. 在 Element Table Data 对话框中单击 Close。
8. 选择菜单 Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data 打开 Get Scalar Data 对话框。
9. 在 the Type of Data to be Retrieved 菜单, 在左列单击 Results Data, 在右列单击 Elem Table Data。
10. 单击 OK 关闭对话框并打开 Get Element Table Data 对话框。
11. 在 Name of Parameter to be Defined 域输入 SIG1。
12. 在 Element Number N 域输入 1。
13. 将 Elem Table Data to be Retrieved 域设为 SIG。
14. 单击 Apply 关闭对话框并打开 Get Scalar Data 对话框。
15. 在 Type of Data to be Retrieved 菜单, 在左列单击 Results Data, 在右列单击 Elem Table Data。
16. 单击 OK 打开 Get Element Table Data 对话框。
17. 在 Name of Parameter to be Defined 域输入 SIG2。

18. 在 Element Number N 域输入 2。
19. 将 Elem Table Data to be Retrieved 域设为 SIG。
20. 单击 Apply 关闭对话框并打开 Get Scalar Data 对话框。
21. Type of Data to be Retrieved 菜单，在左列单击 Results Data，在右列单击 Elem Table Data。
22. 单击 OK 打开 Get Element Table Data 对话框。
23. 在 Name of Parameter to be Defined 域输入 SIG3。
24. 在 Element Number N 域输入 3。
25. 将 Elem Table Data to be Retrieved 域设为 SIG。
26. 单击 OK 关闭对话框。
27. 计算轴向应力的绝对值。选择菜单 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters 打开 Scalar Parameters 对话框。在 Selection 域输入以下信息：

SIG1=ABS(SIG1)	输入 ENTER
SIG2=ABS(SIG2)	输入 ENTER
SIG3=ABS(SIG3)	单击 OK
28. 单击 Close 关闭对话框。

第十三步：显示当前设计

1. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape 打开 The Size and Shape 对话框。
2. 在 Display of element shapes based on real constant description 表示的行中单击 OFF 将其切换为 ON。
3. 在 Real constant Multiplier 域中输入 2。
4. 单击 OK 关闭对话框。
5. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Pan, Zoom, Rotate 打开 Pan, Zoom, Rotate 对话框。
6. 单击 ISO 显示 3 杆桁架的轴测图。
7. 单击 Close 关闭对话框。
8. 选择菜单 Utility Menu>Plot>Elements 画出桁架。

第十四步：生成优化分析文件

1. 选择菜单 Utility Menu>File>Write DB Log File 打开 Write Database Log 对话框。
2. 在 Write Database Log To 域中添加“truss.lgw”到路径名中。
3. 单击 OK 关闭对话框。

第十五步：进入优化处理器并指定分析文件

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>-Analysis File->Assign 打开 Assign Analysis File 对话框。
2. 在 Selection 域添加“truss.lgw”到路径名（或在文件列表中拾取 truss.lgw）。
3. 单击 OK 关闭对话框。

第十六步：定义优化设计变量

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Design Variables 打开 Design Variables 对话框

框。

2. 单击 Add 打开 Define a Design Variable 对话框。
3. 在 Parameter Name 菜单单击 B; B 将出现在 Selection 域。
4. 在 Minimum Value 域中输入 400。
5. 在 Maximum Value 域中输入 2000。
6. 单击 Apply 确认设计变量。
7. 在 Parameter Name 菜单单击 A1; A1 将出现在 Selection 域。
8. 在 Minimum Value 域中输入 1。
9. 在 Maximum Value 域中输入 1000。
10. 单击 Apply 确认设计变量。
11. 在 Parameter Name 菜单单击 A2。
12. 在 Minimum Value 域中输入 1。
13. 在 Maximum Value 域中输入 1000。
14. 单击 Apply 确认设计变量。
15. 在 Parameter Name 菜单单击 A3。
16. 在 Minimum Value 域中输入 1。
17. 在 Maximum Value 域中输入 1000。
18. 单击 OK 关闭对话框。
19. 单击 Close 关闭 Design Variables 对话框。

第十七步：定义优化状态变量

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>State Variables 打开 State Variables 对话框。
2. 单击 Add 打开 Define a State Variable 对话框。
3. 在 Parameters Name 域选择 SIG1; SIG1 将出现在 Selection 域。
4. 在 Upper Limit 域输入 400。
5. 单击 Apply 确认状态变量。
6. 在 Parameters Name 域选择 SIG2; SIG2 将出现在 Selection 域。
7. 在 Upper Limit 域输入 400。
8. 单击 Apply 确认状态变量。
9. 在 Parameters Name 域选择 SIG3; SIG3 将出现在 Selection 域。
10. 在 Upper Limit 域输入 400。
11. 单击 OK 关闭对话框。
12. 单击 Close 关闭 State Variable 对话框。

第十八步：存储优化数据库

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>-Opt Database->Save 打开 Save Optimization Data 对话框。
2. 在 Selection 域添加“trussvar.opt”到路径名。
3. 单击 OK 关闭对话框。

第十九步：设置重量为目标函数

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Objective 打开 Define Objective Function 对话框

框。

2. 在 Parameter Name 菜单单击 WT; WT 将出现在 Selection 域。
3. 在 Convergence Tolerance 域输入 2。
4. 单击 OK 关闭对话框。

第二十步：指定一阶优化方法

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Method/Tool 打开 Specify Optimization Method 对话框。
2. 在 Select Method/Tool 列表中单击 First-Order radio 按钮。
3. 单击 OK 打开 Controls for First-Order Optimization 对话框。
4. 在 maximum Iterations 域中输入 45。
5. 单击 OK 关闭对话框。

第二十一部：运行优化

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Run 打开 Begin Execution of Run 对话框。
2. 查看分析信息，单击 OK 开始优化运算。
3. 求解过程要持续一些时间。在优化循环结束后，最佳设计序列号为 16，重量为 301.23。

第二十二步：列出最佳设计序列和所有设计序列

1. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>-Design Sets->List 打开 List Design Set 对话框。
2. 在列表选项中拾取 BEST 序列。
3. 拾取 OK 打开 OPLIST 命令窗口。最佳序列为 16。
4. 在查看优化参数值后，在菜单条上单击 Close。
5. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>-Design Sets->List 打开 List Design Sets 对话框。
6. 在列表选项中拾取 ALL 序列。
7. 单击 OK 打开 OPLIST 命令窗口。
8. 查看完所有设计序列后，单击菜单条上的 Close。

第二十三步：将重量和基本尺寸作为迭代次数的函数显示

1. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Pan, Zoom, Rotate 打开 Pan-Zoom-Rotate 对话框。
2. 单击 Front 选择 X-Y 平面视角。
3. 单击 Close 关闭对话框。
4. 选择 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs 打开 Graph Controls 对话框。
5. 在 X-Axis 标记域输入 ITERATION NUMBER。
6. 在 Y-Axis 标记域输入 STRUCTURE WEIGHT。
7. 单击 OK 关闭对话框。
8. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables 打开 Graph/List Tables of Design Set Parameters 对话框。
9. 在 Y-Variable Params 菜单单击 WT。
10. 单击 OK 关闭对话框。在 ANSYS 图形窗口将显示重量和迭代的图形。
11. 选择 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs 打开 Graph Controls 对话框。

12. 在 Y-Axis 标记域输入 BASE DIMENSION。
13. 单击 OK 关闭对话框。
14. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables 打开 Graph/List Tables of Design Set Parameters 对话框。
15. 在 Y-Variable Params 菜单单击 WT 不选它，然后单击 B。
16. 单击 OK 关闭对话框。在 ANSYS 图形窗口将显示 Base Dimension 和 Iteration 图形。

第二十四步：将最大应力和截面尺寸作为迭代数的函数显示

1. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs 打开 Graph Controls 对话框。
2. 在 Y-Axis 标记域输入 MAXIMUM STRESS。
3. 单击 OK 关闭对话框。
4. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables 打开 Graph/List Tables of Design Set Parameters 对话框。
5. 在 Y-Variable Params 菜单单击 B 不选它，然后单击 SIG1, SIG2, SIG3。
6. 单击 OK 关闭对话框。在 ANSYS 图形窗口将显示应力和迭代数的图形。
7. 选择菜单 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs 打开 Graph Controls 对话框。
8. 在 Y-Axis 标记域输入 CROSS-SECTIONAL AREA。
9. 单击 OK 关闭对话框。
10. 选择菜单 Main Menu>Design Opt>Graphs/Tables 打开 Graph/List Tables of Design Set Parameters 对话框。
11. 在 Y-Variable Params 菜单单击 SIG1, SIG2, SIG3 不选它，然后单击 A1, A2, A3。
12. 单击 OK 关闭对话框。在 ANSYS 图形窗口将显示截面面积和迭代数的图形。

第二十五步：退出 ANSYS

1. 在 ANSYS 工具栏单击 Quit。
2. 选择一个选项存盘，然后单击 OK。

◆ 优化分析示例（命令和批处理方式）

也可以用命令行方式做以上的优化分析。以！开始的行为注释行。

```

/FILNAM,truss
/TITLE,Optimization of a three-bar truss
!初始化设计变量参数
B=1000                !基本尺寸
A1=1000              !第一个面积
A2=1000              !第二个面积
A3=1000              !第三个面积
!
!进入 PREP7 并建模
/PREP7
ET,1,LINK1           !二维杆单元
R,1,A1               !以参数形式的实参
R,2,A2

```

```

R, 3, A3
MP, EX, 1, 2.1E6           !杨氏模量
N, 1, -B, 0, 0           !定义结点
N, 2, 0, C, 0
N, 3, B, C, 0
N, 4, 0, -1000, 0
E, 1, 4                   !定义单元
REAL, 2
E, 2, 4
REAL, 3
E, 3, 4
FINISH
!
!进入求解器, 定义载荷和求解
/SOLU
D, 1, ALL, 0, , 3       !结点 UX=UY=0
F, 4, FX, 200000       !结点 4 上的 X 方向载荷分量
F, 4, FY, -200000     !结点 4 上的 Y 方向载荷分量
SOLVE
FINISH
!
!进入 POST1 并读出状态变量数值
/POST1
SET, LAST
ETABLE, EVOL, VOLU     !将每个单元的体积放入 ETABLE
SSUM                   !将单元表格内数据求和
*GET, VTOT, SSUM, , ITEM, EVOL !VTOT=总体积
RHO=2.85E-4
WT=RHO*VTOT           !计算总体积
ETABLE, SIG, LS, 1     !将轴向应力放入 ETABLE
!
*GET, SIG, ELEM, 1, ETAB, SIG !SIG1=第一个单元的轴向应力
*GET, SIG, ELEM, 2, ETAB, SIG !SIG2=第二个单元的轴向应力
*GET, SIG, ELEM, 3, ETAB, SIG !SIG3=第三个单元的轴向应力
!
SIG1=ABS(SIG1)        !计算轴向应力的绝对值
SIG2=ABS(SIG2)
SIG3=ABS(SIG3)
!
/ESHAPE, 2            !以实体单元模式显示壳单元
/VIEW, 1, 1, 1, 1    !轴测视图
EPLOT                 !画单元
!

```

```

/OPT                                !进入优化处理器
/OPANL, truss, lgw                   !指定分析文件(批处理方式中不用这个命令)
!
/OPVAR, B, DV, 400, 2000             !定义设计变量
/OPVAR, A1, DV, 1, 1000
/OPVAR, A2, DV, 1, 1000
/OPVAR, A3, DV, 1, 1000
/OPVAR, SIG1, SV, , 400              !定义状态变量
/OPVAR, SIG2, SV, , 400
/OPVAR, SIG3, SV, , 400
!
/OPSAVE, trussvar, opt               !存储数据
!
/OPVAR, WT, OBJ, , , 2,              !定义目标函数
!
/OPTYPE, FIRST                       !定义一阶方法
/OPFRST, 45                           !最大45次迭代
/OPEXE                                !开始优化分析
!
/OPLIST, 16                           !列出最佳设计序列, 号为16
/OPLIST, ALL                           !列出所有设计序列
!
/VIEW, 1, , , 1                       !前视图
!
/AXLAB, X, ITERATION NUMBER           !画重量对迭代数图形
/AXLAB, Y, STRUCTURE WEIGHT
PLVAROPT, WT
!
/AXLAB, Y, BASE DIMENSION             !画B对迭代数图形
PLVAROPT, B
!
/AXLAB, Y, MAX STRESS                 !画最大应力对迭代数图形
PLVAROPT, SIG1, SIG2, SIG3
!
/AXLAB, Y, CROSS-SECTIONAL AREA      !画面积对迭代数图形
PLVAROPT, A1, A2, A3
!
FINISH
/EXIT

```


8.2 拓扑优化

8.2.1 什么是拓扑优化

拓扑优化是指形状优化，有时也称为外型优化。拓扑优化的目标是寻找承受单载荷或多载荷的物体的最佳材料分配方案。这种方案在拓扑优化中表现为“最大刚度”设计。

与传统的优化设计不同的是，拓扑优化不需要给出参数和优化变量的定义。目标函数、状态变量和设计变量（参见“优化设计”一章）都是预定义好的。用户只需要给出结构的参数（材料特性、模型、载荷等）和要省去的材料百分比。

拓扑优化的目标——目标函数——是在满足结构的约束（ V ）情况下减少结构的变形能。减小结构的变形能相当于提高结构的刚度。这个技术通过使用设计变量（ η_i ）给每个有限元的单元赋予内部伪密度来实现。这些伪密度用 PLNSOL, TOPO 命令来绘出。

例如，给定 $V=60$ 表示在给定载荷并满足最大刚度准则要求的情况下省去 60% 的材料。图 8-5 表示满足约束和载荷要求的拓扑优化结果。图 8-5a 表示载荷和边界条件，图 8-5b 表示以密度云图形式绘制的拓扑结果。

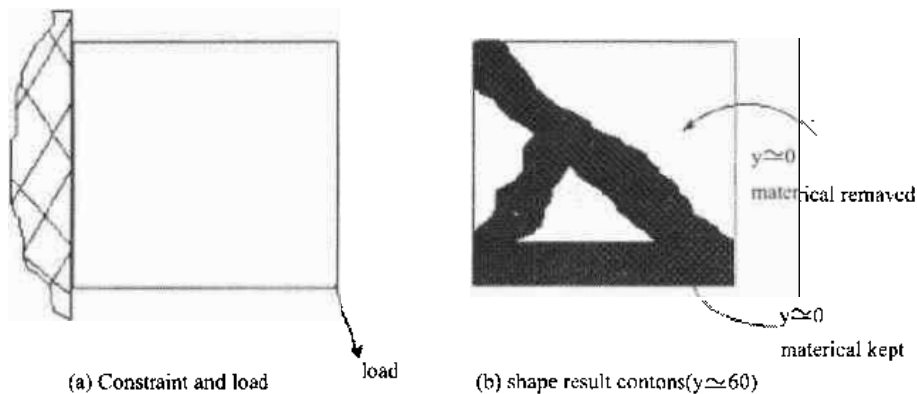


图 8-5 体积减少 60% 的拓扑优化示例

8.2.2 如何做拓扑优化

拓扑优化包括如下主要步骤：

1. 定义拓扑优化问题。
2. 选择单元类型。
3. 指定要优化和不优化的区域。
4. 定义和控制载荷工况。
5. 定义和控制优化过程。
6. 查看结果。

拓扑优化的细节在下面给出。关于批处理方式和图形菜单方式不同的做法也同样提及。

◆ 定义拓扑优化问题

定义拓扑优化问题同定义其他线性、弹性结构问题做法一样。用户需要定义材料特性

(杨氏模量和泊松比), 选择合适的单元类型生成有限元模型, 施加载荷和边界条件做单载荷步或多载荷步分析。

◆ 选择单元类型

拓扑优化功能可以使用二维平面单元, 三维块单元和壳单元。要使用这个功能, 模型中只能有下列单元类型:

二维实体单元: SOLID2 和 SOLID82

三维实体单元: SOLID92 和 SOLID95

壳单元: SHELL93

二维单元用于平面应力问题。

◆ 指定要优化和不优化的区域

只有单元类型为 1 的单元才能做拓扑优化。可以使用这种限制控制模型优化和不优化的部分。例如, 如果要保留接近圆孔部分或支架部分的材料, 将这部分单元类型号指定为 2 或更大即可:

```
...
ET,1,SOLID92
ET,2,SOLID92
...
TYPE,1
VSEL,S,NUM,,1,,2      ! 用这些单元划分的实体将被优化
VMESH,ALL
TYPE,2
VSEL,S,NUM,,3      ! 用这些单元划分的实体将保持原状
VMESH,ALL
...
```

用户可以使用 ANSYS 的选择和修改命令控制单元划分和类型号定义。

◆ 定义和控制载荷工况

可以在单个载荷工况和多个载荷工况下做拓扑优化。单载荷工况是最简便的。

要在几个独立的载荷工况中得到优化结果时, 必须用到写载荷工况和求解功能。在定义完每个载荷工况后, 要用 LSWRITE 命令将数据写入文件, 然后用 LSSOLVE 命令求解载荷工况的集合。

例如, 下面的输入演示如何将三个载荷工况联合做一个拓扑优化分析。

```
...
D,10,ALL,0,,20,1      ! 定义第一个载荷工况的约束和载荷
NSEL,S,LOC,Y,0
SF,
ALLSEL
LSWRITE,1              ! 写第一个载荷工况
DDEL,
SFDEL,
NSEL,S,LOC,X,0,1
D,ALL,ALL,0
```

```

NSEL, ALL
F, 212, FX
LSWRITE, 2           ! 写第二个载荷工况
...
LSWRITE, 3           ! 写第三个载荷工况
...
FINISH
/SOLUTION
TOPDEF, 10, 3        ! 定义优化的参数
LSSOLVE, 1, 3, 1     ! 在拓扑优化前做所有三个载荷工况求解
...

```

◆ 定义和控制优化过程

拓扑优化过程包括两部分：定义优化参数和进行拓扑优化。用户可以用两种方式运行拓扑优化：控制并执行每一次迭代，或自动进行多次迭代。

ANSYS 有三个命令定义和执行拓扑优化：TOPDEF、TOPEXE 和 TOPITER。TOPDEF 命令定义要省去材料的量，要处理载荷工况的数目，收敛的公差。TOPEXE 命令执行一次优化迭代。TOPITER 命令执行多次优化迭代。

● 定义优化参数

首先要定义优化参数。用户要定义要省去材料的百分比，要处理载荷工况的数目，收敛的公差。

命令：TOPDEF

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Topological opt

注意 本步所定义的内容并不存入 ANSYS 数据库中，因此在下一个拓扑优化中要重新使用 TOPDEF 命令。

● 执行单次迭代

定义好优化参数以后，可以执行一次迭代。迭代后用户可以查看收敛情况并绘出或列出当前的拓扑优化结果。可以继续做迭代直到满足要求为止。如果是在 GUI 方式下执行，在 Topological Optimization 对话框 (ITER 域) 中选择一次迭代。

命令：TOPEXE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Topological opt

下面的例子说明了如何在拓扑优化中每次执行一次迭代：

```

...
/SOLUTION
TOPDEF, 25, 1        ! 移去 25% 体积并处理一个载荷工况
SOLVE                ! 执行第一次应力分析
TOPEXE               ! 执行第一次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1               ! 进入后处理器
PLNSOL, TOPO         ! 画出优化结果

```

```

*GET, TIPS RAT, TOPO, , CONV ! 读取拓扑收敛状态
*STATUS, TOPSTAT           ! 列表
/SOLUTION
SOLVE                      ! 执行第二次应力分析
TOPEXE                     ! 执行第二次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1
...

```

TOPEXE 的主要优点是用户可以设计自己的迭代宏进行自动优化循环和绘图。在下一节，可以看到 TOPITER 命令是一个 ANSYS 的宏，用来执行多次优化迭代。

● 自动执行多次迭代

在定义好优化参数以后，用户可以自动执行多次迭代。在迭代完成以后，可以查看收敛情况并绘出或列出当前拓扑形状。如果需要的话，可以继续执行求解和迭代。TOPITER 命令实际是一个 ANSYS 的宏，可以拷贝和定制（见 APDL Programmer's Guide）。

命令：TOPITER

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Topological opt

下面的例子说明了如何使用 TOPITER 宏执行多次迭代：

```

...                ! 定义并写第一个载荷工况
LSWRITE
...                ! 定义并写第二个载荷工况
LSWRITE
...                ! 定义并写第三个载荷工况
LSWRITE
...
TOPDEF, 80, 3, .001 ! 80%体积减少, 3个载荷工况
...                0.001 为收敛公差
/DSCALE, , OFF    ! 关闭形状改变
/CONTCUR, , 3     ! 每次显示3个轮廓数值
TOPITER, 20, 1    ! 最大20次迭代。每次迭代求解并绘出
...                结果

```

每次迭代执行一次 LSSOLVE 命令，一次 TOPEXE 命令和一次 PLNSOL，TOPO 显示命令。当收敛公差达到（用 TOPDEF 定义）或最大迭代次数（用 TOPITER 定义）达到时优化迭代过程终止。

◆ 查看结果

拓扑优化结束后，ANSYS 结果文件（Jobname.RST）将存储优化结果供通用后处理器使用。用户可以使用后面提到的后处理命令。要得到更详细的信息，请查阅 ANSYS Commands Reference 或 ANSYS Basic Analysis Procedures Guide 第五章。

要列出结点解和/或绘出伪密度，使用 PRNSOL 和 PLNSOL 命令的 TOPO 变量。

要列出单元解和/或绘出伪密度，使用 PLESOL 和 PRESOL 命令的 TOPO 变量。

可以使用 ANSYS 表格功能查看结果:

```
ETABLE, EDENS, TOPO
PLETAB, EDENS
PRETAB, EDENS
ESEL, S, ETAB, EDENS, 0.9, 1.0
EPLOT
```

要查看最近（最后一次迭代）的收敛情况和结构变形能，使用 *GET 命令:

```
*GET, TOPCV, TOPO, , CONV      ! 如果 TOPCV=1 (收敛)
*GET, ECOMP, TFO, , COMP      ! ECOMP=变形能
*STAT
```

8.2.3 拓扑优化示例

在本例中，对承受两个载荷工况的梁进行拓扑优化。

◆ 问题描述

图 8-6 表示一个承载的弹性梁。梁两端固定，承受两个载荷工况。梁的一个面是用一号单元划分的，用于拓扑优化，另一个面是用二号单元划分的，不作优化。最后的形状是单元 1 的体积减少 50%。

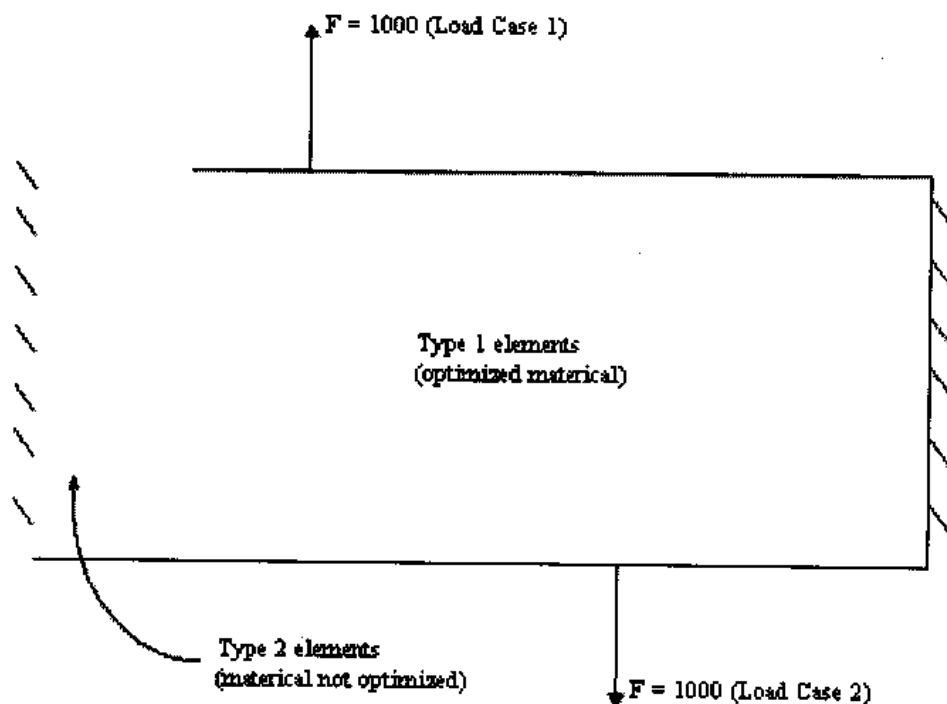


图 8-6 承受两个载荷工况的梁

本问题是用下列的 ANSYS 命令流求解的。两个载荷工况定义并用 LSWRITE 命令写入文件。使用 ANSYS 选择功能，单元 SOLID82 通过类型号 1 和 2 分别指定优化和不优化的部分。TOPDEF 命令定义问题有两个载荷工况并要求 50% 体积减少。TOPEXE 命令在本例中没有使用，代之以用 TOPITER 宏命令指定最大迭代次数为 12 次。

```

/TITLE,A 2-d,multiple-load example of topological optimization
/PREP7
BLC4,0,0,3,1      ! 生成实体模型 (3X1 矩形)
ET,1,82           ! 二维实体单元, 1 号为优化
ET,2,82           ! 2 号不优化
MP,EX,1,118E9     ! 线性各项同性材料
MP,NUXY,1,0.3
ESIZE,0.05        ! 较细的网格密度
TYPE,1
AMESH,ALL         ! 自由矩形网格划分
NSEL,S,LOC,X,0,0.4 ! 选择不优化的部分
ESLN
TYPE,2
EMODI,ALL        ! 定义 2 号单元
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,ALL,0      ! 在 X=0 处固定
NSEL,S,LOC,X,3
D,ALL,ALL,0      ! 在 X=3 处固定
FORCE=1000       ! 载荷数值
NSEL,S,LOC,X,1
NSEL,R,LOC,Y,1
F,ALL,FY,FORCE   ! 定义第一个载荷工况
ALLSEL
LSWRITE,1        ! 写第一个载荷工况
FDEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,2
NSEL,R,LOC,Y,0
F,ALL,FY,-FORCE ! 定义第二个载荷工况
ALLSEL
LSWRITE,2        ! 写第二个载荷工况
FDEL,ALL
TOPDEF,50,2      ! 定义拓扑优化有两个载荷工况
/SHOW,topo,grph ! 将图形输出到文件 (在交互方式下删除本命令)
/DSCALE,,OFF
/CONTOUR,,2
TOPITER,12,1     ! 执行不多于 12 次迭代
FINISH

```

◆ 求解结果

图 8-7 表示上例的计算结果。这些结果存入 top.grph 文件便于后续的数据显示处理。如果是交互地运行 ANSYS 程序，将 /SHOW 命令删除以观看每次迭代的结果。

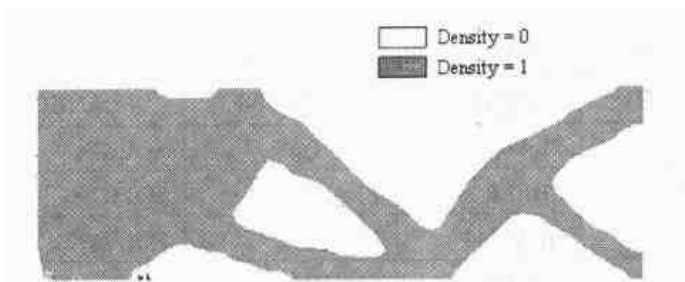


图 8-7 拓扑优化结果——50%体积减少

◆ 一些说明

- 结果对载荷情况十分敏感。很小的载荷变化将导致很大的优化结果差异。
- 结果对网格划分密度敏感。一般来说，很细的网格可以产生“清晰”的拓扑结果，而较粗的网格会生成“混乱”的结果。但是，较大的有限元模型需要更多的收敛时间。
- 在一些情况下会得到桁架形状的拓扑结果。这通常在用户指定很大的体积减少值和较细的网格划分时出现。很大的体积减少值如 80%或更大（TOPDEF 命令）。
- 如果有多个载荷工况时，有多种方式将其联合进行拓扑优化求解。例如，考虑有五个载荷工况的情况。可以选择使用五个单独的拓扑优化分析过程，也可以使用包括这五个工况的一次拓扑优化分析。还有，也可以将这五个工况合成为一个工况，然后做一次优化。综合起来，可以有七个不同的拓扑优化求解：

5 独立的拓扑优化求解（每个工况一次）

1 拓扑优化求解针对五个工况

1 拓扑优化求解针对一个联合工况

附加的结果或结果的组合都是可用的。

- 结果对泊松比敏感但对杨氏模量不敏感。但是，随泊松比变化的效果不明显。
- TOPDEF 和 TOPITER 命令中的指定值并不存储在 ANSYS 数据库中；因此，用户必须在每次拓扑优化时重新指定优化目标和定义。

8.3 单元的生和死

8.3.1 何为单元的生和死

如果模型中加入（或删除）材料，模型中相应的单元就“存在”（或消亡）。单元生死选项就用于在这种情况下杀死或重新激活选择的单元（可用的单元类型在表 8-1 中列出）。本选项主要用于钻孔（如开矿和挖通道等），建筑物施工过程（如桥的建筑过程），顺序组装（如分层的计算机芯片组装）和另外一些用户可以根据单元位置来方便的激活和不激活它们的一些应用中。单元生死功能只适用于 ANSYS/Multiphysics，ANSYS/Mechanical 和 ANSYS/Structural 产品。

表 8-1 Elements with birth and death capability

LINK1	SURF19	SHELL41	SOLID64	PLANE83	SHELL143
PLANE2	PIPE20	PLANE42	SOLID65	SOLID87	SURF151
BEAM3	MASS21	SHELL43	PLANE67	SOLID90	SURF152
BEAM4	SURF22	BEAM44	LINK68	SOLID92	SURF153
SOLID5	BEAM23	SOLID45	SOLID69	SHELL93	SURF154
LINK8	BEAM24	PLANE53	SOLID70	SOLID95	SHELL157
LINK10	PLANE25	BEAM54	MASS71	SOLID96	TARGE169
LINK11	MATRIX27	PLANE55	SOLID72	SOLID97	TARGE170
PLANE13	LINK31	SHELL57	SOLID73	SOLID98	CONTA171
COMBIN14	LINK32	PIPE59	PLANE75	SHELL99	CONTA172
PIPE16	LINK33	PIPE60	PLANE77	PLANE121	CONTA173
PIPE17	LINK34	SOLID62	PLANE78	SOLID122	CONTA174
PIPE18	PLANE35	SHELL63	PLANE82	SOLID123	

在一些情况下，单元的生死状态可以根据 ANSYS 的计算数值决定，如温度、应力、应变等。可以用 ETABLE 命令 (Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table) 和 ESEL 命令 (Utility Menu>Select>Entities) 来确定选择的单元的相关数据，也可以改变单元的状态 (溶和、固结、俘获等)。本过程对于由相变引起的模型效应 (如焊接过程中原不生效的熔融材料变为生效的模型体的一部分)，失效扩展和另外一些分析过程中的单元变化是有效的。

8.3.2 单元生死是如何工作的

要激活“单元死”的效果，ANSYS 程序并不是将“杀死”的单元从模型中删除，而是将其刚度 (或传导，或其他分析特性) 矩阵乘以一个很小的因子 [ESTIF]。因子缺省值为 1.0E-6，可以赋为其他数值 (详见“施加载荷并求解”一章)。死单元的单元载荷将为 0，从而不对载荷向量生效 (但仍然在单元载荷的列表中出现)。同样，死单元的质量、阻尼、比热和其他类似效果也设为 0 值。死单元的质量和能量将不包括在模型求解结果中。单元的应变在“杀死”的同时也将设为 0。

与上面的过程相似，如果单元“出生”，并不是将其加到模型中，而是重新激活它们。用户必须在 PREP7 中生成所有单元，包括后面要被激活的单元。在求解器中不能生成新的单元。要“加入”一个单元，先杀死它，然后在合适的载荷步中重新激活它。

当一个单元被重新激活时，其刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始的数值。重新激活的单元没有应变记录 (也无热量存储等)。但是，初应变以实参形式输入 (如 LINK1 单元) 的不为单元生死选项所影响。而且，除非是打开了大变形选项 [NLGEOM, ON]，一些单元类型将以它们以前的几何特性恢复 (大变形效果有时用来得到合理的结果)。单元在被激活后第一个求解过程中同样可以有热应变 (等于 $a * (T - TREF)$)，如果其承受热量体载荷。

8.3.3 如何使用单元生死特性

可以在大多数静态和非线性瞬态分析中使用单元生死，其基本过程与相应的分析过程是

一致的。对于其他分析来说，这一过程主要包括以下三步：

- 建模
- 施加载荷并求解
- 查看结果

修改基本分析步骤如下以包括单元生死特征：

◆ 建模

在 PREP7 中，生成所有单元，包括那些只有在以后载荷步中才激活的单元。在 PREP7 外不能生成新的单元。

◆ 施加载荷并求解

在 SOLUTION 中完成以下操作：

- 定义第一个载荷步：

在第一个载荷步中，用户必须选择分析类型和所有的分析选项。用下列方法指定分析类型：

Command: ANTYPE

GUI: Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis

在结构分析中，大变形效果应打开。用下列命令设置该选项：

Command: NLGEOM, ON

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

对于所有单元生死应用，在第一个载荷步中应设置牛顿-拉夫森选项，因为程序不能预知 EKILL 命令出现在后面的载荷步中。用下列命令完成该操作：

Command: NROPT

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

杀死[EKILL] 所有要加入到后续载荷步中的单元，用下列命令：

Command: EKILL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Kill Elements

单元在载荷步的第一个子步被杀死（或激活），然后在整个载荷步中保持该状态。要注意保证使用缺省的矩阵缩减因子不会引起一些问题。有些情况下要考虑用严格的缩减因子。用下列方法指定缩减因子数值：

Command: ESTIF

GUI: Main Menu>Solution>Other>StiffnessMult

不与任何激活的单元相连的结点将“漂移”，或具有浮动的自由度数值。在一些情况下，用户可能想约束不被激活的自由度[D, CP 等]以减少要求解的方程的数目，并防止出现位置错误。约束非激活自由度，在重新激活的单元要有特定的（或温度等）时很有影响，因为在重新激活单元时要删除这些人为的约束。同时要删除非激活自由度的结点载荷（也就是不与任意激活的单元相连的结点）。同样，用户必须在重新激活在自由度上施加新的结点载荷。

下面是第一个载荷步中命令输入示例：

```
!第一个载荷步
TIME, ...           !设定时间值（静力分析选项）
NLGEOM, ON         !打开大位移效果
NROPT, FULL        !设定牛顿-拉夫森选项
```

ESTIF,...	!设定非缺省缩减因子(可选)
ESEL,...	!选择在本载荷步中将不激活的单元
EKILL,...	!不激活选择的单元
ESEL,S,LIVE	!选择所有活动单元
NSLE,S	!选择所有活动结点
NSEL,INVE	!选择所有非活动结点(不与活动单元相连的结点)
D,ALL,ALL,0	!约束所有不活动的结点自由度(可选)
NSEL,ALL	!选择所有结点
ESEL,ALL	!选择所有单元
D,...	!施加合适的约束
F,...	!施加合适的活动结点自由度载荷
SF,...	!施加合适的单元载荷
BF,...	!施加合适的体载荷
SAVE	
SOLVE	

请参阅 TIME、NLGEOM、NROPT、ESTIF、ESEL、EKILL、NSLE、NSEL、D、F、SF 和 BF 命令得到更详细的解释。

● 后继载荷步

在后继载荷步中,用户可以随意杀死或重新激活单元。象上面提到的,要正确地施加和删除约束和结点载荷。

用下列命令杀死单元:

Command: EKILL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Kill Elements

用下列命令重新激活单元:

Command: EALIVE

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Activate Elem

!第二个(或后继)载荷步:

TIME,...	
ESEL,...	
EKILL,...	!杀死选择的单元
ESEL,...	
EALIVE,...	!重新激活选择的单元
...	
FDELE,...	!删除不活动自由度的结点载荷
D,...	!约束不活动自由度
...	
F,...	!在活动自由度上施加合适的结点载荷
DDELE,...	!删除重新激活的自由度上的约束
SAVE	
SOLVE	

请参阅 TIME、ESEL、EKILL、EALIVE、FDELE、D、F 和 DDELE 命令得到更详细的

解释。

◆ 查看结果

对于大多数部分来说，用户在对包含不激活或重新激活的单元操作时应按照标准的过程来做。但是必须清楚的是，“杀死”的单元仍在模型中，尽管对刚度（传导）矩阵的贡献可以忽略。因此，它们将包括在单元显示，输出列表等操作中。例如，不激活的单元在结点结果平均(PLNSOL 命令或 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Nodal Solu)时将“污染”结果。整个不激活单元的输出应当被忽略，因为很多项带来的效果都很小。建议在单元显示和其他后处理操作前用选择功能将不激活的单元选出选择集。

◆ 使用 ANSYS 结果控制单元生死

在许多时候，用户并不清楚的知道杀死和重新激活单元的确切位置。例如，用户要在热分析中“杀死”熔融的单元（在模型中移去溶化的材料），事先不会知道这些单元的位置；用户必须根据 ANSYS 计算出的温度确定这些单元。当决定杀死或重新激活单元依靠 ANSYS 计算结果时（如温度，应力，应变等），用户可以使用命令识别并选择关键单元。

用下列方法识别关键单元：

Command: ETABLE

GUI: Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table

用下列方法选择关键单元：

Command: ESEL

GUI: Utility Menu>Select>Entities

然后用户可以杀死或重新激活选择的单元（也可以用 ANSYS APDL 语言编写宏以完成这些操作）。

用下列方法杀死选择的单元：

Command: EKILL, ALL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Kill Elements

用下列方法重新激活选择的单元：

Command: EALIVE, ALL

GUI: Main Menu>Solution>-Load Step Opts-Other>Activate Elem

下面的例子是杀死总应变超过许用值的单元：

```

/SOLU                                !进入求解器
...
...                                  !标准的求解过程
SOLVE
FINISH
!
/POST1                                !进入 POST1
SET, ...
ETABLE, STRAIN, EPTO, EQV             !将总应变存入 ETABLE
ESEL, S, ETAB, STRAIN, 0.20          !选择所有总应变大于或等于 0.20 的单元
FINISH

```

```

!
/SOLU                !重新进入求解器
ANTYPE,,REST
EKILL,ALL            !杀死选择(超过允许值)的单元
ESEL,ALL             !读入所有单元
...
...                 !继续求解

```

请参阅 ETABLE, ESEL, ANTYPE 和 EKILL 命令得到更详细的解释。

◆ 进一步的说明

不活动的自由度上不能施加约束方程[CE, CEINTF 等]。(不活动的自由度当结点不与活动的单元相连时出现)。

可以通过先杀死然后重新激活单元的方法做应力松弛(如退火)操作。

在非线形分析中,注意不要因为杀死或重新激活单元引起奇异性(如结构分析中的尖角)或刚度突变。这将使得收敛困难。

在有单元生死的分析中打开 FULL 牛顿-拉夫森方法的适应下降选项将得到好的结果。用下列方法:

Command: NROPT, FULL,, ON

GUI: Main Menu>Solution>Analysis Options

可以通过一个参数值来指示单元生死状态[*GET, Par, ELEM, n, ATTR, LIVE]

(Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data)。该参数可以用于 APDL 逻辑分支(*IF 等),或其他要控制单元生死的应用场合中。

用户可能想通过改变材料特性来杀死或重新激活单元 [MPCHG] (Main Menu>Preprocessor>Material Props>Change Mat Num)。但是,在这个过程中要特别小心。软件保护系统和限制使得“杀死”的单元在求解器中改变材料特性时将不生效。(单元集中载荷不能自动删除;应变,质量,比热等也不能删除。)不当的使用 MPCHG 命令将带来许多问题。例如,如果将单元的刚度缩减到近于 0,而保留其质量,在有加速度和惯性载荷的问题中将产生奇异性。

一个 MPCHG 的应用是在建立模型时涉及“出生”单元的应变历程的情况下。使用 MPCHG 可以得到单元在变形的结点构造中的初始应变。

在单元生死中不能用多载荷步求解[LSWRITE],因为不激活或重新激活的单元状态将不写入载荷步文件中。有多个载荷步的生死单元分析应该用一系列的 SOLVE 命令(Main Menu>Solution>Current LS)来做。

8.3.4 单元生死应用实例(命令行格式)

◆ 问题描述

等截面杆两端固定,承受均匀的温度载荷时将其中间 1/3 段移去。过程是将其应变自由化并移去均匀温度。分析其热应力和应变情况。材料特性和几何模型参数见下图 8-8。

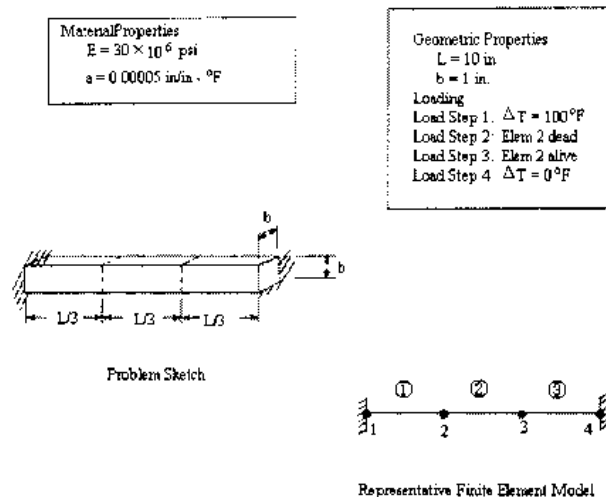


图 8-8 材料特性和几何模型参数

```

/PREP7
/TITLE, ELEMENT BIRTH/DEATH IN A FIXED BAR WITH THERMAL LOADING
ET,1,LINK1                ! 二维杆单元
MP,EX,1,30E6              ! 材料特性
MP,ALPX,1,.00005
MP,EX,2,30E6
MP,ALPX,2,.00005          ! 重新‘出生’单元的特性
MP,REFT,2,100            ! 单元出生的参考温度
R,1,1,1.0
N,1
N,4,10
FILL
E,1,2
EGEN,3,1,-1              ! 生成三个单元
FINISH

/SOLU
ANTYPE,STATIC
D,1,ALL,,4,3            ! 固定杆的两端
TREF,0                  ! 参考温度 0 度
TJNIF,100              ! 均匀温度载荷
NROPT,FULL
OUTPR,BASIC,ALL
SOLVE
EKILL,2                 ! ‘杀死’中间的单元
SOLVE
EALIVE,2                ! 重新激活中间单元
MPCHG,2,2              ! 将材料特性改为 2 以生成自由应变单元
SOLVE
TUNIF,0                 ! 删除温度载荷
SOLVE
    
```