

高等学校计算机科学与技术教材

ANSYS 辅助分析应用基础教程

张乐乐 谭南林 焦风川 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书主要内容分为两部分。第一部分 ANSYS 应用基础,包括基本操作、模型建立、算例分析和结果处理等。第二部分 ANSYS/LS-DYNA 应用基础,包括基本理论、PART 的定义和作用、刚性体的定义、接触条件的定义、约束、初始条件和加载、求解和求解控制等。

本书可作为机械类高年级本科生和研究生的教材。也可以为那些没有接触过 ANSYS 软件,希望了解、学习和使用 ANSYS 的读者提供良好的帮助,达到快速入门、掌握基础、具备独立深入能力的目的。

本书从 ANSYS 软件最基本的使用开始介绍,图文并茂,简单明了,配合了适当的实例供读者练习和借鉴。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 辅助分析应用基础教程 / 张乐乐, 谭南林, 焦风川编著. — 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2006.3

(高等学校计算机科学与技术教材)

ISBN 7-81082-684-0

I. A... II. ① 张... ② 谭... ③ 焦... III. 有限元分析-应用程序, ANSYS-高等学校-教材 IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 153156 号

责任编辑: 谭文芳

出版者: 清华大学出版社 邮编: 100084 电话: 010-62776969 <http://www.tup.com.cn>

北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者: 北京东光印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 15.75 字数: 400 千字

版 次: 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-81082-684-0/O·32

印 数: 1~4000 册 定价: 25.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@center.bjtu.edu.cn

前 言

本书的内容分为两篇,上篇为 ANSYS 应用基础;下篇为 ANSYS/LS-DYNA 应用基础。

上篇为第 1 章~第 7 章,主要介绍 ANSYS 基本操作、实体模型的建立、材料模型的选取、网格的划分、结构分析的内容和方法等。下篇为第 8 章~第 14 章,主要介绍 ANSYS 显式动力学分析模块——LS-DYNA 的基本使用和操作。由于该模块应用广泛,在理论和使用上具有和 ANSYS 其他模块与众不同的特点,因此将详细进行介绍。附录部分介绍了有限元方法的基本概念、显式积分和其他相关内容。

ANSYS 的基本使用主要介绍如何启动 ANSYS 并进入图形用户界面;对 ANSYS 文件系统、坐标系统、工作平面等功能的了解、认识和使用,通过菜单控制实现图形的平移、旋转、缩放和拾取等。以上基本操作是用户最常用的功能,既要配合一些操作的实现,也是后续在 ANSYS 中实现其他目的的基础。

ANSYS 允许用户直接建立实体模型,也可以导入其他 CAD 系统生成的模型。ANSYS 基本图元对象的生成方法多种多样,方便灵活,同时,还可以通过体素的概念和布尔操作来实现对象的建立。对实体模型对象的复制、移动等操作更加方便用户的创建。

ANSYS 实现问题的分析过程与有限元方法解决问题的实质是密不可分的。在完成实体模型建立之后,需要用户定义单元和材料模型,然后对实体模型进行网格的划分、载荷的抽象和施加,即完成有限元模型的建立。求解和后处理,观察和分析所得结果。

由于 ANSYS/LS-DYNA 在基本理论和使用上都与其他模块有显著的区别,而且其适用领域也与众不同,因此在本书中作为重点部分讲述。涉及的内容包括 PART 的定义和作用、刚性体的定义、接触条件的定义、约束、初始条件和加载、求解和求解控制。

本书作为教材适用于初学者,可以为那些没有接触过 ANSYS 软件,希望了解、学习和使用 ANSYS 的读者提供良好的帮助,达到快速入门、掌握基础、具备独立深入能力的目的。

本书从 ANSYS 软件最基本的使用开始,图文并茂,简单明了,配合了适当的实例和算例供读者练习和借鉴。基本囊括了结构分析的主要方面,尤其是对 LS-DYNA 模块的介绍是本教程的特色之一。书中使用的软件版本为 ANSYS ED 8.0 版,对于 ANSYS ED 没有包括的内容(例如 LS-DYNA 模块的有关部分)使用了 ANSYS 5.6 版本。

ANSYS 是一个强大的工程工具,能够解决各种各样的工程问题。然而,不理解有限元方法的基本概念,用户很快就会发现陷入困境。因为强大的工具还需要聪明的人来发掘和使用它,才能显示出无穷的作用。因此,建议读者先从附录 A 开始,初步了解有限元方法的基本概念和解题思路,配合软件学习和实例练习,可以达到事半功倍的效果。附录 B 简单介绍显式积分的内容,作为辅助使用 ANSYS/LS-DYNA。附录 C 建议可以较为熟练使用软件的读者进行学习 and 阅读。附录 D 提供了关于单位制使用的相关知识。

在本书编写过程中,特别感谢 ANSYS 公司北京办事处的大力支持和协助,特别感谢北京交通大学机械电子与控制工程学院的大力支持和协助,感谢张冬泉、苏树强、吴斌、樊莉、杜伟、

马洪涛、沈栋平、周长涛等老师和同学的支持和帮助。

由于编者水平有限,书中缺点、错误和不足在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 1 月

目 录

上篇 ANSYS 应用基础

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 3 |
| 1.1 有限元方法与 ANSYS | 3 |
| 1.1.1 工程问题的解决方案 | 3 |
| 1.1.2 数值分析与有限单元法 | 3 |
| 1.1.3 主流软件与 ANSYS | 4 |
| 1.2 ANSYS 概述 | 4 |
| 1.2.1 组成模块简介 | 4 |
| 1.2.2 功能概览 | 5 |
| 练习题 | 6 |
| 第 2 章 ANSYS 基本操作 | 7 |
| 2.1 启动与窗口功能 | 7 |
| 2.1.1 启动方式 | 7 |
| 2.1.2 窗口功能 | 9 |
| 2.1.3 文件系统 | 11 |
| 2.2 坐标系 | 11 |
| 2.2.1 总体坐标系 | 11 |
| 2.2.2 局部坐标系 | 11 |
| 2.2.3 坐标系的激活 | 12 |
| 2.2.4 显示坐标系 | 12 |
| 2.2.5 节点坐标系 | 12 |
| 2.2.6 单元坐标系 | 13 |
| 2.2.7 结果坐标系 | 13 |
| 2.3 工作平面的使用 | 14 |
| 2.3.1 什么是工作平面 | 14 |
| 2.3.2 生成一个工作平面 | 14 |
| 2.4 图形窗口显示控制 | 15 |
| 2.4.1 图形的平移、缩放和旋转 | 15 |
| 2.4.2 Plot 菜单控制 | 16 |
| 2.4.3 PlotCtrls 菜单控制 | 16 |
| 2.5 主菜单简介 | 18 |

| | | |
|-------|----------------------|----|
| 2.5.1 | 前处理菜单 | 18 |
| 2.5.2 | 求解菜单 | 18 |
| 2.5.3 | 后处理菜单 | 19 |
| | 练习题 | 20 |
| 第 3 章 | ANSYS 实体建模 | 21 |
| 3.1 | 实体模型简介 | 21 |
| 3.1.1 | 实体建模的方法 | 21 |
| 3.1.2 | 群组命令介绍 | 21 |
| 3.2 | 基本图元对象的建立 | 22 |
| 3.2.1 | 点定义 | 22 |
| 3.2.2 | 线定义 | 26 |
| 3.2.3 | 面的定义 | 30 |
| 3.2.4 | 体定义 | 35 |
| 3.3 | 用体素创建 ANSYS 对象 | 40 |
| 3.3.1 | 体素的概念 | 40 |
| 3.3.2 | 布尔操作 | 40 |
| 3.4 | 图元对象的其他操作 | 43 |
| 3.4.1 | 移动和旋转 | 43 |
| 3.4.2 | 复制 | 44 |
| 3.4.3 | 镜像 | 45 |
| 3.4.4 | 删除 | 45 |
| 3.5 | 实体模型的输入 | 45 |
| 3.6 | 实例 轴承座的分析(1) | 46 |
| | 练习题 | 52 |
| 第 4 章 | ANSYS 网格划分 | 53 |
| 4.1 | 区分实体模型和有限元模型 | 53 |
| 4.2 | 网格化的一般步骤 | 53 |
| 4.3 | 单元属性定义 | 54 |
| 4.3.1 | 单元形状的选择 | 54 |
| 4.3.2 | 单元实常数的定义 | 55 |
| 4.3.3 | 单元材料的定义 | 56 |
| 4.3.4 | 单元属性的分配 | 56 |
| 4.4 | 网格划分 | 57 |
| 4.4.1 | 网格划分工具 | 57 |
| 4.4.2 | 自由网格划分 | 60 |
| 4.4.3 | 映射网格划分 | 60 |
| 4.4.4 | 扫掠生成网格 | 62 |
| 4.5 | 网格的局部细化 | 64 |
| 4.5.1 | 局部细化一般过程 | 64 |

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 4.5.2 | 高级参数的控制 | 66 |
| 4.5.3 | 属性和载荷的转换 | 67 |
| 4.5.4 | 局部细化的其他问题 | 67 |
| 4.6 | 网格的直接生成..... | 68 |
| 4.6.1 | 关于节点的操作 | 68 |
| 4.6.2 | 关于单元的操作 | 71 |
| 4.7 | 网格的清除..... | 73 |
| 4.8 | 实例 轴承座的分析(2)..... | 73 |
| | 练习题 | 74 |
| 第 5 章 | ANSYS 加载与求解 | 75 |
| 5.1 | 负载的定义..... | 75 |
| 5.2 | 有限元模型的加载..... | 75 |
| 5.2.1 | 节点自由度的约束 | 76 |
| 5.2.2 | 节点载荷的施加 | 77 |
| 5.2.3 | 单元载荷的施加 | 78 |
| 5.3 | 实体模型的加载..... | 78 |
| 5.3.1 | 关键点上载荷的施加 | 78 |
| 5.3.2 | 线段上载荷的施加 | 80 |
| 5.3.3 | 面上载荷的施加 | 81 |
| 5.4 | 求解..... | 82 |
| 5.4.1 | 分析类型的选择 | 82 |
| 5.4.2 | 加载与求解实例 | 83 |
| 5.5 | 实例 轴承座的分析(3)..... | 85 |
| | 练习题 | 86 |
| 第 6 章 | ANSYS 后处理 | 87 |
| 6.1 | POST1 后处理器 | 87 |
| 6.1.1 | 变形图的绘制 | 87 |
| 6.1.2 | 等值线图的绘制 | 88 |
| 6.1.3 | 路径的定义和使用 | 88 |
| 6.1.4 | 动画显示..... | 90 |
| 6.2 | POST26 后处理器 | 90 |
| 6.2.1 | 定义变量..... | 90 |
| 6.2.2 | 绘制变量曲线图 | 90 |
| 6.3 | 实例 轴承座的分析(4)..... | 92 |
| | 练习题 | 92 |
| 第 7 章 | 综合练习实例 | 93 |
| 7.1 | 实体建模练习一..... | 93 |
| 7.2 | 实体建模练习二..... | 94 |
| 7.3 | 车轮的分析..... | 95 |

| | | |
|-----|-----------------------------|-----|
| 7.4 | 连杆的分析 | 102 |
| 7.5 | 瞬态分析 | 108 |
| 7.6 | 广告牌承受风载荷的模拟 | 113 |
| 7.7 | 模态分析 | 115 |
| 7.8 | 间接法热应力分析 | 118 |
| 7.9 | 一个层/热/定常流的 FLOTRAN 分析 | 121 |

下篇 ANSYS /LS-DYNA 应用基础

| | | |
|--------|---------------------------|-----|
| 第 8 章 | ANSYS /LS-DYNA 概述 | 129 |
| 8.1 | ANSYS /LS-DYNA 功能介绍 | 129 |
| 8.1.1 | 发展概况 | 129 |
| 8.1.2 | 工程应用 | 129 |
| 8.1.3 | 总体特点 | 130 |
| 8.2 | ANSYS /LS-DYNA 程序概述 | 131 |
| 8.2.1 | 程序构成和用户界面 | 131 |
| 8.2.2 | 一般求解步骤 | 131 |
| 8.2.3 | 文件系统 | 132 |
| 8.2.4 | 需要说明的几个问题 | 133 |
| | 练习题 | 133 |
| 第 9 章 | 显式单元的定义与选择 | 134 |
| 9.1 | 显式单元概述 | 134 |
| 9.1.1 | 单点积分单元 | 135 |
| 9.1.2 | 沙漏问题 | 135 |
| 9.2 | 单元和实常数的定义 | 135 |
| 9.3 | SOLID164 实体单元 | 137 |
| 9.4 | SHELL163 薄壳单元 | 137 |
| 9.5 | 梁单元和杆单元 | 139 |
| 9.6 | 离散单元和质量单元 | 140 |
| 9.7 | 实例 钢柱落地的分析 | 140 |
| | 练习题 | 143 |
| 第 10 章 | 材料模式和状态方程 | 144 |
| 10.1 | 材料模型的定义 | 145 |
| 10.2 | 线弹性材料 | 146 |
| 10.2.1 | 各向同性弹性材料 | 146 |
| 10.2.2 | 正交各向异性弹性材料 | 146 |
| 10.2.3 | 各向异性弹性材料 | 146 |
| 10.3 | 非线性弹性材料 | 147 |
| 10.3.1 | Blatz-Ko 橡胶材料 | 147 |

| | | |
|--------|----------------------------|-----|
| 10.3.2 | Mooney-Rivlin 橡胶材料 | 147 |
| 10.3.3 | 粘弹性材料 | 147 |
| 10.4 | 弹塑性材料..... | 147 |
| 10.4.1 | 与应变率无关的各向同性材料 | 148 |
| 10.4.2 | 与应变率相关的各向同性材料 | 148 |
| 10.4.3 | 与应变率相关的各向异性材料 | 149 |
| 10.5 | 泡沫材料..... | 151 |
| 10.5.1 | 各向同性泡沫 | 151 |
| 10.5.2 | 正交各向异性泡沫 | 152 |
| 10.6 | 复合材料..... | 152 |
| 10.7 | 其他材料..... | 153 |
| 10.7.1 | 刚性材料 | 153 |
| 10.7.2 | 索 | 154 |
| 10.8 | 状态方程..... | 154 |
| | 练习题..... | 154 |
| 第 11 章 | PART 概念及使用 | 155 |
| 11.1 | PART 的概念..... | 155 |
| 11.2 | 创建、修改和列出 PART | 155 |
| 11.3 | PART 和刚性体..... | 156 |
| 11.3.1 | 刚性体约束 | 157 |
| 11.3.2 | 定义刚性体惯性特性 | 157 |
| 11.3.3 | 刚性体加载 | 159 |
| 11.4 | PART 使用实例..... | 160 |
| | 练习题..... | 160 |
| 第 12 章 | 接触问题 | 161 |
| 12.1 | 概述..... | 161 |
| 12.1.1 | 接触问题的基本概念 | 161 |
| 12.1.2 | ANSYS/LS-DYNA 中接触的定义 | 162 |
| 12.2 | 接触类型..... | 164 |
| 12.2.1 | 接触类型的选择 | 164 |
| 12.2.2 | 接触选项的选择 | 165 |
| 12.3 | 摩擦问题..... | 166 |
| 12.3.1 | 摩擦系数的定义 | 166 |
| 12.3.2 | 滑动界面能 | 166 |
| 12.3.3 | 初始穿透 | 167 |
| 12.4 | 附加输入参数..... | 167 |
| 12.5 | 接触界面的控制..... | 167 |
| 12.5.1 | 接触刚度控制 | 168 |
| 12.5.2 | 初始穿透检查 | 169 |

| | | |
|--------|-------------------|-----|
| 12.5.3 | 接触深度控制 | 169 |
| 12.5.4 | 接触段自动排序 | 169 |
| 12.5.5 | 壳单元厚度的控制 | 170 |
| | 练习题..... | 170 |
| 第 13 章 | 加载、求解与后处理..... | 171 |
| 13.1 | 加载..... | 171 |
| 13.1.1 | 数组的定义 | 171 |
| 13.1.2 | 一般载荷 | 172 |
| 13.1.3 | 约束 | 175 |
| 13.1.4 | 初始条件 | 177 |
| 13.1.5 | 点焊 | 178 |
| 13.2 | 求解控制..... | 179 |
| 13.2.1 | 基本求解控制 | 179 |
| 13.2.2 | 输出文件控制 | 181 |
| 13.2.3 | 质量缩放 | 183 |
| 13.2.4 | 子循环..... | 184 |
| 13.2.5 | 沙漏控制 | 185 |
| 13.2.6 | 自适应网格划分 | 186 |
| 13.3 | 求解过程控制..... | 188 |
| 13.3.1 | 求解 | 188 |
| 13.3.2 | 求解过程控制和监测 | 189 |
| 13.3.3 | 重启动..... | 189 |
| 13.4 | 后处理..... | 190 |
| | 练习题..... | 194 |
| 第 14 章 | DYNA 模块综合练习 | 195 |
| 14.1 | 模拟点焊..... | 195 |
| 14.2 | 跌落仿真..... | 198 |
| 14.3 | 显式－隐式连续求解..... | 200 |
| 14.4 | 隐式－显式连续求解..... | 207 |
| 附录 A | 有限元方法的基本概念 | 215 |
| A.1 | 连续体的离散化 | 215 |
| A.1.1 | 划分单元 | 215 |
| A.1.2 | 简化约束 | 216 |
| A.1.3 | 移置载荷 | 216 |
| A.2 | 单元位移函数和形状函数 | 217 |
| A.3 | 单元特性分析 | 218 |
| A.3.1 | 单元的应变和应力 | 218 |
| A.3.2 | 单元的刚度矩阵 | 219 |
| A.3.3 | 等效节点载荷 | 220 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| A.3.4 解答的收敛性 | 221 |
| A.4 总体特性分析 | 222 |
| A.4.1 节点的平衡方程 | 222 |
| A.4.2 结构的代数方程组 | 222 |
| A.4.3 总体刚度矩阵的组成 | 223 |
| A.4.4 方程组右端项的形成 | 223 |
| A.4.5 已知条件的引进 | 224 |
| 附录 B 显式积分简介 | 225 |
| B.1 显式积分 | 225 |
| B.2 沙漏模式 | 226 |
| 附录 C 命令流文件和 K 文件 | 230 |
| C.1 命令流文件 | 230 |
| C.2 K 文件 | 232 |
| 附录 D 关于单位制 | 235 |
| D.1 ANSYS 中单位制的使用 | 235 |
| D.2 常用的协调单位制 | 235 |
| D.2.1 kg-m-s 单位制 | 236 |
| D.2.2 kg-mm-s 单位制 | 236 |
| D.2.3 kg-mm-ms 单位制 | 236 |
| D.2.4 T-mm-s 单位制 | 236 |
| D.2.5 T-mm-ms 单位制 | 237 |
| D.2.6 10^6 kg-mm-s 单位制 | 237 |
| D.2.7 g-mm-ms 单位制 | 237 |
| 参考文献 | 238 |

上 篇

ANSYS 应用基础

第 1 章 概 述

本章主要介绍有限元方法与 ANSYS 软件的关系 ;ANSYS 软件模块组成及功能概述。

1.1 有限元方法与 ANSYS

1943 年 Courant 第一次应用有限元法研究扭转问题。20 世纪 50 年代 ,波音公司采用三角元实现了对机翼的建模 ,大大推动了有限元方法的应用。从 20 世纪 60 年代 ,人们开始广为接受“有限元”这一术语 ,并逐步应用到其他工程领域。1967 年 Zienkiewicz 和 Cheung 撰写了第一部有限元的专著。1971 年 ,首次发布了 ANSYS 软件。

1.1.1 工程问题的解决方案

工程问题一般是物理情况的数学模型。数学模型是考虑相关边界条件和初值条件的微分方程组 ,微分方程组是通过对系统或控制体应用自然的基本定律和原理推导出来的 ,这些控制微分方程往往代表了质量、力或能量的平衡。在某些情况下 ,通过给定条件是可以得到系统的精确行为的 ,但实际过程中实现的可能性较少。

因此 ,工程问题的解决方案是对实际问题进行数学模型的抽象和求解的过程。这个过程需要技术人员根据工程问题的特点 ,恰当运用专业知识建立数学模型来表征实际系统 ,然后考虑相关条件进行求解。建立的数学模型既要能够代表实际系统又要可解 ,得到的结果应该达到一定精度以满足工程问题的需要。

1.1.2 数值分析与有限单元法

在许多实际工程问题中 ,由于问题的复杂性和影响因素众多等不确定性 ,一般情况下是难以得到分析系统的精确解 ,即解析解。因此 ,解决这个问题的基本思路是在满足工程需要的前提下 ,采用数值分析方法得到近似解 ,即数值解。可以说 ,解析解表明了系统在任何点上的精确行为 ,而数值解只在称为节点的离散点上近似于解析解。

数值解法可以分为两大类 :有限差分法和有限单元法(或称有限元法)。有限单元方法是目前采用最多的一种数值方法。随着计算机技术的飞速发展 ,有限单元法也得到了长足的进步和更加广泛的应用 ,例如在机械、电子、建筑、军工、航空航天等各领域。对于解决复杂的工程问题有着良好的效果 ,在辅助分析、辅助设计、产品质量预报等多方面有着举足轻重的地位 ,起到了不可替代的作用。

有限单元法从研究有限大小的单元体着手 ,在分析中取有限多个单元体 ,其体积为有限大小 ,通过分析得到一组代数方程。在一定条件下求解该代数方程 ,得到某些点的位移 ,再由位移求得应力和应变。因此 ,相对于解析方法中求解偏微分方程 ,在有限单元法中求解代数方程容易得多 ,并且往往总是可以得到解答的。有限单元法按照所选用的基本未知量和分析方法

的不同,可以分为以下 3 种基本解法。

(1) 位移法

通过选取节点的位移分量为基本的未知量,在节点上建立平衡方程。这个算法计算规律很强,便于编写计算机通用程序。

(2) 力法

通过选取力的分量为基本未知量,在节点上建立位移连续方程。一般来说,用力法求得的内力、应力,比用位移法求得的结果精度高。

(3) 混合法

通过选取混合型的基本未知量,一部分是节点位移分量,另一部分是力的分量,在节点上既建立有关的平衡方程又建立有关的连续方程。

1.1.3 主流软件与 ANSYS

随着有限元方法理论逐步的研究发展及应用领域的拓展,显示了有限元方法解决工程问题的优势。因此,一些大型的通用商用软件应运而生,目前常见的有 ANSYS、NASTRAN、MARC、ADINA、ADAMS、IDEAS 等。

ANSYS 是目前应用最为广泛的通用的有限元计算机程序之一,其代码长度超过 100 000 行。用户可以应用 ANSYS 进行静态、动态、热传导、流体流动和电磁学的分析。在过去的几十年里,ANSYS 是最主要的 FEA 程序。当前的 ANSYS 版本的图形用户界面窗口、下拉菜单、对话框和工具条等的设计都十分友好,用户使用方便,而且算法和模块的完善和加强,使其解决各工程领域问题的功能更加强大。

1.2 ANSYS 概述

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元软件,可广泛地用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、生物医学、水利、日用家电等一般工业及科学研究。该软件提供了不断改进的功能清单,具体包括:结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分及利用 ANSYS 参数设计语言扩展宏命令功能。

ANSYS 软件功能强大,主要特点有:实现多场及多场耦合分析;实现前后处理、求解及多场分析统一数据库的一体化;具有多物理场优化功能;强大的非线性分析功能;多种求解器分别适用于不同的问题及不同的硬件配置;支持异种、异构平台的网络浮动,在异种、异构平台上用户界面统一、数据文件全部兼容;强大的并行计算功能支持分布式并行及共享内存式并行;多种自动网格划分技术;良好的用户开发环境。

ANSYS 不仅支持用户直接创建模型,也支持与其他 CAD 软件进行图形传递,其支持的图形传递标准有: SAT、Parasolid、STEP。相应地,可以进行接口的常用 CAD 软件有: Unigraphics、Pro/Engineer、I-Deas、Catia、CADDs、SolidEdge、SolidWorks 等。

1.2.1 组成模块简介

ANSYS 的产品家族如图 1-1 所示。

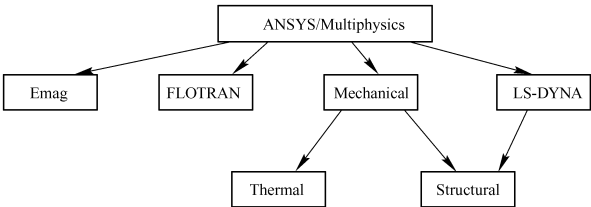


图 1-1 ANSYS 产品家族及相互关系

各模块的功能和应用领域见表 1-1。

表 1-1 ANSYS 模块功能

| 模块名称 | 主要功能和适用领域 | 其他说明 |
|--------------|-----------------|---------------|
| Multiphysics | 包括所有工程学科的所有性能 | ANSYS 产品的“旗舰” |
| Emag | 分析电磁学问题 | |
| FLOTRAN | ANSYS 计算流体动力学 | |
| Mechanical | ANSYS 机械-结构及热分析 | 包括结构及热分析 |
| LS-DYNA | 高度非线性结构问题 | 包括结构分析 |
| Thermal | 分析热问题 | |
| Structural | 分析结构问题 | |

1.2.2 功能概览

1. 结构分析

结构分析用于确定结构的变形、应变、应力及反作用力等 ,包括以下方面：

- ✎ 静力分析用于静态载荷 ,可以考虑结构的线性及非线性行为 ,例如大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹及蠕变等。
- ✎ 模态分析计算线性结构的自振频率及振形。
- ✎ 谱分析 模态分析的扩展 ,用于计算由于随机载荷引起的结构应力和应变 ,例如地震对建筑的影响。
- ✎ 谐响应分析 ,确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应。
- ✎ 瞬态动力学分析 ,确定结构对随时间任意变化的载荷的响应 ,可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为。

其他分析还包括特征屈曲分析、断裂分析、复合材料分析、疲劳分析。

ANSYS/LS-DYNA 用于模拟高度非线性 ,惯性力占支配地位的问题 ,并可以考虑所有的非线性行为 ,它的显式方程可以求解冲击、碰撞、快速成型问题 ,是目前求解这类问题最有效的方法之一。

2. 热分析

热分析计算物体的稳态或瞬态温度分布 ,以及热量的获取或损失、热梯度、热通量等。热分析之后往往进行结构分析 ,计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力。相关分析包括相变

(熔化及凝固)、内热源(例如电阻发热)、三种热传导方式(热传导、热对流、热辐射)。

3. 电磁分析

电磁场分析用于计算磁场,一般考虑的物理量包括磁通量密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、能耗及磁通量泄漏等。磁场可由电流、永磁体、外加磁场等产生。其中:

- ✎ 静磁场分析计算直流电或永磁体产生的磁场;
- ✎ 交变磁场分析计算由于交流电产生的磁场;
- ✎ 瞬态磁场分析计算随时间变化的电流或外界引起的磁场;
- ✎ 电场分析用于计算电阻或电容系统的电场,典型的物理量有电流密度、电荷密度、电场及电阻等;
- ✎ 高频电磁场分析用于微波及波导、雷达系统、同轴连接器等。

4. 流体分析

流体分析用于确定流体的流动及热行为。

- ✎ CFD(Computual Fliud Dynamics,计算流体动力学)主要由 ANSYS/FLORTRAN 模块实现,该模块提供了强大的计算流体动力学分析功能,包括不可压缩或可压缩流体、层流和湍流,以及多组分流等;
- ✎ 声学分析考虑流体介质与周围固体的相互作用,进行声波传递或水下结构的动力学分析等;
- ✎ 容器内流体分析考虑容器内的非流动流体的影响,可以确定由于晃动引起的静水压力;
- ✎ 流体动力学耦合分析在考虑流体约束质量的动力响应基础上,在结构动力学分析中使用流体耦合单元。

5. 耦合场分析

耦合场分析考虑两个或者多个物理场之间的相互作用。如果两个物理量场之间相互影响,单独求解一个物理场是不可能得到正确结果的,因此需要一个能将两个物理场组合到一起求解的分析软件。例如在压电力分析中,需要同时求解电压分布(电场分析)和应变(结构分析)。典型情况有:热—应力分析,流体—结构相互作用,感应加热(电磁—热),感应振荡。

练习题

1. 有限元有几种基本解法?每种解法的优缺点是什么?
2. ANSYS 产品家族的主要模块是什么?各模块的功能和应用领域有何不同?

第 2 章 ANSYS 基本操作

本章主要介绍 ANSYS 的基本操作,包括如何启动 ANSYS 软件、基本的窗口功能和文件系统;ANSYS 定义和使用的坐标系统;工作平面的概念;图形窗口显示控制;主菜单功能的简介。通过本章的学习可以了解软件的图形用户界面和各部分的主要功能,可以进行简单的操作,例如控制图形的平移、旋转和缩放等。

2.1 启动与窗口功能

ANSYS 构架分为两层,一是起始层(Begin Level),二是处理层(Processor Level)。这两个层的关系主要是使用命令输入时,要通过起始层进入不同的处理器。在 ANSYS 较低版本的启动过程可以很清楚地看出这两层架构,目前本书使用的 8.0 版本就不是那么明显。

2.1.1 启动方式

ANSYS 有两种模式:一种是交互模式(Interactive Mode),另一个是非交互模式(Batch Mode)。交互模式为初学者和大多数使用者所采用,包括建模、保存文件、打印图形及结果分析等,一般无特别原因皆用交互模式。这个特点在 ANSYS 较低版本中的体现也很明确,在 8.0 中就有所不同。

首先,用户安装好软件之后,从“开始”菜单进入选择启动 ANSYS 的选项菜单,如图 2-1 所示,选择“Configure ANSYS ED”,打开图 2-2 所示的 ANSYS 登录界面。需要说明的是,图中显示的是 ANSYS ED 版安装之后的选项,和正式版本是不同的,但基本使用过程类似。

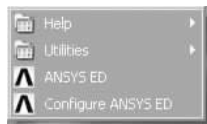


图 2-1 启动 ANSYS 的选项



图 2-2 ANSYS 登录界面

如图 2-2 所示 ANSYS 登录界面 ,对于 ED 版没有用户可选项。对于正式版本 ,用户可以通过“Product”的下拉式菜单选项选择要应用的模块 ,即前面介绍的 ANSYS 产品家族中的某一个。从登录界面的顶部选择“File Management”标签 ,打开如图 2-3 所示文件管理界面。

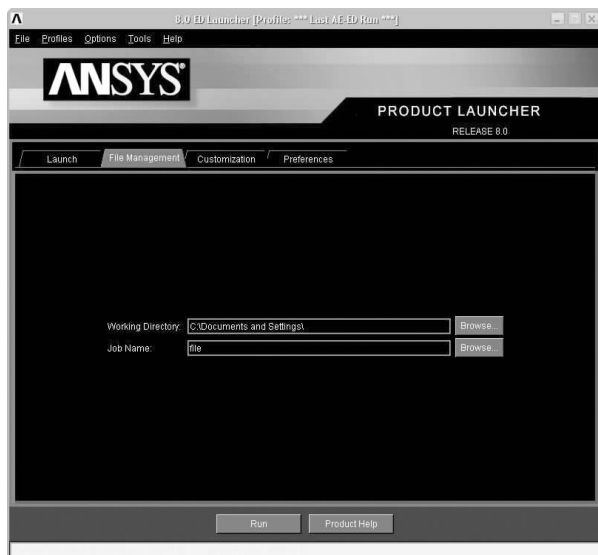


图 2-3 ANSYS 文件管理界面

ANSYS 允许用户在“Working Directory”下指定工作目录 ,即指定 ANSYS 运行过程产生的文件存放的位置。一般来说 ,用户应该有效管理工作目录和文件 ,建议初学者针对每一次分析建立不同的工作目录 ,便于区分不同问题的分析和结果文件的保存 ;用户还可以在“Job Name”指定工作文件的名称 ,默认条件下即为“file”。

从登录界面的顶部选择“Customization”标签 ,打开如图 2-4 所示定制界面。

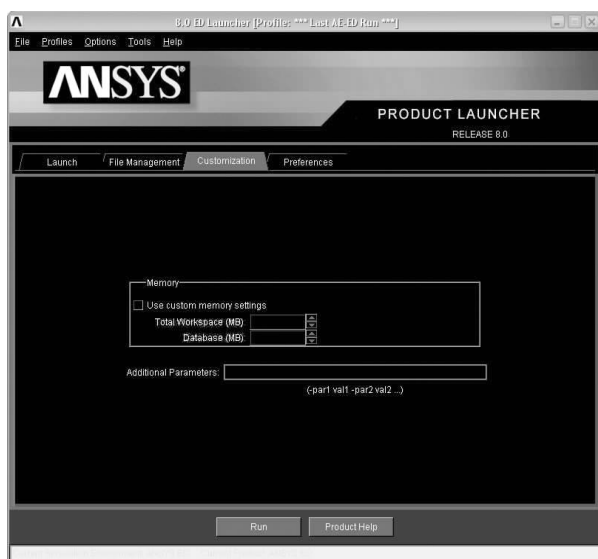


图 2-4 ANSYS 定制界面

如图 2-4 所示界面中,可设置内存等相关参数。上述步骤完成之后,可以单击“Run”按钮,启动 ANSYS 程序。

一般来说,不是每一次启动程序都需要进行上述设置,如果使用产品、工作目录、文件名称等没有改变,用户可以直接选择如图 2-1 所示的 ANSYS 启动选项中的“ANSYS ED”选项启动程序。因为程序是自动记录最近一次设置的参数,所以在开始分析一个新问题时,建议通过上述步骤重新进行相关参数的设置。

2.1.2 窗口功能

进入系统后的整个窗口称为图形用户界面(Graphical User Interface,GUI),如图 2-5 所示。该窗口可以分为 6 大部分,提供使用者与软件之间的交流,凭借这 6 个部分可以非常容易地输入命令、检查模型的建立、观察分析结果及图形输出与打印。

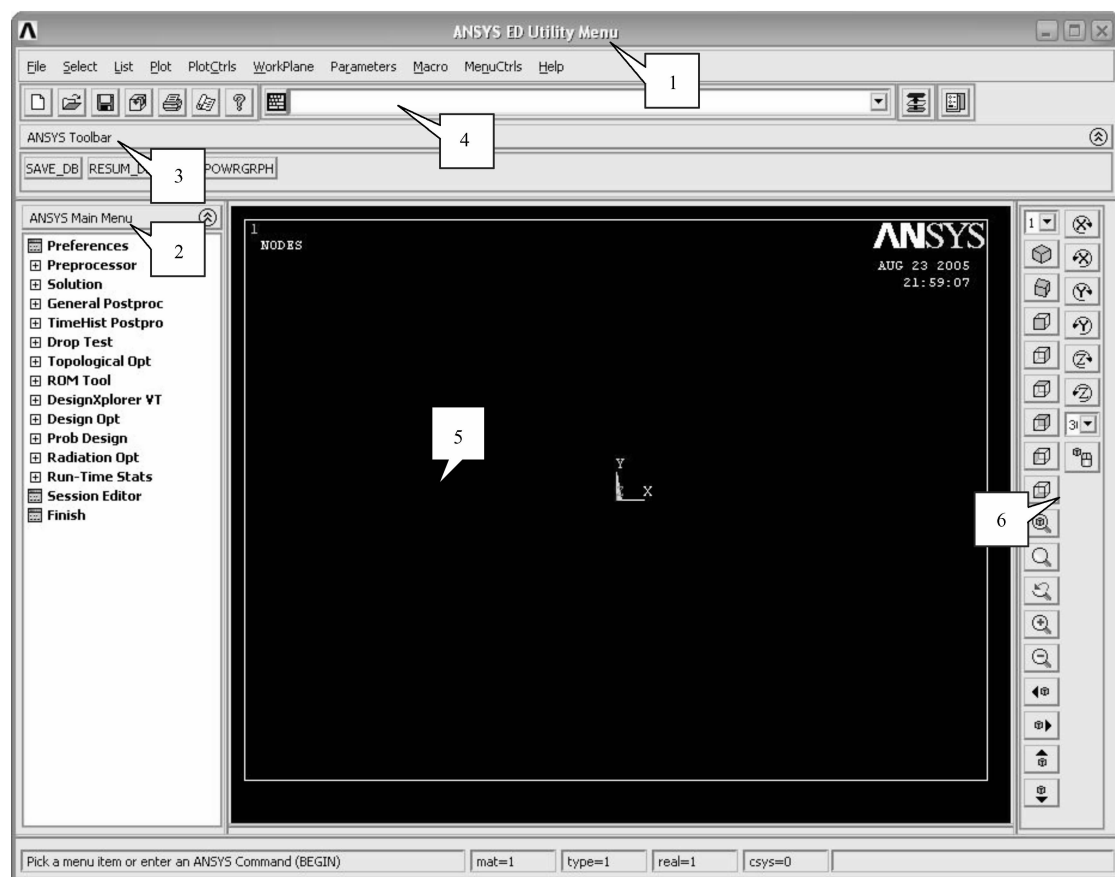


图 2-5 ANSYS 的图形用户界面(GUI)

各部分的功能如下。

标注 1 为应用命令菜单(Utility Menu),包含各种应用命令,如文件控制(File)、对象选择(Select)、资料列表(List)、图形显示(Plot)、图形控制(PlotCtrls)、工作界面设定(WorkPlane)、参数化设计(Parameters)、宏命令(Macro)、窗口控制(MenuCtrls)及辅助说明(Help)等。

标注 2 是主菜单(Main Menu) ,包含分析过程的主要命令 ,如建立模型、外力负载、边界条件、分析类型的选择、求解过程等。

标注 3 是工具栏(Toolbar) ,执行命令的快捷方式 ,可依照个人使用习惯自行设定。

标注 4 是输入窗口(Input Window) ,该窗口用于输入命令 ,同时显示命令可选参数。

标注 5 是图形窗口(Graphic Window) ,显示使用者所建立的模型及查看结果分析。

标注 6 是由若干快捷键组成的 ,方便用户快速实现图形显示控制 ,即平移、旋转和缩放。

启动窗口系统的同时 ,程序还启动了输出窗口(Output Window) ,如图 2-6 所示 ,该窗口显示输入命令执行的结果。

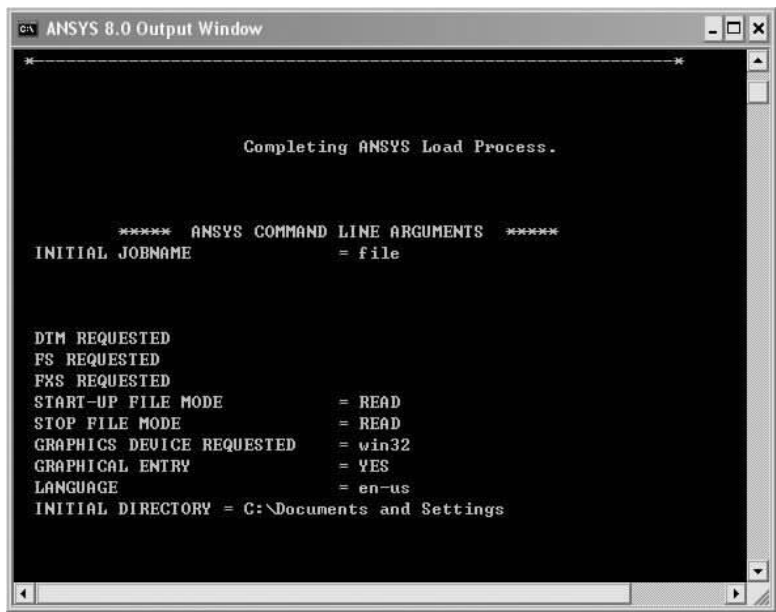


图 2-6 ANSYS 的输出窗口

需要说明的是 ,ANSYS 的大部分 GUI 操作都有相对应的命令格式 ,而且一些命令格式对应几种菜单操作路径 ,但都能实现相同的功能。例如 ,要创建一个关键点 ,用户可以通过主菜单的选项来实现 ,也可以在输入窗口直接输入命令格式来实现 ,具体实现如下 :

命令格式 :

```
K ,NPT ,X ,Y ,Z
```

菜单操作 :

```
Main Menu>Preprocessor>Create>KeyPoint>On Working Plane
Main Menu>Preprocessor>Create>KeyPoint>In Active CS
```

在“输入窗口”直接输入命令格式“K ,1 ,5 ,5 ,5” ,即在坐标(5 ,5 ,5)位置创建一个编号为“1”的关键点。或者依照菜单操作的顺序 ,即在“主菜单”(Main Menu)中选择“前处理器”(Pre-processor) ,再选择“创建”(Create)选项其下“关键点”(KeyPoint)选项的“On Working Plane”或者“ In Active CS” ,输入相应的坐标值。这两种方法都可以实现关键点的创建。

为了方便读者的学习和使用 ,在以后的说明中 ,一般同时给出“命令格式”和“菜单操作”。

2.1.3 文件系统

ANSYS 在分析过程中需要读写文件,文件格式为 jobname.ext,其中 jobname 是设定的工作文件名,ext 是由 ANSYS 定义的扩展名,用于区分文件的用途和类型,默认的工作文件名是“file”。ANSYS 分析中有一些特殊的文件,其中主要的几个文件如表 2-1 所示。

表 2-1 ANSYS 文件系统

| 文件名称 | 文件性质 |
|-------------|-----------|
| jobname.db | 二进制数据库文件 |
| jobname.log | 记录文件 |
| jobname.err | 错误和警告信息文件 |
| jobname.rst | 结果文件 |

2.2 坐标系

ANSYS 提供多种坐标系供用户选择,每种坐标系的主要作用是不同的。这里主要介绍总体和局部坐标系、显示坐标系、节点坐标系、单元坐标系、结果坐标系。

2.2.1 总体坐标系

总体坐标系和局部坐标系用来定位几何形状参数的空间位置。总体坐标系是一个绝对的参考系,ANSYS 提供 3 种总体坐标系:笛卡尔坐标、柱坐标和球坐标。这 3 种系统都是右手系,分别由坐标系号 0、1、2 来识别。

2.2.2 局部坐标系

局部坐标系与预定义的总体坐标系类似,也是 3 种,即笛卡尔坐标、柱坐标和球坐标。当用户定义了一个局部坐标系后,它就会被激活,同时分配一个坐标系号,该编号必须是大于等于 11 的整数,在 ANSYS 程序中的任何阶段都可以建立(删除、查看)局部坐标系。关于定义、删除和查看局部坐标的命令和 GUI 操作路径如表 2-2 所示。

表 2-2 局部坐标系的修改、删除和查看

| 命令 | 意义 | GUI 操作路径 |
|----------|-----------------------------|--|
| LOCAL | 按总体笛卡尔坐标定义局部坐标系 | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At Specified Loc |
| CS | 通过已知节点定义局部坐标系 | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Nodes |
| CSKP | 通过已有关键点定义局部坐标系 | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Keypoints |
| CSWPLA | 在当前定义的工作平面的原点为中 线定义局部坐标系 | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin |
| CSDELETE | 删除一个局部坐标系 | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Delete Local CS |
| CSLIST | 查看所有的总体和局部坐标系 | Utility Menu>List>Other>Local Coord Sys |

2.2.3 坐标系的激活

用户可定义任意多个坐标系,但某一个时刻只能有一个坐标系被激活。激活坐标系的过程如下:首先程序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,该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。

命令格式:

CSYS,KCN

菜单操作:

Utility Menu> WorkPlane> Chang Active CS to> Global Cartesian
Utility Menu> WorkPlane> Chang Active CS to> Global Cylindrical
Utility Menu> WorkPlane> Chang Active CS to> Global Spherical
Utility Menu> WorkPlane> Chang Active CS to> Specified Coord Sys
Utility Menu> WorkPlane> Chang Active CS to> Working Plane

在激活某个坐标系后,如果没有明确的改变坐标系的操作或者命令,当前激活的坐标系将一直保持有效。需要说明的是,坐标表示 X, Y, Z , 如果激活的不是笛卡尔坐标,用户应将其对应理解为柱坐标中的 R, θ, Z 或球坐标中的 R, θ, ϕ 。

2.2.4 显示坐标系

我们已经介绍过显示坐标系用于几何形状参数的列表和显示。在默认情况下,即使是在其他坐标系下定义的节点或者关键点,其列表都显示为在笛卡尔坐标下的坐标。用户可用如下方法改变显示坐标。

命令格式:

DSYS,KCN

菜单操作:

Utility Menu> WorkPlane> Chang Display CS to> Global Cartesian
Utility Menu> WorkPlane> Chang Display CS to> Global Cylindrical
Utility Menu> WorkPlane> Chang Display CS to> Global Spherical
Utility Menu> WorkPlane> Chang Display CS to> Specified Coord Sys

改变显示坐标系是会影响图形显示的,除非用户有特殊需要,否则不推荐对显示坐标进行改变。

2.2.5 节点坐标系

节点坐标系定义每个节点的自由度方向。每个节点都有自己的节点坐标系,默认情况下,总是平行于总体笛卡尔坐标系。用表 2-3 所示的方法可将任意节点坐标系旋转到所需方向。

表 2-3 节点坐标系的修改、删除和查看

| 命 令 | 意 义 | GUI 操作路径 |
|--------|--------------------------|--|
| NROTAT | 将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向 | Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Rotate Node CS>To Active CS |
| | | Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Nodes>Rotate Node CS>To Active CS |
| N | 按给定的旋转角旋转节点坐标系 | Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>In Active CS |
| NMODIF | 生成节点时定义旋转角度或者对已有节点制定旋转角度 | Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Rotate Node CS>By Angles |
| | | Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Rotate Node CS>By Angles |
| NANG | 列出节点坐标系相对于总体笛卡尔坐标旋转的角度 | Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Rotate Node CS>By Vectors |
| | | Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Rotate Node CS>By Vectors |
| NLIST | | Utility Menu>List>Nodes |
| | | Utility Menu>List>Picked Entities>Nodes |

2.2.6 单元坐标系

单元坐标系确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。每个单元都有自己的坐标系 ,用于规定正交材料特性的方向、面压力和结果的输出方向。所有单元的坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的默认方向遵循以下原则。

- ✎ 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 ,Y 轴垂直于 X Z 轴 ,方向按右手定则确定。
- ✎ 二维和三维单元的坐标系总是平行于总体笛卡尔坐标系。

不是所有单元的坐标系都符合上述规则 ,对于特定单元坐标系的默认方向在帮助中都有详细说明。尽管如此 ,单元的坐标系方向也是可以修改的 ,例如面和体单元可以通过下列命令将单元坐标系调整到已定义的局部坐标系上。

命令格式：

```
ESYS ,KCN
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>DefaultAttribs
Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>ElemAttributes
```

2.2.7 结果坐标系

结果坐标系一般在通用后处理操作中应用 ,作用是将节点或单元结果转换到一个特定的坐标系中 ,便于用户列表或显示这些计算结果。用户可将活动的结果坐标系转到另外的坐标系(如总体的柱坐标系或者一个局部坐标系) ,或转到在求解时所用的坐标系(如节点或者单元

坐标系)。利用下列方法可改变结果坐标系。

命令格式：

```
RSYS ,KCN
```

菜单操作：

```
Main Menu>General Postproc>Options for Output
Utility Menu>List>Create>Results>Options
```

2.3 工作平面的使用

2.3.1 什么是工作平面

光标在屏幕上表现为一个点 ,但其实质是代表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 ,能唯一确定空间中的一个点。这个假想平面就是工作平面。

工作平面是一个无限平面 ,有原点、二维坐标、捕捉增量和显示栅格。工作平面的主要作用是辅助用户对图形的控制 ,它与坐标系是相互独立的 ,即工作平面和激活的坐标系可以有不同的原点和旋转方向。初学者在使用过程中要正确理解工作平面的概念、作用及和坐标系的关系 ,不要与坐标系混淆。

2.3.2 生成一个工作平面

ANSYS 默认的工作平面与总体笛卡尔坐标系的 X - Y 平面重合 ,当进入到 ANSYS 程序后打开工作平面即可看到。

1. 定义新的工作平面

用户可以通过表 2-4 中所示的方法定义新的工作平面。

表 2-4 定义工作平面

| 命 令 | 意 义 | GUI 操作路径 |
|--------|----------------------|--|
| WPLANE | 由 3 向坐标定义工作平面 | Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>XYZ Locations |
| NWPLAN | 由 3 节点定义工作平面 | Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Nodes |
| KWPLAN | 由 3 关键点定义工作平面 | Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Keypoints |
| LWPLAN | 由过指定线上的点的垂直于视向量的平面定义 | Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Plane Normal to Line |
| WPCSYS | 通过现有坐标系的 X - Y 平面 | 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 |

2. 控制工作平面

用户可以通过表 2-5 中所示的方法对工作平面进行相应的控制。

表 2-5 控制工作平面

| 命 令 | 意 义 | GUI 操作路径 |
|------------------|-------------------|---|
| KWPAVE | 将工作平面的原点移动到关键点的位置 | Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints |
| NWPAVE | 将工作平面的原点移动到节点的位置 | Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to>Nodes |
| WPAVE | 将工作平面的原点移动到指定点的位置 | 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 |
| WPOFFS WPROTA | 偏移或者旋转工作平面 | Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments |

3. 还原已定义的工作平面

尽管实际上不能存储一个工作平面,但用户可以在工作平面的原点创建一个局部坐标系,然后利用局部坐标系来还原一个已经定义的工作平面,具体方法如表 2-6 所示。

表 2-6 工作平面的还原

| 步 骤 | 具 体 操 作 | 命 令 | GUI 操作路径 |
|-----|-------------------|--------|--|
| 1 | 在工作平面的原点创建局部坐标系 | CSWPLA | Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin |
| 2 | 利用局部坐标系还原已定义的工作平面 | WPCSYS | 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 |

2.4 图形窗口显示控制

用户在分析问题的过程中,主要对图形窗口的模型进行操作。例如在实体创建过程中,根据需要改变图形的观察角度,便于拾取等。因此,用户熟练掌握图形窗口相关的显示控制,将为其其他操作提供方便。

2.4.1 图形的平移、缩放和旋转

对图形进行平移、缩放和旋转的操作通过两种途径可以实现。一是在应用菜单的 PlotCtrl 菜单中选择 Pan Zoom Rotate 选项,打开如图 2-7(a)所示“Pan-Zoom-Rotate”对话框,通过其上的按钮进行相关操作;二是通过图形窗口右侧的快捷键实现相关操作,如图 2-7(b)所示。

这两种方式的操作基本是一一对应的,主要的功能如图 2-7 的说明,而且将鼠标放置在快捷键上停留几秒钟,将显示该键的功能,方便用户的选择。

“激活窗口编号”是指当前图形窗口的编号;“视角变化”是通过按钮选择直接将图形窗口中的图形对象置于主(俯)视图、前(后)视图、左(右)视图、正等轴侧等视角上,便于用户观察;“缩放”包括窗口缩放、取框缩放等;“平移”通过上、下、左、右箭头实现图形的平移;“绕轴旋转”允许用户在设定了“旋转角度增量”之后,指定图形对象绕指定轴进行顺、逆时针的旋转;“鼠标拖动”选项允许用户对图形对象进行自由的平移和旋转,按住鼠标左键上、下、左、右拖动实现

平移 ,按住右键拖动实现旋转。

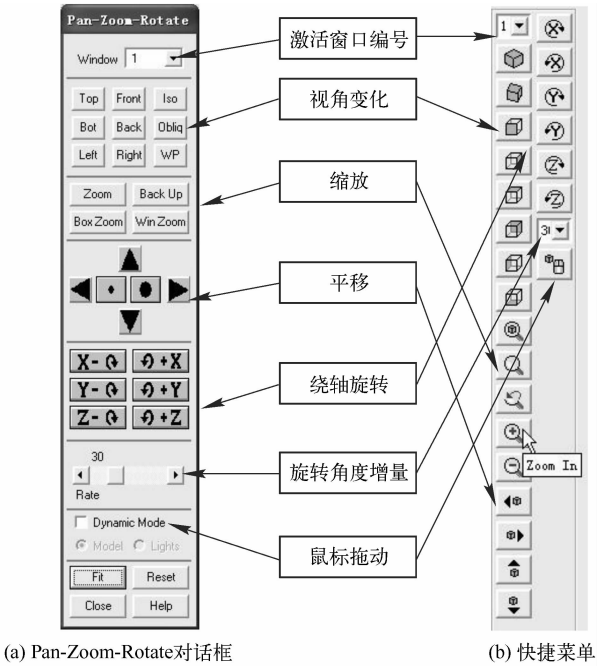


图 2-7 图形平移、缩放和旋转控制

2.4.2 Plot 菜单控制

Plot 菜单主要控制图形绘制和显示 ,打开的菜单选项如图 2-8 所示。这些选项允许用户有选择的绘制图形对象。

“Replot”选项用于重画 ,起到更新图形窗口的作用。

其余选项提供给用户绘制需要图元对象的功能。例如 ,选择 Lines ,图形窗口即显示所有线段 ,而隐藏了相应的面或者体(如果存在面或者体的话)。类似的 ,可以选择只显示点、面、体、单元、节点 ,等等。

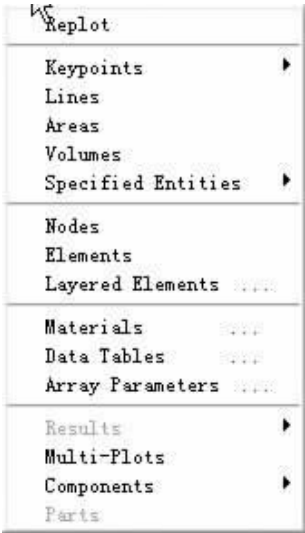


图 2-8 Plot 菜单选项

2.4.3 PlotCtrls 菜单控制

PlotCtrls 菜单选项较多 ,囊括的功能也较多 ,包括图元标号控制、图形窗口的背景、字体、动画 ,等等。这里不一一详述 ,只介绍其中两个选项。

在 PlotCtrls 菜单中选择 Numbering ,打开如图 2-9 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。通过选择复选框 ,就可以打开或者关闭显示图元对象的编号。例如 ,将 Line numbers 右侧的复选框选中 ,即变为“On”状态 ,那么在图形窗口中的所有线段就显示出其编号。

图元的编号显示有 3 种方式:颜色、数字和二者兼有。这个功能的实现通过“Numbering shown with”右侧的下拉列表框进行选择。仍以线段显示为例,如果选择 Colors only,那么线段就以不同的颜色区分显示;如果选择 Numbers only,线段就带有编号显示而颜色是相同的;如果选择 Colors & Numbers,那么区分颜色同时带有编号显示;如果选择 no Color / Number,则编号显示关闭。

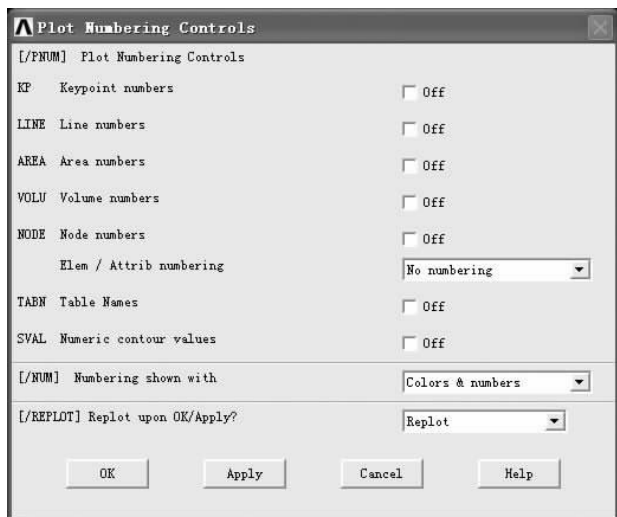


图 2-9 图元对象编号显示控制对话框

在 PlotCtrl 菜单中选择 Symbols 选项,打开如图 2-10 所示的 Symbols 对话框,通过复选框和下拉列表框选择图形窗口的标志显示。包括是否标志显示边界条件、面载荷、体载荷和其他一些关于坐标和网格的标志,以及选择标志的形式,例如颜色或者箭头等。这些功能的提供和选择都是方便用户在分析过程中观察和标志模型对象。

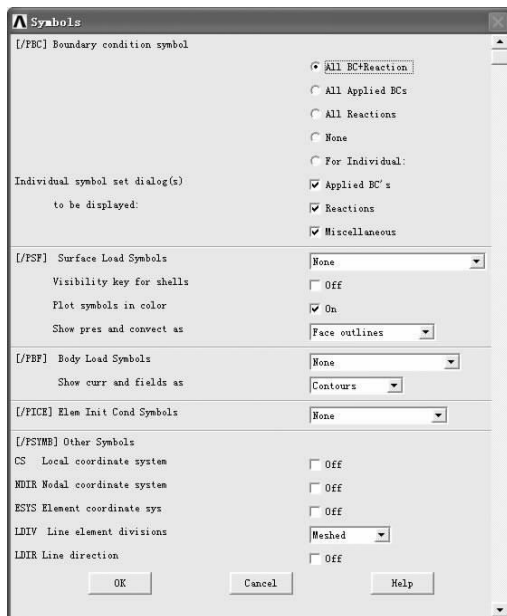


图 2-10 标志显示控制对话框

2.5 主菜单简介

ANSYS 的主菜单(ANSYS Main Menu)是完成分析工作要用到的主要部分 ,大部分功能都从这里实现 ,包括前、后处理和求解 ,各菜单位置如图 2-11 所示。

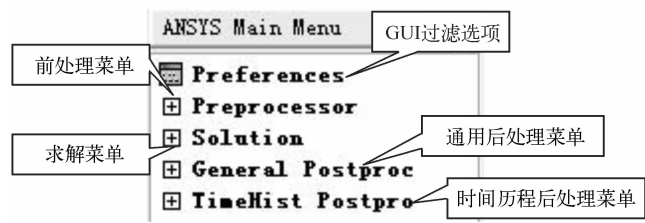


图 2-11 主菜单选项

首先 ,选择 Preference 选项 ,打开如图 2-12 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框 ,通过复选框的选择对图形用户界面进行过滤。也就是说 ,当选择 Structural 时 ,后续就只显示与结构分析相关的菜单和选项 ,而与此无关的菜单和选项就被过滤掉而不再显示了。

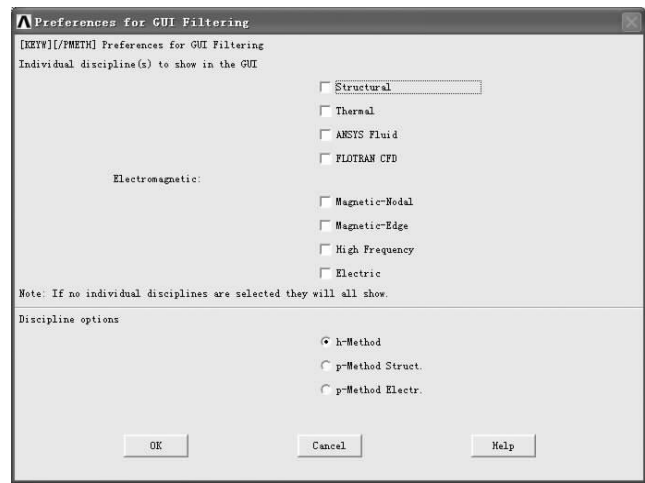


图 2-12 图形用户界面过滤对话框

2.5.1 前处理菜单

前处理(Preprocessor)菜单包括完成前处理器各项功能的选项 ,如图 2-13(a)所示 ,即完成用户建立有限元模型所需输入的资料 ,如实体模型的建立、单元属性的定义、节点、坐标资料、单元内节点排列次序、材料属性、单元划分的产生(即网格生成) ,等等。这些功能的实现都由主菜单内的前处理菜单选项提供完成。

2.5.2 求解菜单

求解(Solution)菜单部分完成求解器提供的各项功能 ,如图 2-13(b)所示 ,可以选择分析类型、定义载荷和约束条件、求解追踪、求解 ,等等。

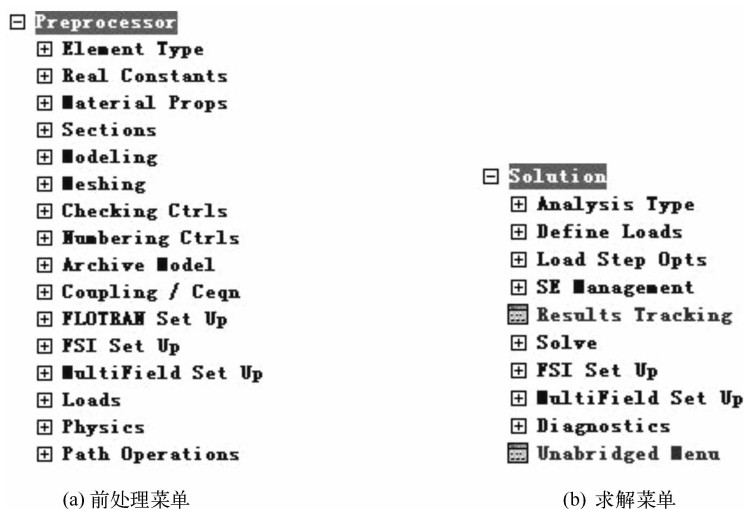


图 2-13 前处理和求解菜单选项

2.5.3 后处理菜单

后处理菜单包括两部分。

一是通用后处理(General Postprocessor)菜单,如图 2-14(a)所示,完成通用后处理器的各项功能,用于静态结构分析、屈曲分析及模态分析,将解题部分所得的解答如位移、应力、反力等资料,通过图形接口以各种不同表示方式显示出来,例如位移或者应力的等值线图。

二是时间历程后处理(Time Postprocessor)菜单,如图 2-14(b)所示,完成与时间相关后处理器的各项功能,用于动态结构分析、与时间相关的时域处理等。



图 2-14 后处理菜单选项

练习题

1. 启动 ANSYS 一般几个步骤？每一步完成哪些工作？
2. 进入 ANSYS 后 ,图形用户界面分几个功能区域？每个区域的作用是什么？
3. ANSYS 提供多种坐标系供用户选择 ,主要介绍的 6 种坐标系的主要作用各是什么？
4. 工作平面是真实存在的平面吗？怎样理解工作平面的概念和作用？它和坐标系的关系是怎样的？

第 3 章 ANSYS 实体建模

本章主要介绍在 ANSYS 中实现实体建模的过程。

3.1 实体模型简介

AYSYS 中的实体模型的建立与一般的 CAD 软件类似 ,利用点、线、面、体组合而成。实体模型几何图形决定之后 ,由边界来决定网格 ,即每一线段要分成几个单元或单元的尺寸是多大。决定了每个边单元数目或尺寸大小之后 ,ANSYS 的内建程序即能自动产生网格 ,即自动产生节点和单元。

3.1.1 实体建模的方法

实体模型建立有下列方法 :

(1) 由下往上法(bottom-up Method)

由建立最低图元对象的点到最高图元对象的体 ,即先建立点 ,再由点连成线 ,然后由线组合成面 ,最后由面组合建立体。

(2) 由上往下法(top-down method)及布尔运算命令一起使用

此方法直接建立较高图元对象 ,其对应的较低图元对象一起产生 ,图元对象的高低顺序依次为体、面、线、点。所谓布尔运算指图元对象相互加、减、组合等。

(3) 混合使用前两种方法

依照使用者个人的经验 ,可结合前两种方法综合运用 ,但应考虑到要获得什么样的有限元模型 ,即在网格划分时 ,要产生自由网格划分或映射网格划分。自由网格划分时 ,实体模型的建立比较简单 ,只要所有的面或体能接合成一个体就可以 ,映射网格划分时 ,平面结构一定要四边形或三边形面相接而成 ,立体结构一定要六面体相接而成。

3.1.2 群组命令介绍

表 3-1 列出了 ANSYS 中 X 对象的名称 ,表 3-2 中列出了 ANSYS 中 X 对象的群组命令。用户通过对群组命令的认识可以很快识别和应用用于不同对象的命令操作 ,例如 ,关于关键点操作的群组命令都以“K”开头 ,其后是删除(DELE)、列表(LIST)、选择(SEL)等。

表 3-1 ANSYS 中 X 图元对象的名称

| 对象种类(X) | 节 点 | 元 素 | 点 | 线 | 面 | 体 |
|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 对象名称 | X = N | X = E | X = K | X = L | X = A | X = V |

表 3-2 ANSYS 中 X 图元对象的群组命令

| 群 组 命 令 | 意 义 | 例 子 |
|---------|-------------|--------------------------------|
| XDELE | 删除 X 对象 | LDELE ,删除线 |
| XLIST | 在窗口中列示 X 对象 | VLIST ,在窗口中列出体的资料 |
| XGEN | 复制 X 对象 | VGEN ,复制体 |
| XSEL | 选择 X 对象 | NSEL ,选择节点 |
| XSUM | 计算 X 对象几何资料 | ASUM ,计算面的几何资料 ,如面的大小 ,边长 ,重心等 |
| XMESH | 网格化 X 对象 | AMESH ,面的网格化 ,LMESH ,线的网格化 |
| XCLEAR | 清除 X 对象网格 | ACLEAR ,清除面的网格 ,VCLEAR ,清除体的网格 |
| XPLOT | 在窗口中显示 X 对象 | KPLOT ,在窗口中显示点 ,APLOT ,在窗口中显示面 |

3.2 基本图元对象的建立

3.2.1 点定义

实体模型建立时 ,点是最小的图元对象。点即为机械结构中一个点的坐标 ,点与点连接成线 ,也可直接组合成面或体。点的建立按实体模型的需要而设定 ,但有时会建立些辅助点以帮助其他命令的执行 ,如圆弧的建立。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point ,将出现如图 3-1 所示的关键点定义的菜单选项 ,可以由不同方法实现关键点的建立。

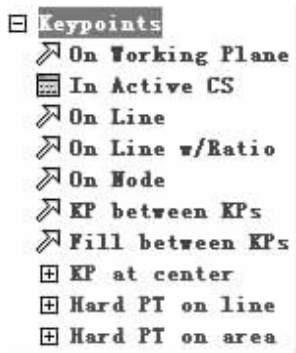


图 3-1 关键点定义的菜单选项

1. 关键点的一般定义

对话框上前两项操作可以建立关键点(Key point)的坐标位置(X ,Y ,Z)及关键点的编号 NPT ,方法如下。

命令格式：

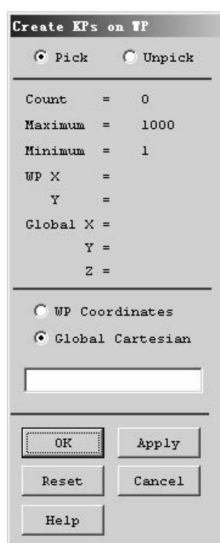
```
K ,NPT ,X ,Y ,Z
```

菜单操作：

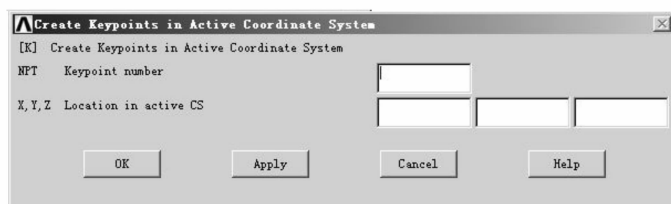
Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>On Working Plane

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>In Active CS

选择菜单操作的“On Working Plane”,则弹出如图 3-2(a)所示对话框,提示用户直接在图形窗口拾取要创建关键点的位置,就可以实现一个关键点的创建。这个对话框称作“拾取”对话框,在以后类似的操作中也会出现,只是根据目的的不同略有差异,例如提示用户选择或者拾取点、线、面、体、节点、单元等等。



(a)



(b)

图 3-2 关键点一般定义所用的对话框

选择菜单操作的“In Active CS”,则弹出如图 3-2(b)所示对话框,用于在激活的坐标系下创建关键点。这个对话框的作用是可以和命令格式对应上的,直接给定关键点的编号和 3 个坐标数值即可。需要说明的是,ANSYS 软件中,“OK”按钮的作用是确定一项操作,并同时关闭对话框,“Apply”按钮的作用是确定一项操作,并继续进行相同的操作。以如图 3-2(a)和如图 3-2(b)所示的对话框为例,单击“OK”按钮就是确定创建一个关键点,同时关闭对话框,单击“Apply”按钮是完成了一个关键点的创建,然后对话框不消失,用户可以继续创建其他的关键点,只要给出不同的点的编号和坐标数值即可。

关键点编号的安排不影响实体模型的建立,关键点的建立也不一定要连号,但为了数据管理方便,定义关键点之前先规划好点的号码,有利于实体模型的建立。在不同坐标系下,关键点的坐标含义也略有变化。虽然仍以 X, Y, Z 表示,但在圆柱坐标系下,对应表达的是 R, θ, Z ,球面坐标系下,对应表达 R, θ, Φ 。

2. 在已知线上定义关键点

图 3-1 上的第三、四项选项用于在已知线上建立关键点,方法如下。

命令格式：

KL, NL1, RATIO, NK1

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>On Line

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>On Line w/Ratio

这两项操作要求图形窗口中已经创建了相应的线段。“On Line”选项的操作灵活一些,通过“拾取”对话框提示用户选择一个关键点的线段及其位置,线段和位置的选择都是任意的,完全凭用户通过鼠标进行选择;“On Line w/Ratio”选项的操作类似,线段的选择是通过拾取实现的,关键点的位置是通过如图 3-3 所示对话框上给定具体比例来实现的。

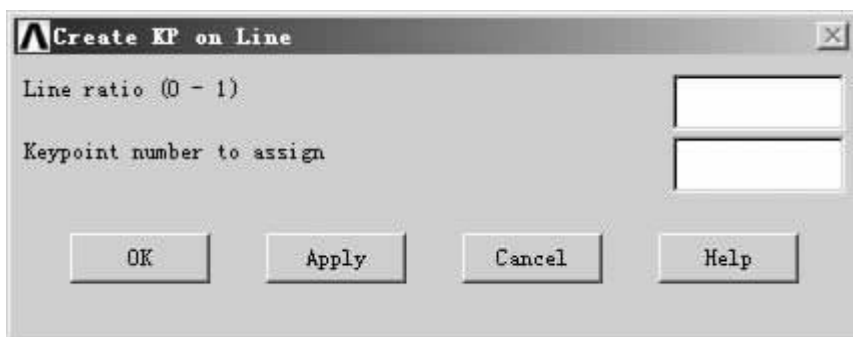


图 3-3 给定关键点在线段上的比例

3. 在节点上生成关键点

图 3-1 上第五项选项用于在已建立的节点上生成关键点。该命令要求用户必须已经建立有限元模型,即有节点存在。通过拾取对话框选择相应的节点,然后在节点上生成关键点。方法如下。

命令格式：

KNODE ,NPT ,NODE

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>On Node

4. 在关键点之间生成新的关键点

图 3-1 上的第三、四项选项用于在关键点之间建立新的关键点,方法如下。

命令格式：

KL ,KP1 ,KP2 ,KPNEW ,Type ,VALUE

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>KP between KPS

该项操作同样要求至少已经创建了两个关键点,才能在这两个关键点之间创建新的关键点。首先通过拾取选择两个关键点,然后弹出如图 3-4 所示对话框,其上有两个选项,“RATI”是提示用户指定比例,例如给出了“0.5”,即在两点之间的中点位置创建新的关键点;“DIST”是要求用户给出具体的长度数值来创建新关键点。

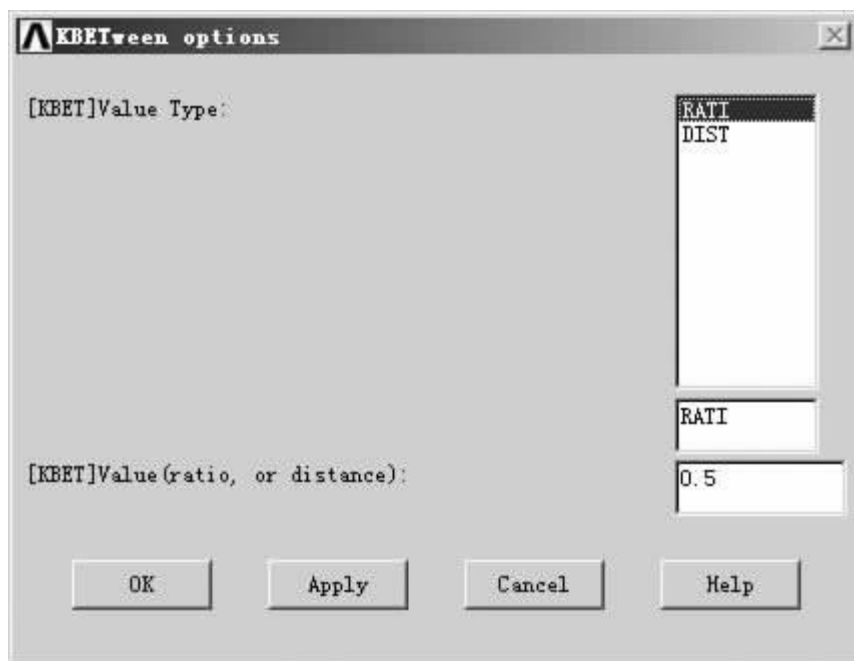


图 3-4 指定两点间新建关键点的位置

5. 在关键点之间填充关键点

关键点的填充命令是在现有的坐标系下,自动在已有的两个关键点 NP1、NP2 间填充若干点,两点间填充关键点的个数(NFILL)及分布状态视其参数(NSTRT、NINC、SPACE)而定,系统设定为均分填充。如语句“FILL,1,5”则平均填充 3 个点在 1 和 5 之间,结果如图 3-5 所示。方法如下。



图 3-5 点的填充

命令格式：

```
KFILL ,NP1 ,NP2 ,NFILL ,NSTRT ,NINC ,SPACE
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>Fill

6. 由三点定义的圆弧中心定义关键点

该命令允许用户通过圆弧的中心定义关键点,但圆弧线是由 3 个点确定的。方法如下。

命令格式：

```
KCENTER ,Type ,VAL1 ,VAL2 ,VAL3 ,VAL4 ,KPNEW
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>KP at center

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>3 KPs and radius

Main Menu>Preprocessor>Create>Key Point>Location on line

该项操作要求至少已经创建 3 个关键点,然后通过这 3 个点确定的圆弧的中心点来创建新的关键点。“3 Keypoints”选项提示用户直接拾取 3 个关键点,程序自动在圆心位置创建关键点;“3 KPs and radius”表示在拾取 3 个关键点后,在后续弹出的对话框上给出圆弧的半径,然后在圆心位置创建关键点;“Location on line”表示指定圆心在某条线段上,所以线段要求是已经创建的。

7. 硬点

硬点实际上是一种特殊的关键点,它不改变模型的几何形状和拓扑结构。大多数关键点的命令同样适用于硬点,而且硬点有自己的命令集。关于硬点的知识在这里不多讲,在需要时请查阅相关资料和帮助文件。

3.2.2 线定义

建立实体模型时,线为面或体的边界,由点与点连接而成,构成不同种类的线。例如直线、曲线、多义线、圆、圆弧等,也可直接由建立面或体而产生。线的建立与坐标系统有关,例如直角坐标系为直线,圆柱坐标系下为曲线。



依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Lines,打开如图 3-6 所示的线定义选项,用于实现不同线的建立。

从图中可以看出,线的定义主要分为 4 部分:Lines(直线)、Arcs(圆弧)、Splines(多义线)和 Line Fillet(倒圆角)。

图 3-6 线定义选项

1. 直线的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Lines,将打开如图 3-7 所示的 Lines 子菜单,可以通过不同的方式实现线的建立。

(1) 通过关键点建立线段

通过直接拾取两个已经建立好的关键点建立直线,该命令建立的直线与激活坐标系统的状态无关,命令格式及操作如下。

命令格式:

LSTR P1 P2

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Straight Line

下述命令也是通过已有关键点建立线段,但所建立线段的形状与激活坐标系统有关,可为直线或曲线。

命令格式:

L P1 P2 ,NDIV ,SPACE ,XV1 ,YV1 ,ZV1 ,XV2 ,YV2 ,ZV2

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>In Active Coord

下述命令生成在一个面上两关键点之间最短的线,因此要求有已经创建的面存在。

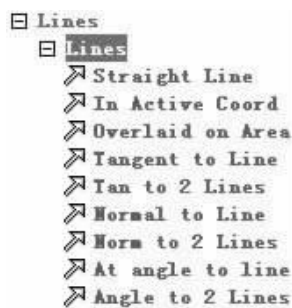


图 3-7 线段定义子菜单选项

命令格式：

```
L ,P1 ,P2 ,NAREA
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Overlaid on Area

(2) 切线的建立

下述命令生成与已有线段相切的新线段,且两条线段有共同的终点。需要说明的是,在定义新线段之前,要先定义好新线段的另一个端点,而且相切处的状态可以通过向量的形式进行指定。

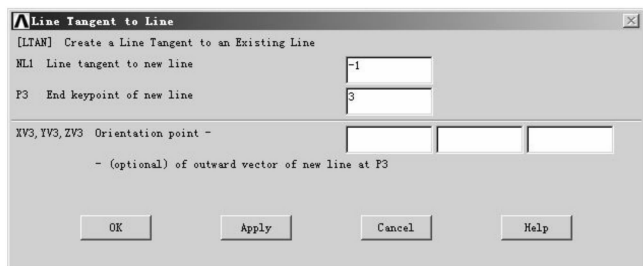
命令格式：

```
LTAN ,NL1 ,P3 ,XV3 ,YV3 ,ZV3
```

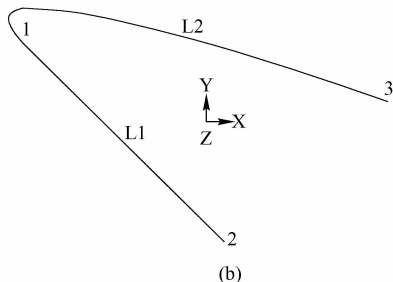
菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Tangent to Line

首先通过拾取已有线段,然后拾取切点,拾取新建线段的另一个端点,弹出如图 3-8(a)所示对话框,确定之后得到如图 3-8(b)所示的效果,其中 L1 是已知线段,点 1 为切点,点 3 为新线段的另一端点, L2 是新创建得到的切线。



(a)



(b)

图 3-8 与已知一条线段相切线的建立

下述命令生成一条与已知两条线同时相切的新线段,该命令与“LTAN”命令类似,只是新创建的线段同时与两条已知线段相切。

命令格式：

```
L2TAN ,NL1 ,NL2
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Tan to 2 Lines

(3) 通过角度控制建立线段

下述命令生成与已知线有一定角度的新直线,而且需要事先定义新直线的另一端点。略有不同的是,第一个操作选项允许用户指定两线所夹的角度,第二命令直接生成垂直线(即两线夹角为 90°)。

命令格式：

```
LANG ,NL1 ,P3 ,ANG ,PHIT ,LOCAT
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>AT Angle to Line

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Normal to Line

下述命令生成与两条已知线段成一定角度的新线段。操作与“LANG”命令相似。

命令格式：

L2ANG ,NL1 ,P3 ,ANG ,PHIT ,LOCAT

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>AT Angle to 2 Line

Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Normal to 2 Line

2. 圆弧的建立

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Arcs 打开如图 3-9 所示的圆弧定义选项菜单,可以通过不同的方式实现圆弧的建立。

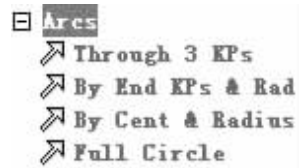


图 3-9 圆弧定义选项

(1) 由点产生圆弧

命令格式：

LARC ,P1 ,P2 ,PC ,RAD

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arcs>Through 3 Kps

Main Menu>Preprocessor>Create>Arcs>By End KPs & Rad

定义两点(P1 ,P2)间的圆弧线(Line of Arc) ,其半径为 RAD ,若 RAD 的值没有输入 ,则圆弧的半径直接从 P1 ,PC 到 P2 自动计算出来。不管现在坐标为何 ,线的形状一定是圆的一部分。PC 为圆弧曲率中心部分任何一点 ,不一定是圆心 ,如图 3-10 所示。



图 3-10 圆弧的产生

(2) 圆及圆弧的定义

命令格式：

CIRCLE ,PCENT ,RAD ,PAXIS ,PZERO ,ARC ,NSEG

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arcs>By End Cent & Radius

Main Menu>Preprocessor>Create>Arcs>Full Circle

此命令会产生圆弧线(CIRCLE Line) ,该圆弧线为圆的一部分 ,依参数状况而定 ,与目前所在

的坐标系统无关,点的号码和圆弧的线段号码会自动产生。PCENT 为圆弧中心点坐标号码; PAXIS 为定义圆心轴正向上任意点的号码; PZERO 为定义圆弧线起点轴上的任意点的号码,此点不一定在圆上; RAD 为圆的半径,若此值不输,则半径的定义为 PCENT 到 PZERO 的距离; ARC 为弧长(以角度表示),若输入为正值,则由开始轴产生一段弧长,若不输入数值,产生一个整圆; NSEG 为圆弧欲划分的段数,此处段数为线条的数目,非有限元网格化时的数目。

3. 多义线的建立

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > Splines 打开如图 3-11 所示的多义线定义选项菜单,可以实现多义线的建立。

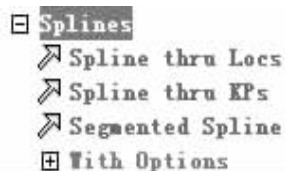


图 3-11 多义线定义选项

(1) 定义通过若干关键点的样条曲线

该命令与操作要求已建立好若干关键点,即 P1, ..., P6, 然后生成以这些关键点拟合得到的样条曲线。

命令格式:

```
BSPLIN ,P1 ,P2 ,P3 ,P4 ,P5 ,P6 ,XV1 ,YV1 ,ZV1 ,XV6 ,YV6 ,ZV6
```

菜单操作:

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>Spline thru KPs
```

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>Spline thru Locs
```

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>With Options>Spline thru KPs
```

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>With Options>Spline thru Locs
```

(2) 定义通过一系列关键点的多义线

该命令与操作要求已建立好若干关键点,即 P1, ..., P6, 然后生成以这些关键点拟合得到的多义线。

命令格式:

```
SPLINE ,P1 ,P2 ,P3 ,P4 ,P5 ,P6 ,XV1 ,YV1 ,ZV1 ,XV6 ,YV6 ,ZV6
```

菜单操作:

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>Segmented Spline
```

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Splines>With Options>Segmented Spline
```

4. 倒圆角的实现

命令格式:

```
LFILLT ,NL1 ,NL2 ,RAD ,PCENT
```

菜单操作:

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Line Fillet
```

此命令是在两条相交的线段(NL1, NL2)间产生一条半径等于 RAD 的圆角线段,同时自动产生 3 个点,其中两个点分别在 NL1, NL2 上,是新曲线与 NL1, NL2 相切的点,第三个点是新曲线的圆心点(PCENT, 若 PCENT = 0 则不产生该点),新曲线产生后原来的两条线段会改变,新形成的线段和点的号码会自动编排上去。如图 3-12 所示。

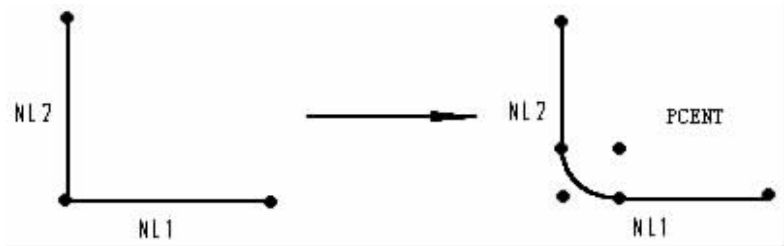


图 3-12 产生圆角

5. 其他

用户还可以通过复制、镜像等方法从已知线段生成新的线段 ,通过关键点的延伸和旋转也可以实现新线段的生成。

用户可以对线段进行查看、选择和删除的操作。

3.2.3 面的定义

实体模型建立时 ,面为体的边界 ,由线连接而成 ,面的建立可由点直接相接或线段围接而成 ,并构成不同数目边的面。也可直接建构体而产生面。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Areas ,打开如图 3-13 所示的面定义选项菜单 ,用于实现面的建立。

从图中可以看出 ,要实现面的定义可以通过几种途径 :Arbitrary(任意形状的面)、Rectangle(矩形面)、Circle(圆形面)、Polygon(多边形面)和 Area Fillet(倒圆角面)。

1. 任意面的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Areas>Arbitrary ,打开如图 3-14 所示的任意面定义选项菜单 ,用于实现任意面的建立。



图 3-13 面定义选项



图 3-14 任意面定义选项

该菜单上的操作可以实现通过点、线直接生成面 ,还可以偏移、复制生成新的面 ,同时可以通过引导线生成“蒙皮”似的光滑曲面。

(1) 由点直接生成面

命令格式：

A P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>Through KPs

此命令用已知的一组点(P1 ... ,P9)来定义面(Area),最少使用3个点才能围成面,同时产生围绕该面的线段。点要依次序输入,输入的顺序会决定面的法线方向。如果此面超过了四个点,则这些点必须在同一个平面上,否则不能成功实现面的创建。如图3-15所示。

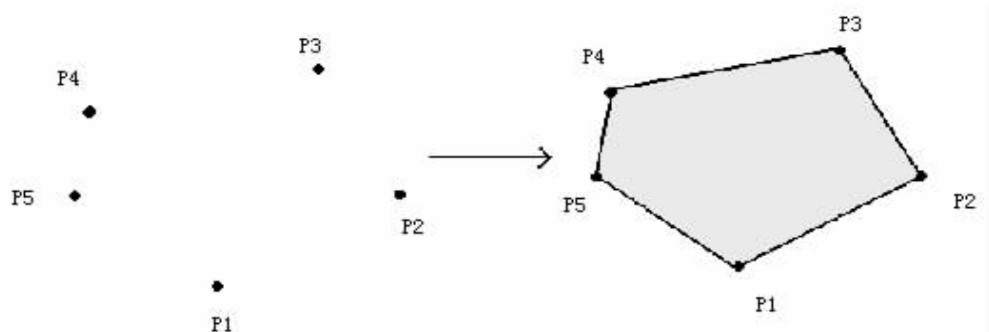


图 3-15 由点生成面的过程

(2) 由线生成面

命令格式：

AL ,L1 ,L2 ,L3 ,L4 ,L5 ,L6 ,L7 ,L8 ,L9 ,L10

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Lines

此命令由已知的一组线段(L1 ... ,L10)围绕而成面,至少须要3条线段才能形成平面,线段的号码没有严格的顺序限制,只要它们能完成封闭的面即可。同时若使用超过4条线段去定义平面时,所有的线段必须在同一平面上,以右手定则来决定面的方向。

(3) “蒙皮”面的定义

命令格式：

ASKIN ,NL1 ,NL2 ,NL3 ,NL4 ,NL5 ,NL6 ,NL7 ,NL8 ,NL9

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Skinning

“蒙皮”面的定义类似于中国古代的灯笼,有“骨架”和“灯笼面”。因此在生成“蒙皮”面之前需首先建立好导引线(相当于“骨架”),如图3-16(a)所示,相当于蒙皮的框架,然后执行该命令,生成面(相当于“灯笼面”),如图3-16(b)所示。如果所建立的引导线不是共面的,将生成三维的面。

(4) 通过偏移定义新的面

命令格式：

AOFFST ,NAREA ,DIST ,KINC

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Offset

该命令也需要定义好原始的面,由这个面生成新的偏移面。如对图3-16(b)所示的蒙皮面进行偏移,效果如图3-16(c)所示。生成的偏移面可以和原面保持等大,也可以放大。

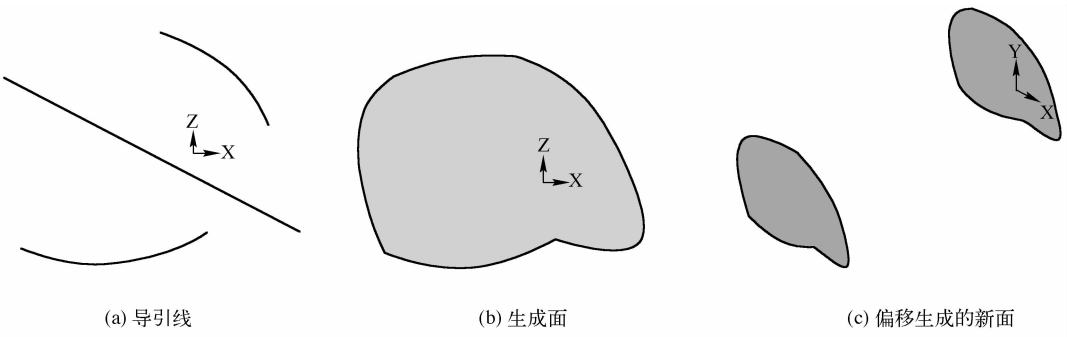


图 3-16 “蒙皮”面和偏移面的生成过程

(5) 通过复制定义新的面

命令格式：

```
ASUB ,NA1 ,P1 ,P2 ,P3 ,P4
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>Overlaid on Area
```

该命令是将定义好的原始面(一般是形状比较复杂的面)的部分从中分离出来 ,并覆盖原始面。命令所需要的关键点及其相关的线段都必须是在原始面上已经存在的。

2. 矩形面的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Areas>Rectangle 打开如图 3-17 所示的矩形面定义选项菜单 ,用于矩形面的建立。

矩形面的定义方法有 3 种 ,具体过程见表 3-3。

表 3-3 矩形面的建立方法

| 命令及菜单操作 | 意 义 |
|--|-------------------------|
| BLC4 ,XCORNER ,YCORNER ,WIDTH ,HEIGHT ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By 2 Corners | 通过控制矩形的一个角点坐标和长、宽来定义矩形面 |
| BLC5 ,XCENTER ,YCENTER ,WIDTH ,HEIGHT ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By Centr & Cornr | 通过控制矩形的中心点的坐标和长、宽来定义矩形面 |
| RECTNG ,X1 ,X2 ,Y1 ,Y2 Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By Dimensions | 通过控制矩形的两个对角点的坐标来定义矩形面 |

3. 圆形面的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Areas>Circle 打开如图 3-18 所示的圆形面定义选项菜单 ,用于圆形面的建立。

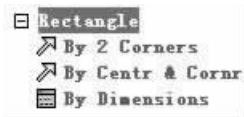


图 3-17 矩形面定义选项

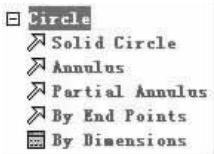


图 3-18 圆形面定义选项

圆形面的定义方法见表 3-4 ,各参数的含义如图 3-19 所示。

表 3-4 圆形面的建立方法

| 命令及菜单操作 | 意 义 |
|--|--|
| CYL4 ,XCENTER , YCENTER , RAD1 , THETA1 , RAD2 , THETA2 , DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Solid Circle Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Annulus Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Partial Annulus | 通过控制圆形中心点坐标和半径的方式定义实心圆形面、环形面和部分环形面(通过给定中心角度) |
| CYL5 , XEDGE1 , YEDGE1 , XEDGE2 , YEDGE2 , DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create> Circle>By End Points | 通过控制圆形直径的方式定义圆形面 |
| PCIRC , RAD1 , RAD2 , THETA1 , THETA2 Main Menu>Preprocessor>Create> Circle>By Dimensions | 通过控制圆形面的尺寸(内、外圆半径、中心角大小)来定义圆形面 |

4. 多边形面的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Areas>Polygon 打开如图 3-20 所示的多边形面定义选项菜单 ,用于各种正多边形面的建立。

该菜单上的选项允许用户通过系统定义好的方式直接生成三角形、正方形、正五边形、正六边形、正七边形和正八边形 ,也可以通过给定边数和角度等方式定义需要的多边形面。上述选项操作都很简单、清楚 ,这里就不再赘述。

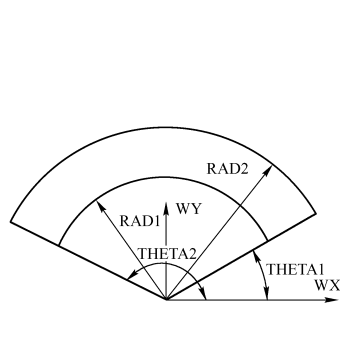


图 3-19 圆形面的创建及各参数意义

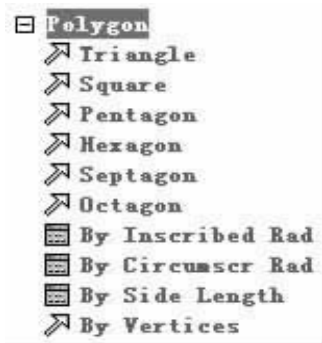


图 3-20 多边形面定义选项

5. 倒圆角面

命令格式：

AFILLET ,NA1 ,NA2 ,RAD

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor> Create>Areas>Area Fillet

该命令与对相交线进行倒圆角很相似 ,需要指定要倒圆角的两相交面和倒角角度 ,如图 3-21(a)所示 ,生成效果如图 3-21(b)所示。

6. 通过拉伸和旋转线生成面

(1) 由一组线沿一定路径拉伸生成面

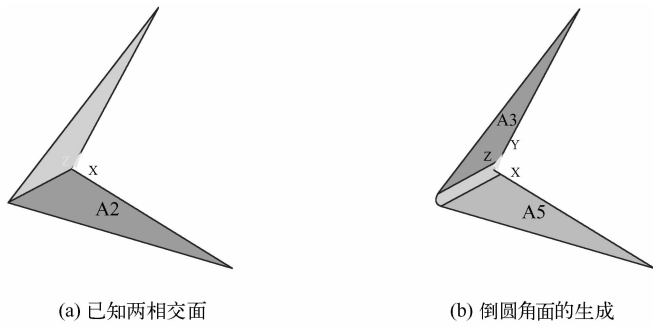


图 3-21 倒圆角面的过程

命令格式：

ADrag ,NL1 ,NL2 ,NL3 ,NL4 ,NL5 ,NL6 ,NLP1 ,NLP2 ,NLP3 ,NLP4 ,NLP5 ,NLP6

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Operator>Extrude/Sweep>Along Lines

NL1~NL6 为要拖拉的定义线段 ,NLP1~NLP6 为定义路径 ,如图 3-22 所示。

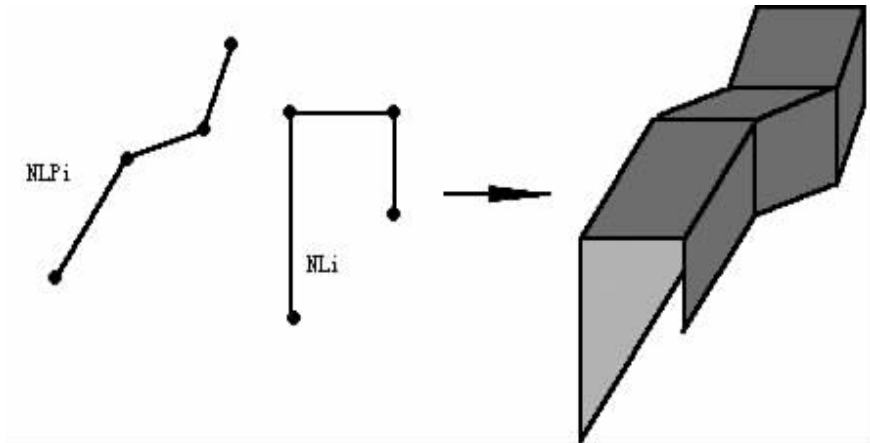


图 3-22 拉伸面的过程

(2) 一组线绕指定轴旋转生成面

命令格式：

AROTAT ,NL1 ,NL2 ,NL3 ,NL4 ,NL5 ,NL6 ,PAX1 ,PAX2 ,ARC ,NSEG

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Operator>Extrude/Sweep>About Axis

建立一组圆柱型面 ,方式为一组线段绕轴旋转产生。PAX1 ,PAX2 为轴上的任意两点 ,并定义轴的方向 ,旋转一组已知线段(NL1 ,... ,NL6) ,以已知线段为起点 ,旋转角度为 ARC , NSEG 为在旋转角度方向可分的数目 ,如图 3-23 所示。

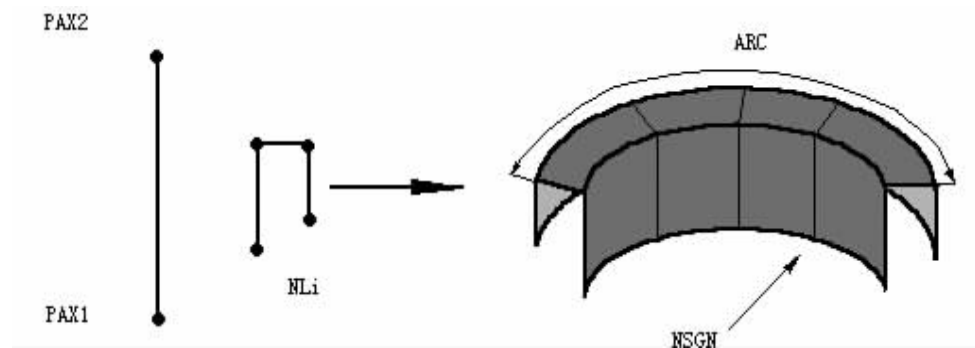


图 3-23 旋转生成面的过程

3.2.4 体定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volumes 打开如图 3-24 所示的体定义选项菜单,用于实现各种形状体的建立。

从图中可以看出,要实现体的定义可以通过几种途径:Arbitrary(任意形状的体)、Block(块状体)、Cylinder(圆柱体)、Prism(棱柱体)、Sphere(球体)、Cone(圆锥体)和 Torus(圆环体)。

定义体的命令使用与面定义十分相似,而且菜单清楚,用户可以一目了然。

1. 任意体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volumes>Arbitrary 打开如图 3-25 所示的 Arbitrary 任意体定义选项菜单,用于实现任意形状体的建立。

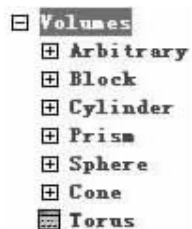


图 3-24 体定义选项

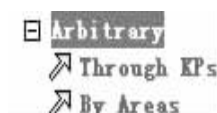


图 3-25 任意体定义选项

体为最高级图元对象,最简单体的定义由点或面组合而成。如图 3-25 上的两个选项允许用户通过点和面直接创建体。

(1) 由点直接生成体

命令格式:

V ,P1 ,P2 ,P3 ,P4 ,P5 ,P6 ,P7 ,P8

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>Through KPs

此命令由已知的一组点(P1 ... P8)定义体(Volume),同时也产生相应的面和线。由点组合时,要注意点的编号,不同顺序的点的选取可以得到不同形状的体,如图 3-26 所示,图形下部的命令格式表示不同点的顺序生成了不同形状的体。

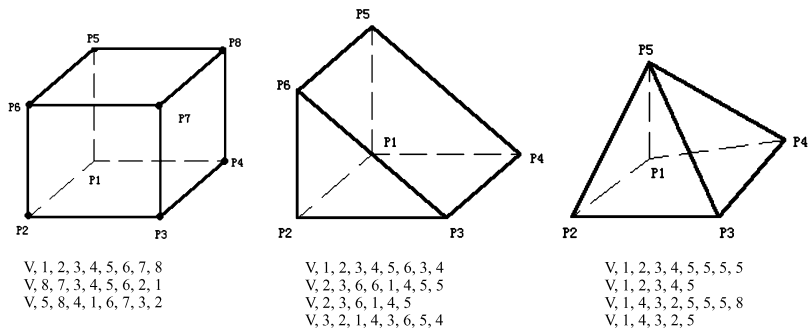


图 3-26 由点生成体

(2) 由面直接生成体

命令格式：

```
VA ,A1 ,A2 ,A3 ,A4 ,A5 ,A6 ,A7 ,A8 ,A9 ,A10
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Areas  
Main Menu>Preprocessor>Create>Volume by Areas  
Main Menu>Preprocessor>Geom Repair>Create Vlume
```

定义由已知的一组面(VA1 ,... ,VA10)包围成一个体 ,至少需要 4 个面才能围成一个体 ,该命令适用于所建立体多于 8 个点时。

2. 块状体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volumes>Block ,打开如图 3-27 所示的块状体定义选项菜单 ,可以通过不同方式定义块状体。

块状体的定义方法有 3 种 ,具体过程见表 3-5。

表 3-5 块状体的建立方法

| 命令及菜单操作 | 意 义 |
|---|-------------------------------|
| BLC4 ,XCORNER ,YCORNER ,WIDTH ,HEIGHT ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Block>By 2 Corners & Z | 通过控制块状体(长方体)的一个角点坐标和长、宽、高来定义体 |
| BLC5 ,XCENTER ,YCENTER ,WIDTH ,HEIGHT ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Block>By Centr ,Cornr ,Z | 通过控制块状体的中心点的坐标和长、宽、高来定义体 |
| BLOCK ,X1 ,X2 ,Y1 ,Y2 ,Z1 ,Z2 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Block>By Dimensions | 通过控制块状体的两个对角点的三向坐标来定义体 |

3. 圆柱体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder ,打开如图 3-28 所示的圆柱体定义选项菜单 ,用于圆柱体的建立。

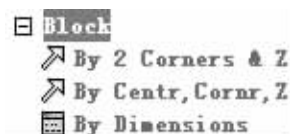


图 3-27 块状体定义选项

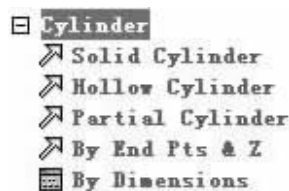


图 3-28 圆柱体定义选项

圆柱体的定义方法见表 3-6。

表 3-6 圆柱体的建立方法

| 命令及菜单操作 | 意 义 |
|---|--|
| CYL4 ,XCENTER ,YCENTER ,RAD1 ,THETA1 ,RAD2 ,THETA2 ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder >Solid Cylinder Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder >Hollow Cylinder Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder >Partial Cylinder | 通过控制圆柱体底面中心点坐标、半径和柱高的方式定义实心、空心和部分环形(通过给定中心角度)圆柱体 |
| CYL5 ,XEDGE1 ,YEDGE1 ,XEDGE2 ,YEDGE2 ,DEPTH Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder >By End Points | 通过控制圆柱体底面直径和柱高的方式定义圆柱体 |
| CYLINDER ,RAD1 ,RAD2 ,Z1 ,Z2 ,THETA1 ,THETA2 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cylinder >By Dimensions | 通过控制圆柱体的尺寸(底面内、外圆半径、中心角大小、柱高)来定义圆柱体 |

4. 棱柱体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Prism ,打开如图 3-29 所示的棱柱体定义选项菜单 ,用于各种底面为正多边形的棱柱体建立。

与多边形面的定义相似 ,只是多一步操作 ,即需要用户指定棱柱体的高度。

5. 球体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Sphere ,打开如图 3-30 所示的球体定义选项菜单 ,用于球形体的建立。

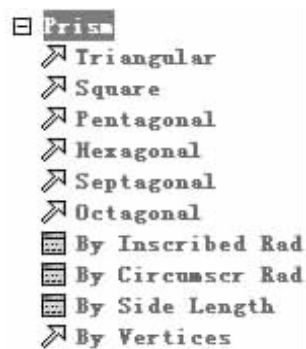


图 3-29 棱柱体定义选项

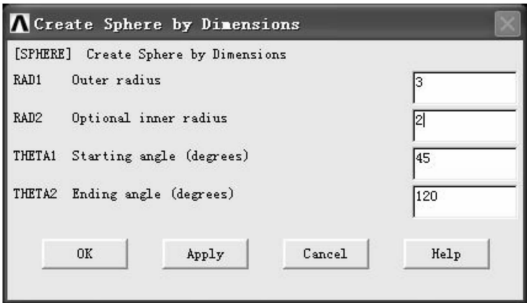


图 3-30 球体定义选项

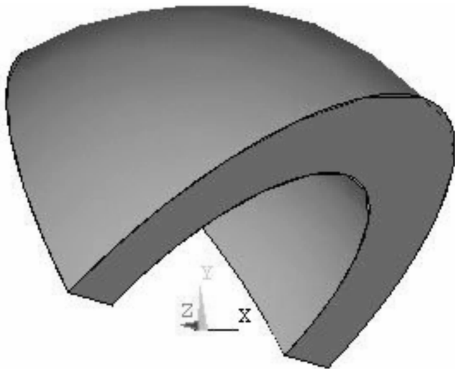
与定义圆形面相似 ,具体定义方法见表 3-7。其中 ,通过控制尺寸即“By Dimensions”选项定义空心球时将弹出如图 3-31(a)所示对话框 ,用户给定相应参数就可以创建如图 3-31(b)所示的效果。

表 3-7 球形体的建立方法

| 命令及菜单操作 | 意 义 |
|--|---------------------------------------|
| SPH4 ,XCENTER ,YCENTER ,RAD1 ,RAD2 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Sphere >Solid Sphere Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Sphere>Hollow Sphere | 通过控制球体中心点坐标和半径的方式定义实心或者空心(通过给定中心角度)球体 |
| SPH5 ,XEDGE1 ,YEDGE1 ,XEDGE2 ,YEDGE2 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Sphere>By End Points | 通过控制球体直径的方式定义体 |
| SPHERE ,RAD1 ,RAD2 ,THETA1 ,THETA2 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Sphere >By Dimensions | 通过控制球体的尺寸(内、外圆半径、中心角大小)来定义球形体 |



(a) 定义空心球相关参数

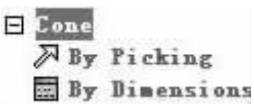


(b) 空心球效果

图 3-31 空心球的创建

6. 圆锥体的定义

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Cone 打开如图 3-32 所示的圆锥体定义选项菜单 用于圆锥体的建立。



圆锥体(包括圆台)的定义有两种方式,一是通过“By Picking”选项,即在图形窗口用鼠标直接定义,指定圆锥体上、下底面的半径和圆锥高度;二是通过“By Dimensions”选项,通过对话框来控制圆锥体的尺寸(上、下底面圆半径、中心角大小),以定义圆锥体和部分圆锥体。

图 3-32 圆锥体定义选项

7. 圆环体的定义

命令格式：

TORUS ,RAD1 ,RAD2 ,RAD3 ,THETA1 ,THETA2

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Volume>Torus

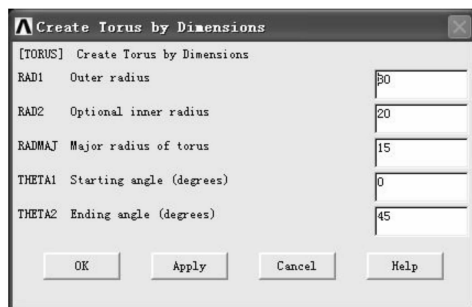
通过对如图 3-33(a)对话框设置半径参数(实心、空心)、转角参数(圆环体或者部分圆环体)就可以得到如图 3-33(b)所示的圆环体。

8. 通过拉伸和旋转面生成体

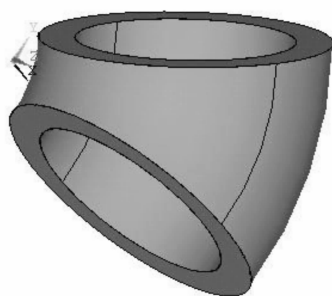
(1) 由一组面沿一定的路径拉伸生成体

命令格式：

VDRAG ,NA1 ,NA2 ,NA3 ,NA4 ,NA5 ,NA6 ,NLP1 ,NLP2 ,NLP3 ,NLP4 ,NLP5 ,NLP6



(a) 设定相关参数



(b) 圆环体效果

图 3-33 圆环体的创建

菜单操作：

Main Menu>Operate>Extrude/Sweep>Along Lines

体(Volume)的建立是由一组面(NA1, ..., NA6),以线段(NL1, ..., NL6)为路径,拉伸而成,如图 3-34 所示。

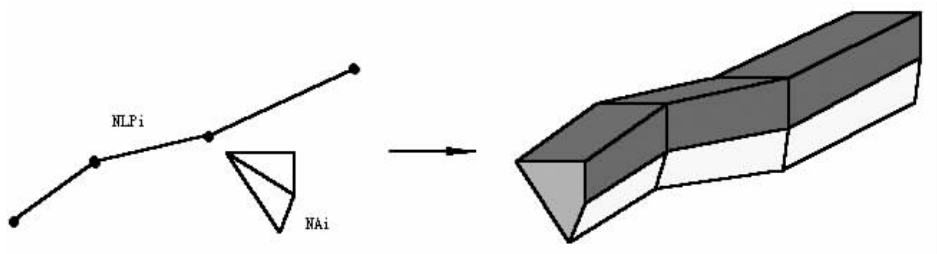


图 3-34 拉伸生成体

(2) 由一组面绕指定的轴旋转生成体

命令格式：

VROTAT, NA1, NA2, NA3, NA4, NA5, NA6, PAX1, PAX2, ARC, NSEG

菜单操作：

Main Menu>Operate>Extrude/Sweep>About Axis

将一组面(NA1, ..., NA6)绕轴 PAX1, PAX2 旋转而成柱形体,以已知面为起点,ARC 为旋转的角度,NSEG 为整个旋转角度中欲分的数目,如图 3-35 所示。

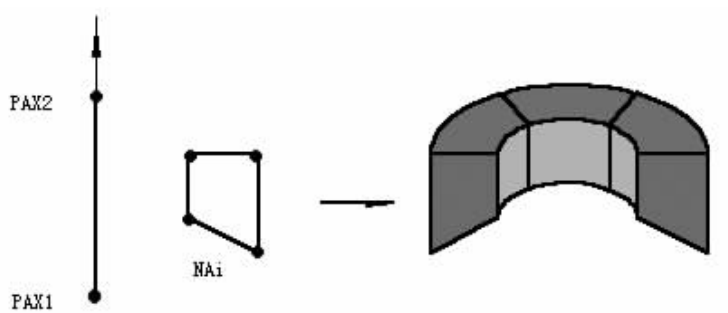


图 3-35 旋转生成体

3.3 用体素创建 ANSYS 对象

3.3.1 体素的概念

ANSYS 中体素(Primitive)指预先定义好的具有共同形状的面或体。利用它可直接建立某些形状的高级图元对象 ,例如前述提到的矩形、正多边形、圆柱体、球体等 ,高级图元对象的建立可节省很多时间 ,其所对应的低级图元对象同时产生 ,且系统给予最小的编号。在应用体素创建对象时 ,通常要结合一定的布尔操作才能完成实体模型的建立。常用的 2-D 及 3-D 体素如图 3-36 所示。

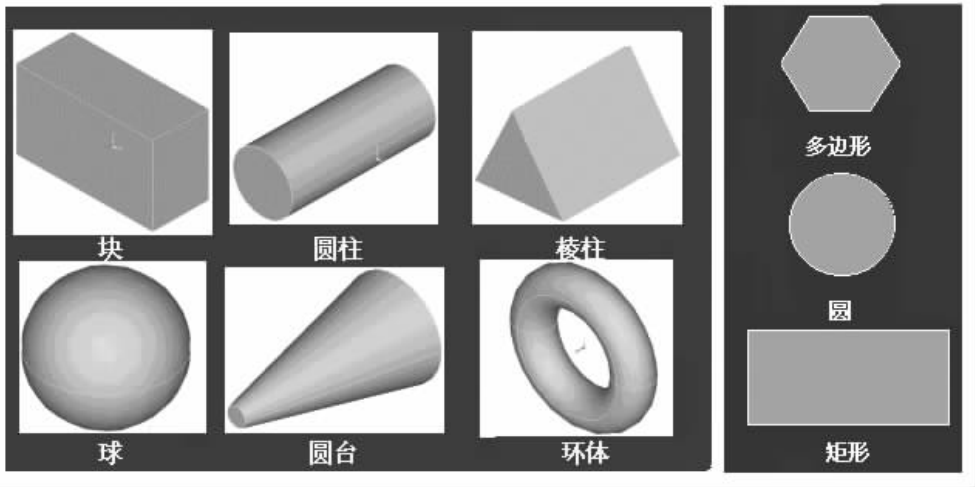


图 3-36 常用的 2-D 及 3-D 体素

需要注意的是 ,3-D 对象是具有高度的 ,且高度必须在 Z 轴方向 ,如欲在非原点坐标建立 3-D 体素对象 ,必须移动工作平面至所需的点上 ,对象的高度非 Z 轴的 ,必须旋转工作平面。上述体素创建的具体过程在前面图元对象的学习中已经讲述过了 ,这里不再重复。

3.3.2 布尔操作

布尔操作可对几何图元进行布尔计算 ,它们不仅适用于简单的图元 ,也适用于从 CAD 系统中导入的复杂几何模型。



图 3-37 布尔操作选项

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Booleans ,打开如图 3-37 所示的布尔操作选项菜单。

1. 加(ADD)

把两个或者多个实体合并为一个 ,实现过程如图 3-38 ,面 A1 和面 A2 经过“加”的过程变为一个面 A3。

2. 粘接(GLUE)

把两个或者多个实体粘合在一起 ,如图 3-39 所示。两个面也成为 一个面 ,但在其接触面上具有共同的边界。该方法在处理两

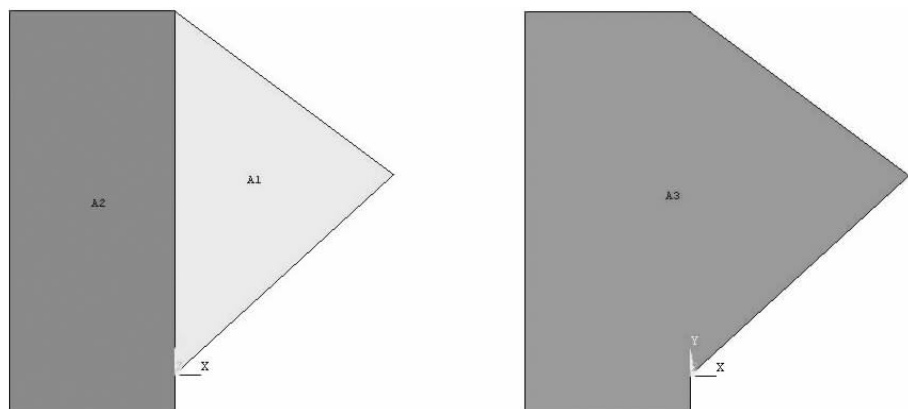


图 3-38 “加”的过程

个不同材料组成的实体时比较方便。

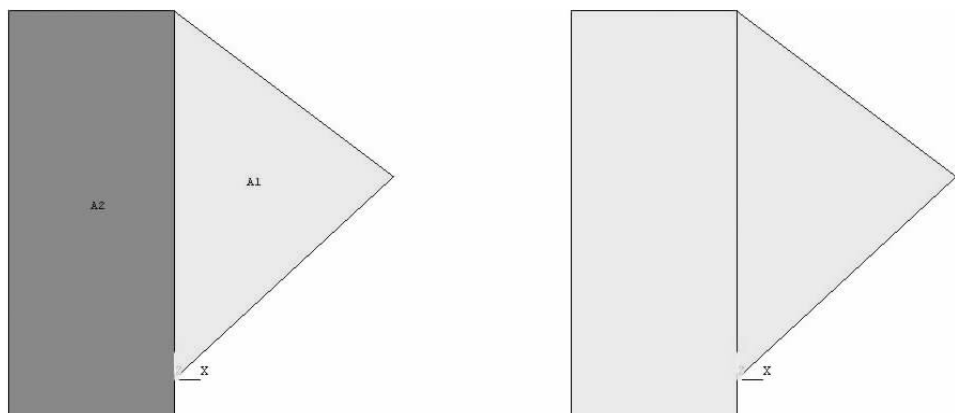


图 3-39 “粘接”的过程

3. 搭接(OVERLAP)

类似于粘接运算,但要求输入的实体之间有重叠,如图 3-40 所示,搭接之后变为接触边界共有的 3 个面。

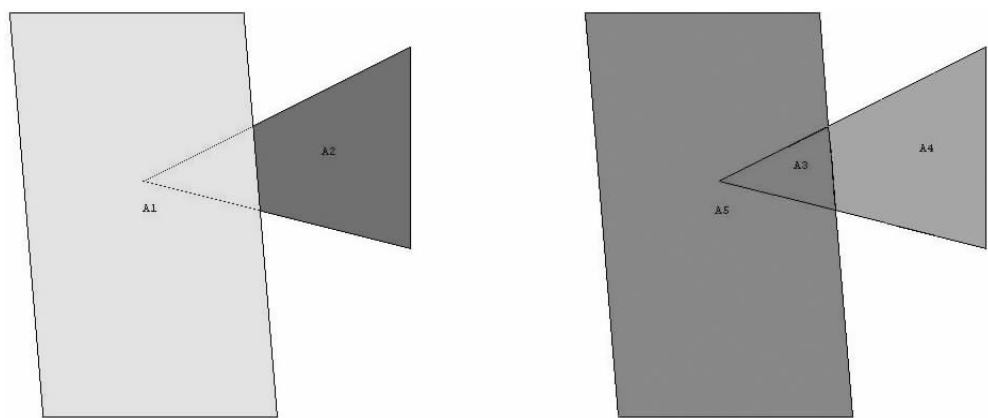


图 3-40 “搭接”的过程

4. 减(SUBTRACT)

删除“母体”中一块或者多块与“子体”重合的部分,对于建立带孔的实体或者准确切除部分实体比较方便,如图 3-41 所示。

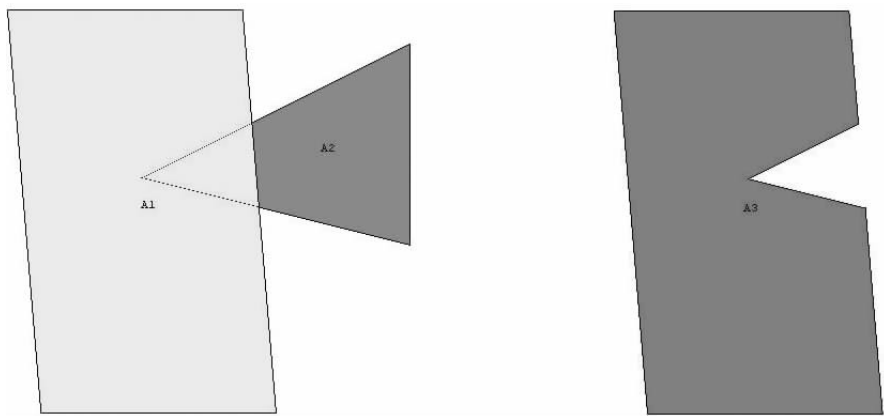


图 3-41 “减”的过程

5. 切分(DIVIDE)

把一个实体分割为两个或者多个,分割后得到的实体仍通过共同的边界联接在一起,如图 3-42 所示。“切割工具”可以是工作平面,自定义面或者线,甚至是体。在网格划分时,通过对实体的分割可以把复杂的实体变为简单的体,便于实现均匀网格划分。

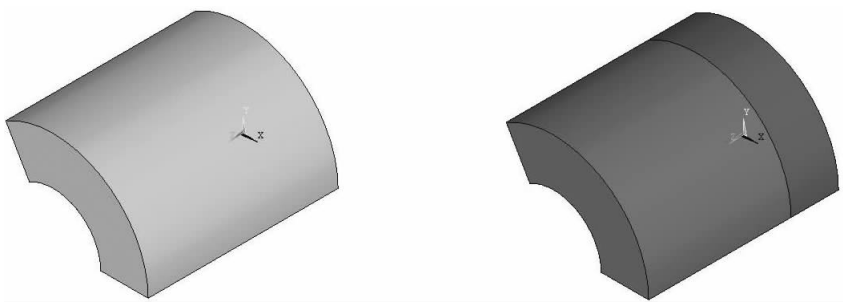


图 3-42 “切分”的过程

6. 相交(INTERSECT)

保留两个或者多个实体重叠的部分。如果是两个以上的实体,如图 3-43(a),则有两种相交方式的选择:一是公共相交只保留全部实体的共有部分,如图 3-43(b),二是两两相交则保留每一对实体间共同的部分,如图 3-43(c)。

7. 互分(PARTITION)

把两个或者多个实体相互分为多个实体,但相互之间仍通过共同的边界联接在一起。该命令在寻找两条相交线交点并保留原有线的处理时很方便,如图 3-44 所示。相交的两条线段 L1 和 L2,互分以后得到 4 条线 L3、L4、L5、L6 即 L1 被 L2 分为 L3 和 L4, L2 被 L1 分为 L5 和 L6,同时产生了两线的交点。

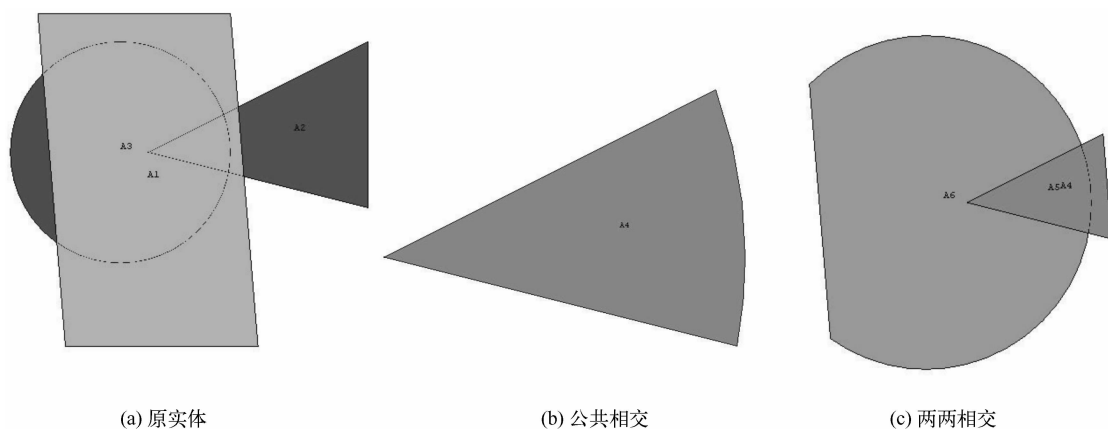


图 3-43 “相交”的过程

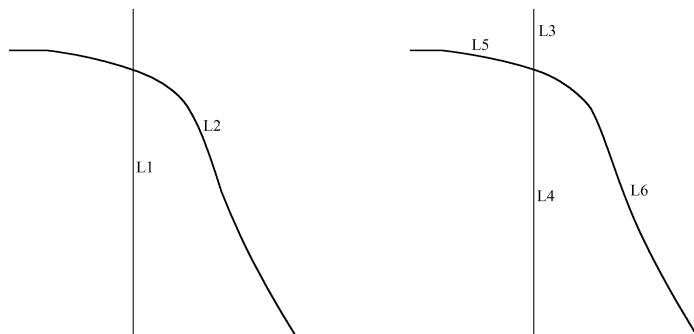


图 3-44 “互分”的过程

3.4 图元对象的其他操作

在实体模型的创建过程中,除了应用基本图元和体素以外,还可以根据具体情况采用其他一些操作。例如对相同结构进行复制、对对称结构进行镜像等。操作的对象可以是单个图元,也可以是组合后的实体模型。

3.4.1 移动和旋转

如果所创建的实体图元位置和方向不理想,可以通过移动和旋转来进行调整。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move / Modify, 打开如图 3-45(a)所示“Move / Modify”移动/修改选项。

该部分提供了图元对象移动的选项,包括点(一组点或者单个点)、线、面、体、节点等。以体为例,选择 Volumes 选项,需要用户在图形窗口指定要移动的体,确定之后打开如图 3-45(b)所示的 Move Volumes 对话框,在对话框上给定要移动的方向和距离就可以实现体的移动。

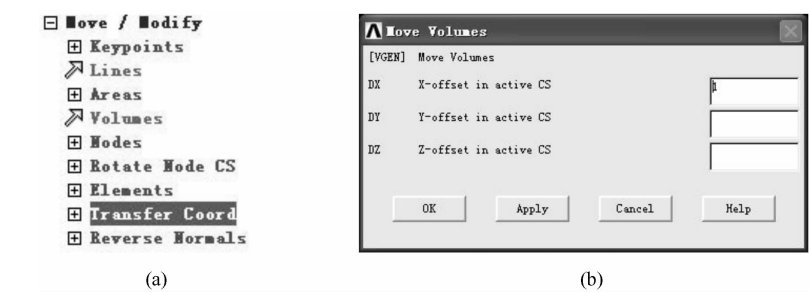


图 3-45 “移动/修改”选项及相关对话框

对图元对象进行旋转操作是通过图 3-45(a)上的 Transfer Coord 选项实现的,打开后的选项如图 3-46(a)所示。仍以体为例,选择 Volumes 选项,需用户在图形窗口指定要旋转的体,确定之后打开如图 3-46(b)所示的旋转体对话框。从对话框上的选项要求可以看出,在进行旋转之前,需要事先定义一个局部坐标系,就是要把体旋转到什么位置。对话框上的其他选项还可以指定关键点的增量值,可以选择将体和划分后的单元一起进行旋转。

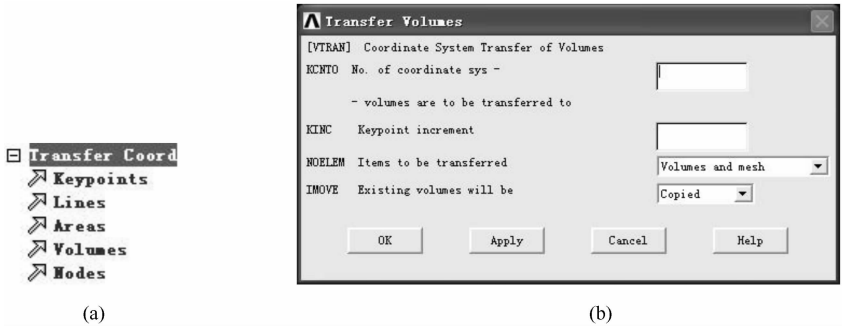


图 3-46 “旋转”选项及相关对话框

3.4.2 复制

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy,打开如图 3-47(a)所示的复制选项。

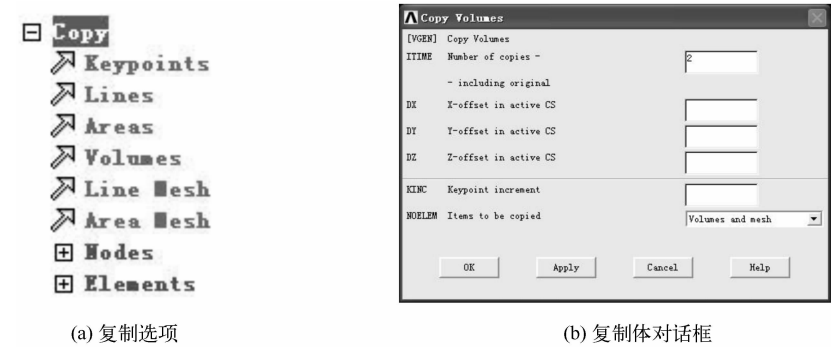


图 3-47 复制图元对象

仍以体为例,选择 Volumes 选项,需要用户在图形窗口指定要复制的体,确定之后打开如图 3-47(b)所示的复制体对话框。在对话框上给定要复制的份数,要复制的位置、关键点的增量值、复制内容(体或者网格)就可以实现复制。需要说明的是,如果要在圆周上的复制,就要将坐标系变为柱坐标系下,其余操作是相同的。

3.4.3 镜像

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect,打开如图 3-48(a)所示的镜像选项。



图 3-48 镜像图元对象

仍以体为例,选择 Volumes 选项,需要用户在图形窗口指定要镜像的体,确定之后打开如图 3-48(b)所示镜像体对话框。在对话框上选择关于哪个面(或者沿哪个坐标轴)进行镜像、关键点的增量值、复制内容(体或者网格)就可以实现镜像。

3.4.4 删除

图元对象的删除很简单,方法如下。

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete

选择要删除的内容,然后在图形窗口指定目标图元就可以实现删除。需要注意的是,ANSYS 中的图元是分等级的,也就是说,如果选择只删除“体”,那么删除之后,虽然体是不存在了,但组成体的面、线、点还在,如果选择删除“体及以下图元”,那么操作之后,体及低于体的所有图元(即组成体的面、线、点)就都不存在了。

3.5 实体模型的输入

用户既可以在 ANSYS 中直接创建实体模型,也可以从其他 CAD 软件包中输入实体模型。这里简要介绍如何输入一个 IGES(Initial Graphics Exchange Specification)文件。IGES 是用来把实体几何模型从一个软件包传递给另一个软件包的规范,该文件是 ASCII 码文件,很容易在计算机系统之间传递,许多大型 CAD 系统都允许进行。在 ANSYS 中输入 IGES 文件的操作如下。

菜单操作：

Utility Menu>File>Import>IGES

在弹出的对话框中选择默认选项,在第二对话框中选择想要的文件并单击 OK。

需要说明的是,使用 IGES 输入实体模型,由于选项的不同,有时可能失败,有时输入的实体模型会丢失一些信息,有时要对输入后的模型进行进一步的修改和完善。

3.6 实例 轴承座的分析(1)

练习目的

创建实体的方法、工作平面的平移、旋转及布尔运算(相减、粘接、搭接、模型体素的合并)的使用等。

具体步骤

启动 ANSYS 在指定工作目录下,以“example”为文件名称开始一个新的分析。

1. 创建基座模型

(1) 生成长方体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Block>By Dimensions,在打开的对话框中,如图 3-49 所示,输入“ $x1=0$ $x2=3$ $y1=0$ $y2=1$ $z1=0$ $z2=3$ ”,单击 OK 按钮,即生成长方体。

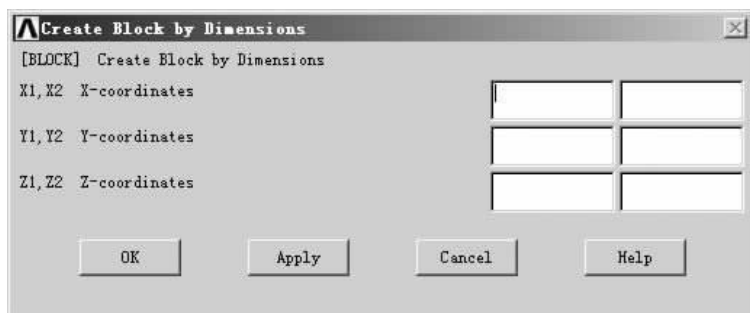


图 3-49 由尺寸控制创建长方体的对话框

(2) 平移并旋转工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments,在打开的浮动对话框中的“X,Y,Z Offsets”输入“2.25,1.25,0.75”,单击 Apply 按钮;在“XY,YZ,ZX Angles”处输入“0,-90”,单击 OK 按钮,实现工作平面的旋转。如图 3-50 所示,工作平面控制对话框上的主要功能说明。

(3) 创建圆柱体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Solid Cylinder,在弹出的对话框中,在“Radius”中输入“ $0.75/2$ ”,“Depth”中输入“-1.5”,单击 OK 按钮。如图 3-51 所示。

(4) 拷贝生成另一个圆柱体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Copy>Volume,弹出“拾取”对话框,用户根据指示拾取已创建的圆柱体,单击 Apply 按钮,在弹出的如图 3-47(b)对话框的“DZ”中输入 1.5,单击 OK 按钮。

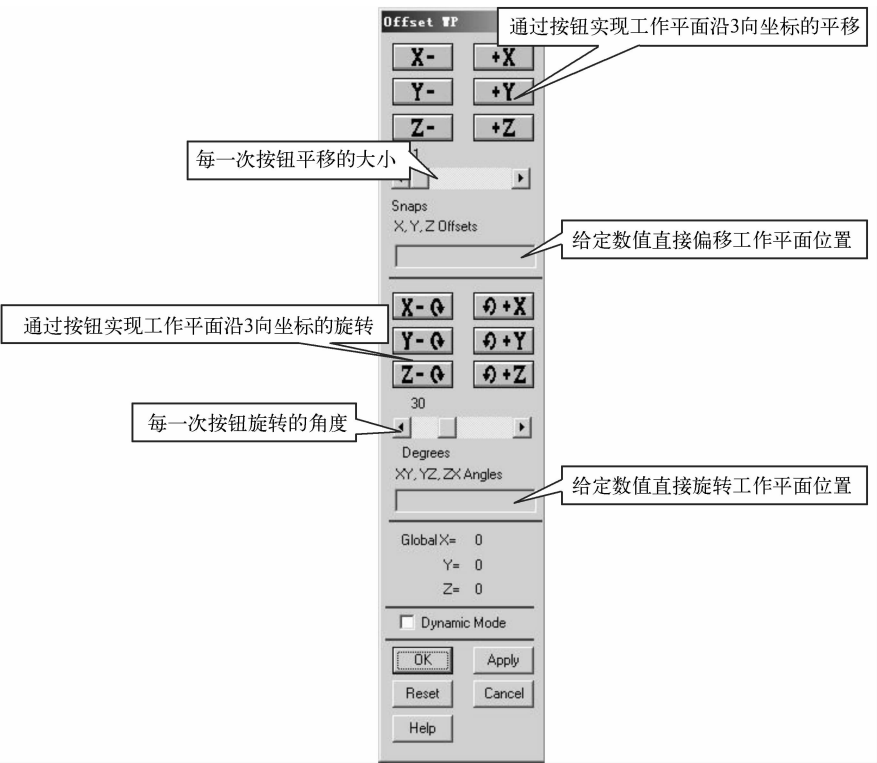


图 3-50 工作平面控制对话框

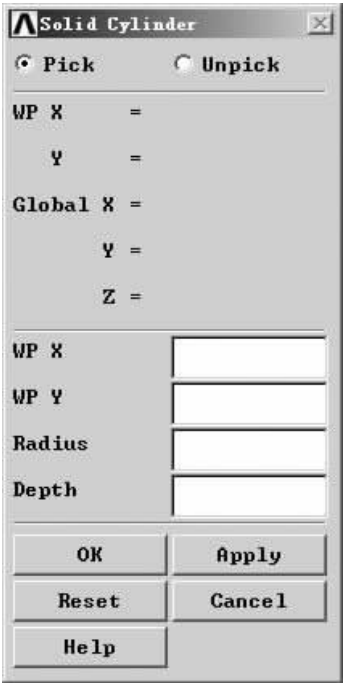


图 3-51 实体圆柱体创建对话框

(5) 从长方体中减去两个圆柱体

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Operate > Subtract Volumes ,首先拾取被减的长方体 ,单击 Apply 按钮 ,然后拾取要减去的两个圆柱体 ,单击 OK 按钮。结果如图 3-52(a)所示。

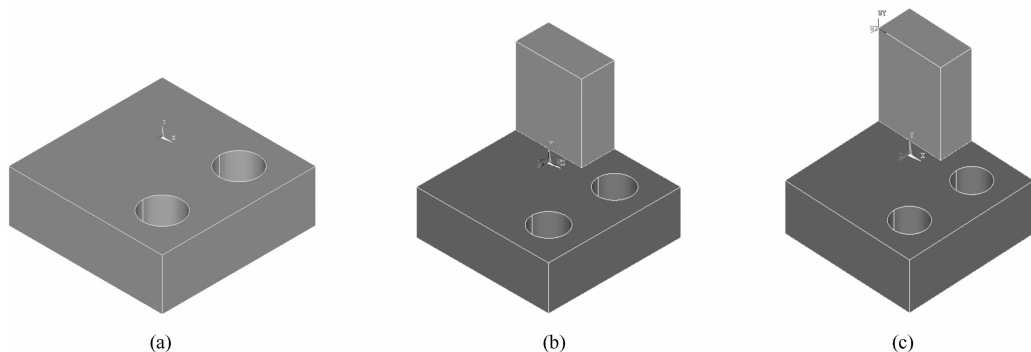


图 3-52 基座的创建

(6) 使工作平面与总体笛卡尔坐标系一致

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Global Cartesian ,操作完成则将工作平面恢复到总体笛卡尔坐标的位置。

2. 创建支撑部分

(1) 显示工作平面

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Display Working Plane (toggle on) ,操作完成后图形窗口即显示工作平面的位置。总体坐标系的 3 个轴以“X ,Y ,Z”标志 ,工作平面的 3 个轴以“WX ,WY ,WZ”标志。

(2) 创建长方体块

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create > Volumes-Block > By 2 corners & Z ,弹出如图 3-53 所示的对话框。在参数表中输入数值 :“WP X = 0 WP Y = 1 Width = 1.5 ;Height = 1.75 Depth = 0.75” ,单击 OK 按钮。结果如图 3-52(b)所示。

确定操作无误后 ,在工具栏 (Toolbar) 中选择保存数据库按钮 (SAVE _ DB) ,保存数据库文件。

(3) 偏移工作平面到轴瓦支架的前表面

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Keypoints ,在刚刚创建的实体块的左上角拾取关键点 ,单击 OK 按钮。结果如图 3-52(c)所示。

确定操作无误后 ,在工具栏 (Toolbar) 中选择保存数据库按钮 (SAVE _ DB) ,保存数据库文件。

(4) 创建轴瓦支架的上部

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create > Volumes-Cylinder > Partial Cylinder ,弹出如图 3-54 所示的对话框。在创建圆柱的参数表中输入参数 :“WP X = 0 WP Y = 0 Rad - 1 = 0 Theta - 1 = 0 ;Rad - 2 = 1.5 Theta - 2 = 90 Depth = -0.75” ,单击 OK 按钮。结果如图 3-55(a)所示。

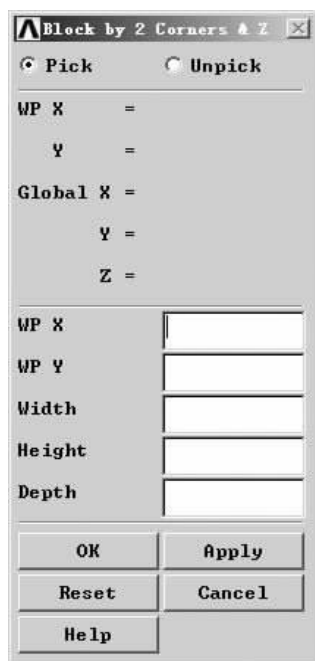


图 3-53 由对角和高度控制长方体的对话框

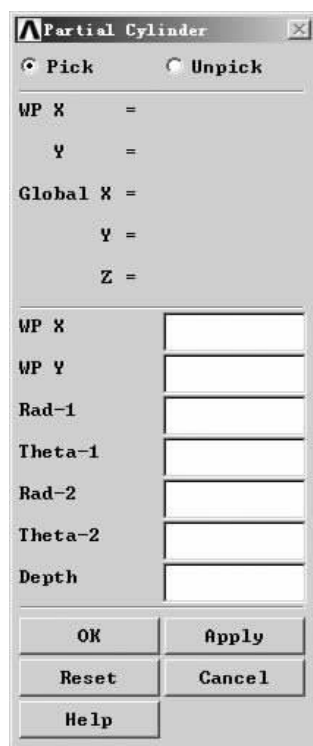


图 3-54 创建部分圆柱体的对话框

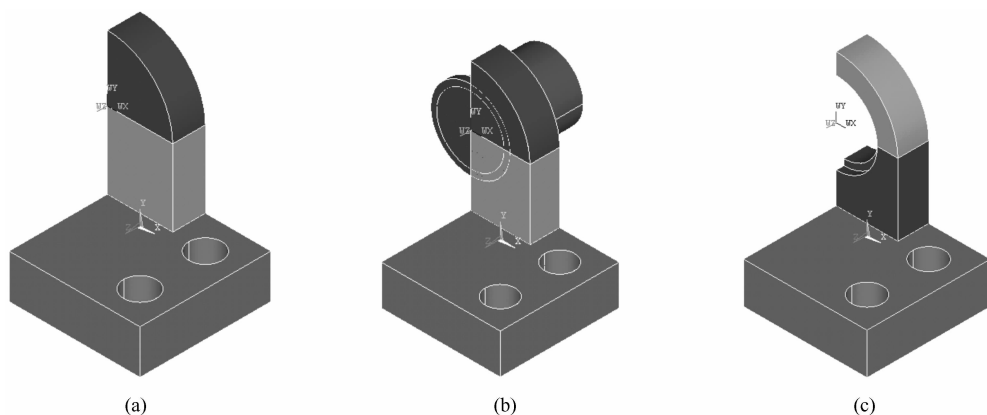


图 3-55 支撑部分的创建

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE_DB),保存数据库文件。

(5) 在轴承孔的位置创建两个圆柱体为布尔操作生成轴孔做准备

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create > Volume-Cylinder > Solid Cylinder,在弹出的对话框(如图 3-51)中输入参数:“WP X = 0 WP Y = 0 Radius = 1 Depth = -0.1875”;拾取 Apply 按钮,输入参数:“WP X = 0 WP Y = 0 Radius = 0.85 Depth = -2”,单击 OK 按钮,完成大小两个圆柱体的创建。结果如图 3-55(b)所示。

(6) 从轴瓦支架“减”去圆柱体形成轴孔

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Subtract > Volumes,拾取构成轴瓦支架的两个体,作为布尔“减”操作的母体,单击 Apply 按钮,拾取大圆柱作为要“减”去的对象,单击 Apply 按钮。

再次拾取构成轴瓦支架的两个体,单击 Apply 按钮,拾取小圆柱体,单击 OK 按钮。结果如图 3-55(c)所示。

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE_DB),保存数据库文件。

(7) 合并重合的关键点

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items,弹出如图 3-56 所示的对话框。将 Label 设置为“Keypoints”,单击 OK 按钮。

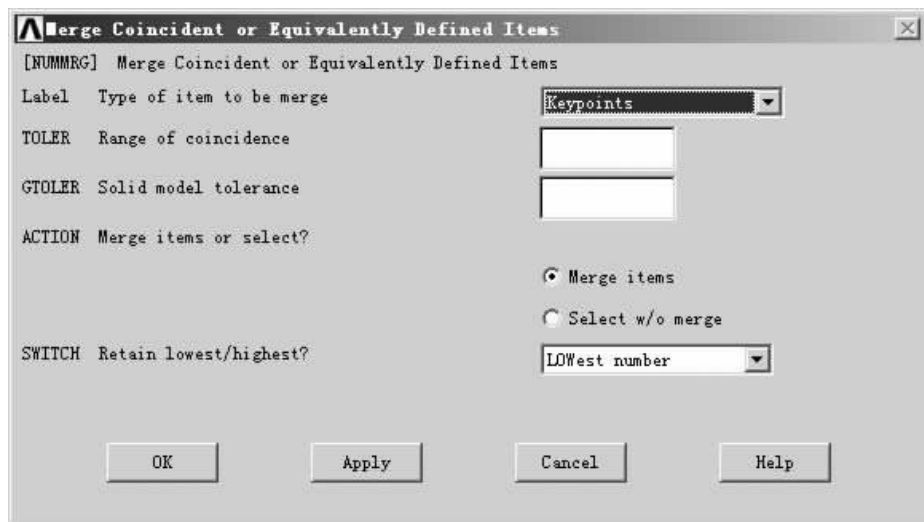


图 3-56 合并选项对话框

3. 创建筋板部分

(1) 在底座的上部前面边缘线的中点建立一个关键点

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Keypoints > KP between KPs,拾取底座的上部前面边缘线的两个关键点,单击 OK 按钮。在弹出的对话框(如图 3-4 所示)中输入 $RATI = 0.5$,单击 OK 按钮。

(2) 创建一个三角面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Arbitrary > Through KPs,拾取上述新建的关键点,拾取轴承孔座与整个基座的交点,拾取轴承孔上下两个体的交点,单击 OK 按钮,由选中的 3 个点创建三角形面。

(3) 沿面的法向拖拉三角面形成一个三棱柱

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Operate > Extrude > Areas- Along Normal,拾取新建的三角形面,单击 OK 按钮,弹出如图 3-57 的对话框,输入 $DIST = -0.15$,厚度的方向是向轴承孔中心,单击 OK 按钮。



图 3-57 定义拉伸长度对话框

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE _ DB),保存数据库文件。

(4) 关闭工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane> Display Working Plane(toggle off)。菜单项前面的对勾消失,即取消工作平面的显示,结果如图 3-58(a)所示。

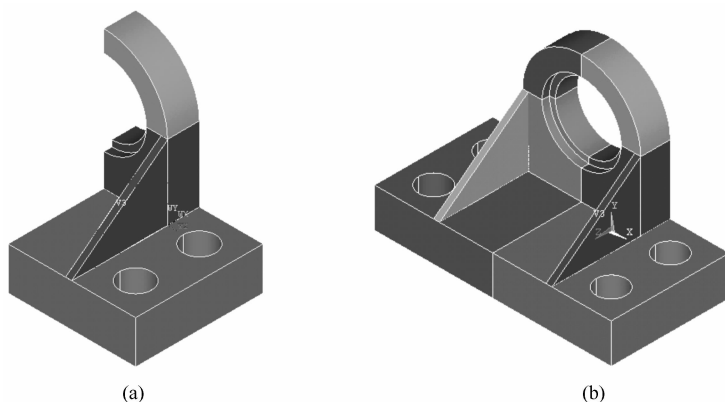


图 3-58 实体模型的完成

4. 生成整个模型

(1) 沿坐标平面镜像生成对称部分

依次选择 Main Menu>Preprocessor > Modeling-Reflect> Volumes,在弹出的“拾取”对话框中拾取 All 按钮,在弹出的如图 3-48(b)所示的对话框中拾取 Y-Z plane,单击 OK 按钮。

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE _ DB),保存数据库文件。

(2) 粘接所有体

依次选择 Main Menu>Preprocessor> Modeling-Operate > Booleans-Glue > Volumes,在弹出的“拾取”对话框中拾取 All 按钮。结果如图 3-58(b)所示。

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE _ DB),保存数据库文件。

练习题

1. 实体模型建立的方法有 3 种 ,各有什么特点 ?

2. 基本图元对象包括点、线、面和体 ,掌握不同的实现方法是实现实体建模的基础之一。

基本图元对象的定义方法各有几种 ? 适用于什么情况下使用 ?

3. 体素的概念是什么 ? 布尔操作实现几种功能 ?

4. 图元对象的移动、旋转、复制和镜像操作如何实现 ?

第 4 章 ANSYS 网格划分

有限元方法分析问题的重要步骤之一就是实体模型的离散化。ANSYS 提供了方便、快捷、有效的功能来实现实体模型的网格划分。本章介绍在 ANSYS 中实现网格划分的一般步骤、如何选择或者定义单元与材料的属性、如何应用网格划分工具对实体进行网格化及网格的直接生成等。网格划分的好坏直接影响计算结果的准确性和有效性,因此在学会一般意义上的网格划分方法的基础上,应该掌握一些必要的技巧,才可以得到理想的有限元模型。

4.1 区分实体模型和有限元模型

现今所有的有限元分析都用实体建模(类似于 CAD),ANSYS 以数学的方式表达结构的几何形状。也就是说,所得到的模型是实际问题当中结构几何形状的抽象,也就是实体模型。但是实体模型并不是可以进行求解的模型,必须在里面填充节点和单元(即网格划分过程),并且在几何边界上施加约束和载荷(即加载过程),也就是得到所说的有限元模型。

简单地说,实体模型是不参与求解的,即使在实体模型直接施加载荷或约束,也最终传递到有限元模型(即节点和单元)进行求解。可以说,建立实体模型是为有限元模型的创建做基础的。不是所有的问题都需要从实体模型的创建开始,所以 ANSYS 提供了直接生成节点和单元的方法,方便用户创建有限元模型。

实体模型和有限元模型的区别和联系如图 4-1 所示。

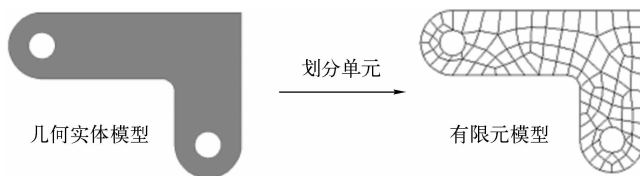


图 4-1 实体模型和有限元模型比较

4.2 网格化的一般步骤

(1) 建立并选取单元数据

第一步是建立单元的数据,这些数据包括单元的种类(TYPE)、单元的几何常数(R)、单元的材料性质(MP)及单元形成时所在的坐标系统,也就是说当对象进行网格化分时,单元的属性是什么。当然可以设定不同种类的单元,相同的单元又可设定不同的几何常数,也可以设定不同的材料特性,以及不同的单元坐标系统。

(2) 设定网格建立所需的参数

第二步即可进行设定网格划分的参数,最主要是定义对象边界单元的大小和数目。网格设定所需的参数,将决定网格的大小、形状,这一步非常重要,将影响分析时的正确性和经济

性。网格划分得较细也许会得到很好的结果,但并非网格划分得越细,得到的结果就越好。因为网格太密太细,会占用大量的分析时间。有时较细的网格与较粗的网格比较起来,较细的网格分析的精确度只增加百分之几,但占用的计算机资源比起较粗的网格却是数倍之多,同时在较细的网格中,常会造成不同网格划分时连接的困难。所以要在计算精度和经济性之间找到合适的平衡点。

(3) 产生网格

完成前两步即可进行网格划分,如果不满意网格化的结果,也可清除网格,重新定义单元的大小和数目,再进行网格化,直到得到满意的网格为止。

实体模型的网格化可分为自由网格化(Free Meshing)及映射网格化(Mapped Meshing)两种不同的网格化。不同网格化的方法对建构的实体模型是有不同要求的,自由网格化时对实体模型的构建要求简单,无较多限制。反之,映射网格化对实体模型的建立就有一些要求和限制,否则难以实现映射网格的划分。

4.3 单元属性定义

单元属性的定义包括单元形状的选择、实常数的定义、材料的定义。在网格划分之前,必须分配相应的单元属性。

4.3.1 单元形状的选择

ANSYS 为用户提供了大量可以选择的、不同形状、不同用途的单元。在 2-D 结构中可分为四边形和三角形,在 3-D 结构中可分为六面体和角锥体。根据不同的网格划分方法,将会产生不同的单元,例如映射网格划分一般得到四边形或者六面体形状的网格。从已有单元库中选择单元形状可以通过以下方法完成。

命令格式:

```
ET, ITYPE, Ename, KOP1, KOP2, KOP3, KOP4, KOP5, KOP6, INOPR
```

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

在弹出的 Element Type 对话框中(如图 4-2(a))单击 Add 按钮,弹出如图 4-2(b)所示的 Library of Element Types 对话框。

对话框上的左侧列出了单元类型,如质量单元(Mass)、梁单元(Beam)、实体单元(Solid)等,右侧列出相应的性质(三维还是二维单元)和编号,例如质量单元是三维的,为 21 号单元;下侧是用户选择的单元编号,例如同一个问题中用户选择了若干种单元,而质量单元为第 2 种单元,那么这个位置的单元编号即为 2。

通过 Apply 按钮可以连续选择需要的单元,完成后单击 OK 按钮。选择好的单元将列出在“Element Types”对话框中,此时 Option 按钮和 Delete 按钮将变为可用的,Option 按钮用于对单元特性的进一步定义,不是所有单元都需要定义,用户要根据所用单元的特点和要求来操作,Delete 按钮允许用户从列表中删除已经选择的单元类型。

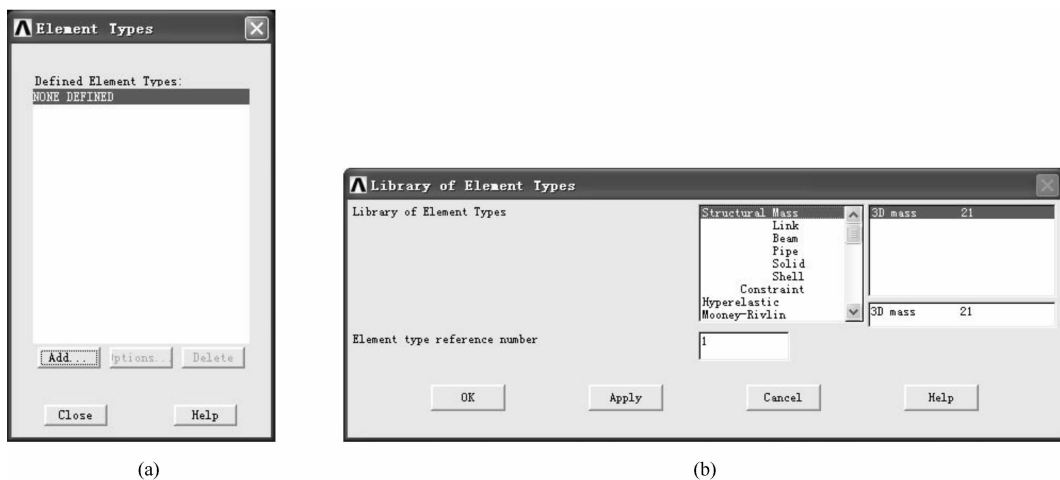


图 4-2 单元选择对话框

4.3.2 单元实常数的定义

实常数的定义是为单元服务的,也就是说,实常数是单元特性的进一步描述。不是所有单元都需要定义实常数,实常数只是某些单元特有的参数,而且不同单元实常数代表的意义也不同,例如对于壳单元,实常数代表的是壳的厚度。实常数的使用方法如下。

命令格式：

R, NSET, R1, R2, R3, R4, R5, R6

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

以壳单元为例,在弹出的“Real Constants”对话框(如图 4-3(a))中单击 Add 按钮,将弹出 Element Type for Real Constants 对话框,其上列出了所有用户已经选择的单元类型,选择需要定义的单元类型,如图 4-3(b)所示,然后单击 OK 按钮,在弹出的对话框上定义实常数,如图 4-3(c)所示。

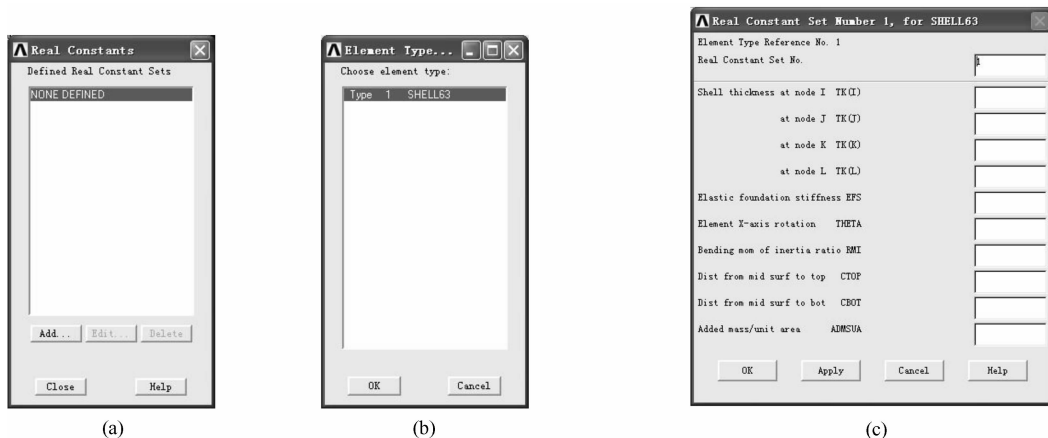


图 4-3 单元实常数的定义

4.3.3 单元材料的定义

材料模型的抽象与定义也是建立有限元模型过程中重要的部分 ,直接影响分析的结果。如果材料模型的选择不能较为确切地表达和描述实际问题 ,有限元模型的建立就是失败的。无论其他步骤做得多么完美 ,最后的结果也是有问题的。因此 ,用户需要依据专业知识来表达材料特性 ,并从 ANSYS 材料库中选择合适的材料模型来完成材料的建立。单元材料的定义方法如下。

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

弹出如图 4-4(a)所示的定义材料模型 Define Matenal Model Behavior 对话框 ,左侧为定义的材料模型的编号 ,同一个问题中可以有不同的材料模型 ;右侧是可供选择的材料模型 ,这是一个树状的列表 ,双击图标可以层层打开 ,例如依次选择“Structural > Linear > Elastic > Isotropic” ,双击图标打开的是线性弹性各向同性材料的定义。如图 4-4(b)所示 ,这个模型需要用户给出两个参数 ,即弹性模量和泊松比。

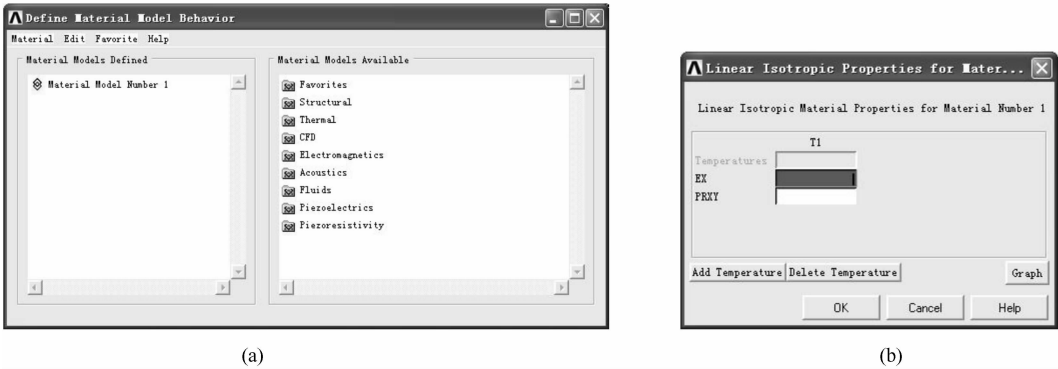


图 4-4 材料模型的定义

4.3.4 单元属性的分配

给实体模型图元分配单元属性允许对模型的每一个部分预置单元属性 ,从而可以避免在网格划分过程中重置单元属性。下述命令及菜单操作可以完成图元对象的属性分配 ,更具体的过程在“网格划分工具”中介绍。

(1) 指定关键点的属性

命令格式：

KATT ,MAT , REAL , TYPE ,ESYS

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Define>All Keypoints

Main Menu>Preprocessor>Define>Picked KPs

(2) 指定线的属性

命令格式：

LATT ,MAT ,REAL , TYPE , -- , KB , KE , SECNUM

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Define>All Lines

Main Menu>Preprocessor>Define>Picked Lines

(3) 指定面的属性

命令格式：

AATT ,MAT ,REAL , TYPE , ESYS

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Define>All Areas

Main Menu>Preprocessor>Define>Picked Areas

(4) 指定体的属性

命令格式：

VATT ,MAT ,REAL , TYPE , ESYS

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Define>All Volumes

Main Menu>Preprocessor>Define>Picked Volumes

4.4 网格划分

4.4.1 网格划分工具

网格划分工具是网格控制的一种快捷方式,它能方便地实现单元属性控制、智能网格划分控制、尺寸控制、自由网格划分和映射网格划分、执行网格划分、清除网格划分及局部细分。网格划分工具各部分的功能如图 4-5 所示。

程序默认为自由网格划分,单元形状以四边形、六面体优先,三角形、角锥次之。网格化时,如果实体模型能够实现映射网格化,而且相对应边长度不是差得很多,则必以映射网格化优先考虑进行。

启动网格划分工具的方法如下。

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>MeshTool

即打开如图 4-5 的网格划分工具浮动对话框。

1. 单元属性控制

该部分控制分配单元属性。在下拉列表框内可以选择 Global、Volumes、Areas、Lines 和 KeyPoints 选项,即给实体模型中的全部图元、体、面、线和关键点分配单元属性。

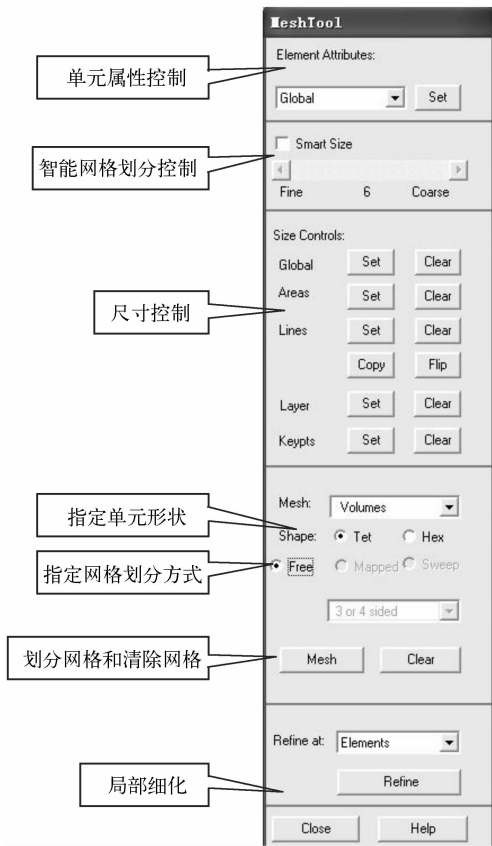


图 4-5 网格划分工具的功能

选择好上述内容后 ,单击右侧 Set 按钮 ,在打开的 Meshing Attributes 对话框上(如图 4-6 所示)指定单元类型、材料、实常数和单元坐标系。以上都是下拉式列表 ,用户需从已定义好的内容中进行选择。例如 ,用户已经选择并定义了若干种单元 ,在“Element type number”右侧下拉式列表中都有显示并可以指定 ,图 4-6 中显示的是用户已经定义的 1 号单元为“SHELL163” ;而材料模型和实常数都没有事先定义 ,则右侧下拉式列表中显示“None defined”。

2. 智能网格划分控制

智能网格划分 ,即 SmartSizing 算法。首先根据要划分网格的图元的所有线来估算单元的边长 ,然后对实体中的弯曲近似区域的线进行细化。

当选择 Smart Size 之后 ,其下的滑块就可以控制单元划分的尺度 ,默认值为“6” ,最大值为“10”(网格最粗的状态) ,最小值为“1”(网格最细的状态)。

3. 尺寸控制

尺寸控制是通过指定整体图元、面、线等划分的具体尺寸或者划分份数来控制网格划分的密度。例如想指定实体模型中某些线划分的尺寸 ,可以单击 Lines 右侧的 Set 按钮 ,然后在实体模型上选取要定义的线段 ,确定以后在弹出的对话框中给定单元具体长度或者份数 ,如图 4-7 所示。

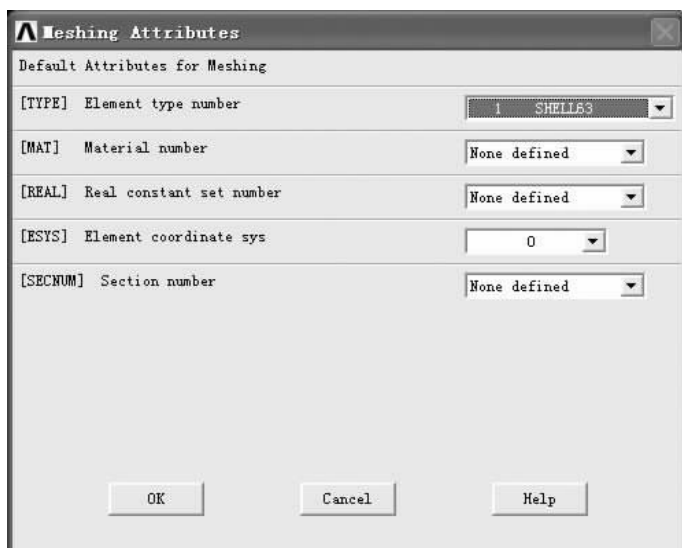


图 4-6 给实体模型的图元分配单元属性

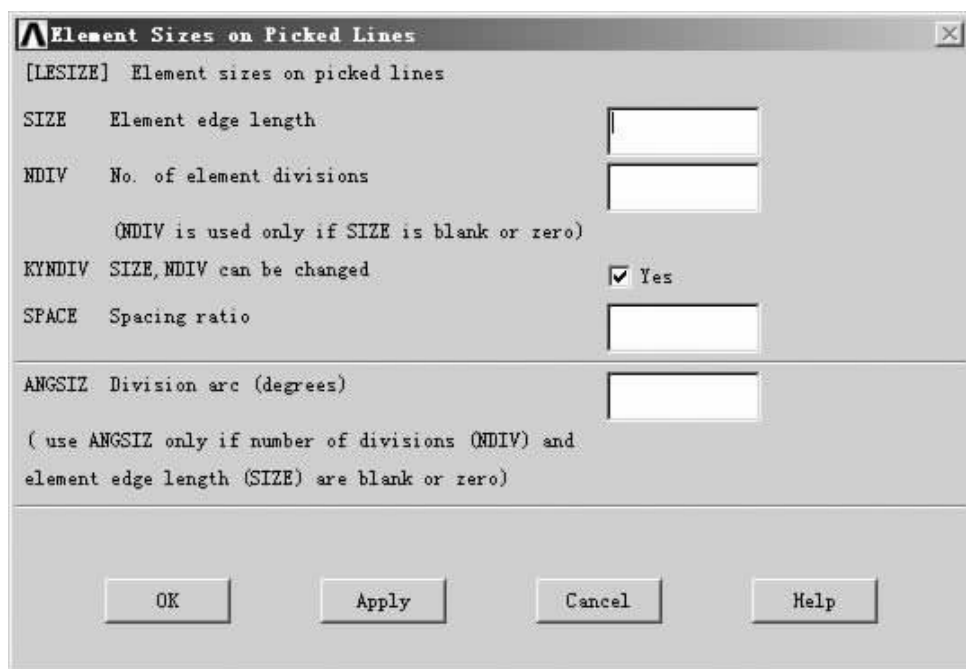


图 4-7 控制线段尺寸对话框

网格划分工具中,一般只用它的一两组功能,即可达到要求。这里有必要知道尺寸控制的优先级。

(1) 默认单元尺寸控制

最先考虑线的划分;关键点附近的单元尺寸作为第二级考虑对象;总体单元尺寸作为第三级考虑对象;默认尺寸最后考虑。

(2) 智能单元尺寸的优先顺序

最先考虑线的划分 ;关键点附近的单元尺寸作为第二级考虑对象 ,当考虑到小的几何特征和曲率时 ,可以忽略它 ;总体单元尺寸作为第三级考虑对象 ,当考虑到小的几何特征和曲率时 ,可以忽略它 ;智能单元尺寸设置最后考虑。

4. 指定单元形状与网格划分方式

首先在“Mesh”右侧的下拉式列表中选择要划分的对象(体、面、线、关键点) ,然后确定单元的形状 ,是“Tet”还是“Hex”。这个选项与网格划分方式是紧密相连的 ,如果选择“Tet” ,下面的网格划分方式自动变为“Free” ,即自由网格划分 ;否则对应的是“Map”(映射网格划分)或者“Sweep”(扫掠网格划分)。

5. 执行网格划分和清除网格

将上述参数设置完成之后 ,就可以单击 Mesh 按钮进行网格划分 ,这部分是由程序根据用户的设置自动进行。

如果用户对划分的网格不满意 ,可以通过“Clear”按钮将其清除。

4.4.2 自由网格划分

自由网格划分对实体模型的几何形状没有特殊的要求 ,无论其是否规则都可以实现网格化。一些局部细小区域的网格划分也选择自由网格划分方法。

所用的单元形状取决于划分对象 ,对面进行划分时 ,自由网格可以由四边形、三角形或者二者混合划分组成。也就是说 ,如果不是指定必须产生三角形单元的情况下 ,当面边界线分割数目为偶数时 ,生成的网格将会全部是四边形 ,并且单元质量较好 ;反之 ,形状很差的四边形单元会分解为三角形单元 ,即出现二者混合的情况。这要求用户在划分网格时要适当进行处理 ,例如选择支持多种形状的面单元或者通过选择 Smart Size 选项来让程序决定合适的单元数目。对于体的划分和面的划分类似 ,只是单元将是四面体或六面体。

网格的密度既可以通过单元尺寸进行控制 ,也可以采用智能划分。一般地 ,在自由网格划分时推荐使用智能尺寸设置。

4.4.3 映射网格划分

映射网格划分要求实体形状规则或者满足一定的准则 ,用户可以指定程序全部使用四边形、三角形、六面体产生映射网格 ,其网格密度也依赖于当前单元尺寸的设置。

要实现面映射网格划分 ,需要满足以下条件。

- ☞ 该面必须由 3 或者 4 条线组成 ,有 3 条边时划分的单元数为偶数且各边单元数相等。
- ☞ 面的对边必须划分为相同数目的单元 ,或者是可以形成过渡形网格划分的情况 ,如图 4-8 所示。

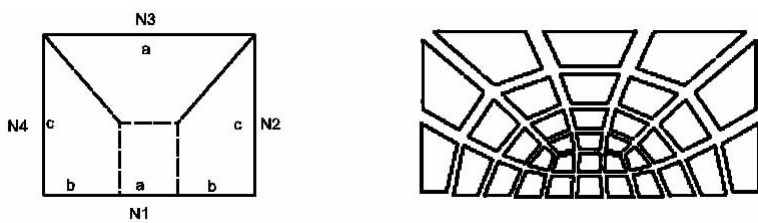


图 4-8 面的过渡映射网格划分

- ✎ 网格划分必须设置为映射网格(命令格式: MSHKEY,1),根据单元类型和形状的设置,可以得到全部是四边形或者三角形的映射网格。
- ✎ 如果面的边数多于4条,可以将部分线合并或者连接起来使边数降为4条。线的合并命令优先于线连接命令。

线合并命令在实体建模中已经讲过,不再重复。线连接的方法如下。

命令格式:

```
LCCAT ,NL1 ,NL2
```

菜单操作:

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

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

对于使用 IGES 默认功能输入的模型不能使用线连接命令,只能使用线合并命令进行操作。

要实现体全部是六面体形状的映射网格化,需要满足以下条件。

- ✎ 该体应为块状(6个面组成)、楔形、棱柱(5个面组成)、四面体(4个面组成)。如果是棱柱或者四面体,三角形面上的单元分割数必须是偶数。
- ✎ 对边必须划分为相同数目的单元,或者是可以形成过渡形网格划分的情况,如图4-9所示。(注意图中箭头指示的边的划分数目。)

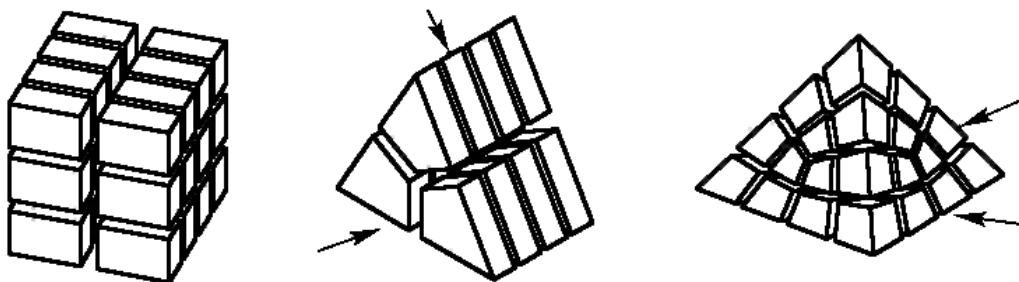


图4-9 体的过渡映射网格划分

- ✎ 如果体的面数多于4个,可以将部分面合并或者连接起来使面数下降。与线的操作类似,面连接的方法如下。

命令格式:

```
ACCAT ,NA1 ,NA2
```

菜单操作:

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

一般情况,当两面为平面或者共面时,面相加的效果比面连接要好。而且,在进行面连接之后一般还要进行线连接的操作。但要连接的两个面都由4条线组成时(无连接线),线连接操作会自动进行。

面连接同样不支持使用 IGES 默认功能输入的模型,也只有使用面相加命令来实现合并面的目的。

4.4.4 扫掠生成网格

1. 扫掠网格的使用

通过扫掠方式对体进行网格划分的基本过程是从体的一边界面(称为源面)扫掠整个体至另一界面(称为目标面)结束生成网格。体扫掠生成网格的优点如下。

- ✎ 适合对输入的实体模型进行网格划分。
- ✎ 对于不规则的体要生成六面体网格时,可以通过将体分解成若干可扫掠的部分来实现。
- ✎ 体扫掠对源面划分使用的单元没有限制。

在网格划分工具当中已介绍了如何激活扫掠划分的操作,一旦选择 Sweep 选项,其下相应的下拉列表也随之激活,它允许用户设置“源面/目标面”的指定方式,一是程序自动选择,二是由用户指定。那么,什么样的实体可以进行扫掠划分?对“源面/目标面”的要求又是什么呢?

- ✎ 体的拓扑结构能够进行扫掠,也就是说,可以找到合适的“源面/目标面”。
- ✎ 如果有合适的“源面/目标面”,不要求实体模型是等截面的,但截面的变化是线性的才有较好的结果。
- ✎ 源面和目标面的形状可以不同,但拓扑结构相同时,也可以成功进行扫掠操作。
- ✎ 源面和目标面不一定是平面或者二者平行。

当进行体扫掠划分失败时,可以通过一些办法重新尝试,例如交换“源面”和“目标面”、重新选择合适的“源面/目标面”、将实体划分成几部分以减少扫掠的长度等。

为了比较清楚地说明扫掠网格划分的过程,下面介绍一个实例。

2. 扫掠网格实例

【例 4-1】 应用工作平面分割实体等方法实现对实体的扫掠网格划分。

具体步骤如下。

启动 ANSYS,在指定工作目录下,以“grid”为文件名称开始一个新的分析。首先创建实体模型,步骤如下。

(1) 生成长方体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Block>By Dimensions,在弹出对话框上(第 3 章已给出图形,相同对话框出现不再详细说明)输入“x1=0,x2=4,y1=0,y2=2,z1=0,z2=2”,单击 OK 按钮。

(2) 平移工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments,在打开的浮动对话框中的“X,Y,Z Offsets”输入“1,1,0”,单击 OK 按钮。

(3) 创建第一个圆柱体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Solid Cylinder,在弹出对话框上的“WP X”和“WP Y”中输入“0”,在“Radius”输入“0.4”,“Depth”输入“2”,单击 OK 按钮。

(4) 平移并旋转工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments,在打开的浮动对话框中的“X,Y,Z Offsets”输入“2,-1,1”,单击 OK 按钮,在“XY,YZ,ZX Angles”中输入“0,-90,0”,单击 OK 按钮。

(5) 创建第二个圆柱体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Cylinder>Solid Cylinder,在弹出对话框上

的“WP X”和“WP Y”中输入“0”，在“Radius”输入“0.4”，“Depth”输入“2”，单击 OK 按钮。

(6) 将工作平面恢复到原始位置

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian。

(7) 将两个圆柱体从长方体中减去

依次选择 Main Menu>Preprocessor> Modeling-Operate > Subtract > Volumes 拾取长方体作为布尔“减”操作的母体，单击 Apply 按钮，拾取第一个圆柱作为要“减”去的对象，单击 Apply 按钮。再次拾取长方体，单击 Apply 按钮，拾取第二圆柱体，单击 OK 按钮。如图 4-10(a)所示。

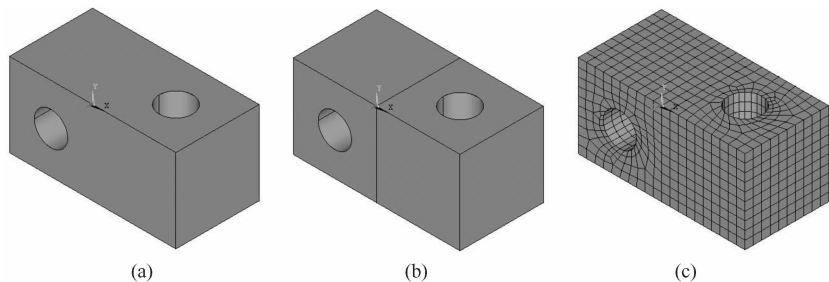


图 4-10 扫掠网格划分

然后选择单元并划分网格，步骤如下。

(1) 选择单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，在弹出的对话框中选择 Add 按钮，在左侧 Structural 中选择“Solid”，然后从右侧选择“Brick 8node 45”，单击 OK 按钮，单击 CLOSE 按钮。

(2) 平移并旋转工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments，在打开的浮动对话框中的“X,Y,Z Offsets”输入“2 0 0”，单击 OK 按钮；“XY,YZ,ZX Angles”输入“0 0 90”，单击 OK 按钮。

(3) 用工作平面切分长方体

依次选择 Main Menu>Preprocessor> Modeling-Operate > Divide> Volu by WorkPlane，拾取要切分的体，单击 OK 按钮。

(4) 将工作平面恢复到原始位置

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian。

如图 4-10(b)所示。

(5) 打开网格划分根据并设置网格大小

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool，在打开的对话框上选项 Size Control 菜单中的 Lines 选项，单击右侧的 Set 按钮，拾取需要设置的一组线，单击 OK 按钮，在打开的对话框上的“NDIV”输入 10，单击 OK 按钮。

(6) 实现扫掠网格划分

在 MeshTool 对话框上指定 Mesh 为“Volumes”，在 Shape 中选择“Hex/Wedge”和“Sweep”，单击 Sweep 按钮，拾取要划分网格的实体，单击 OK 按钮。如图 4-10(c)所示。

4.5 网格的局部细化

网格的局部细化属于 ANSYS 修改模型的方法之一,本节主要介绍对特殊形状和需求的实体进行网格局部细化的过程、高级参数的控制、细化后原有单元属性和载荷的转换、局部细化网格具有的特征等。

4.5.1 局部细化一般过程

用户在前述之后就可以完成网格的划分工作,但在如下情况下,用户可以进一步考虑进行网格的局部细化处理。

- ✎ 用户在完成了模型的网格划分之后,希望在模型的某一指定区域内得到更好的网格。
- ✎ 用户已经完成了分析过程,但根据计算结果希望在感兴趣的区域得到更为精细的求解。

值得说明的是,对于所有由四面体组成的面网格和体网格,ANSYS 程序允许在指定的节点、单元、关键点、线或者面的周围进行局部网格细化。由非四面体所组成的网格(如六面体、楔形、棱锥)不能进行局部网格细化。一般网格细化的步骤如下。

首先,选择图元(或者一组图元)为对象,围绕其进行网格细化。

其次,指定细化程度,即指定细化区域相对于原有网格的尺寸。细化后的单元一定比原有单元小。

使用网格划分工具上的局部细化部分,或者通过命令格式,或者菜单操作都可以实现网格细化过程。例如,对如图 4-11(a)所示已经划分好的网格进行局部细化操作的过程如下。

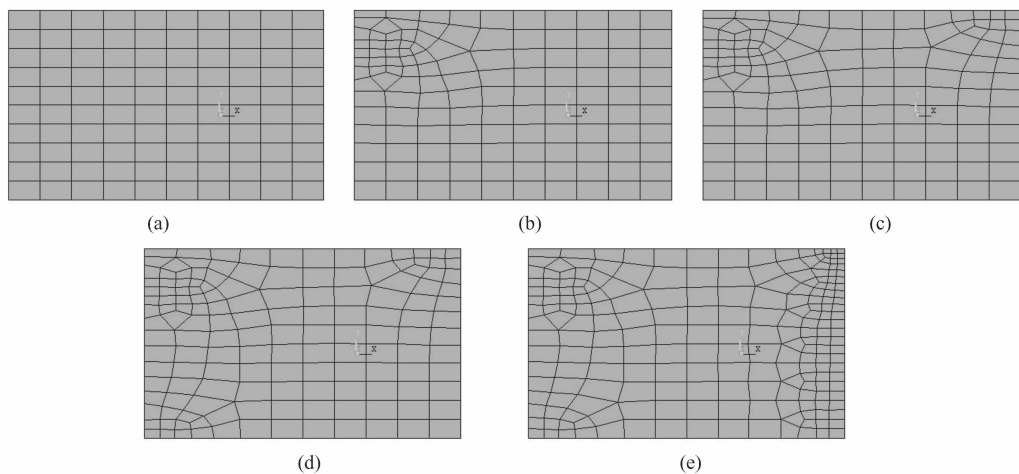


图 4-11 在指定区域进行网格局部细化

(1) 围绕指定节点进行细化操作

命令格式：

NREFINE, NN1, NN2, NINC, LEVEL, DEPTH, POST, RETAIN

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Meshing-Modify Mesh>Refine At > Nodes

该操作指定左上角的某个节点,效果如图 4-11(b)所示。

(2) 围绕指定单元进行细化操作

命令格式：

```
EREFINE, NE1, NE2, NINC, LEVEL, DEPTH, POST, RETAIN
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Meshing-Modify Mesh>Refine At> Elements

该操作指定右上角的一个单元,效果如图 4-11(c)所示。

(3) 围绕指定关键点进行细化操作

命令格式：

```
KREFINE, NP1, NP2, NINC, LEVEL, DEPTH, POST, RETAIN
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Meshing-Modify Mesh>Refine At> Keypoints

该操作指定左下角的关键点,效果如图 4-11(d)所示。

(4) 围绕指定线段进行细化操作

命令格式：

```
LREFINE, NL1, NL2, NINC, LEVEL, DEPTH, POST, RETAIN
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Meshing-Modify Mesh>Refine At> Lines

该操作指定长方形的右边,效果如图 4-11(e)所示。

(5) 围绕指定面进行细化操作

命令格式：

```
AREFINE, NA1, NA2, NINC, LEVEL, DEPTH, POST, RETAIN
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Meshing-Modify Mesh>Refine At> Areas

该操作对已经划分好单元的长方体(如图 4-12(a)所示)的两个面进行了程度不同的细化操作。对面向读者的左侧面进行了程度最低(LEVEL=1)的细化,对右侧面进行了程度最高(LEVEL=5)的细化,效果如图 4-12(b)所示。

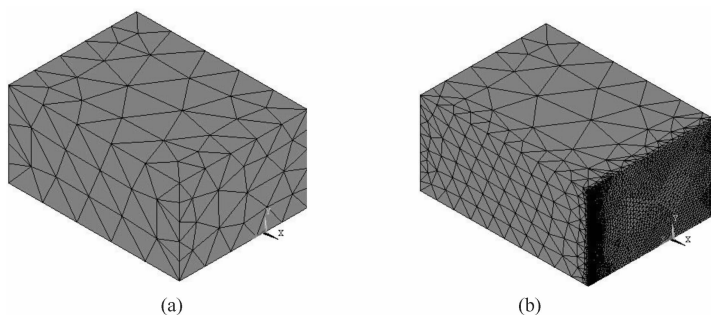


图 4-12 指定面进行网格局部细化

4.5.2 高级参数的控制

实现局部细化的命令或者菜单操作过程中,有几个参数需要用户指定,对这些高级参数的控制可以有效达成用户对局部细化的要求。

1. 细化的程度

局部细化中的“LEVEL”参数用来指定细化的程度。“LEVEL”值必须是从1~5的整数,值为1时细化的程度最低,此时在细化区域得到的单元边界长度大约是原有单元边界长度的 $1/2$,值为5时细化的程度最高,此时得到的单元边界长度大约是原有单元边界长度的 $1/9$ 。那么,其中2、3、4的取值设置,得到的单元长度分别大约是原有单元长度的 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 。

“LEVEL”数值的选择与参数“RETAIN”也是有关系的,相关内容在后面介绍。

2. 细化的深度

局部细化中的“DEPTH”参数用来指定细化的深度,即指定图元周围有多少单元要被细化。默认状态下,取值为0,即只有所选图元外面的一个单元参与细化。当取值逐渐增大时,参与细化的单元也随之增加。例如,当用户指定对某一边界线里侧的单元进行细化时,默认设置下只对里侧一层单元进行局部细化,如图4-13(a)所示;当取值为1时,对里侧两层单元进行细化,如图4-13(b)所示;依此类推。但细化深度不是无限制的,当取值为2时,针对图4-13中的情况就已经是对全部单元进行细化了,即使用户继续增加取值,也没有变化了,即细化深度达到最大。

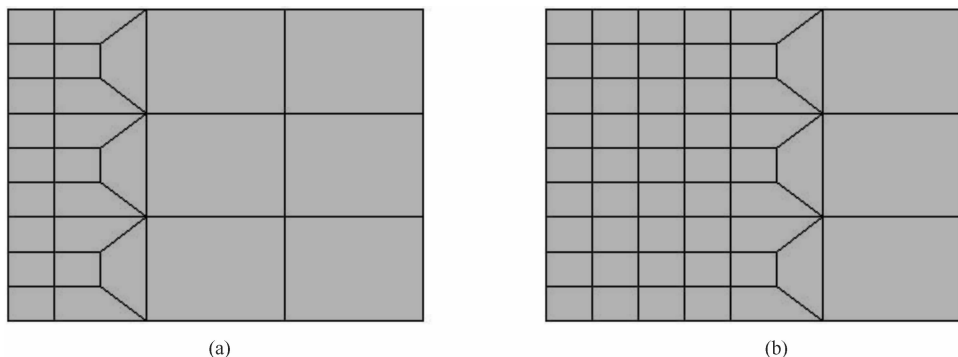


图 4-13 细化深度的意义

3. 细化区域的后处理

作为细化过程的一部分,细化区域的后处理是指原始单元分裂后,新生单元与老单元之间如何过渡和连接。用户由此可以选择“光滑和清理”、“只进行光滑操作”或者“两者皆不”。这项参数的控制通过“POST”来实现。

当选项指定为“OFF”时的效果如图4-13所示,新旧单元之间没有过渡;当选项指定为“Clean & Smooth”时,程序自动在新旧单元之间进行光滑和清理工作,效果如图4-14(a)所示;当选项指定为“Smooth”时,程序只进行光滑处理,效果如图4-14(b)所示。通过上述效果的对比可以发现,适当的后处理选项和操作可以改善单元的形状质量。

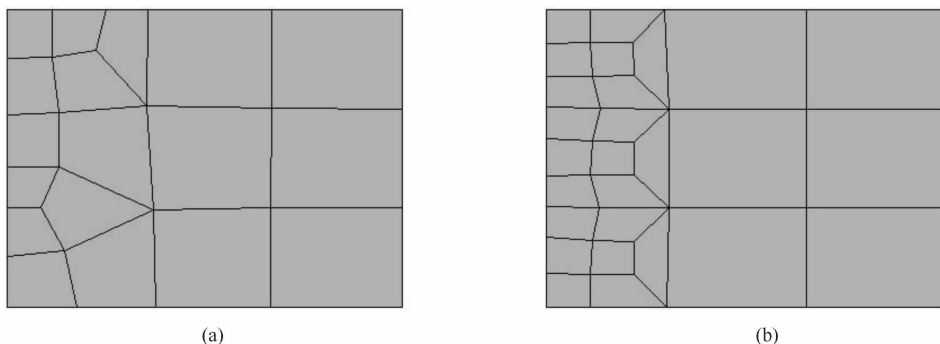


图 4-14 后处理选项的效果

4. 四边形单元是否保留的问题

在对四边形网格进行细化时,如果希望细化后得到的单元还是四边形,可通过参数“RETAIN”来实现。

默认状态下,参数设置为“ON”,这意味着细化过程不会引入三角形单元。如果设置为“OFF”,为了保持新旧单元之间的连续过渡有可能会包含一定数量的三角形单元,但通过“清理”操作可以使三角形单元保持在最少的状态。

对于四边形单元而言,在“RETAIN”打开状态下增加或者减少“LEVEL”取值不一定能够得到希望的细化结果。即使细化成功,所有四边形单元都保留下来,某些单元的形状也可能不好,特别是细化程度较高的情况下会更加严重,这样势必影响单元的质量。因此,有适当的少量三角形单元保留在过渡区域未必不可取,目的是得到比较好的单元质量。如果一定要保留所有的四边形单元,可以通过增加细化深度、或者设置清理操作等来避免或者减少三角形单元的出现。

4.5.3 属性和载荷的转换

通过网格细化过程,会产生新的网格状态,这些新的单元属性与原有单元属性是什么样的关系呢?事实上,与旧单元相关联产生的新单元属性自动继承了旧单元的单元属性,包括单元类型、材料特性、实常数和单元坐标系。

由于 ANSYS 允许用户将载荷施加在实体模型或者有限元模型上,载荷的转换有着不同的处理方式。对于实体模型加载,相应的载荷和边界条件在求解之前将转换到节点和单元上,因此实体模型载荷将正确地转换到细化产生的新单元和节点上;对于有限元载荷(即加在节点和单元上的载荷)就不能直接转换到细化后的新单元和节点上,而且程序不允许用户对带有载荷的单元进行细化操作,除非用户先将所加载荷删除,细化结束后再重新加载。

4.5.4 局部细化的其他问题

对于网格的局部细化操作,还需要注意以下问题。

- ✎ 网格细化只对用户指定的单元内进行,对其他单元没有影响。
- ✎ 如果用户使用“LESIZE”控制线段的分割数,这将会受到随后细化过程的影响,即会改变线的分割数。

- ✎ 局部细化对所有的面网格有效 ,但只能用于四面体单元组成的体网格中。
- ✎ 对包含有接触单元的区域不能进行网格细化。
- ✎ 如果有梁单元存在于细化区域附近 ,也不能进行细化操作。
- ✎ 在有初始条件的节点、耦合节点或者模型中存在约束方程的节点上 ,也不能实现细化操作。
- ✎ 在使用 ANSYS /LS-DYNA 模块时 ,不推荐使用局部网格细化。

4.6 网格的直接生成

通过实体建模后划分网格是最常用的实现有限元模型处理的一种方法 ,也是简便易行的方法之一。但有些情况下需要直接定义节点或者单元 ,进而生成网格。以本节介绍使用直接生成网格方法中节点和单元的定义。

4.6.1 关于节点的操作

1. 定义节点

(1) 定义单个节点

命令格式 :

```
N , NODE , X , Y , Z , THXY , THYZ , THZX
```

菜单操作 :

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>In Active CS
```

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>On Working Plane
```

在实际操作中 ,可以打开工作平面的捕捉功能 ,然后在图形窗口可以比较准确地通过拾取建立用户需要的节点。

(2) 在已有关键点处定义节点

命令格式 :

```
NKPT , NODE , NPT
```

菜单操作 :

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>On Keypoint
```

上述命令中的两个参数一个代表所建节点的编号 ,一个表示关键点的编号。如果“NPT”取值为“ALL” ,那么在所有关键点处都会建立一个相应的节点。

(3) 移动节点到交点处

命令格式 :

```
MOVE , NODE , KC1 , X1 , Y1 , Z1 , KC2 , X2 , Y2 , Z2
```

菜单操作 :

```
Main Menu>Preprocessor> Move /Modify>To Intersect
```

该命令的操作是与坐标相关的 ,而且命令可以计算或者直接选取交点的位置。

(4) 在两节点连线上生成节点

命令格式：

```
FILL , NODE1 , NODE2 , NFILL , NSTRT , NINC , ITIME , INC , SPACE
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Creat>Nodes>Fill between Nds
```

(5) 复制节点

命令格式：

```
NGEN , ITIME , INC , NODE1 , NODE2 , NINC , DX , DY , DZ , SPACE
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Nodes>Copy
```

该命令的操作通过将已有节点复制到指定位置。下面的命令也可以实现复制功能,但略有不同的地方在于,是通过控制新建节点与原有节点之间 3 向坐标的比例来实现的。

命令格式：

```
NSCALE , INC , NODE1 , NODE2 , NINC , RX , RY , RZ
```

菜单操作：

```
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 & Mov
```

(6) 镜像节点集

命令格式：

```
NSYM , Ncomp , INC , NODE1 , NODE2 , NINC
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Nodes
```

该命令的操作与前面接触到的镜像操作类似,只是镜像的对象是一组已经定义好的节点。

(7) 在弧线的曲率中心定义节点

命令格式：

```
CENTER , NODE , NODE1 , NODE2 , NODE3 , RADIUS
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>At Curvature Ctr
```

该命令的操作与“通过三点定义的圆弧中心定义关键点”的操作比较相似,允许用户指定弧线(或者 3 个节点)和曲率半径,然后在曲率中心处定义节点。

2. 查看和删除节点

当使用直接法定义节点时,常常需要查看节点的列表来掌握节点的编号、坐标等信息。通过下列方法可以实现节点的查看。

命令格式:

```
NLIST, NODE1, NODE2, NINC, Lcoord, SORT1, SORT2, SORT3
```

菜单操作:

Utility Menu>List>Nodes

Utility Menu>List>Picked Entities>Nodes

对已经定义好的节点还可以进行删除,一般在删除节点的同时,与节点相关的边界条件、载荷、耦合或者约束方程的定义也将随之删除。

命令格式:

```
NDELE, NODE1, NODE2, NINC
```

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Delete>Nodes

3. 移动节点

节点的移动实际上可以理解为对节点的修改,即修改已经定义的节点的坐标。

命令格式:

```
NMODIF, NODE, X, Y, Z, THXY, THYZ, THZX
```

菜单操作:

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

4. 计算两节点间的距离

命令格式:

```
NDIST, ND1, ND2
```

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Modeling-Check Geom>ND distances

该命令的结果是给出列表将用户计算的两节点之间的距离、3 向坐标的增量等信息汇报给用户。

5. 节点数据文件的读写

ANSYS 允许用户将已经生成的节点数据读入,这样方便与其他 CAD 程序相连。相反, ANSYS 也可以将节点数据文件输出。两项操作传递的文件格式是 ASCII 形式的。

(1) 从节点文件读入节点数据

命令格式：

NRRANG, NMIN, NMAX, NINC

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Read Node File

该命令允许用户指定文件某个范围内的节点,并将其读入。

(2) 从文件读入节点

命令格式：

NREAD, Fname, Ext, Dir

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Read Node File

该命令允许用户指定读入文件的名称、扩展名和路径,并将其读入。这个操作是方便用户将其他程序生成的节点数据文件载入到 ANSYS 中来。

(3) 将节点数据写入文件

命令格式：

NWRITE, Fname, Ext, Dir, KAPPND

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>Write Node File

该命令允许用户指定文件的名称、扩展名和路径,并将节点数据写入。

4.6.2 关于单元的操作

直接定义单元和从实体划分单元的共同之处就是也需要事先定义好单元的属性,并进行属性的分配。但是直接定义单元之前还需要定义好节点,并且是适合单元的节点数,例如要定义一个四边形单元至少要有 4 个节点存在。

1. 单元的定义

一旦设置好了单元属性,就可以通过已定义好的节点来定义单元了。事实上,节点的数目和输入顺序是由单元类型决定的。

(1) 定义单元

命令格式：

E, I, J, K, L, M, N, O, P

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Auto Numbered-Thru Nodes

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>User Numbered-Thru Nodes

命令中的 8 个参数代表单元的节点和排列顺序。而且如果使用命令定义单元只能定义 8

个节点。对于多与 8 个节点的单元,例如常见的 20 节点块单元,还需要“EMORE”命令来定义其他的节点。

(2) 复制单元

命令格式：

```
EGEN,ITIME,NINC,IEL1,IEL2,IEINC,MINC,TINC,RINC,CINC,SINC,DX,DY,DZ
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor> Modeling>Copy>Auto Numbered
```

(3) 镜像单元

命令格式：

```
ESYM,--,NINC,IEL1,IEL2,IEINC
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor> Modeling>Reflect> Auto Numbered
```

该命令的操作与前面接触到的镜像操作类似,只是镜像的对象是一组已经定义好的单元。上述复制和镜像操作不生成节点,用户必须事先定义节点,才能实现单元的复制或者镜像。新产生的单元属性与原有单元的属性保持一致,当前设置对其没有影响。

2. 查看和删除单元

与定义节点时类似,如果用户需要查看单元的列表可以通过下列方法可以实现。

命令格式：

```
ELIST,IEL1,IEL2,INC,NNKEY,RKEY
```

菜单操作：

```
Utility Menu>List>Elements
```

```
Utility Menu>List>Picked Entities>Elements
```

删除已经定义单元的操作如下。

命令格式：

```
EDELE,IEL1,IEL2,INC
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>Delete>Elements
```

3. 单元数据文件的读写

与读写节点数据文件一样,ANSYS 允许读写单元数据文件。

(1) 从单元文件读入单元数据

命令格式：

```
ERRANG,EMIN,EMAX,EINC
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Read Element File

该命令允许用户指定文件某个范围内的单元,并将其读入。

(2) 从文件读入单元

命令格式:

EREAD, Fname, Ext, Dir

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Read Element File

该命令允许指定读入文件的名称、扩展名和路径,并将其读入。这个操作是方便用户将其他程序生成的单元数据文件载入到 ANSYS 中来。

(3) 将单元数据写入文件

命令格式:

EWRITE, Fname, Ext, Dir, KAPPND, Format

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Write Element File

该命令允许用户指定文件的名称、扩展名和路径,并将单元数据写入。

4.7 网格的清除

有限元模型的等级是优于实体模型的,也就是说当划分好网格之后,如果想删除或者修改实体模型是不能直接实现的,必须要先将网格清除才能进行。清除命令可以认为是网格生成的反过程。清除操作可以通过两种方式进行,一是通过网格划分工具对话框上的 Clear 按钮,二是通过菜单选项。

Clear 按钮的使用十分方便,单击该按钮,在图形窗口直接拾取要清除的网格即可。当然,图形窗口要存在已经创建好的有限元模型,这个操作才有效。

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Clear

通过如图 4-15 所示菜单选项也可以实现网格的清除操作,例如选择“Volumes”就可以将与选定体相联系的节点和体单元清除。

一般在完成一次网格清除工作之后,程序会报告用户有多少图元被清除了。



图 4-15 网格清除选项

4.8 实例 轴承座的分析(2)

本实例将在第 3 章实例中建立的实体模型基础进行网格划分。

练习目的

在已经创建的实体基础上,进行单元选择、材料定义、基本网格划分。

具体步骤

进入指定工作目录下,仍以“example”为工作名称,恢复储存的数据。将前面建立的模型调入。需要说明的是,恢复已保存过的数据库有两种方式:一是从工具栏中直接单击 RESUME 按钮(Toolbar:RESUME),即将当前同名的数据库恢复;二是从应用命令菜单的“File”中选择相应选项,可以恢复同名或者异名的数据库。ANSYS 没有“Undo”操作,通过恢复上一步保存的数据库,可以起到“撤销”的作用,因此提醒初学者注意这一点,适时选择保存和恢复数据库操作。

(1) 定义材料特性

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Structural-Linear-Elastic-Isotropic,在弹出的对话框内设定“Young's Modulus EX”为“30e6”,单击 OK 按钮。

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE_DB),保存数据库文件。

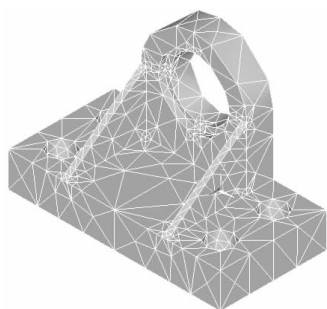


图 4-16 网格划分

(2) 用网格划分工具 MeshTool 将几何模型划分单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool,启动网格划分工具,将智能网格划分(Smart Sizing)设定为“on”;将滑动码设置为“8”(可选,如果计算机速度很快,可将其设置为“7”或更小值来获得更密的网格);确认 MeshTool 的各项为“Volumes”,“Tet”和“Free”;单击 MESH 按钮,然后选择 Pick All 按钮,单击 OK 按钮。关闭 MeshTool 对话框。效果如图 4-16 所示。

确定操作无误后,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE_DB),保存数据库文件。

练习题

1. 如何区分有限元模型和实体模型?
2. 网格划分的一般步骤是什么?
3. 单元属性的定义都有什么内容?如何实现?如何实现单元属性的分配操作?
4. 自由网格划分、映射网格划分和扫掠网格划分一般适用于什么情况的网格划分?使用过程中各需要注意什么问题?
5. 如何实现网格的局部细化?相关高级参数如何控制?

第 5 章 ANSYS 加载与求解

ANSYS 中加载方式有两种,一是直接加载在节点和单元上,二是加载在实体模型。无论载荷如何施加,最终都将传递到节点或者单元上来参与求解。本章介绍 ANSYS 加载和求解过程,在此之前,先了解一下 ANSYS 中负载的定义。

5.1 负载的定义

负载可分为边界条件(boundary condition)和实际外力(external force)两大类,在不同领域中负载的类型如下。

结构力学:位移、集中力、压力(分布力)、温度(热应力)、重力。

热学:温度、热流率、热源、对流、无限表面。

磁学:磁声、磁通量、磁源密度、无限表面。

电学:电位、电流、电荷、电荷密度。

流体力学:速度、压力。

以特性而言,负载可分为六大类:DOF 约束、力(集中载荷)、表面载荷、体积载荷、惯性力、耦合场载荷。

(1) DOF 约束(DOF constraint)

将给定某一自由度为已知值。例如,结构分析中约束被指定为位移和对称边界条件;在热力学分析中指定为温度和热通量平行的边界条件。

(2) 力(Force)

为施加于模型节点的集中载荷。如在模型中被指定的力和力矩。

(3) 表面载荷(Surface load)

为施加于某个面的分布载荷。例如在结构分析中为压力。

(4) 体积载荷(Body load)

为体或场的载荷。在结构分析中为温度和 fluences。

(5) 惯性载荷(Inertia loads)

由物体惯性引起的载荷,如重力和加速度、角速度和角加速度。

(6) 耦合场载荷(Coupled-field loads)

为以上载荷的一种特殊情况,从一种分析得到的结果用作为另一种分析的载荷。

5.2 有限元模型的加载

将载荷施加在节点或者单元上,不需要程序进行转化,减少分析问题可能出现的困难,不必考虑可能出现过约束情况。但是,这种施加载荷的方式也有不方便之处,例如对有限元模型进行了修正,就必须将已经施加的载荷删除,然后重新施加。而且在实际操作中,节点和单元

的选择没有图元对象的选择那么方便。

5.2.1 节点自由度的约束

(1) 普通约束

对于结构分析来说,自由度的约束体现在位移上,通过给定 3 向坐标的值(一般情况下值为 0),体现约束的位移。

命令格式:

```
D, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6
```

菜单操作:

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Nodes

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Nodes

执行操作后,在图形窗口内直接拾取要约束的节点,单击 OK 按钮,在弹出的 Apply U, ROT on Nodes 对话框上(如图 5-1 所示)选择约束方向和键入数值。

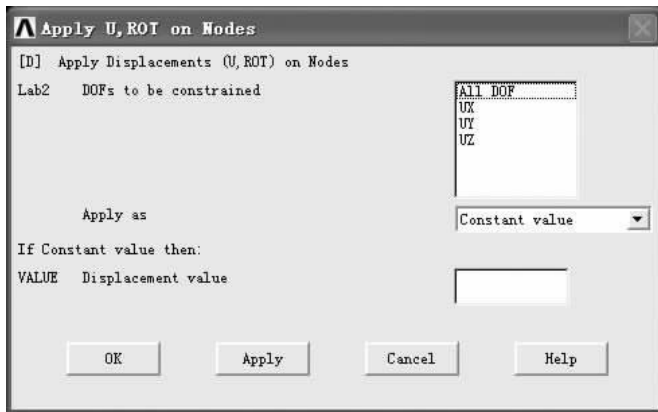


图 5-1 节点约束对话框

(2) 对称约束

节点的对称约束可以是平面(关于线对称),也可以是三维的(关于面对称),首先也将对称的节点全部选中,然后执行下述操作。

命令格式:

```
DSYM, Lab, Normal, KCN
```

菜单操作:

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> Symmetry B.C.> On Nodes

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> Symmetry B.C.> On Nodes

在弹出的 Apply SYMM on Nodes 对话框上(如图 5-2 所示)选择对称面(或者线)的法向

坐标轴、坐标系编号。

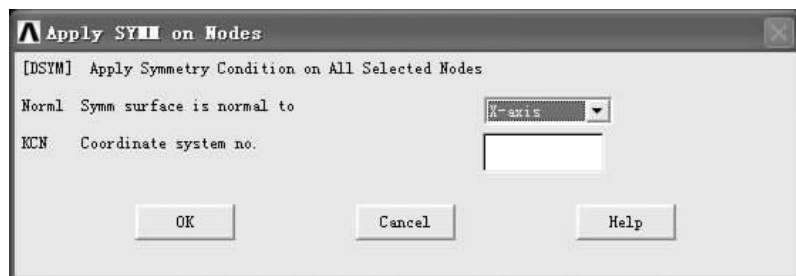


图 5-2 节点对称约束对话框

(3) 反对称约束

节点的反对称约束与对称约束基本相同,只是菜单位置略有不同。

命令格式:

DSYM, Lab, Normal, KCN

菜单操作:

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> Antisymm B.C.> On Nodes

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> Antisymm B.C.> On Nodes

5.2.2 节点载荷的施加

如图 5-3(a)所示,结构部分的载荷施加选项,在每一个选项下面都有对节点施加载荷的选择。以施加力或者力矩为例,如图 5-3(b)所示。



图 5-3 载荷施加选项

菜单操作:

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes

执行操作以后,在图形窗口内直接选择力或者力矩作用的节点,然后在弹出的 Apply F/M on Nodes 对话框上(如图 5-4 所示),指定力的作用方向、力的方式(常量还是曲线)和数值(对于常量有效)。

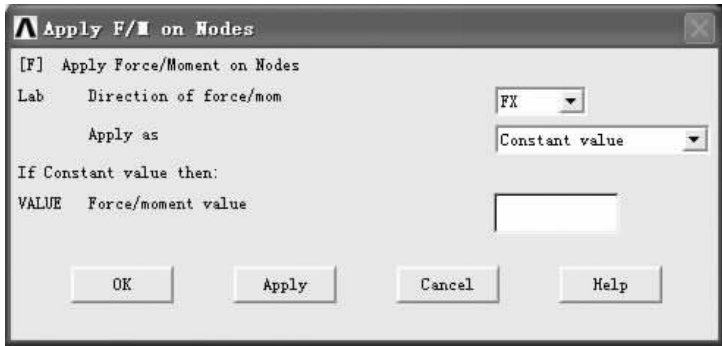


图 5-4 施加节点作用力 /力矩对话框

5.2.3 单元载荷的施加

单元载荷的施加与节点载荷施加是一样的 ,区别在于不是所有负载形式都可以作用在单元上。对于结构问题来说 ,只有压力和温度可以施加在单元上。其余操作参见节点施加即可。

5.3 实体模型的加载

相对于有限元模型的加载 ,实体模型的加载在操作时要方便得多 ,而且由于实体模型不参与分析计算 ,当改变单元和节点划分情况时 ,无需重新施加载荷 ,程序可以自动将施加在实体模型上的载荷传递到有限元模型上。也正因为如此 ,有时会出现关键点过约束的问题 ,初学者如果遇到这种情况就不容易查找到原因。

在实体模型上施加载荷和在有限元模型施加载荷的操作类似 ,菜单位置也大致相同 ,只是根据情况选择载荷作用的位置 ,即关键点、线、面。

5.3.1 关键点上载荷的施加

1. 约束关键点

命令格式 :

KD ,KPOI ,Lab ,VALUE ,VALUE2 ,KEXPND ,Lab2 ,Lab3 ,Lab4 ,Lab5 ,Lab6

菜单操作 :

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Keypoints
Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Keypoints

命令格式中的 KPOI 为要约束的关键点的编号 ,VALUE 为受约束点的值。Lab1~Lab6 与 D 相同 ,可借着 KEXPND 去扩展定义在不同点间节点所受约束。如果通过菜单操作执行 ,则在图形窗口直接拾取要约束的关键点 ,确定以后打开如图 5-5 所示对话框 ,其上各选项的意义与图 5-1 类似。

2. 定义集中外力

仍以结构问题定义力 /力矩为例 ,命令格式和菜单操作如下。

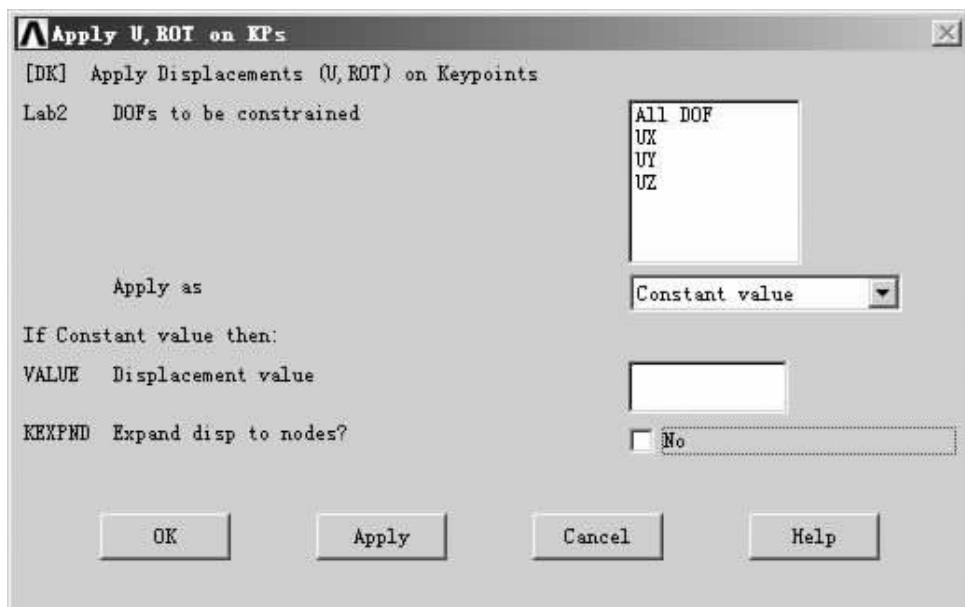


图 5-5 约束关键点对话框

命令格式：

FK ,KPOI ,Lab ,VALUE1 ,VALUE2

菜单操作：

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints

Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints

该命令在关键点(Keypoint)上定义集中外力(Force),KPOI 为关键点的编号,VALUE 为外力的值。如果通过菜单操作执行,则在图形窗口直接拾取施加外力的关键点,确定以后打开如图 5-6 所示对话框,其上各选项的意义与图 5-4 类似。

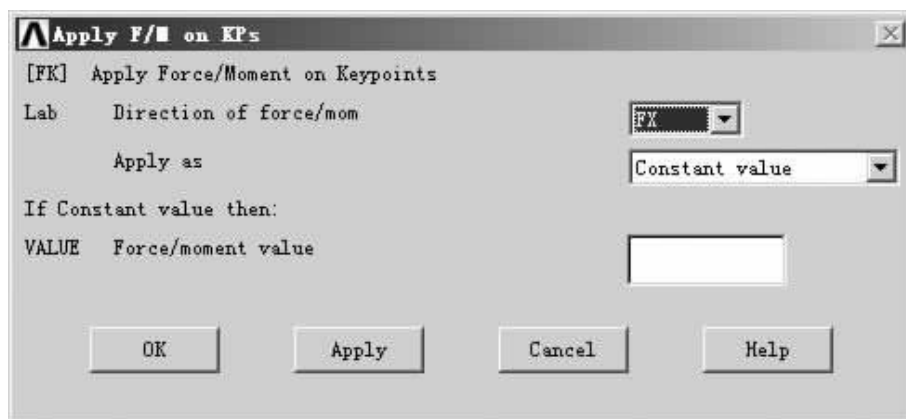


图 5-6 施加关键点外力/力矩对话框

5.3.2 线段上载荷的施加

1. 约束

命令格式：

```
DL ,LINE ,AREA ,Lab ,Value1 ,value2
```

菜单操作：

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Lines

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Lines

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Symmetry B.C.>On Lines

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Symmetry B.C.> On Lines

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Antisymm B.C.>On Lines

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Antisymm B.C.> On Lines

在线段上定义约束条件(Displacement)LINE ,AREA 为受约束线段及线段所属面的号码。Lab 增加了对称(Lab = SYMM)与反对称(Lab = ASYM) ,Value 为约束的值。通过菜单操作的过程更加直观和易于理解,在图形窗口拾取要约束的线段,确定后通过类似图 5-1 或者图 5-5 所示的对话框,给定约束方向和具体数值就可以。如果是约束对称或者反对称线段则程序直接执行,不需要用户给定约束方向和数值。

2. 定义分布力

命令格式：

```
SFL ,LINE ,Lab ,VALI ,VALJ ,VAL2I ,VAL2J
```

菜单操作：

Main Menu> Preprocessor> Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Pressure>On Lines

该命令在面的某线上定义分布力作用的方式和大小,应用于 2-D 的实体模型表面力。LINE 为线段的号码,VALI ,VALJ ,VAL1I ,VAL2I 为当初建立线段时点顺序的分布力值。如图 5-7(a)所示。

通过菜单操作,在图形窗口直接拾取施加分布力的线段,确定后弹出如图 5-7(b)所示对话框,其上允许用户选择分布力作用的方式和大小,如果是均布力,则给定具体数值,如果不是,则通过数组参数来定义。作用方式的选择通过“Apply PRES on lines as a”右侧的下拉列表来选择。

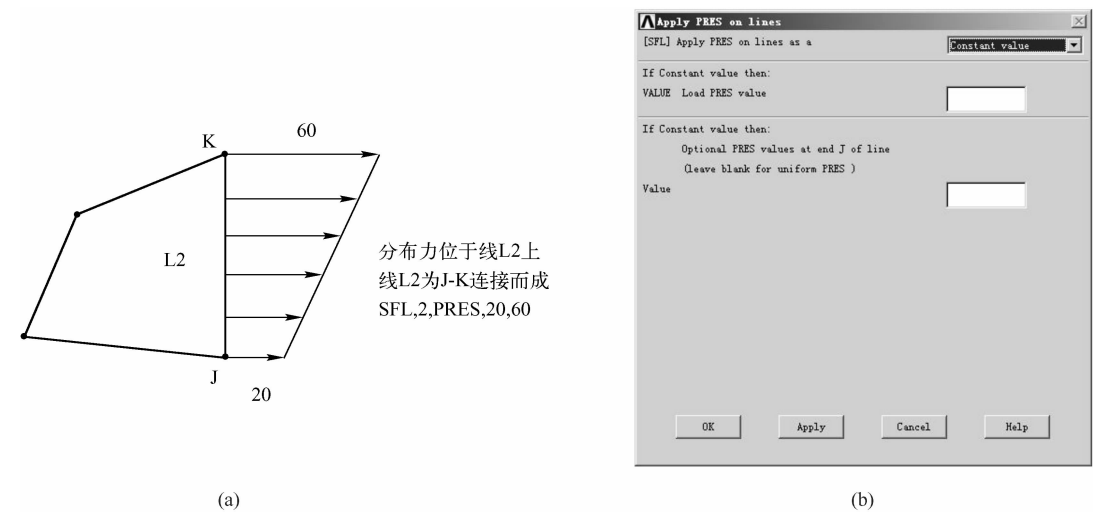


图 5-7 线上分布力的加载

5.3.3 面上载荷的施加

1. 约束

命令格式：

DA ,AREA ,Lab ,Value1 ,Value2

菜单操作：

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Areas

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> On Areas

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Symmetry B.C.>On Areas

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Symmetry B.C.> On Areas

Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Antisymm B.C.>On Areas

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Displacement> Antisymm B.C.> On Areas

定义面的约束条件的参数含义、菜单操作、对话框等相关内容与约束线段基本相同 ,留给读者自行练习 ,不再赘述。

2. 定义分布力

命令格式：

SFA ,AREA ,LKEY ,Lab ,VALUE1 ,VALUE2

菜单操作：

Main Menu> Preprocessor> Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas

Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural>Pressure>On Areas

该命令在体的面上定义分布力作用的方式和大小 ,应用于 3-D 的实体模型表面力。AREA 为面积的号码 ,LKEY 为当初建立体积时面积的顺序 ,选择 AREA 与 LKEY 其中的一个输入 ,VALUE 为分布力的值。其他操作与在线段上施加分布力的过程类似。

5.4 求解

5.4.1 分析类型的选择

在 Main Menu> Solution>Analysis Type 路径下有 3 个选项提供给用户定义分析类型。

一般情况下 ,用户进行的都是新的分析 ,即第一个选项“New Analysis” ,打开如图 5-8 所示的 New Analysis 对话框 ,可以选择不同问题的分析方法 ,例如静力、模态、瞬态 ,等等。

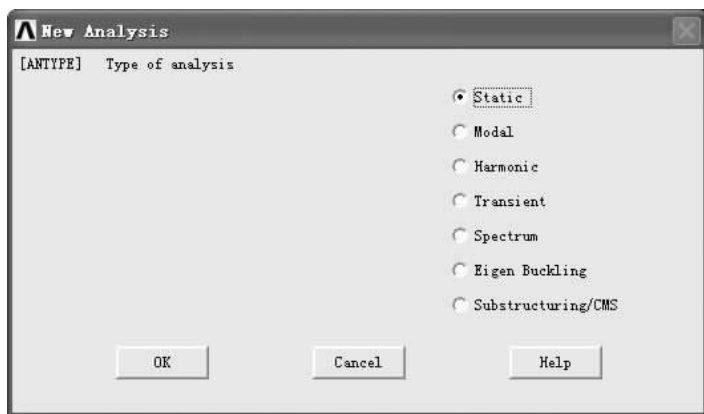


图 5-8 分析类型的选择

ANSYS 还提供重启动功能 ,用于接续未完成的分析工作 ,这部分将在下篇中详细介绍。

选择第 3 选项即打开如图 5-9 所示的 Solution Controls 对话框 ,对求解器的一些参数进行控制。

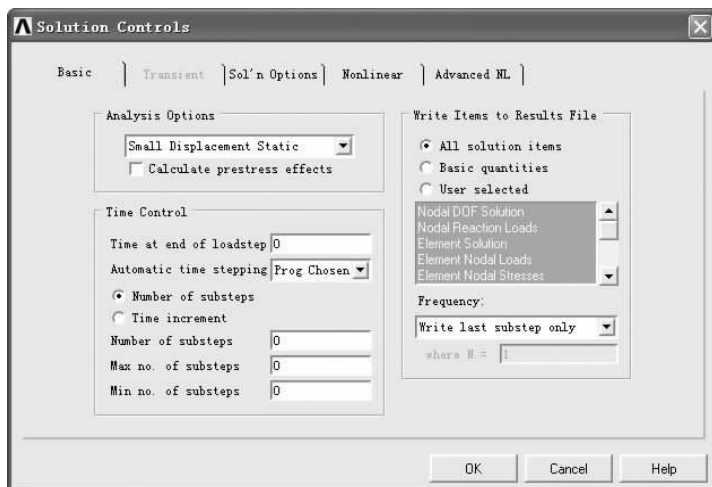


图 5-9 求解器控制对话框

5.4.2 加载与求解实例

【例 5-1】如图 5-10 所示 $E=30e6$,两端压力为 100 ,中心孔内线压分布力 500 向外 ,取对称进行分析。对实体进行网格划分后加载 ,求解并查看结果。

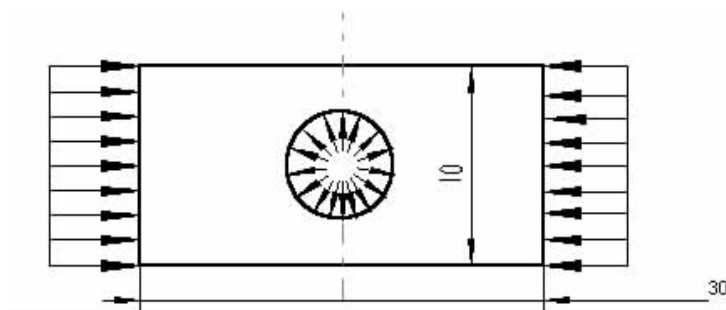


图 5-10 加载和求解实例

具体步骤如下。

启动 ANSYS ,在指定工作目录下 ,以“load”为文件名称开始一个新的分析。由于该结构为对称的 ,所以可以取一半进行分析。

1. 创建实体模型

(1) 生成长方形

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Rectangle>By Dimensions ,弹出如图 5-11 所示对话框。输入 $x1=0$, $x2=15$, $y1=-5$, $y2=5$,单击 OK 按钮。

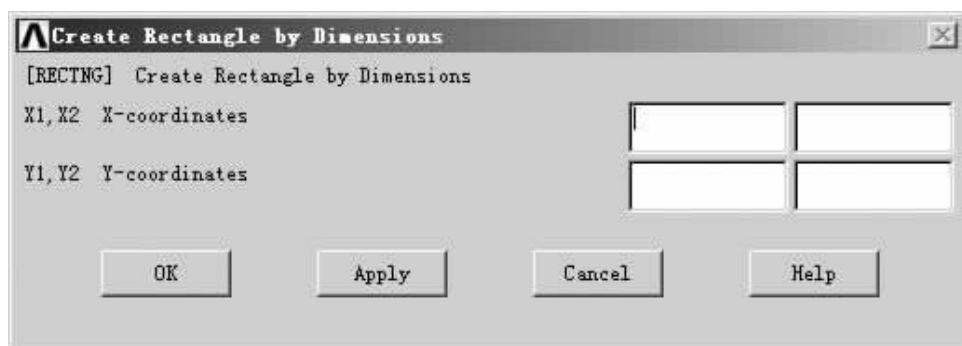


图 5-11 由具体尺寸创建长方形对话框

(2) 生成圆

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Create>Circle>Solid Circle ,弹出如图 5-12 所示的对话框。输入 $WP\ x=0$, $WP\ y=0$,Radius=2 ,单击 OK 按钮。

(3) 从长方形中减去圆

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Operate>Subtract>Areas ,拾取长方形 ,单击 Apply 按钮 ,然后拾取圆 ,单击 OK 按钮。

确定操作无误后 ,在工具栏(Toolbar)中选择保存数据库按钮(SAVE _ DB) ,保存数据库文件。

2. 定义单元属性并划分网格

(1) 选择单元

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete, 在弹出的对话框中选择 Add 按钮, 在左侧 Structural 中选择“Solid”, 然后从右侧选择“Quad 4node 42”, 单击 OK 按钮, 单击 CLOSE 按钮。

(2) 定义材料

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Structural-Linear-Elastic-Isotropic, 默认材料号 1, 在“Young's Modulus EX”下输入“ $30e6$ ”, 单击 OK 按钮。

(3) 打开网格划分根据并设置网格大小

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool, 在打开的对话框中选择 Size Control 菜单中的 Lines 选项, 单击右侧的 Set 按钮, 拾取需要设置的一组线, 单击 OK 按钮, 在打开的对话框上的 SIZE 输入 1, 单击 OK 按钮。

(4) 实现自由网格划分

在 MeshTool 对话框上指定 Mesh 为“Areas”, 在 Shape 选择“Quad”和“Free”, 单击 Mesh 按钮, 拾取要划分网格的实体, 单击 OK 按钮。

3. 加载和求解

(1) 约束对称边界

依次选择 Main Menu > Solution > loads-Apply > Structural-Displacement > Symmetry B.C. -On lines, 拾取左侧圆弧上下的线, 单击 OK 按钮。

(2) 施加两端压力

依次选择 Main Menu > Solution > loads-Apply > Structural-Pressure > On lines, 拾取右侧的线, 在弹出对话框上输入 100, 单击 OK 按钮。

(3) 施加中心孔压力

依次选择 Main Menu > Solution > loads-Apply > Structural-Pressure > On lines, 拾取圆弧线, 在弹出对话框上输入 500, 单击 OK 按钮。

(4) 选择所有元素

依次选择 Utility Menu > Select > everything。用户在实体建模、有限元建模过程中, 操作的步骤很多, 经常会选择模型的部分元素(例如某些点、线、面、体或者单元节点等)进行一些设置或者操作。因此, 在求解之前, 一般有必要执行这一步的所有元素选择, 以免在后续求解中出错。

求解之前必须保存数据库文件。

(5) 求解

依次选择 Main Menu > Solution > Solve-Current LS。

4. 查看结果

依次选择 Main Menu > General Postproc > Plot Results, 在弹出的对话框中选择要查看的结果, 图 5-13 所示为位移和应力结果。

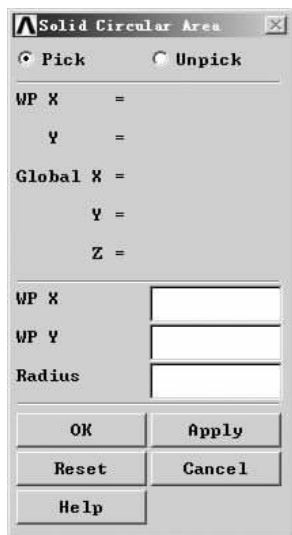


图 5-12 定义实心圆面对话框

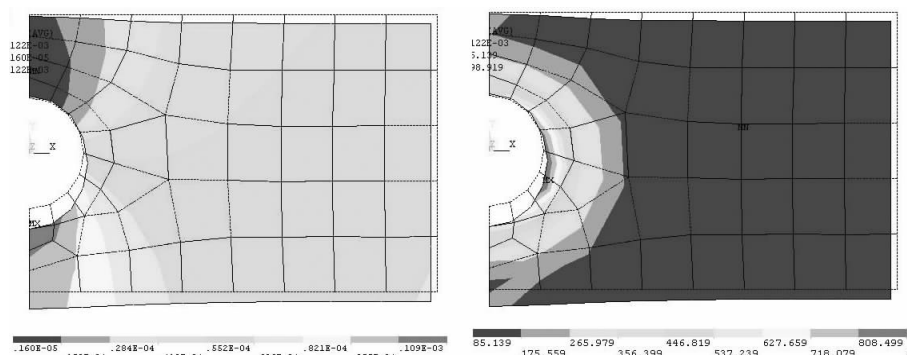


图 5-13 变形和应力结果

5.5 实例 轴承座的分析(3)

【例 5-2】 在上两章完成的有限元模型基础上 ,施加必要的载荷和约束 ,并进行求解。具体步骤如下。

1. 模型加载

(1) 约束四个安装孔

依次选择 Main Menu>Solution > Loads-Apply > Structural-Displacement > Symmetry B.C.-On Areas ,拾取四个安装孔的 8 个柱面(每个圆柱面包括两个面) ,单击 OK 按钮。

(2) 整个基座的底部施加位移约束 ($U_Y=0$)

依次选择 Main Menu>Solution> Loads-Apply > Structural-Displacement > on Lines ,拾取基座底面的所有外边界线 ,picking menu 中的“count”应等于 6 ,单击 OK 按钮。选择 U_Y 作为约束自由度 ,单击 OK 按钮。

(3) 在轴承孔圆周上施加推力载荷

依次选择 Main Menu>Solution > Loads-Apply > Structural-Pressure > On Areas ,拾取轴承孔上宽度为“.15”的所有面 ,单击 OK 按钮 ,输入面上的压力值“1000” ,单击 Apply 按钮。

(4) 用箭头显示压力值

依次选择 Utility Menu>PlotCtrls > Symbols ,将“Show pres and convect as”选择为“Arrows” ,单击 OK 按钮。如图 5-14(a)所示。

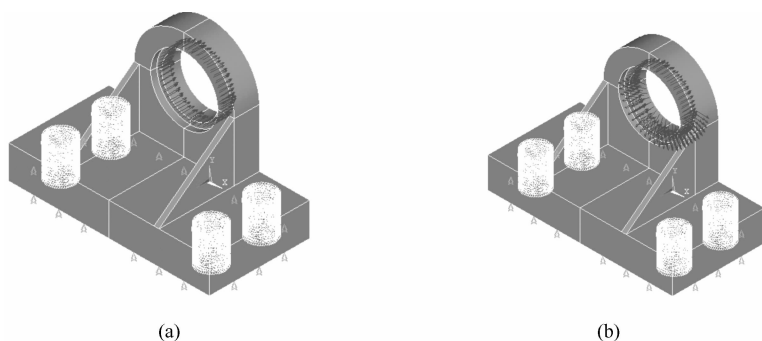


图 5-14 实体模型加载

(5) 在轴承孔的下半部分施加径向压力载荷(这个载荷是由于受重载的轴承受到支撑作用而产生的)

依次选择 Main Menu>Solution > Loads>Apply > Structural-Pressure > On Areas 拾取宽度为“.1875”的下面两个圆柱面,单击 OK 按钮,输入压力值 5 000,单击 OK 按钮。如图 5-14(b)所示。

2. 求解

依次选择 Main Menu>Solution > Solve-Current LS,浏览状态窗口中出现的信息,然后关闭此窗口,单击 OK 按钮(开始求解,并关闭由于单元形状检查而出现的警告信息);求解结束后,关闭信息窗口。

练习题

1. 负载是如何定义和分类的?
2. 在有限元模型上加载时,节点自由度的约束有几种?如何实现节点载荷的施加?
3. 与有限元模型加载相比,实体模型加载有何优缺点?如何实现在点、线和面上载荷的施加?

第 6 章 ANSYS 后处理

有限元方法分析问题得到的是数值结果,要想从这些数值中总结出各种场量的变化规律并不容易,而且工作量大。大型商业软件一个突出优势就是后处理部分,将分析结果可视化,帮助用户快捷、有效地分析计算结果。因此,ANSYS 后处理提供用户浏览分析结果的功能,这可能是用户分析问题过程中最重要的步骤之一,因为分析问题的最终目标是通过结果为用户的设计服务。

ANSYS 后处理器有两种:一是通用后处理,也称为 POST1;二是时间历程后处理,也称为 POST26。

6.1 POST1 后处理器

POST1 允许用户查看指定求解步骤上的整个模型的计算结果,包括位移(即变形)、应变和应力等,还可以查看结果的动画显示和控制,应用路径方法观察结果的过程及一些偏差处理的查看等。下面简单介绍比较常用的几种查看结果的方法。

一旦用户完成了求解过程,在 POST1 中就会出现 Plot Results 菜单选项,如图 6-1 所示。

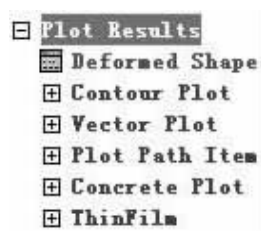


图 6-1 绘制结果选项

6.1.1 变形图的绘制

变形图的绘制可通过 Deformed Shape 选项来完成,主要观察模型的变形情况。单击该选项打开如图 6-2 所示 Plot Deformed Shape 对话框,其上有 3 个选项,将分别显示模型变形情况、共同显示模型变形和未变形前网格情况、共同显示模型变形和未变形前边界情况。通过这些选项,可以很容易观察和对比模型变形前后的差异。

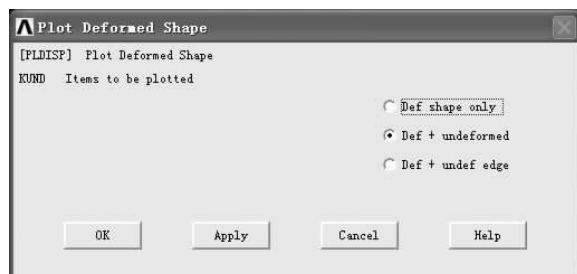


图 6-2 变形图绘制对话框

6.1.2 等值线图的绘制

等值线图的绘制,即所谓的云图绘制,主要通过颜色的变化来体现变形情况,包括位移、应变、应力等。通过在 Plot Results 菜单中选择 Contour Plot 选项来完成,其下仍有“节点结果”、“单元结果”等若干选项。以节点结果为例,打开如图 6-3 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框,通过对话框中的选项可以指定要显示的内容,即观察位移(包括沿 3 向坐标方向的位移和旋转角度等)、应变(包括沿 3 向坐标轴方向的应变、剪切应变、主应变、等效应变等)、应力(包括沿 3 向坐标轴方向的应力、剪切应力、主应力、等效应力等)等,是否对比显示变形前的情况,指定插值点数等。

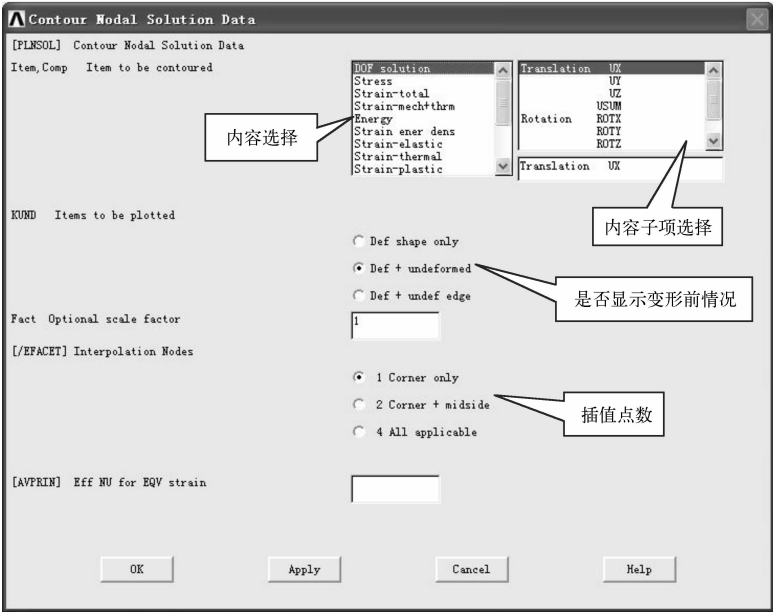


图 6-3 节点等值线图绘制对话框

6.1.3 路径的定义和使用

路径的定义和使用允许用户自由观察模型任意位置的变形情况,并且以曲线的形式展示变化过程。定义路径的数量不限,同一路径下可以映射多个结果,可以单独显示也可以显示在同一坐标系下,这对于对比结果十分方便。下面以第 5 章中工作名为“load”的分析为例,说明路径的定义和使用。

1. 定义路径

依次选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes,在圆孔周围拾取第一组节点,单击 OK 按钮,在弹出的对话框中输入路径名称“P1”,其余选择默认选项,单击 OK 按钮。进行类似操作,在右侧边部拾取第二组节点,名为“P2”。通过这样的方法可以定义多个路径。

需要说明的是,除了可以通过节点定义路径外,还可以通过工作平面、坐标位置等定义路径。定义好的路径可以修改、可以查看。

2. 将结果映射到路径

如果用户定义了多个路径,可以通过依次选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Recall Path,在打开的 Recall Path 对话框上(如图 6-4 所示)选择要观察的路径名称。

依次选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Map onto Path,设置 Lab=P1-seqv,选择等效应力选项,单击 Apply 按钮,设置 Lab=P1-s1,选择第一主应力,单击 Apply 按钮,设置 Lab=P1-s2,选择第二主应力,单击 Apply 按钮,设置 Lab=P1-s3,选择第三主应力,单击 OK 按钮。



图 6-4 路径选择对话框

3. 绘制路径上的结果曲线

依次选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item-On Graph,在打开的 Plot of Path Items on Graph 对话框上将映射的结果选中,如图 6-5 所示。单击 OK 按钮,绘制效果如图 6-6 所示。

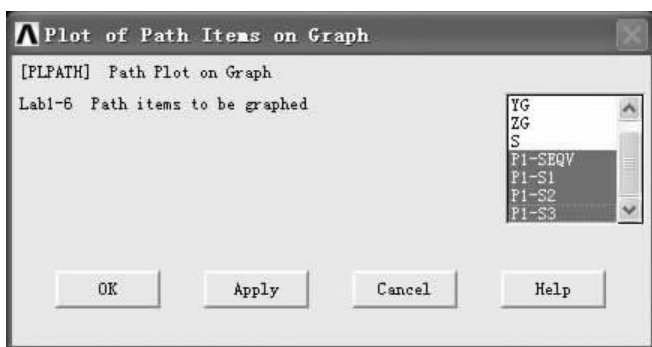


图 6-5 路径结果选择对话框

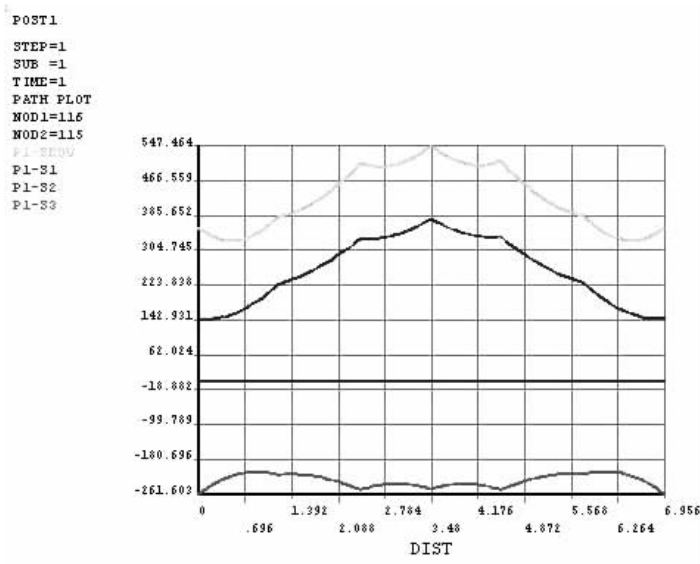


图 6-6 结果曲线

6.1.4 动画显示

通过动画的形式显示模型变形的过程,可以清晰地观察模型上每一部分变形的大小、位置的变化。对于与时间相关的问题,使用动画显示的作用就更突出。

依次选择 Utility Menu>PlotCtrls > Animate > Deformed Results,打开如图 6-7(a)所示的 Animate Nodal Solution Data 对话框,选择要观察的内容,即动画显示位移、应变还是应力。单击 OK 按钮就可以实现动画显示。同时,有如图 6-7(b)所示的浮动对话框控制动画显示的速度(滚动条拖动,向左为快,向右为慢)、播放的方向(向前还是向后)及开始/停止等。

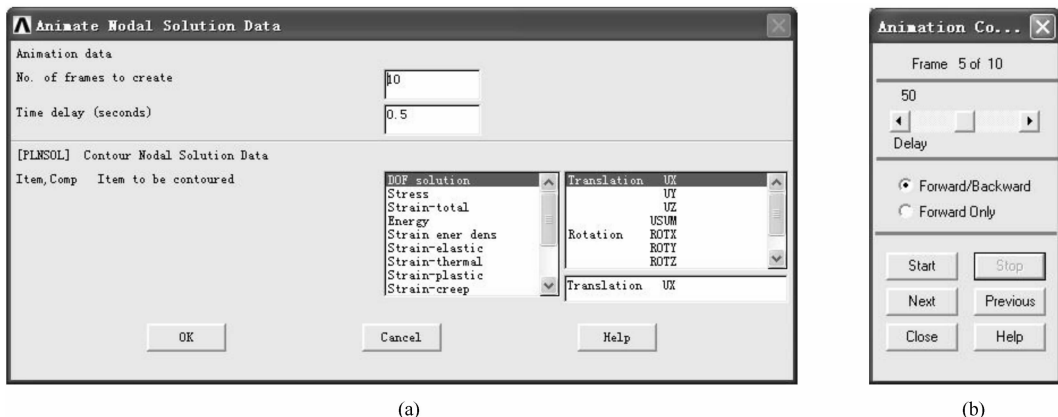


图 6-7 动画显示与控制

6.2 POST26 后处理器

POST26 允许用户查看模型上指定点相对于时间变量的计算结果,可以通过多种方法处理结果数据,并且用图形、图表等方式表达出来。例如在非线性结构分析中,可以绘制指定节点上力随时间变化的关系。

6.2.1 定义变量

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables,打开 Defined Time-History Variables 对话框,如图 6-8(a)所示,单击 Add 按钮,弹出 Add Time-History Variable 对话框,如图 6-8(b)所示,选择要绘制的内容,例如第一个选项,节点约束结果,单击 OK 按钮,弹出 Define Nodal Data 对话框。在图形窗口中点取相关的节点,单击 OK 按钮,弹出 Define Nodal Data 对话框,如图 6-9 所示,在其上进一步选择要查看的结果内容。例如在 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 按钮。

6.2.2 绘制变量曲线图

依次选择 Main Menu>TimeHist PostPro>Graph Variables,弹出 Graph Time-History Variables 对话框,如图 6-10 所示。在 1st variable to graph 处输入所定义变量的编号,单击 OK

按钮,图形窗口中将出现一个曲线图。

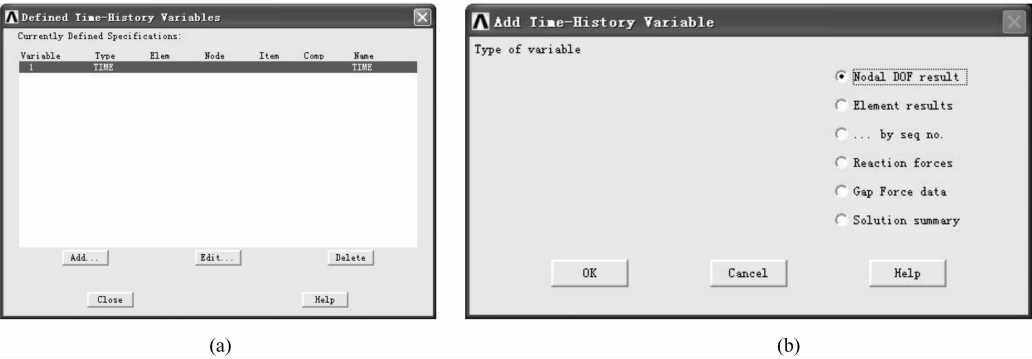


图 6-8 变量添加对话框

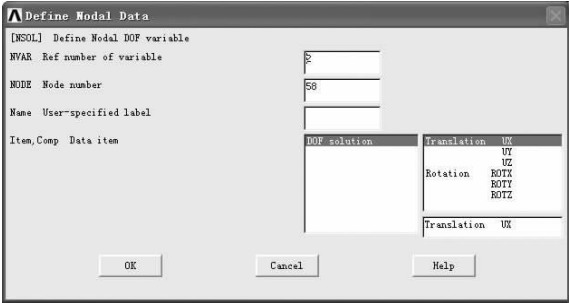


图 6-9 节点数据定义

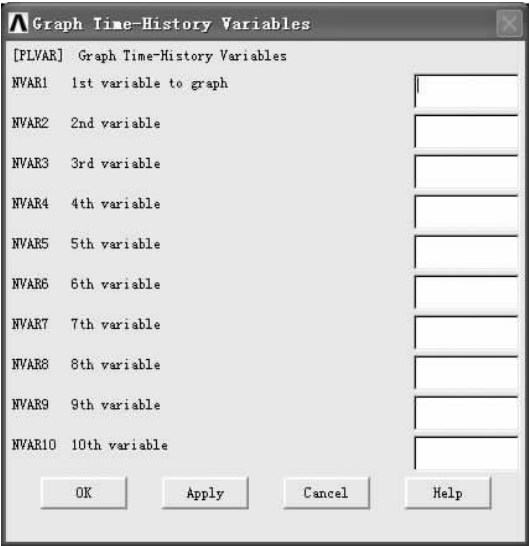


图 6-10 绘制变量的选择对话框

6.3 实例 轴承座的分析(4)

在前述 3 次实例求解的基础上,利用后处理器查看计算结果。

具体步骤

恢复轴承座分析的数据库。

1. 观看结果

(1) 绘制等效应力(von Mises)云图

依次选择 Main Menu>General Postproc > Plot Results > Contour Plot-Nodal Solu,弹出如图 6-3 所示的对话框。选择“Stress”,选择“von Mises”,单击 OK 按钮。

(2) 应力动画

依次选择 Utility Menu>PlotCtrls > Animate > Deformed Results,弹出如图 6-7(a)所示的对话框。选择“Stress”,选择“von Mises”,单击 OK 按钮,弹出如图 6-7(b)所示的对话框。拾取 MediaPlayer 的“>”键,播放等效应力动画。

2. 退出

在工具栏(Toolbar)上选择“QUIT”按钮,弹出如图 6-11 所示的对话框。选择“Save Everything”,单击 OK 按钮,即保存分析的内容后关闭程序退出。

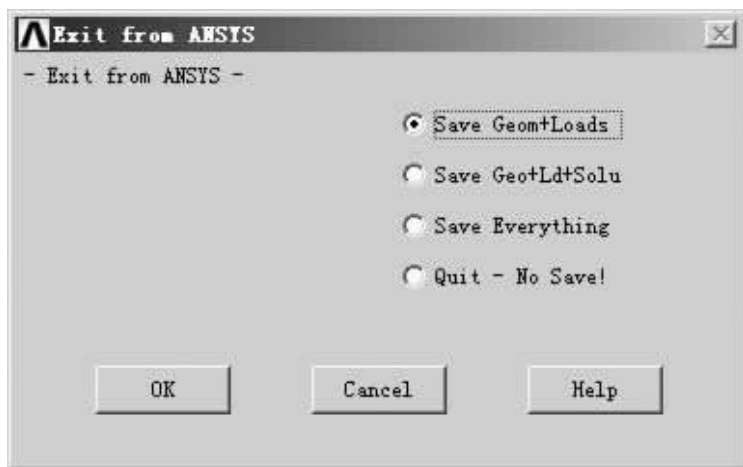


图 6-11 退出 ANSYS 对话框

练习题

1. ANSYS 提供的两种后处理器分别适合查看模型的什么计算结果?
2. 使用 POST1 后处理器,如何实现变形图、等值线图的绘制?
3. 使用 POST1 后处理器,路径的定义和使用过程是怎样的?
4. 使用 POST26 后处理器,如何实现自定义变量曲线的绘制?

第 7 章 综合练习实例

由于前面的章节已经对一些常用的操作进行了较为详细的介绍,包括命令格式和菜单路径。因此,7.1 节和 7.2 节的练习只给出了步骤和相关尺寸,具体操作过程留给读者练习。

7.1 实体建模练习一

练习目的

综合运用实体建模方法实现如图 7-1 所示的实体模型。

具体步骤

1. 创建底座

(1) 创建空心圆柱体 1(相关尺寸:40,15,8,360)。

(2) 创建关键点 100(坐标值:0,0,0),关键点 200(坐标值:50,50,0),在两点之间创建关键点 300(距离关键点 100 为 30)。

(3) 偏移工作平面到关键点 300,并旋转(角度值:45,0,0)。

(4) 创建实心圆柱体 2(相关尺寸:5,0,0,10,360),复制圆柱体 2 到其他 3 个位置。

(5) 从空心圆柱体 1 中减去 4 个小圆柱体,删除关键点 100,200,300。

2. 创建中间部分

(1) 复原工作平面到整体坐标系原点,创建空心圆柱体 3(相关尺寸:20,15,8,40,360)。

(2) 创建关键点 200(坐标值:-30,0,40),偏移工作平面到该点,并旋转(角度值:0,90,0)。

(3) 创建环状体(相关尺寸:30,20,15,45),将所有体相加。

3. 创建上部分

(1) 取顶面圆心为关键点 300(KBETW,68,70,300,RATI,0.5),偏移工作平面到该点,并旋转(角度值:45,0,0),(角度值:0,-90,0)工作平面两次。

(2) 删除辅助关键点 200、300,创建空心圆面 1(相关尺寸:25,15,360)。

(3) 平移工作平面(平移值:28,0,0),创建两个实心圆面(相关尺寸:7,0,360),(相关尺寸:4,0,360)。

(4) 从大的实心圆面减去小圆面,并将得到的面与空心圆面 1 相加。

(5) 倒圆角(半径 5),新增部分由线生成面,并与现有面合并。

(6) 依次对工作平面进行平移(平移值:-28,0,0)、旋转(角度值:-120,0,0)、平移(平移值:28,0,0),创建两个实心圆面(相关尺寸:7,0,360),(相关尺寸:4,0,360),减去小圆面,并将两面相加,倒圆角(半径 5),新增部分由线生成面,并与现有面合并。

(7) 重复步骤(6)。

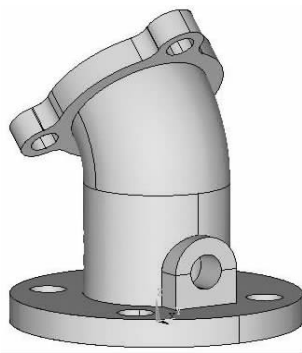


图 7-1 实体模型一

(8) 沿法线方向拉伸新建好的面,高度为 8 个单位。

4. 创建右侧部分

(1) 复原工作平面,平移(平移值 24 0,18)、旋转(角度值 0 0,90)工作平面。

(2) 创建块状体(相关尺寸:0,10,-10,10,-8,0),圆柱体(相关尺寸:10,0,-8,0,90,270),所有体相加。

(3) 创建圆柱体(相关尺寸:5,0,-12,0,0,360),减去圆柱体。

7.2 实体建模练习二

练习目的

综合运用实体建模方法实现如图 7-2 所示的实体模型。

具体步骤

1. 创建基座

(1) 创建块体 1(相关尺寸:0,20,-20,20,0,35)和圆柱体 1(相关尺寸:20,0,0,35,90,270)。

(2) 创建圆柱体 2(相关尺寸:15,0,0,40,0,360),并从块体 1 和圆柱体 1 中减去圆柱体 2。

(3) 平移工作平面(平移值:0,0,10),创建块体 2(相关尺寸:-20,0,-30,30,0,10),并从现有体中减去块体 2。

2. 创建倾斜部分

(1) 平移(平移值:20,0,25)、旋转(角度值:0,0,-30)工作平面,创建块体 3(相关尺寸:-5,50,-20,20,-5,0)(尺寸略大,便于与现有体结合)。

(2) 为了减去多余部分,用相交面切分新建块体,将多余部分删除,然后两体相加。

(3) 倒圆角面,增加部分由线生成面,由面生成体,3 体相加。

(4) 平移工作平面(平移值:15,0,0),创建圆柱体 3(相关尺寸:6,0,-5,5,0,360),减去新建圆柱体 3。

(5) 平移工作平面(平移值:23,20,0),创建圆柱体 4(相关尺寸:12,0,-5,0,0,180),圆柱体 5(相关尺寸:6,0,-5,5,0,360),现有体与圆柱体 4 相加并减去圆柱体 5。

(6) 平移工作平面(平移值:0,-40,0),创建圆柱体 6(相关尺寸:6,0,-5,5,0,360),圆柱体 7(相关尺寸:12,0,-5,0,180,360),现有体与圆柱体 7 相加并减去圆柱体 6。

(7) 倒圆角面,增加部分由线生成面,由面生成体,现有的 3 体相加。

3. 创建肋板

(1) 将工作平面平移到关键点 4(肋板最下点),在现有工作平面上创建关键点(稍长一些坐标值:40,0,0),两点连线。

(2) 将肋板左边(3 条)复制(距离 15,0,5),然后合并。

(3) 4 条相交线互分,删除多余线,倒圆角。

(4) 由线生成面(线编号为:75,83,107,94,95,66,78),注意不要用圆角面部分的线,否则所建面可能与现有体不相交。

(5) 将工作平面复原至整体坐标原点,平移(平移值:28,-20,18)、旋转(角度值:0,90,0)

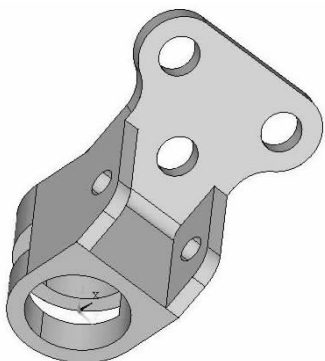


图 7-2 实体模型二

工作平面。

(6) 创建圆面(相关尺寸 $\varnothing 0 \varnothing 360$) ,减去圆面。

(7) 拉伸肋板面成体(注意法线方向决定拉伸值的正负) ;将生成体复制到对称位置(0 , 35 0) 将所有体相加。

4. 完善模型

将有相交面进行相加。

7.3 车轮的分析

练习目的

创建实体的方法、工作平面的平移及旋转、建立局部坐标系、模型的镜像、拷贝、布尔运算(相减 粘接 搭接)。

用自由及映射网格对轮模型进行混合的网格划分。

加载和求解 扩展结果及查看。

问题描述

车轮为沿轴向具有循环对称的特性 ,基本扇区为 45 度 ,旋转 8 份即可得到整个模型。如图 7-3 所示。

材料特性为 杨氏模量 $= 2.1 \times 10^5 \text{ Mpa}$ 密度 $= 7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 。

载荷为 对称面 ,Y 向约束 ,旋转角速度 $= 500 \text{ rad/sec}$ 。

具体步骤

1. 建立切面模型

(1) 建立三个矩形

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create > Areas>Rectangle > By Dimensions ,在打开对话框上依次输入 $x1 = 130$ $x2 = 140$ $y1 = 0$ $y2 = 130$,单击 Apply 按钮 ;再输入 $x1 = 140$ $x2 = 190$ $y1 = 40$ $y2 = 60$,单击 Apply 按钮 ;最后输入图 7-4 $x1 = 190$ $x2 = 200$ $y1 = 15$ $y2 = 95$,单击 OK 按钮。效果如图 7-4(a)所示。

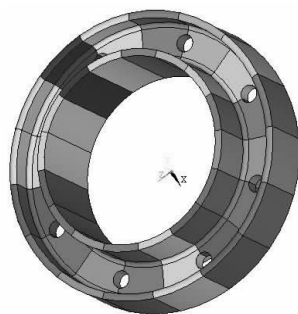


图 7-3 车轮建模的问题描述

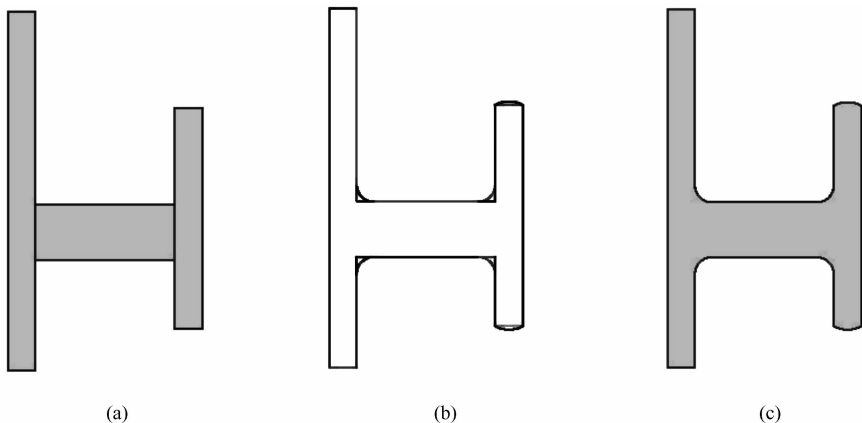


图 7-4 切面模型的建立

(2) 将三个矩形加在一起

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Booleans-Add > Areas ,单击 Pick All 按钮。

(3) 分别对图中所示进行倒角 ,倒角半径为 6

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Create > Lines-Line Fillet ,拾取线 14 与 7 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆角半径 6 ,单击 Apply 按钮 ,拾取线 7 与 16 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆角半径 6 ,单击 Apply 按钮 ,拾取线 5 与 13 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆角半径 6 ,单击 Apply 按钮 ,拾取线 5 与 15 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆角半径 6 ,单击 OK 按钮。效果如图 7-4(b)所示。

(4) 打开关键点编号

依次选择 Utility Menu > PlotCtrls > Numbering ,关键点编号为 ON ,并使[/NUM]为“Colors & Numbers”。

(5) 通过三点画圆弧

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Create > Arcs > By End KPs & Rad ,拾取 12 及 11 点 ,单击 Apply 按钮 ,再拾取 10 点 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆弧半径 10 ,单击 Apply 按钮 ,拾取 9 及 10 点 ,单击 Apply 按钮 ,再拾取 11 点 ,单击 Apply 按钮 ,输入圆弧半径 10 ,单击 OK 按钮。

(6) 由线生成面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Create > Areas-Arbitrary > By Lines ,拾取新生成的线与原有线围成新的面。

(7) 将所有的面加在一起

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Booleans-Add > Areas ,单击 Pick All 按钮。效果如图 7-4(c)所示。

2. 旋转产生部分体

(1) 定义两个关键点(用来定义旋转轴)

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Create > Keypoints-In Active CS ,NPT 输入 100 ,单击 Apply 按钮 ,NPT 输入 200 ,Y 输入 200 ,单击 OK 按钮。

(2) 面沿旋转轴旋转 22.5 度 ,形成部分实体

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Operate-Extrude > Areas- About Axis ,拾取面 ,单击 Apply 按钮 ,拾取上面定义的两个关键点 50 ,51 ,单击 OK 按钮 ,输入圆弧角度 22.5 ,单击 OK 按钮。如图 7-5 所示的对话框。输入圆弧角度 22.5 ,单击 OK 按钮。结果如图 7-6(a)所示。



图 7-5 拉伸面对话框

(3) 将坐标平面进行平移并旋转

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Keypoints ,拾取关键点 14 和 16 ,单击 OK 按钮 ,依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments ,在 XY ,YZ ,ZX Angles 文本框输入“0 , -90 0” ,单击 Apply 按钮。

(4) 创建实心圆柱体

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Create > Cylinder-By Dimensions ,在弹出对话框上 RAD1 中输入 0.45 在 Z1 ,Z2 坐标中输入“1 , -2” ,单击 OK 按钮。

(5) 将圆柱体从轮体中减掉

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Operate > Booleans-Subtract > Volumes ,拾取轮体 ,单击 Apply 按钮 ,然后拾取圆柱体 ,单击 OK 按钮。效果如图 7-6(b)所示。

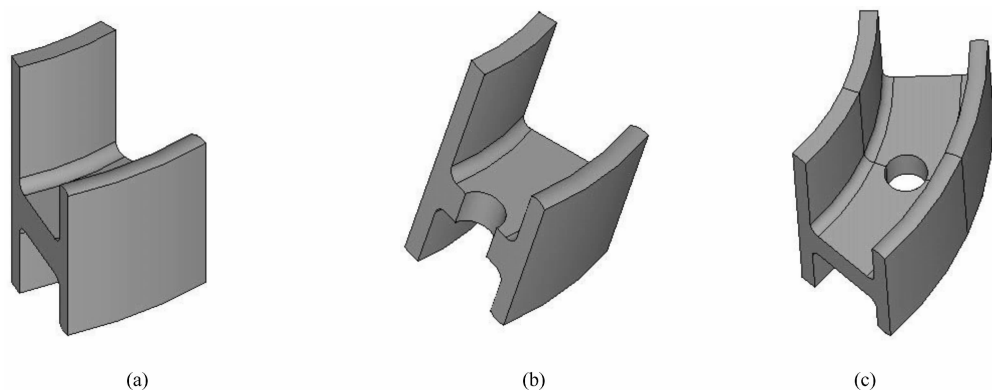


图 7-6 由面产生体

3. 生成整个实体

(1) 工作平面与总体笛卡尔坐标系一致

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Align WP With > Global Cartesian ,此处将模型另存为 Wheel.db ,保存数据库文件。

(2) 将体沿 XY 坐标面镜像

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Reflect > Volumes ,拾取体 ,并选择 X - Y plane ,单击 OK 按钮。效果如图 7-6(c)所示。

(3) 旋转工作平面

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments ,在 XY ,YZ ,ZX Angles 文本框中输入“0 , -90 0” ,单击 Apply 按钮 ,在 XY ,YZ ,ZX Angles 文本框中输入“22.5 0 0” ,单击 Apply 按钮。

(4) 在工作平面原点定义一个局部柱坐标系

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At WP Origin ,在弹出的如图 7-7 所示的对话框中设置 KCN 为 11 ,KCS 设置为 Cylindrical 1。

(5) 将体沿周向复制 8 份形成整环。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Copy > Volumes ,拾取 Pick All 按钮 ,弹出如图 7-8 所示的对话框。在 ITIME 中输入 8 ,在 DY 中输入 45 ,单击 OK 按钮。

保存数据库文件。

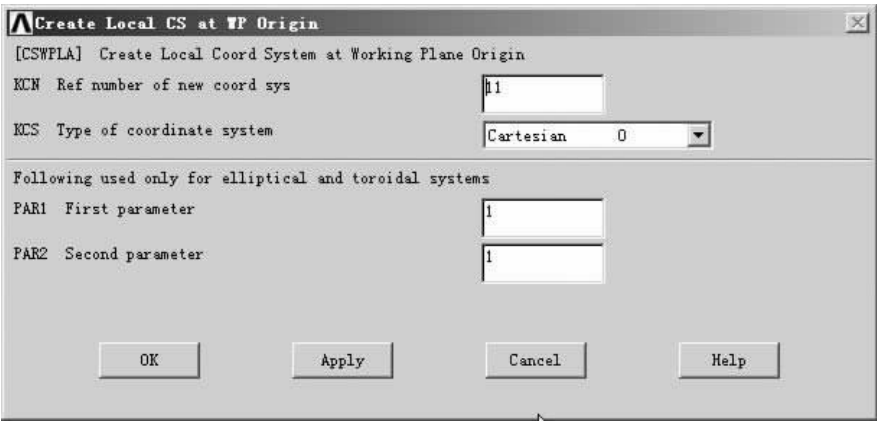


图 7-7 定义局部坐标系对话框

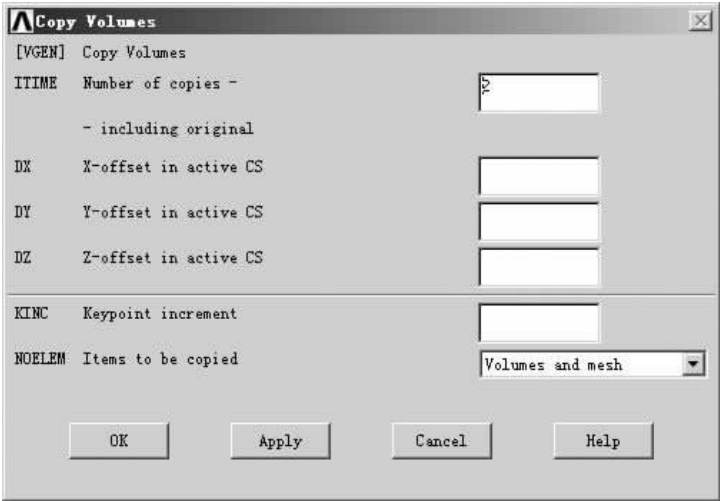


图 7-8 复制体对话框

4. 划分网格

恢复数据库 ,如图 7-9(a)所示。

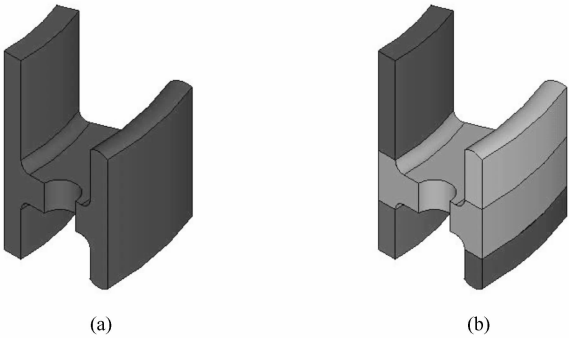


图 7-9 工作平面切分体

(1) 选择单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete,在弹出的对话框中选择 Add 按钮,在左侧“Structural”中选择“Solid”,然后从右侧选择“Brick 8node 45”,单击 OK 按钮,重复上述操作,选择 Solid95 单元,单击 OK 按钮,单击 CLOSE 按钮。

(2) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Structural-Linear-Elastic-Isotropic,默认材料号为 1,在“Young's Modulus EX”中输入 2.1×10^5 ,泊松比输入 0.3,密度为 7.8×10^{-6} ,单击 OK 按钮。

(3) 平移并旋转工作平面

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to,将工作平面平移至 13 号关键点,然后依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments,在打开的浮动对话框的 XY, YZ, ZX Angles 中输入“0, 90, 0”,单击 OK 按钮。

(4) 用工作平面切分体

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling-Operate>Divide>Volu by WorkPlane,拾取要切分的体,单击 OK 按钮。

(5) 平移工作平面并再次切分体

依次选择 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to,将工作平面平移至 18 号关键点,然后依次选择 Menu>Preprocessor>Modeling-Operate>Divide>Volu by WorkPlane,拾取要切分的体,单击 OK 按钮。效果如图 7-9(b)所示。

(6) 设定整体单元尺寸

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool,在打开的网格划分工具上,选择 Size Controls 为 Global,右侧 Set 按钮在打开的对话框中将“SIZE”设置为 6,单击 OK 按钮。

(7) 指定单元属性

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool,在打开的网格划分工具上,通过“Element Attributes”右侧 Set 按钮在打开的对话框中设置 TYPE 为 1, MAT 为 1,单击 OK 按钮。

(8) 映射网格划分

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool,在打开的网格划分工具上,指定 Mesh 为 Volumes,在 Shape 选择 Hex 和 Map,单击 Mesh 按钮,拾取要划分网格的实体,单击 OK 按钮。效果如图 7-10(a)所示。

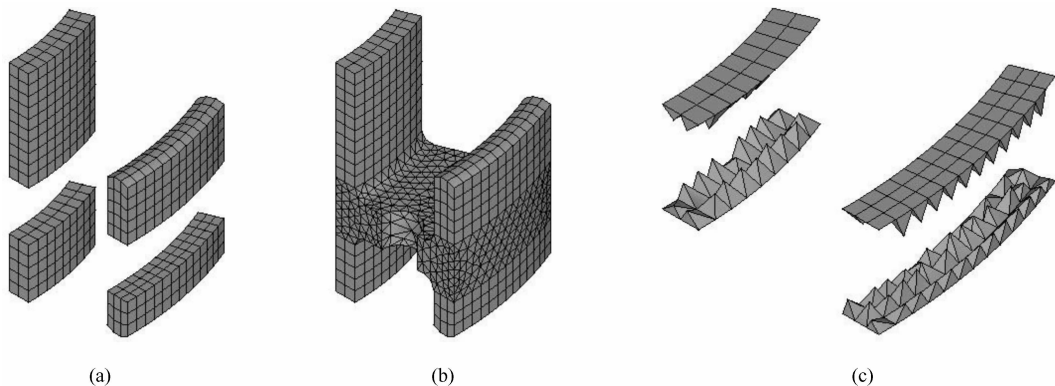


图 7-10 网格的混合划分

(9) 设定整体单元尺寸

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,选择 Size Controls 为 Global ,右侧 Set 按钮在打开的对话框中设置 SIZE 为 5 ,单击 OK 按钮。

(10) 指定单元属性

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,通过 Element Attributes 右侧的 Set 按钮在打开的对话框中设置 TYPE 为 2 ,MAT 为 1 ,单击 OK 按钮。

(11) 自由网格划分

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,设置 Mesh 为 “Volumes” ,在 Shape 中选择 “Tet” 和 “Free” ,单击 Mesh 按钮 ,拾取要划分网格的实体 ,单击 OK 按钮。如图 7-10(b)所示。

(12) 单元转换

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing-Modify Mesh > Change Tets ,在打开的对话框内选择默认值 ,单击 OK 按钮 ,如图 7-11 所示。

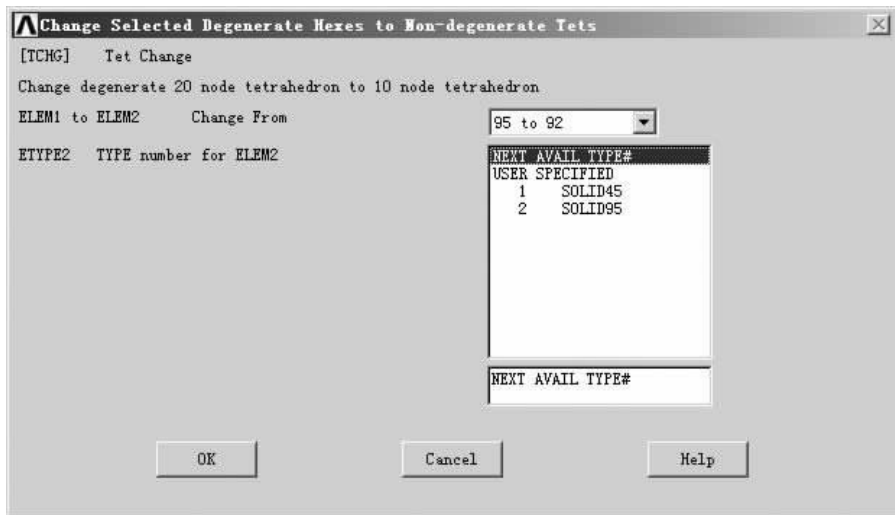


图 7-11 单元转换对话框

(13) 选择并绘制 Solid95 单元

依次选择 Utility Menu > Select > Entities ,在打开的对话框内选择 Elements By Attributes 和 Elem type num ,设置 “Min ,Max ,Inc” 为 2 ,单击 OK 按钮 ,依次选择 Utility Menu > Plot > Elements ,效果如图 7-10(c)所示。

5. 加载与求解

(1) 约束对称面

依次选择 Main Menu > Solution > Loads-Appl > Structural-Displacement > Symmetry B.C.-On Areas ,拾取所有对称面 ,如图 7-12 所示 ,单击 OK 按钮。

(2) 约束刚性位移

依次选择 Main Menu > Solution > Loads-Appl > Structural-

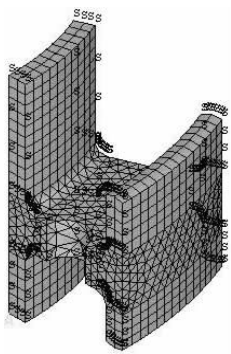


图 7-12 边界约束

Displacement> on Keypoints 拾取关键点 1 ,单击 OK 按钮。选择 UY 作为约束自由度 ,值为 0 ,单击 OK 按钮。

(3) 施加角速度

依次选择 Main Menu> Solution > Loads-Apply > Structural-Other > Angular Velocity ,在打开的对话框中设置“OMEGY”为 500 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu> Solution > Analysis Type-Sol'n Control ,在打开的对话框的 Sol'n Options 选项卡上选择“Pre-Condition CG”求解器 ,如图 7-13 所示 ,单击 OK 按钮。

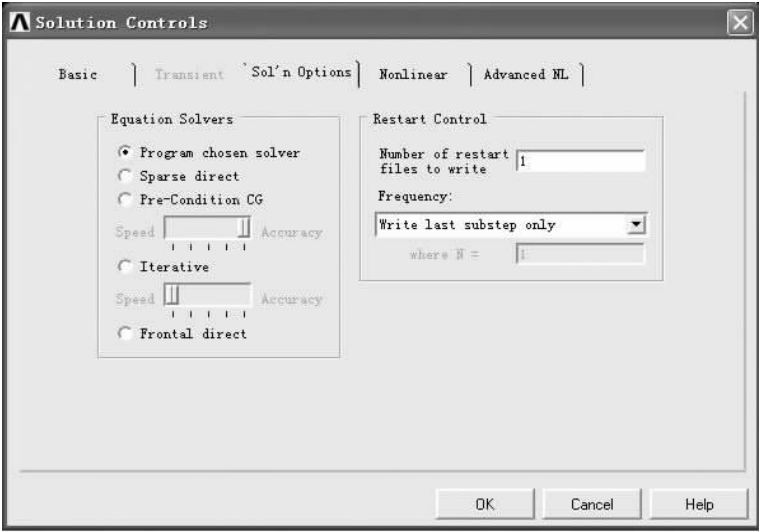


图 7-13 求解器选择

(4) 求解

依次选择 Main Menu> Solution > Solve-Current LS ,浏览 status window 中的信息 ,然后关闭此窗口 ,单击 OK 按钮(开始求解 ,并关闭由于单元形状检查而出现的警告信息) ;求解结束后 ,关闭信息窗口。

6. 观看结果

(1) 查看等效应力

依次选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results ,在弹出对话框中选择要查看的结果 ,如图 7-14(a)所示。

(2) 工作平面与总体笛卡尔坐标系一致

依次选择 Utility Menu >WorkPlane >Align WP With>Global Cartesian。

(3) 旋转工作平面

依次选择 Utility Menu >WorkPlane >Offset WP by Increments ,在 XY ,YZ ,ZX Angles 文本框中输入“0 , -90 0” ,单击 Apply 按钮 ,在 XY ,YZ ,ZX Angles 文本框中输入“22.5 0 0” ,单击 Apply 按钮。

(4) 在工作平面原点定义一个局部柱坐标系

依次选择 Utility Menu >WorkPlane >Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin ,KCN 为 11 ,KCS 为 Cylindrical 1。

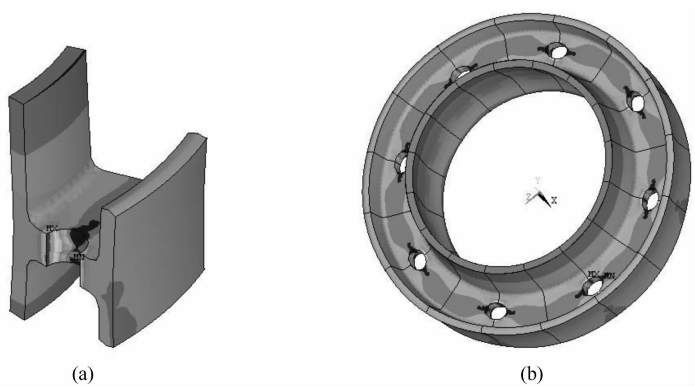


图 7-14 查看结果

(5) 沿局部坐标系 11 的 z 轴扩展结果

依次选择 Utility Menu >Plotctrl>Style Expansion>User-Specified Expansion ,弹出如图 7-15 所示的对话框。设置 NREPEAT 为 16 ,TYPE 为“Local Polar” ,PATTERN 为“Alternate Symm” ,“DY”为 22.5 ,单击 OK 按钮。效果如图 7-14(b)所示。

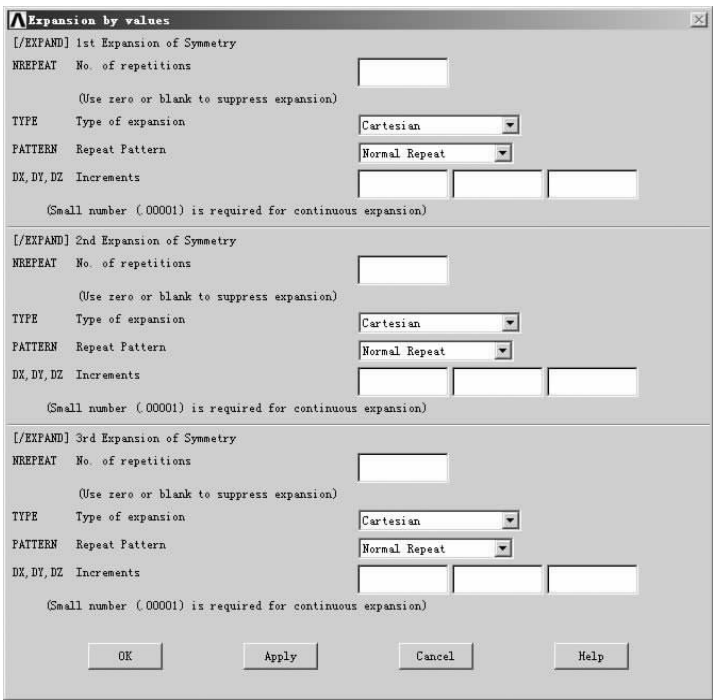


图 7-15 扩展结果对话框

7.4 连杆的分析

练习目的
熟悉从下向上建模的过程。

对已建立的二维连杆面进行网格化,然后拉伸形成三维网格化的体。

加载并求解后,练习查询和路径操作进行结果查看。

问题描述

- ✎ 连杆为上下对称结构,先创建一半,然后镜像得到整体,图中点的位置为样条拟合点,如图 7-16 所示。
- ✎ 材料特性为: 杨氏模量 = 2.1×10^5 Mpa, 密度 = 7.8×10^{-6} kg/mm³。
- ✎ 载荷为: 对称面 Z 向约束, 面压力 = 100 Mpa。

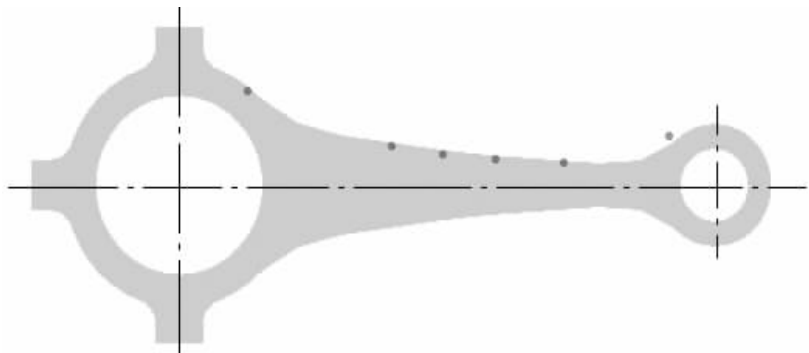


图 7-16 连杆模型

具体步骤

进入 ANSYS 工作目录,将“c-rod”作为工程名。

1. 创建左右两个端面

(1) 创建两个圆面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Circle > By Dimensions, 在弹出对话框上设置 RAD1 = 25, RAD2 = 35, THETA1 = 0, THETA2 = 180, 单击 Apply 按钮, 然后设置 THETA1 = 45, 再单击 OK 按钮。

(2) 创建两个矩形面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Rectangle > By Dimensions, 在弹出对话框上设置 X1 = -8, X2 = 8, Y1 = 30, Y2 = 45, 单击 Apply 按钮, 设置 X1 = -45, X2 = -30, Y1 = 0, Y2 = 8, 单击 OK 按钮。

(3) 偏移工作平面到给定位置

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations, 在窗口输入 165, 单击 OK 按钮。

(4) 将激活的坐标系设置为工作平面坐标系

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。

(5) 创建另两个圆面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Circle > By Dimensions, 在弹出对话框上设置 RAD1 = 10, RAD2 = 20, THETA1 = 0, THETA2 = 180, 然后单击 Apply 按钮, 设置第二个圆 THETA2 = 135, 然后单击 OK 按钮。

(6) 对面组分别执行布尔运算

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Operate > Booleans- Overlap > Areas , 首先选择左侧面组 ,单击 Apply 按钮 ,然后选择右侧面组 ,单击 OK 按钮。如图 7-17 所示。



图 7-17 端面的创建

2. 由下自上生成连杆的中间部分

(1) 将激活的坐标系设置为总体笛卡尔坐标系

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian.

(2) 定义四个新的关键点

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Keypoints > In Active CS ,设置第一个关键点 X=64 ,Y=13 ,单击 Apply 按钮 ,设置第二个关键点 X=83 ,Y=10 ,单击 Apply 按钮 ,设置第三个关键点 X=100 ,Y=8 ,单击 Apply 按钮 ,设置第四个关键点 X=120 ,Y=7 ,单击 OK 按钮。

(3) 将激活的坐标系设置为总体柱坐标系

依次选择 Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical.

(4) 通过一系列关键点创建样条曲线

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Lines- Splines > With Options > Spline thru KPs ,按顺序拾取关键点 5 30 31 32 33 21 ,然后单击 OK 按钮 ,在弹出的B-Spline对话框中设置 XV1 = 1 ,YV1 = 135 ,XV6 = 1 ,YV6 = 45 ,如图 7-18 所示 ,单击 OK 按钮。

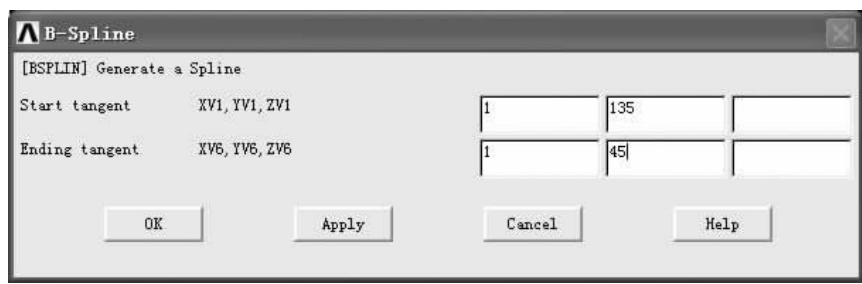


图 7-18 由关键点产生样条曲线

(5) 在关键点 1 和 18 之间创建直线

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Lines- Lines > Straight Line ,拾取如图的两个关键点 ,然后单击 OK 按钮。效果如图 7-19 所示。

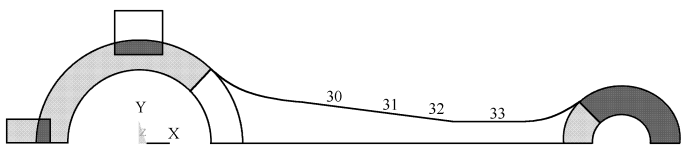


图 7-19 新生成的两条线段

(6) 由前面定义的线 6,1,7,25 创建一个新的面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Arbitrary > By Lines,拾取四条线(6,1,7,25),然后单击 OK 按钮。效果如图 7-20 所示。

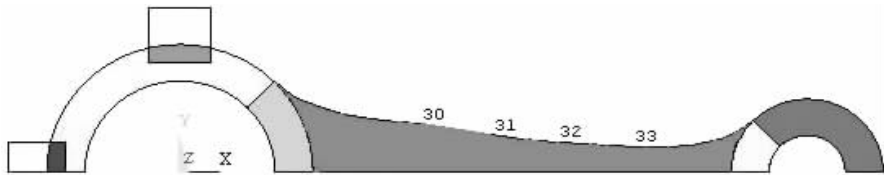


图 7-20 新产生的面

(7) 创建倒角

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Lines- Line Fillet,拾取线 36 和 40,然后单击 Apply 按钮,设置 RAD = 6,然后单击 Apply 按钮,拾取线 40 和 31,然后单击 Apply 按钮;拾取线 30 和 39,然后单击 OK 按钮。效果如图 7-21(a)所示。

(8) 由前面定义的两个倒角创建新的面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Create > Areas- Arbitrary > By Lines,拾取线 12,10 和 13,单击 Apply 按钮,拾取线 17,15 和 19,单击 Apply 按钮,拾取线 23,21 和 24,单击 OK 按钮。效果如图 7-21(a)所示。

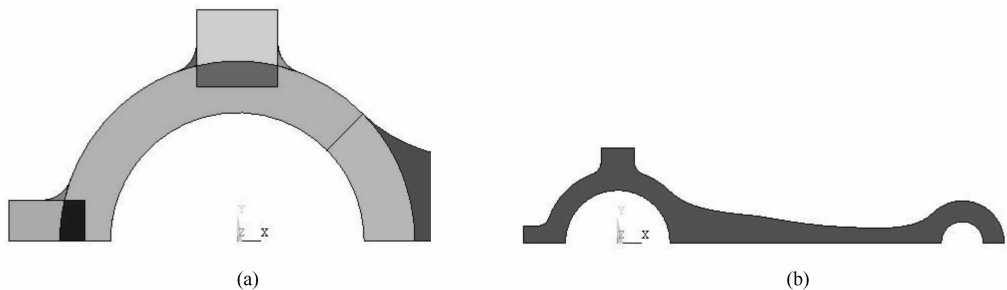


图 7-21 进行倒角并生成面

(9) 将面加起来形成一个面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling- Operate > Add > Areas,单击 Pick All 按钮,效果如图 7-21(b)所示。

3. 划分网格

(1) 选择单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add /Edit /Delete,在弹出的对话框中选择 Add 按钮,在左侧 Not Solved 中选择 Mesh Facet200,单击 OK 按钮,然后单击 Option 按钮,设置 K1 为“QUAD 8-NODE”,单击 OK 按钮,单击 CLOSE 按钮。

(2) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor > Material Props > Structural-Linear-Elastic-Isotropic,默认材料号 1,在“Young's Modulus EX”中输入 2.1e5,泊松比设置为 0.3,密度设置为 7.8e-6,单击 OK 按钮。

(3) 设定整体单元尺寸

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,在 Size Controls 选择“Global” ,单击右侧 Set 按钮 ,在打开的对话框中将设置“SIZE”为 5 ,单击 OK 按钮。

(4) 指定单元属性

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,单击 Element Attributes 右侧 Set 按钮在打开的对话框中将 TYPE 设置为 1 ,MAT 设置为 1 ,单击 OK 按钮。

(5) 自由网格划分面

依次选择 Main Menu > Preprocessor > MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,将 Mesh 设置为“Areas” ,在 Shape 中选择“Quad”和“Free” ,单击 Mesh 按钮 ,拾取要划分网格的实体 ,单击 OK 按钮。效果如图 7-22(a)所示。

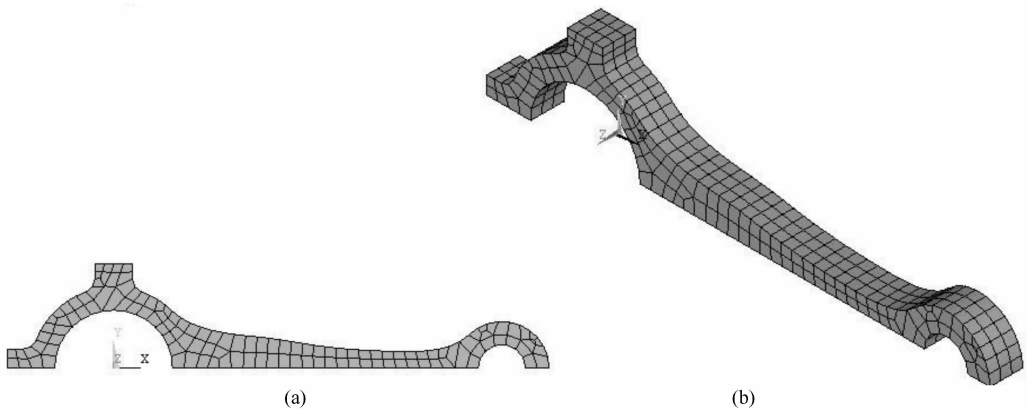


图 7-22 拉伸生成网格

(6) 添加三维块体单元

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add /Edit /Delete ,在弹出的对话框中选择 Add 按钮 ,在弹出的对话框中添加 Solid95 单元。

(7) 设置单元拉伸特性

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Extrude > Element Ext Opts ,在弹出的对话框中设置 VAL1 为 3 ,单击 OK 按钮。

(8) 拉伸面网格

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling-Operate > Extrude > Areas-Along Normal ,拾取要拉伸的网格面 ,单击 OK 按钮 ,在打开的对话框中将 DIST 设置为 15 ,单击 OK 按钮。效果如图 7-22(b)所示。

4. 加载与求解

(1) 约束对称面

依次选择 Main Menu > Solution > Loads-Apply > Structural-Displacement > Symmetry B.C.-On Areas ,拾取所有对称面 ,单击 OK 按钮。

(2) 约束刚性位移

依次选择 Main Menu > Solution > Loads-Apply > Structural-Displacement > on Key-

points 拾取关键点 43 ,单击 OK 按钮。选择 UZ 作为约束自由度 ,值为 0 ,单击 OK 按钮。

(3) 施加均布压力

依次选择 Main Menu> Solution > Loads-Apply > Structural-Pressure > Areas ,拾取小圆的左侧里面 ,单击 OK 按钮 ,在打开的对话框上设定压力为 100 ,单击 OK 按钮。

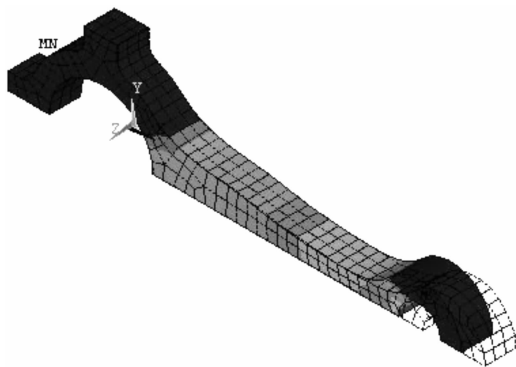
(4) 求解

依次选择 Main Menu> Solution > Solve-Current LS ,浏览 status window 中的信息 ,然后关闭此窗口 ,单击 OK 按钮(开始求解 ,并关闭由于单元形状检查而出现的警告信息) ;求解结束后 ,关闭信息窗口。

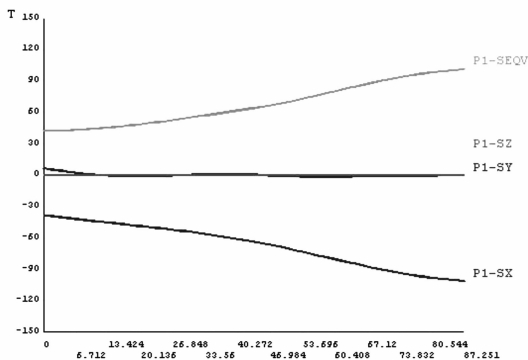
5. 观看结果

(1) 查看等效应力

依次选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results ,在弹出的对话框中选择要查看的结果 ,效果如图 7-23(a)所示。



(a)



(b)

图 7-23 查看结果

(2) 定义路径

依次选择 Main Menu> General Postproc> Path Operations> Define Path> By Nodes ,拾取要定义的节点 ,单击 OK 按钮 ,在弹出对话框中输入路径名称“P1” ,其余默认 ,单击 OK 按钮。

(3) 将结果映射到路径

依次选择 Main Menu> General Postproc> Path Operations> Map onto Path ,设置 Lab = P1-seqv ,选择等效应力选项 ,单击 Apply 按钮 ,设置 Lab = P1-sx ,选择 X 向应力 ,单击 Apply 按钮 ,设置 Lab = P1-sy ,选择 Y 向应力 ,单击 Apply 按钮 ,设置 Lab = P1-sz ,选择 Z 向应力 ,单击 OK 按钮。

(4) 绘制路径上的结果曲线

依次选择 Main Menu> General Postproc> Path Operations> Plot Path Item-On Graph ,选择 P1-seqv ,单击 Apply 按钮 ,选择 P1-sx ,单击 Apply 按钮 ,选择 P1-sy ,单击 Apply 按钮 ,选择 P1-sz ,单击 OK 按钮 ,效果如图 7-23(b)所示。

7.5 瞬态分析

- 练习目的
- 了解瞬态分析过程。
- 随时间变化载荷的定义和施加。
- 应用 POST26 观察结果。
- 问题描述

瞬态(FULL)完全法分析板－梁结构实例 ,如图 7-24 所示板－梁结构 ,板件上表面施加随时间变化的均布压力 ,计算在下列已知条件下结构的瞬态响应情况。全部采用 A3 钢材料 ,特性如表 7-1 和表 7-2 所示。

表 7-1 A3 钢材料特性

| 扬氏模量 E /Pa | 泊 松 比 | 密度 ρ /kg \cdot m ⁻³ | 板壳厚度 t /m |
|--------------|-------|---------------------------------------|-------------|
| 2e11 | 0.3 | 7.8e3 | 0.02 |

表 7-2 四条腿(梁)的几何特性

| 截面面积 A /m ² | 惯性矩 I /m ³ | 宽度 b /m | 高度 h /m |
|--------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| 2e-4 | 2e-8 | 0.01 | 0.02 |

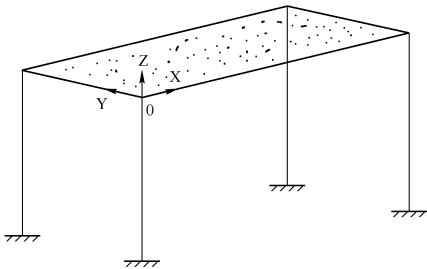


图 7-24 质量板－梁结构及载荷示意图

压力载荷与时间的关系曲线如图 7-25 所示。

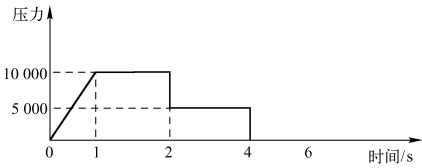


图 7-25 板上压力与时间关系

具体步骤

1. 定义单元类型

单元类型 1 为 SHELL63 ,单元类型 2 为 BEAM4。

2. 定义单元实常数

实常数 1 为壳单元的实常数 ,输入厚度为 0.02(只需输入第一个值 ,即等厚度壳) ;

实常数 2 为梁单元的实常数 ,输入 AREA 为 $2\text{e-}4$,惯性矩为 $IZZ = 2\text{e-}8$, $IYY = 2\text{e-}8$,宽度为 $TKZ = 0.01$,高度为 $TKY = 0.02$ 。

3. 定义材料特性

定义扬氏模量为 $EX = 2\text{e}11$,泊松比为 $\text{NUXY} = 0.3$,密度为 $\text{DENS} = 7.8\text{e}3$ 。

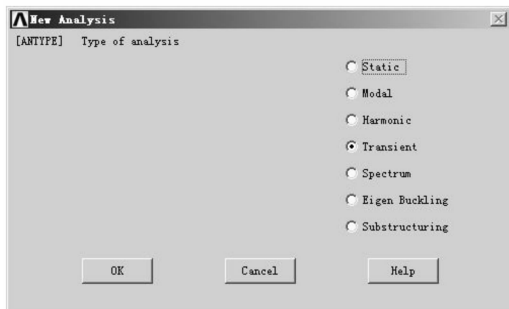
4. 建立有限元分析模型

创建矩形 ,相关尺寸为 $x1 = 0$, $x2 = 2$, $y1 = 0$, $y2 = 1$,将所有关键点沿 Z 方向拷贝 ,输入 $DZ = -1$ 连线。将表示梁的关键点分别连成直线 ,设置线的分割尺寸为 0.1 ,首先给面划分网格 ;然后设置单元类型为 2 ,实常数为 2 ,对线 5 到 8 划分网格。

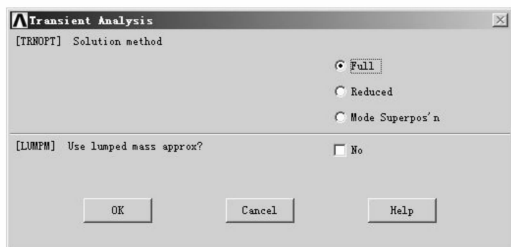
5. 瞬态动力分析

(1) 设定动力分析选项

依次选择 Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis ,弹出如图 7-26(a)所示 “New Analysis”对话框 ,选择 Transient ,然后单击 OK 按钮 ,弹出如图 7-26(b)所示的对话框 ,仍然单击 OK 按钮。



(a)



(b)

图 7-26 分析类型的选择

(2) 施加约束

依次选择 Main Menu > Solution > Loads-Apply > Structural-Displacement > On Keypoints ,拾取四个脚上的节点 ,单击 OK 按钮 ,弹出的对话框中选择 DOFS to be constrained 中的 All DOF 选项 ,单击 OK 按钮。

(3) 设定阻尼系数

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts-Time/Frequenc > Damping ,弹出 Damping Specifications 窗口 ,在 Mass matrix multiplier 处输入 5。单击 OK 按钮。

(4) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts-Output Ctrl > DB/Results File ,在弹出的 Item to be controlled 滚动窗中选择 All items ,在 File write frequency 中选择

Every substep ,如图 7-27 所示 ,单击 OK 按钮。

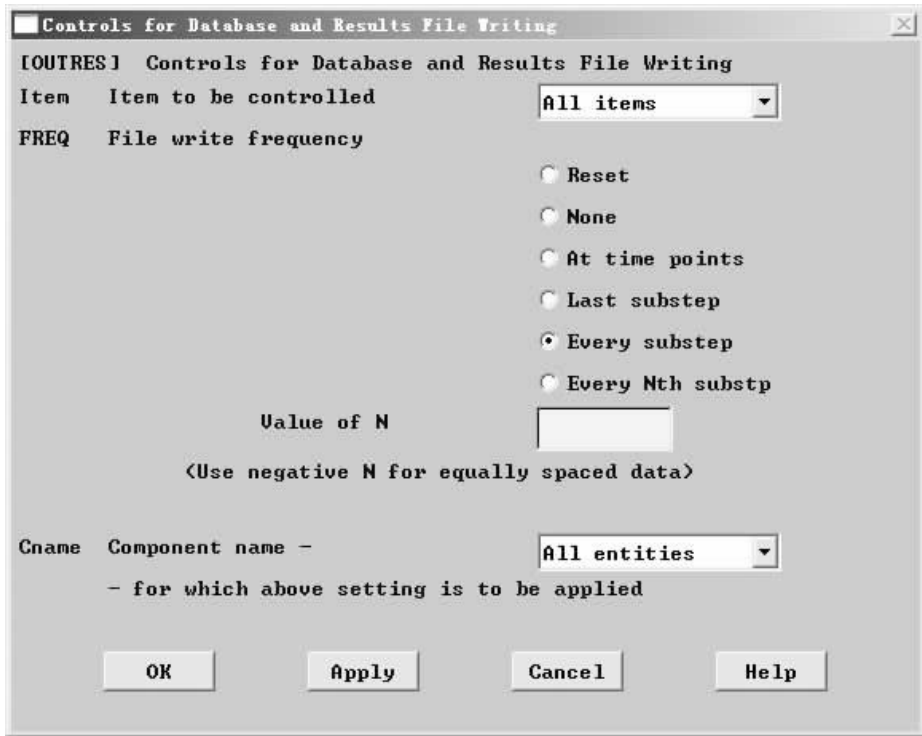


图 7-27 输出文件控制对话框

(5) 设置加载曲线的第一部分

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts-Time/Frequenc > Time - Time Step ,弹出窗口 ,在 Time at end of load step 中输入 1 ;在 Time step size 中输入 0.2 ;在 Stepped or ramped b.c 中单击 ramped ;单击 Automatic time stepping 为 on ;在 Minimum time step size 中输入 0.05 ;在 Maximum time step size 中输入 0.5 ,如图 7-28 所示 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Loads-Apply > Structure-Pressure > On Areas ,单击 Pick All 按钮 ,在弹出的对话框的 pressure value 中输入 10 000 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main menu > Preprocessor > Loads > Write LS File ,在弹出的对话框的 Load step file number n 中输入 1 ,如图 7-29 所示 ,单击 OK 按钮。

(6) 设置加载曲线的第二部分

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts-Time/Frequenc > Time-Time Step ,在弹出的对话框的 Time at end of load step 中输入 2 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main menu > Preprocessor > Loads > Write LS File ,弹出的对话框的 Load step file number n 中输入 2 ,单击 OK 按钮。

(7) 设置加载曲线的第三部分

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Loads-Apply > Structure-Pressure > On Areas ,单击 Pick All 按钮 ,弹出的对话框的 pressure value 中输入 5000 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts-Time/Frequenc > Time-

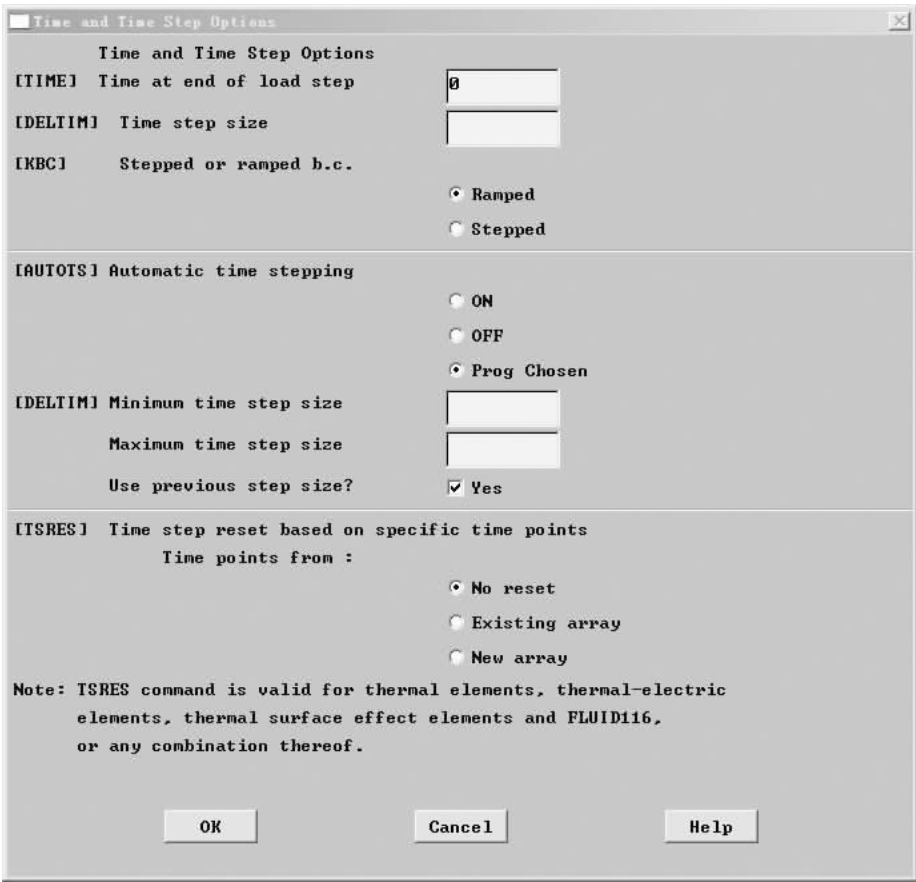


图 7-28 加载曲线定义对话框



图 7-29 写文件对话框

Time Step 弹出的对话框的 Time at end of load step 中输入 4 在 Stepped or ramped b.c 中单击 Stepped 按钮 单击 OK 按钮。

依次选择 Main menu > Preprocessor > Loads > Write LS File 弹出的对话框的 Load step file number n 处输入 3 单击 OK 按钮。

(8) 设置加载曲线的第四部分

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Loads-Apply > Structure-Pressure > On Areas 弹出 Apply PRES on Areas 拾取窗口。单击 Pick All 按钮 弹出 Apply PRES on Areas

对话框,在 pressure value 中输入 0。单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu> Preprocessor> Loads> Load Step Opts-Time/Frequenc> Time - Time Step,弹出 Time - Time Step Options 窗口。在 Time at end of load step 中输入 6。单击 OK 按钮。

依次选择 Main menu> Preprocessor> Loads> Write LS File,弹出 Write Load Step File 对话框。在 Load step file number n 中输入 4,单击 OK 按钮。

(9) 求解所有加载步

依次选择 Main Menu> Solution> Solve-From LS File,弹出 Slove Load Step Files 对话框。在 Starting LS file number 中输入 1,在 Ending LS file number 处输入 4,如图 7-30 所示,单击 OK 按钮。

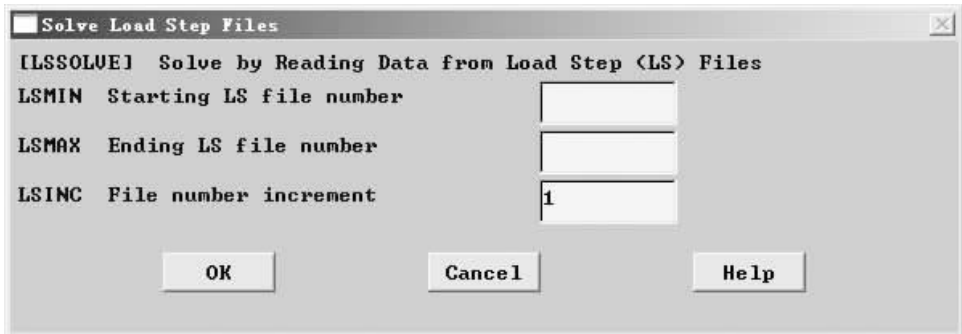


图 7-30 指定载荷步文件对话框

当求解完成时会出现一个 Solution is done 提示对话框。单击 Close 按钮。

6. POST26 观察结果(某节点的位移时间历程结果)

依次选择 Main Menu> TimeHist Postpro> Define Variables,弹出 Defined Time-History Variables 对话框,单击 Add 按钮,弹出 Add Time-History Variable 对话框。选择默认选项 Nodal DOF Result,单击 OK 按钮,弹出 Define Nodal Data 拾取对话框。在图形窗口中拾取节点 146。单击 OK 按钮,弹出 Define Nodal Data 对话框。在 user-specified label 中输入 UZ146;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 按钮。

依次选择 Utility Menu> PlotCtrls> Style> Graph> Modify Grid,弹出 Grid Modifications for Graph Plots 对话框。在 type of grid 滚动框中选中 X and Y lines,选择 Display grid 选项,如图 7-31 所示,单击 OK 按钮。

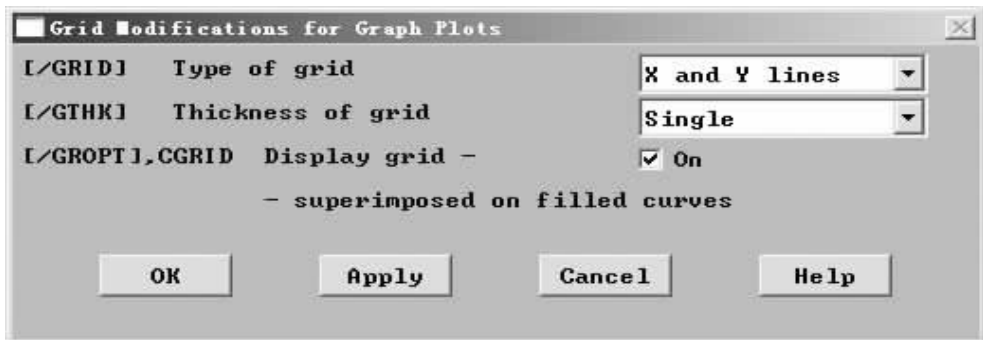


图 7-31 设置曲线图显示格式

依次选择 Main Menu > TimeHist PostPro > Graph Variables ,弹出 Graph Time-History Variables 对话框 ,在 1st Variable to graph 中输入 2。单击 OK 按钮 ,图形窗口中将出现一个曲线图 ,如图 7-32 所示。

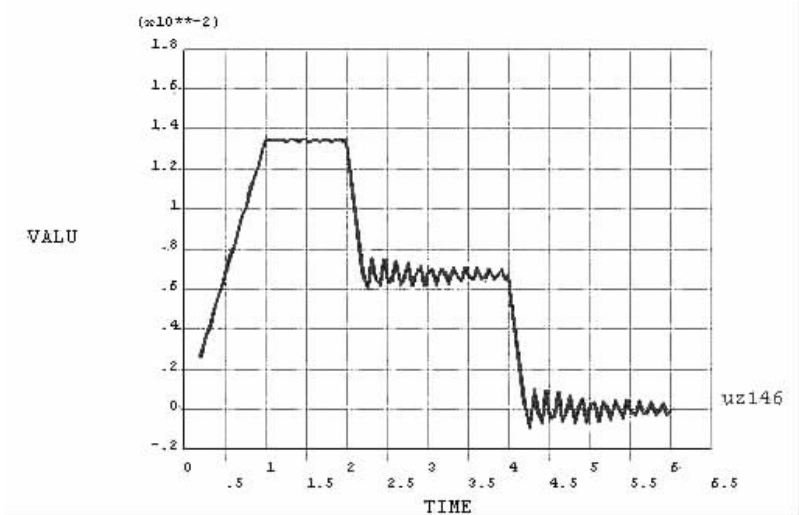


图 7-32 节点 146 的 UZ 位移结果

7.6 广告牌承受风载荷的模拟

- 练习目的
- 熟悉梁、壳、实体单元混合使用分析过程。
- 面上施加均布力的定义。
- 问题描述

梁单元截面形状为圆 ,与实体有 0.1 m 长度的联接。壳单元划分广告牌面 ,在块体内部有弯折(0.1 m 处) ,即嵌入到块体当中 ,如图 7-33。约束为两立柱的底部节点全部约束 ,风载全部加在壳单元的面上 ,材料均为钢材。

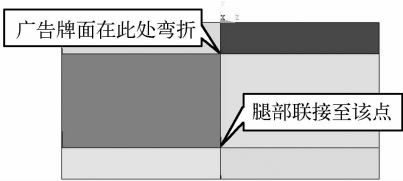


图 7-33 广告牌侧面断面形状

- 具体步骤
- 1. 定义单元类型
- 单元类型 1 为 SHELL181 ,单元类型 2 为 SOLID45 ,单元类型 3 为 BEAM88。
- 2. 定义单元实常数
- 实常数 1 为壳单元的实常数 ,输入厚度为 0.02(只需输入第一个值 ,即等厚度壳)。

3. 定义梁单元的截面特性

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Sections > Common Sectns ,在弹出的对话框上定义 ID 号 ,设置 “Sub-Type”截面形状为圆形 ,“Offset To”截面中心位置为默认(即形心位置) ,设置“R”为 0.2 ;“N”为 8。如图 7-34 所示。

4. 定义材料特性

扬氏模量 $EX = 2e11$,泊松比 $\nu_{XY} = 0.3$,密度 $DENS = 7.8e3$ 。

5. 建立有限元分析模型

(1) 创建矩形 $x1 = 0, x2 = 4, y1 = 0, y2 = 3$ 。

(2) 创建块体 $x1 = 0, x2 = 4, y1 = -0.5, y2 = 0, z1 = 0, z2 = 0.5$ 。

(3) 创建块体 $x1 = 0, x2 = 4, y1 = -0.5, y2 = 0, z1 = -0.5, z2 = 0$ 。

(4) 创建点 $x = 0, y = -5, z = 0$;点 $x = 4, y = -5, z = 0$;点 $x = 5, y = -5, z = 0$ 。

(5) 合并关键点 ,由点产生直线 ,即广告牌的两个腿。

(6) 平移工作平面(0 , -0.1 0) ;旋转工作平面(0 90 0) ;用工作平面切分所有体。

(7) 平移工作平面(0 0 , -0.3) ;用工作平面切分下半部的两个体 ,合并所有项目。

(8) 指定广告牌的腿(包括两个支架和与块体相连的两条短线 ,共 4 条线)的材料 ,单元类型 ,并指定梁单元的方向 ;分别指定使用壳单元的面和实体单元的体。

(9) 指定所有线划分的尺寸为 0.1 ,分别划分线、面和体 ,如图 7-35(a)所示。

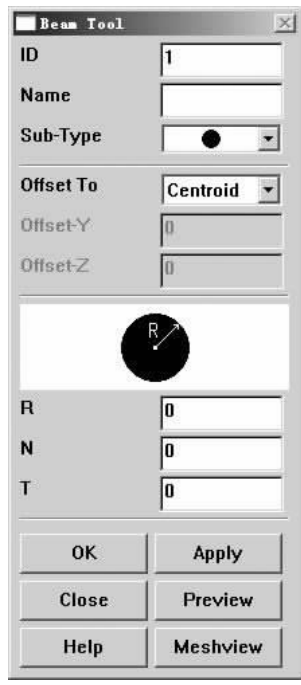


图 7-34 梁单元截面特性定义对话框

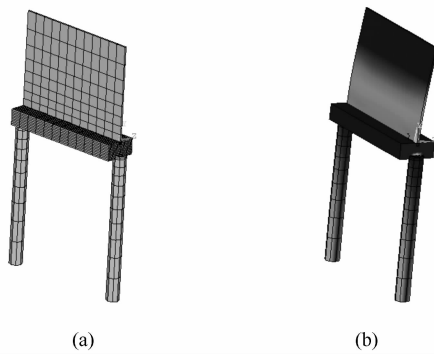


图 7-35 广告牌承受风载的模型和结果

6. 加载和求解

(1) 约束 y 向坐标为 -5 的所有节点的自由度。

(2) 在广告牌面上施加 100 的均布力。

(3) 求解。

7. 后处理观察结果

打开形状显示,观察位移和应变结果,如图 7-35(b)所示。

7.7 模态分析

练习目的

模态分析。

复合材料单元的使用。

约束方程的使用。

问题描述

复合材料板联接在一起的结构,外形如图 7-36(a)所示,内部如图 7-36(b)所示。

底部圆环使用材料 1 扬氏模量 = 7.1×10^{10} Pa,密度 = 2780 kg/m^3 ,泊松比 = 0.3。

其余板使用蜂窝材料 2 扬氏模量 = 7.1×10^{10} Pa,密度 = 45 kg/m^3 ,泊松比 = 0.3。

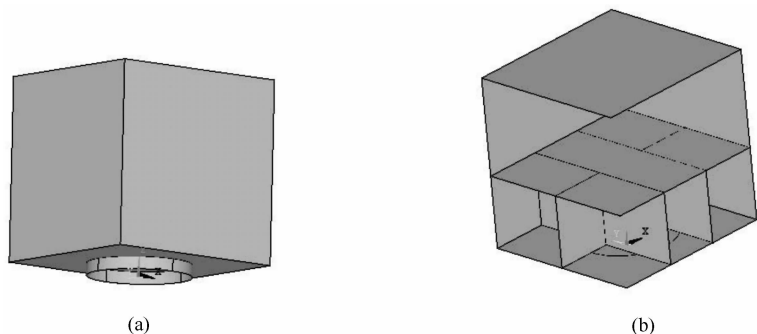


图 7-36 复合材料板结构模态问题描述

具体步骤

1. 建立模型

(1) 通过直线旋转得到圆柱面,柱面半径 = 0.33,高度 = 0.08。

(2) 平移工作平面然后创建与圆柱面联接的底板,底板长度(x) = 1.2,底板宽度(y) = 1.2。

(3) 复制生成顶板,高度(z) = 1.1,由点或者线生成其他各面。

(4) 将工作平面复原。

2. 划分网格

(1) 选择单元

选择单元 1 为 SHELL63,单元 2 为 SHELL91。

(2) 定义材料

材料 1 扬氏模量 = 7.1×10^{10} ,密度 = 2780,泊松比 = 0.3。材料 2 扬氏模量 = 7.1×10^{10} ,密度 = 45,泊松比 = 0.3。

(3) 定义实常数

定义单元 1 实常数(单元厚度) = 0.004,定义单元 2 实常数,在弹出的对话框中输入如图 7-37(a)所示的值;单击 OK 按钮后弹出如图 7-37(b)所示的对话框,输入相应数值。

(4) 指定单元属性和尺寸,划分网格

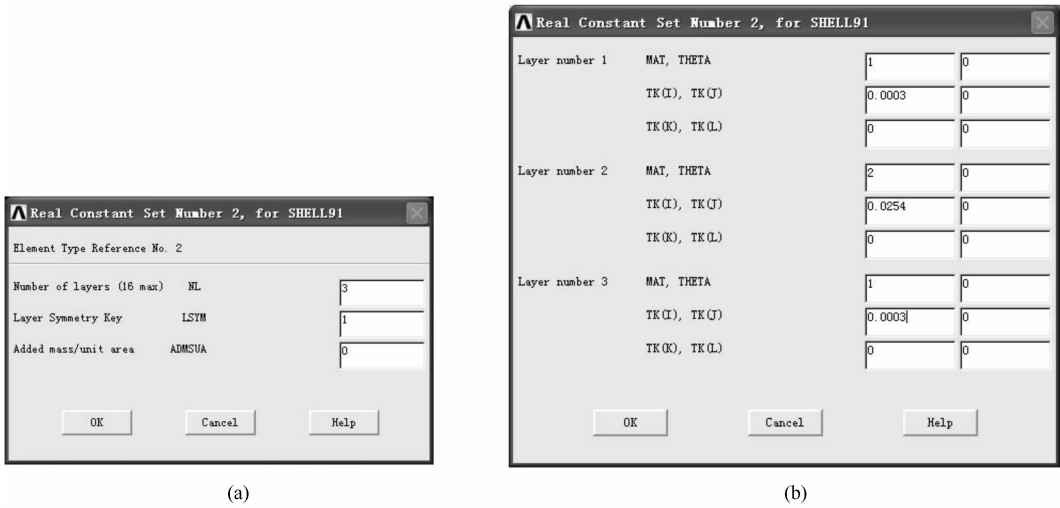


图 7-37 定义实常数的对话框

圆柱面为单元 1 ,其余面为单元 2。

3. 加载与求解

(1) 定义约束

圆柱面的底边为固定端 ,因此 ,选择圆柱面的底边线段或者节点 ,对其 3 向自由度进行约束。

(2) 约束方程的定义

应用约束方程表示相关的联接 ,以圆柱面上边与底板联接为例 ,选择圆柱面上边的所有节点 ,再选择底板上的单元 ,然后由 Main Menu > Preprocessor > Coupling / Ceqn > Adjacent Regions ,输入如图 7-38 所示相关数值 ,单击 OK 按钮。

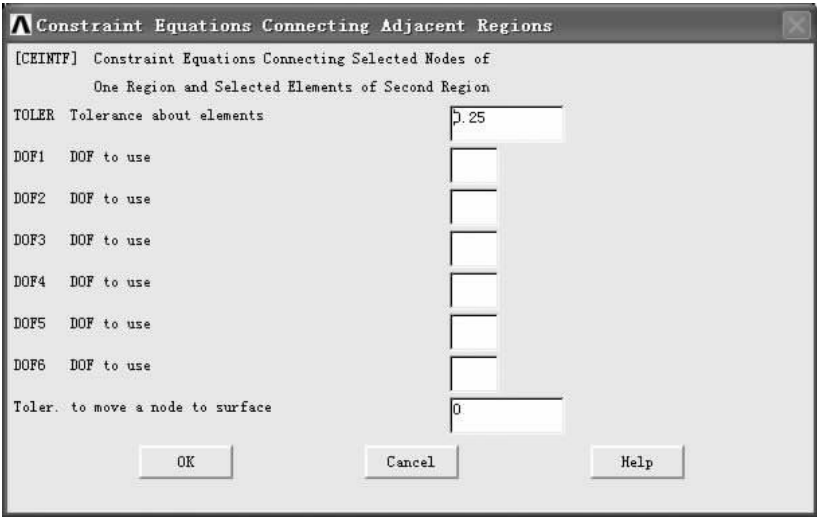


图 7-38 定义约束方程的对话框

(3) 选择模态分析类型

选取菜单途径 Main Menu>Solution>Analysis Type-New Analysis ,弹出 New Analysis 对话框 ,选择 Modal ,然后单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu> Solution > Analysis Options ,在弹出的对话框上选择“Subspace ”, 在 Number of modes to extract 文本框输入 5 ,如图 7-39 所示。单击 OK 按钮 ,在弹出的对话框上接受默认值 ,单击 OK 按钮。

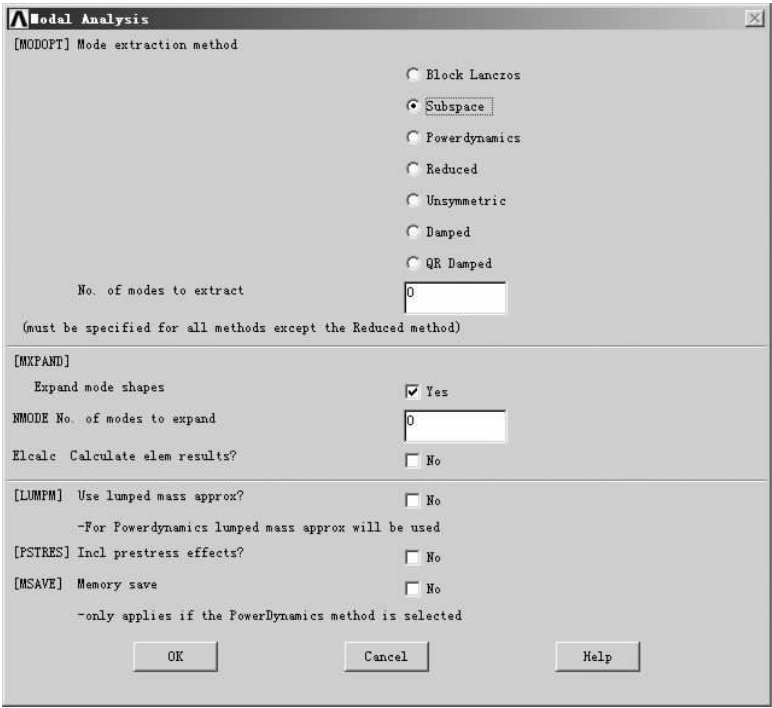


图 7-39 模态分析定义对话框

(4) 指定要扩展的模态数

依次选择 Main Menu>Solution > Load Step Opts-ExpansionPass>Expand Modes ,在弹出的对话框上的 number of modes to expand 文本框中输入 5 ,如图 7-40 所示 ,单击 OK 按钮。

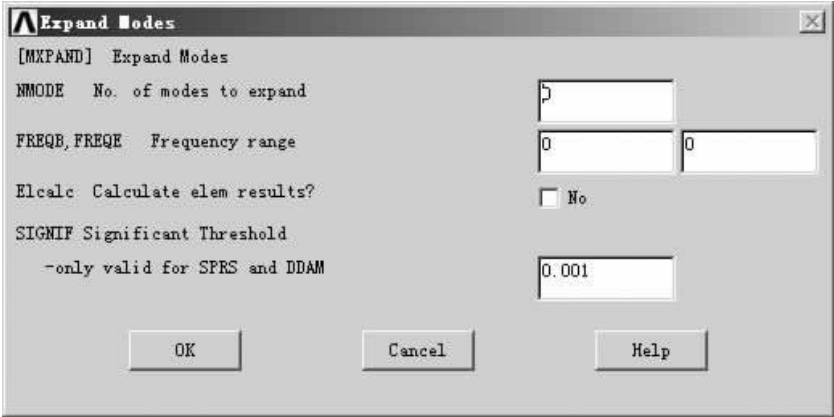


图 7-40 扩展模态定义对话框

(5) 求解

4. 观看结果

列出固有频率

依次选择 Main Menu>General Postproc> Results Summary ,浏览对话框中的信息。

7.8 间接法热应力分析

练习目的

了解间接法热应力分析求解问题的方法。

问题描述

热流体在带有冷却栅的管道里流动 ,图 7-41 所示为轴对称截面。管道和冷却栅的材料均为不锈钢 ,导热系数为 1.25 ,弹性模量 28e6 ,热膨胀系数 0.9 ,泊松比 0.3 ,管道内压力 1 000 ,管内流体温度 450 ,对流系数 1 ,外界流体温度 70 ,对流系数 0.25。求解温度及应力分布。

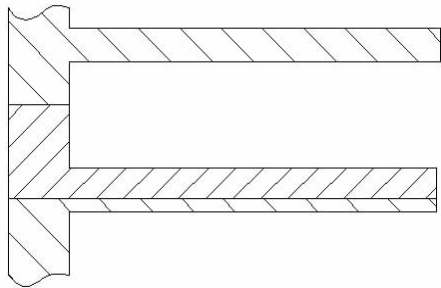


图 7-41 管道和冷却栅断面形状

具体步骤

1. 给定文件名和标题

设定文件名为 pipe ,标题为自定。

2. 定义热单元类型

单元类型 1 为 PLANE55 ,单击 Option 按钮 ,在弹出的对话框中指定单元选项为轴对称。

3. 定义热单元材料类型(导热系数)

定义导热系数为 1.25。

4. 建立有限元模型

(1) 创建 8 个关键点

坐标及编号如表 7-3 所示。

表 7-3 关键点坐标值

| 编 号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------|---|---|----|------|------|---|---|------|
| X 坐标 | 5 | 6 | 12 | 12 | 6 | 6 | 5 | 5 |
| Y 坐标 | 0 | 0 | 0 | 0.25 | 0.25 | 1 | 1 | 0.25 |

(2) 由点直接组成三个面

面 1 :由点 1 2 5 8 组成 ,面 2 :由点 2 3 4 5 组成 ,面 3 :由点 8 5 6 7 组成。

(3) 划分网格

指定单元整体尺寸为 0.125 ,划分网格。

(4) 施加管内对流边界条件

依次选择 Main Menu>Solution> Apply>Convection>On Nodes ,在左侧边界节点(线 4 ,

10)施加对流系数 1 ,流体温度 450。

(5) 施加外界对流边界条件

依次选择 Main Menu>Solution> Apply>Convection>On Nodes ,在右侧外界边界节点

(线 6 7 8)施加对流系数 0.25 ,流体温度 70。

5. 热分析求解和温度分布显示

求解后的温度分布如图 7-42 所示。

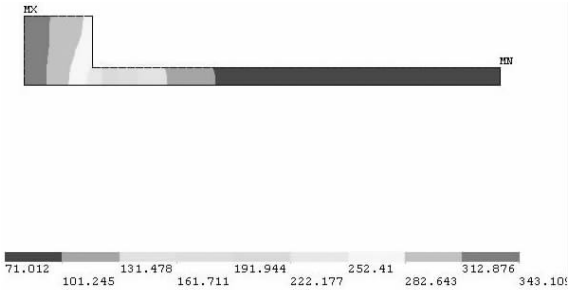


图 7-42 温度分布

6. 单元转换与设置

重新进入前处理 ,依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Switch Elem

Type ,选择 Thermal to Structural ,如图 7-43 所示。然后设定结构单元为轴对称。

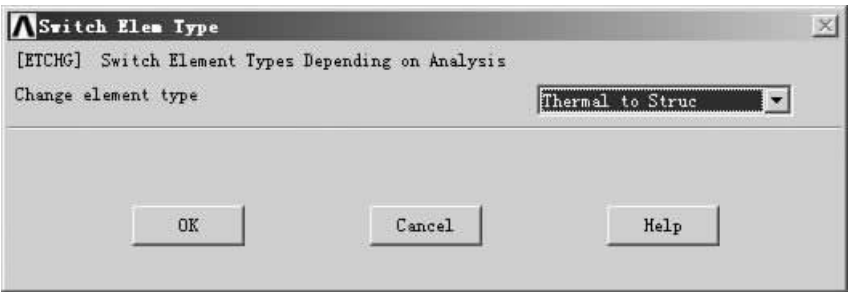


图 7-43 单元类型转换对话框

7. 定义材料

定义弹性模量为 28e6 ,泊松比为 0.3 ,热膨胀系数为 0.9e-5。

8. 结构加载和求解

(1) 定义对称边界

定义上下边界(线 1,5,9)为 Y 轴对称。

(2) 施加管内壁压力

施加左侧(线 4,10)节点压力 1000。

(3) 设置参考温度

依次选择 Main Menu>Solution> Load>Setting>Reference Temp ,在弹出的对话框中输入 70 ,如图 7-44 所示 ,单击 OK 按钮。

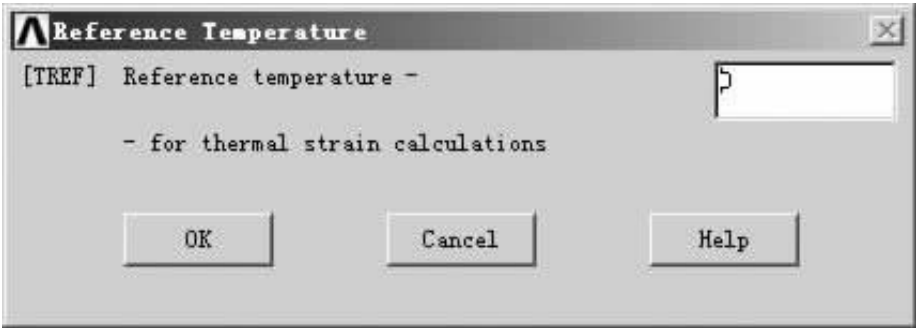


图 7-44 参考温度设定对话框

依次选择 Utility Menu>Select>Everything。

(4) 读入热分析结果

依次选择 Main Menu>Solution> Apply>Temperature>From Thermal Anslsysis ,选择 pipe.rth ,如图 7-45 所示 ,单击 OK 按钮。

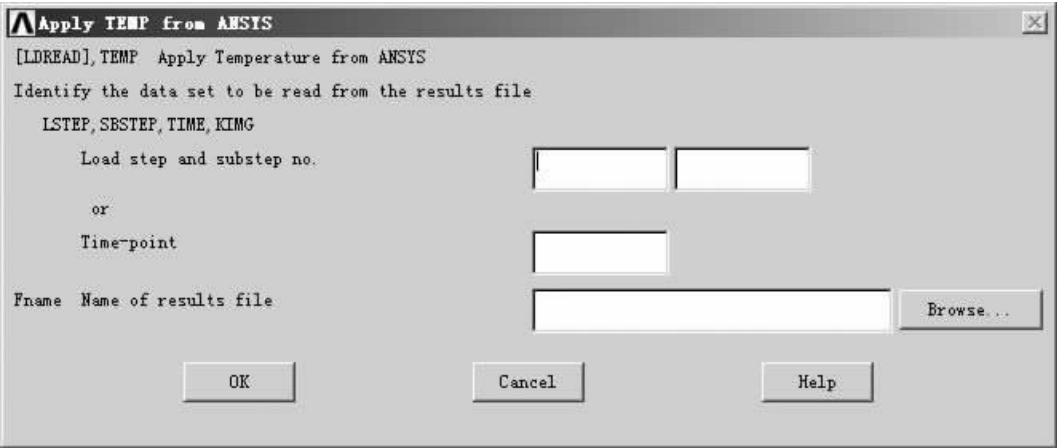


图 7-45 读入热分析结果对话框

(5) 求解并显示应力

求解后的应力结果如图 7-46 所示。

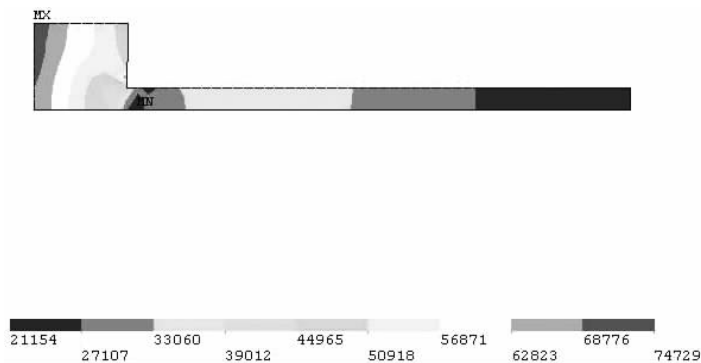


图 7-46 应力结果显示

7.9 一个层/热/定常流的 FLOTRAN 分析

练习目的

了解 ANSYS/FLOTRAN 求解问题的方法。

问题描述

计算在两条垂直边上具有不同温度的方腔内的浮力驱动流动,用 FLUID141 二维单元分析层流定常流动。这个问题模拟的物理现象在许多实际问题中都会遇到,包括太阳能的收集,房屋的通风等。

分析条件方腔尺寸为 $0.03\text{ m} \times 0.03\text{ m}$,重力加速度为 9.8 m/s^2 ;名义温度为 193 K ;参考压力为 $1.0135\text{e}5\text{ Pa}$;流体为空气,国际单位,载荷为方腔左侧壁面温度 320 K ,右侧壁面温度 280 K 。

具体步骤

1. 定义单元类型

单元类型 1 为 FLUID141。

2. 建立有限元模型

(1) 生成代表方腔的面。

创建矩形面,相关尺寸为 $X1=0, X2=0.03, Y1=0, Y2=0.03$ 。

(2) 划分网格

指定线分割数目为 25,划分面。

(3) 施加速度边界条件

依次选择 Utility Menu > Select > Entities,在弹出的对话框上选择 Nodes 和 Exterior,如图 7-47 所示。单击 OK 按钮,即选择了方腔外边界上的所有节点。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Loads-Appl > Fluid/CFD-Velocity > On Nodes,在弹出的对话框上单击 Pick All 按钮,设置 $V_x=0, V_y=0$,单击 OK 按钮。

(4) 施加热边界条件

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Loads > Loads-Appl > Thermal-Temperature > On Nodes,框选左侧边界的所有节点,单击 OK 按钮,在弹出的对话框中输入温度值“320”,如图 7-48 所示。以同样的方法给右侧边界节点施加 280° 的温度值。

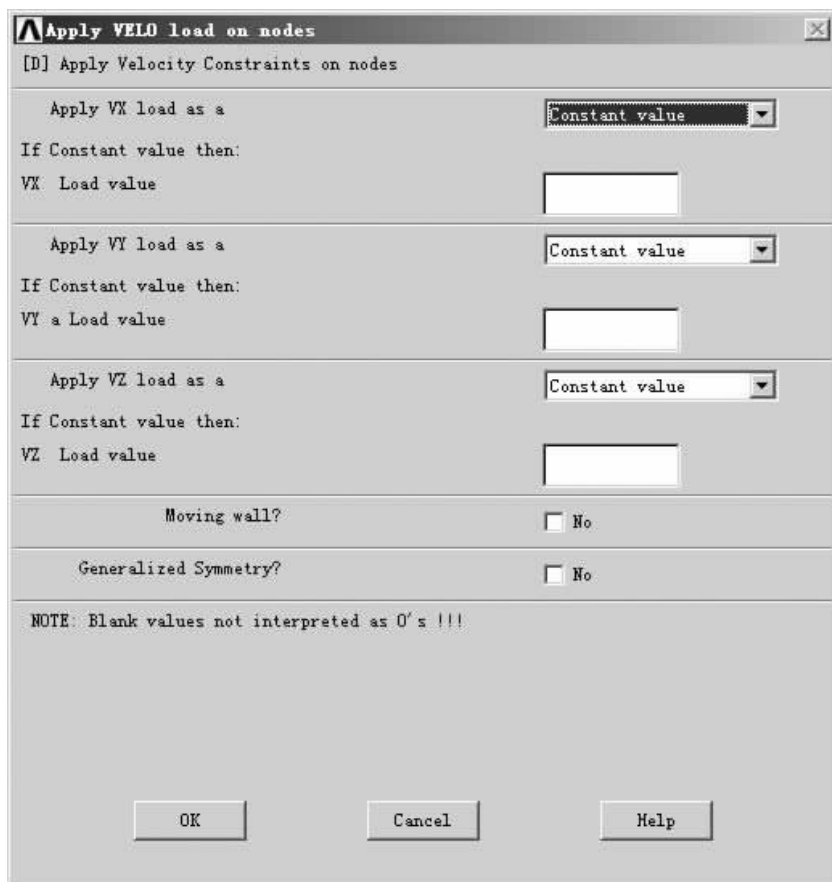


图 7-47 速度边界条件定义对话框

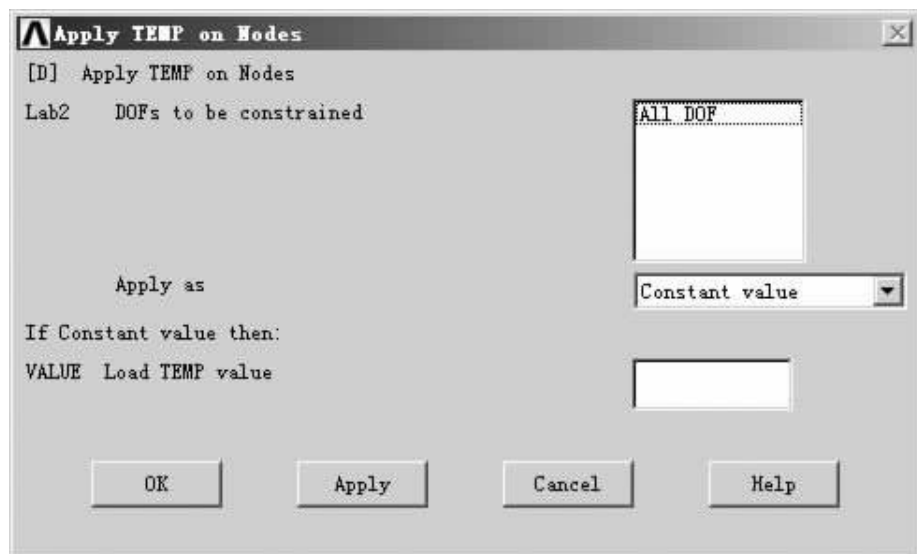


图 7-48 施加温度对话框

3. 设置求解选项和执行控制

(1) 设置求解选项

依次选择 Main Menu>Preprocessor>FLOTRAN Set Up>Solution Options ,在弹出的对话框上将 Adiabatic or thermal 设置为“Thermal” ,单击 OK 按钮。

(2) 设置执行控制

依次选择 Main Menu>Preprocessor>FLOTRAN Set Up>ExecutionCtrl ,在弹出的对话框上设置全局迭代数(EXEC)为 200 ,文件覆盖率为 50 ,如图 7-49 所示 ,单击 OK 按钮。

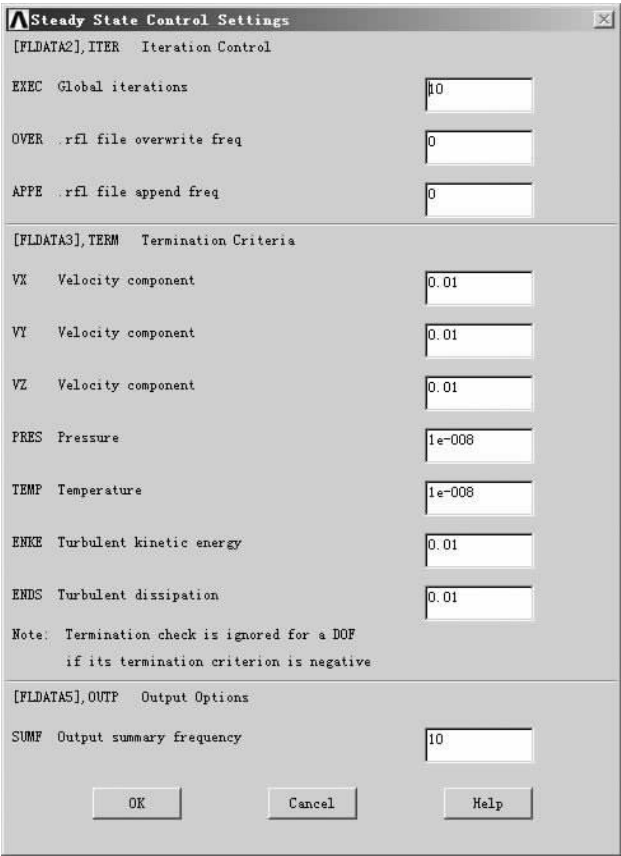


图 7-49 执行控制对话框

4. 设置流体特性

将坐标平面进行平移并旋转。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>FLOTRAN Set Up>Fluid Properties ,在出现的流体特性对话框上将 Density ,Viscosity ,Conductivity 和 Specific Heat 均设置为“ AIR-SI ”;并将“Allow density variations ?”设置为“on” ,如图 7-50 所示。单击 OK 按钮。阅读如何计算系数的信息后 ,单击 OK 按钮。

5. 设置 FLOTRAN 流动环境参数

依次选择 Main Menu>Preprocessor>FLOTRAN Set Up>Flow Environment>Gravity ,出现重力说明对话框 ,设置 Accel in Y direction 为 9.81 ,如图 7-51 所示 ,单击 OK 按钮。



图 7-50 流体特性定义对话框

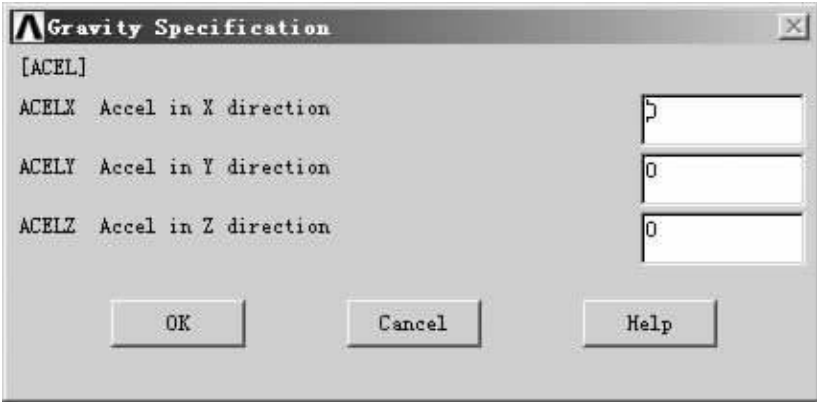


图 7-51 流动环境参数定义对话框

6. 求解

(1) 设置求解器控制

依次选择 Main Menu>Preprocessor>FLOTTRAN Set Up>CFD SOLVER Contr>PRES Solver CFD ,在弹出的对话框上选择“TDMA” ,如图 7-52(a)所示。单击 OK 按钮 ,在其后弹出的对话框上确定“No. Of TDMA sweep for pressure”的值为 100 ,如图 7-52(b)所示 ,单击 OK 按钮。

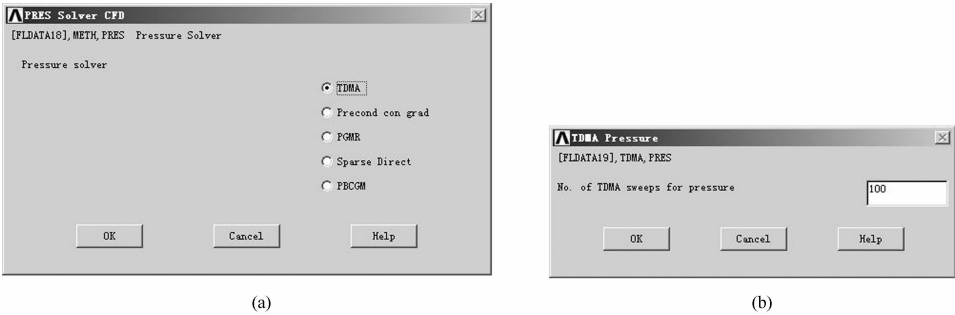


图 7-52 求解器控制设置对话框

(2) 求解

依次选择 Main Menu>Solution>Run FLOTRAN。

7. 查看结果

(1) 显示温度解

读入最后一步结果 ,显示温度分布 ,如图 7-53(a)。

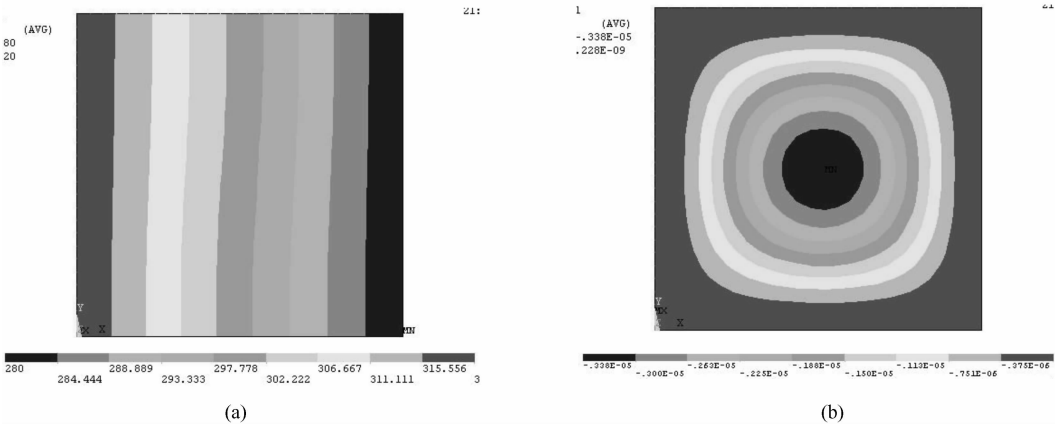


图 7-53 温度结果和流函数等值线图显示

(2) 显示流函数等值线

如图 7-53(b)所示。

(3) 显示速度矢量图

依次选择 Utility Menu >Plot Controls >Device Options ,在弹出的对话框上将矢量模式 (wireframe)设为“On” ,如图 7-54 所示 ,单击 OK 按钮。

依次选择 Main Menu>General PostProc>Plot Result>Vector Plot>Predefined ,在弹出的对话框上选择 Velocity 选项 ,单击 OK 按钮。结果如图 7-55(a)所示。

(4) 显示温度等值线的粒子轨迹图

设置工作平面的捕捉增量为 0.000 5 ,间距为 0.000 1 ,容许偏差为 0.000 05。

依次选择 Utility Menu >Plot >Elements。

依次选择 Main Menu>General PostProc>Plot Result>Flow Trace>Defi Trace Pt ,在求解域内任意拾取 5、6 个点 ,单击 OK 按钮。

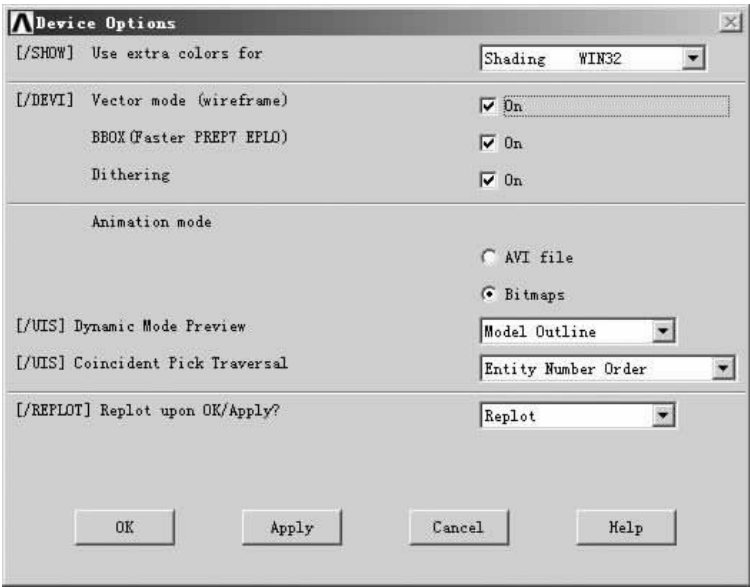


图 7-54 显示矢量定义对话框

依次选择 Main Menu>General PostProc>Plot Result>Flow Trace>Plot Flow Trace ,在弹出的对话框上选择温度选项 ,显示温度粒子轨迹等值线图 结果如图 7-55(b)所示。

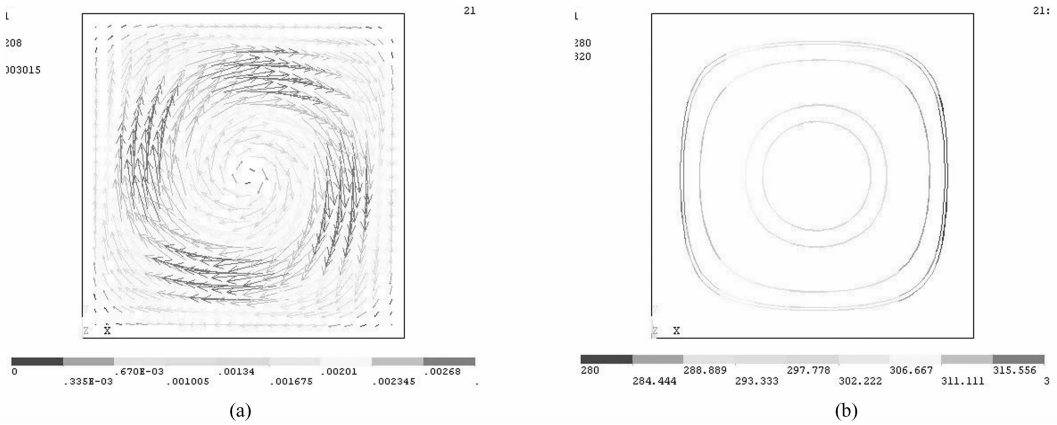


图 7-55 速度矢量图和温度粒子轨迹等值线图

下 篇

ANSYS /LS-DYNA 应用基础

第 8 章 ANSYS/LS-DYNA 概述

8.1 ANSYS/LS-DYNA 功能介绍

8.1.1 发展概况

1976—1986 年,美国劳伦斯·利沃莫尔国家实验室的 J.O.Hallquist 博士主导开发 DYNA3D,主要目的是为武器设计提供分析工具,后经多年的功能扩充和改进,在武器结构设计、内弹道和终点弹道、军用材料研制等方面表现突出,广泛应用于冲击、碰撞、爆破及流固耦合研究。

1986 年 DYNA 部分源程序在 Public Domain(北约局域网)发布,从此在研究和教育机构广泛传播,被公认为是显式有限元程序的鼻祖和理论先导,是目前所有显式求解程序(包括显式板成型程序)的基础代码。

1987 年 Hallquist 创建 LSTC 公司,开始了 DYNA 软件商品化的过程,推出了 LS-DYNA 程序系列,进一步规范和完善了 DYNA 的研究成果。1990 年推出 LS-DYNA 900 版本,目前为 970 版本,增加了汽车安全性分析(汽车碰撞、气囊、安全带、假人)、薄板冲压成型过程模拟,以及流体与固体耦合等新功能。

1996 年,ANSYS 与 LSTC 合作推出 ANSYS/LS-DYNA5.3,秉承了 ANSYS 软件的强大的前后处理功能和 DYNA3D 强大的求解分析能力,是目前市场上求解最快的,功能最丰富,用户数量最多的显式有限元分析软件。

用户可以充分利用 ANSYS 的前后处理和统一数据库的优点,不仅增强了 LS-DYNA 的分析能力,同时大大拓展了其用户群体和应用范围。另一方面,也填补了 ANSYS 应用和分析领域。

8.1.2 工程应用

ANSYS/LS-DYNA 程序是功能齐全的几何非线性(大位移、大转动和大应变)、材料非线性(140 多种材料动态模型)和接触非线性(40 多种接触类型)程序。它以 Lagrange 算法为主,兼有 Euler 算法和 ALE 算法;以显式求解为主,兼有隐式求解功能;以结构分析为主,兼有热分析、流体-结构耦合功能;以非线性动力分析为主,兼有静力分析功能(如动力分析前的预应力计算和薄板冲压成型后的回弹计算);军用和民用相结合的通用结构分析非线性有限元程序。

ANSYS/LS-DYNA 的工程应用范围见表 8-1。

表 8-1 工程应用的领域

| 领 域 | 具 体 应 用 |
|------|--|
| 汽车 | 气囊 碰撞 乘员安全 零部件加工 |
| 制造业 | 锻压成形 铸造切割 |
| 工程结构 | 地震分析 混凝土结构 爆破作业 气弹颤振 |
| 电子 | 跌落分析 包装设计 电子封装 热分析 |
| 军工 | 内弹道、终点弹道 装甲与反装甲 弹头的动能及化学能 武器设计 爆炸或震动波的传播 侵彻 空中、油中和水下爆炸 核废物装运 |
| 石油 | 液体晃动 完井射孔 事故分析 管道抗冲击设计 输油管道冲击 爆炸熔割(射流) 海上平台设计 |
| 航空航天 | 瞬态动力冲击 分离过程模拟 声振耦合 鸟撞 叶片包容 碰撞分析 冲击、爆炸、点火 空间废墟碰撞 气弹颤振 |

8.1.3 总体特点

ANSYS /LS-DYNA 是三维快速高度非线性显式有限元分析程序 ,以三维结构为主的多物理场耦合分析 ,应用了先进丰富的数值处理技术 ,包括材料模式、接触方式、ALE 算法、并行处理、网格畸变处理。

1. 显式算法和时步控制

ANSYS /LS-DYNA 算法无收敛迭代 ,依靠小时步保证计算精度 ;有条件稳定 ,变时步增量解法 ,集中质量矩阵 ,无总体刚度矩阵 ,计算速度快。

2. 丰富的材料模型

程序目前提供了 140 多种金属和非金属材料模型 ,其种类可大致分为 :弹性材料和弹塑性材料(代表大多数金属材料)、泡沫材料和复合材料(代表泡沫材料、蜂窝材料或者丝织物等)、混凝土材料(代表土壤等)、状态方程定义的材料(代表炸药、推进剂等)、其他材料(包括弹性流体、刚性体等)。

3. 简单适用的单元类型

程序现有 16 种单元类型。各类单元又有多种理论算法可供选择 ,具有大位移、大应变、大转动的性能 ,单元积分采用沙漏粘性阻尼以克服零能模式 ,单元计算速度块 ,节省存储量 ,可以满足各种实体结构 ,薄壁结构和流体固体耦合结构的有限元网格划分的需要。

4. 多种接触和耦合方式

现有 40 多种接触类型可以求解下列接触问题 :变形体对变形体的接触、变形体对刚体的接触、刚体对刚体的接触、与刚性墙的接触、板壳结构的单面接触(屈曲分析)、变形结构固连和失效。

上述技术成功用于整车碰撞研究 ,乘员与柔性气囊或者安全带接触的安全性分析 ,薄板与冲头和模具接触的金属成型 ,水下爆炸对结构的影响 ,高速弹丸对靶板的穿甲模拟计算等。

5. 先进 ALE 算法

Lagrange 算法的单元网格附着在材料上 ,随着材料的流动而产生单元网格的变形。但是在结构变形过于巨大时 ,有可能使有限元网格造成严重畸变 ,引起数值计算的困难 ,甚至程序终止计算。

ALE 算法可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难 ,并实现流体 – 固体耦合的动态分析。

8.2 ANSYS/LS-DYNA 程序概述

8.2.1 程序构成和用户界面

ANSYS/LS-DYNA 程序系统是将非线性动力分析程序 LS-DYNA 显式积分部分与 ANSYS 程序的前处理 PREP7 和后处理 POST1、POST26 连接成一体。这样既能充分运用 LS-DYNA 程序强大的非线性动力分析功能,又能很好地利用 ANSYS 程序完善的前后处理功能来建立有限元模型与观察计算结果,它们之间的关系如图 8-1 所示。

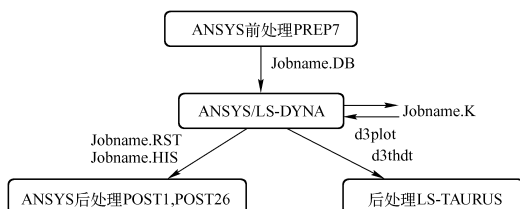


图 8-1 ANSYS/LS-DYNA 程序系统相互关系

8.2.2 一般求解步骤

ANSYS/LS-DYNA 程序系统的求解步骤如下。

1. 前处理建立有限元模型(使用 PREP7 前处理器)

(1) 设置 Preference 选项

依次选择 Main Menu>Preference 打开如图 8-2 所示的 Preference for GUI Filtering 对话框,选择 Structural 和 LS-DYNA Explicit 选项。

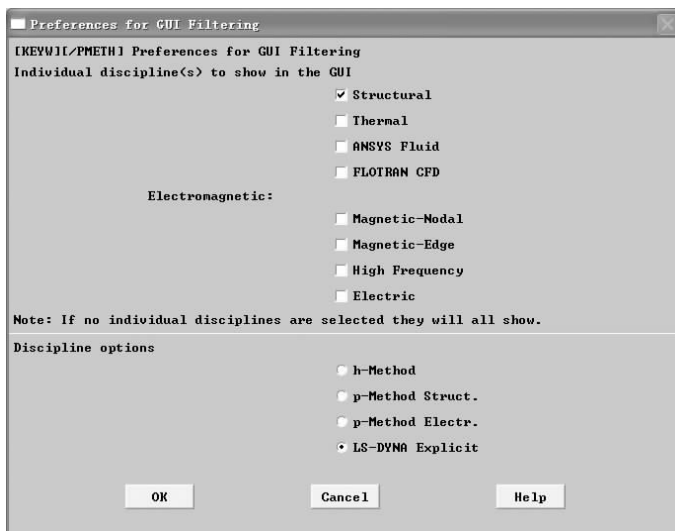


图 8-2 设置 Preference 选项

经过这样的设置 ,在以后显示的菜单将过滤成 ANSYS /LS-DYNA 的输入选项。

(2) 定义单元类型

ANSYS /LS-DYNA 模块不仅需要选择单元类型 ,还要根据分析情况选择单元的算法。还有一些单元需要定义实常数 ,例如常用的壳单元通过实常数给定壳的厚度。

(3) 定义材料性质

ANSYS /LS-DYNA 模块提供了丰富的材料模型 ,定义过程与前面的 ANSYS 定义类似 ,但也有很多不同之处。根据分析问题的实际需要 ,选择合适的材料模型表达实际问题 ,是有限元分析重要的一步。

(4) 实体模型的建立和网格化

通过前处理器建立或者直接导入实体模型 ,然后进行网格化操作 ,实现连续体的离散化。

(5) 接触的定义

工程问题不可避免有摩擦、碰撞的现象。ANSYS /LS-DYNA 模块处理接触问题有着特殊的方式 ,通过定义接触面和目标面的接触类型来表征和解决接触问题。

2. 加载和求解

(1) 加载

加载包括约束边界条件、给定载荷和初始条件。ANSYS /LS-DYNA 的载荷定义成与时间相关的函数 ,然后才能施加 ,而一般的动力分析也要求有初始条件 ,例如初速度。

(2) 设置求解过程的控制参数

求解控制包括基本控制、输出文件控制等多方面。计算时间、输出文件的时间间隔、格式化文件输出、质量缩放、子循环、沙漏控制等。

(3) 求解

完成上述步骤之后 ,将程序的控制权转到求解 ,即调用 LS-DYNA 求解器进行求解。

3. 后处理

POST1(用于观察整体变形和应力应变状态)和 POST26(用于绘制时间历程曲线) ,也可以连接到 LSTC 公司的后处理程序 LS-TAURUS。

8.2.3 文件系统

由于 ANSYS /LS-DYNA 程序构成的特点 ,其数据文件与 ANSYS 略有不同 ,产生的文件既满足 ANSYS 的要求 ,也满足 LS-DYNA 的要求。

表 8-2 给出了 ANSYS 数据文件的名称、形式和文件性质 ,表 8-3 给出了 LS-DYNA 数据文件的名称、形式和文件性质 ,由此 ,可以清楚地知道 ANSYS /LS-DYNA 模块文件系统的组成 ,及与 ANSYS 文件系统的异同。

表 8-2 ANSYS 数据文件

| 文件 名 称 | 文 件 形 式 | 文 件 性 质 |
|----------|-------------|----------|
| 数据库文件 | Jobname.DB | 二进制文件 |
| 图形数据文件 | Jobname.RST | 二进制文件 |
| 时间历程数据文件 | Jobname.HIS | 二进制文件 |
| 输出文件 | Jobname.OUT | ASCII 文件 |
| 命令文件 | Jobname.LOG | ASCII 文件 |

表 8-3 LS-DYNA 数据文件

| 文件名称 | 文件形式 | 文件性质 |
|--------|-----------|----------|
| 输入数据文件 | Jobname.K | ASCII 文件 |
| 重新启动文件 | D3DUMP | 随机文件 |
| 图形数据文件 | D3PLOT | 随机文件 |
| 时间历程文件 | D3THDT | 随机文件 |

8.2.4 需要说明的几个问题

由于 ANSYS 前处理程序还不能满足 LS-DYNA 程序系统的全部功能 ,用户可以生成 LS-DYNA 的输入数据文件 Jobname.K 经过编辑修改后 ,再直接调用 LS-DYNA 程序求解 ,其计算结果图形数据文件仍然可以连接 ANSYS 后处理程序 POST1、POST26 和 LS-DYNA 后处理程序 LS-TAURUS 观察计算结果。

ANSYS/LS-DYNA 可以与 ANSYS 结构分析程序之间传递几何数据和结果数据来执行隐式—显式或者显式—隐式分析 ,如跌落试验 /回弹计算等。

使用 ANSYS/LS-DYNA 时 ,建议用户使用程序提供的默认设置。多数情况 ,这些设置适合求解问题。

练习题

- 1. ANSYS/LS-DYNA 工程应用领域有哪些？该模块的突出特点是什么？
- 2. ANSYS/LS-DYNA 程序系统是怎样的？一般解题步骤是什么？

第 9 章 显式单元的定义与选择

根据 DYNA 显式单元族与 ANSYS 隐式单元显著不同的特点 ,分类介绍各种单元定义的编号、类型、不同的算法、单元的特点、适用条件和选择方法 ,其中针对不同单元详细阐述相关的理论与应用实践等问题。

9.1 显式单元概述

ANSYS /LS-DYNA 给出 7 种单元类型 ,如表 9-1 所示。

表 9-1 显式动力单元类型

| 名 称 | 说 明 |
|----------|----------------------------------|
| LINK160 | 显式桁架单元(类似于 ANSYS 中的 LINK8) |
| BEAM161 | 显式梁单元(类似于 ANSYS 中的 BEAM4) |
| SHELL163 | 显式薄壳单元(类似于 ANSYS 中的 SHELL181) |
| SOLID164 | 显式块单元(类似于 ANSYS 中的 SOLID45) |
| COMB165 | 显式弹簧与阻尼单元(类似于 ANSYS 中的 COMBIN14) |
| MASS166 | 显式结构质量(类似于 ANSYS 中的 MASS21) |
| LINK167 | 显式缆单元(类似于 ANSYS 中的 LINK10) |

显式单元族在以下方面与 ANSYS 隐式单元明显不同。

(1) 每种单元可用于多种材料模型。

在 ANSYS 隐式分析中 ,不同的单元类型仅仅适用于特定的材料类型 ,如超弹材料只能使用单元 HYPER56、HYPER58 和 HYPER74 ;粘塑性材料只能使用单元 VISCO106 和 VISCO108。而每种显式单元都可以使用多种材料 ,例如同样是实体单元 SOLID164 ,既可以使用弹性材料 ,又可以使用弹塑性材料 ,单元使用什么材料取决于用户的定义和选择。

(2) 每种单元类型有几种不同算法。

如果 ANSYS 隐式单元有多种算法 ,则具有多个单元名称 ,例如壳单元就有 SHELL43、SHELL63 ,这标志着这两种单元虽然都是壳单元 ,但算法不相同 ,编号也不同。在 ANSYS /LS-DYNA 中 ,每种单元类型可以具有多种算法 ,如 SHELL163 就有 11 种算法 ,用户可以根据不同需要选择算法。

(3) 所有显式动力单元都是三维的 ,且具有一次线性位移函数。

(4) 每种显式动力单元默认为单点积分。

(5) 不具备带额外形函数和中间节点的单元。

9.1.1 单点积分单元

实体单元积分的求解是由高斯积分近似完成的,正常实体单元和壳单元的积分点分别为8个和4个。而单点积分单元只使用一个积分点。即单点积分块单元在其中心有一个积分点,单点积分壳单元在面中心具有一个积分点。

(1) 单点积分单元的优点

在显式动力分析中最耗 CPU 的一项就是单元的处理,单元处理的快慢与积分点数成正比,因此,单点积分最大的优势在于节约计算时间。所有的显式动力单元的默认设置为单点积分。

此外,全积分单元在求解塑性或者类似问题过程中,当泊松比接近 0.5 时易出现零能模式,在材料失效条件下可能性更大。因此,单点积分单元在大变形分析中更加有效,而且能承受比标准 ANSYS 隐式单元更大的变形。

(2) 单点积分单元的缺点

单点积分最大的不足在于需要控制零能模式的出现,也称为沙漏模式,这是需要控制和减少的模式。另外,应力结果的精确度与积分点数直接相关,单点积分在节约计算时间的同时一定程度上牺牲了计算精度。

9.1.2 沙漏问题

沙漏变形是一种以比结构全局响应高的多的频率震荡的零能变形模式,它导致一种在数学上是稳定的,但在物理上是不可能的状态。它们通常没有刚度,变形呈现锯齿形网格,如图 9-1 所示。沙漏的出现可能会导致结果无效,应尽量避免和减小。

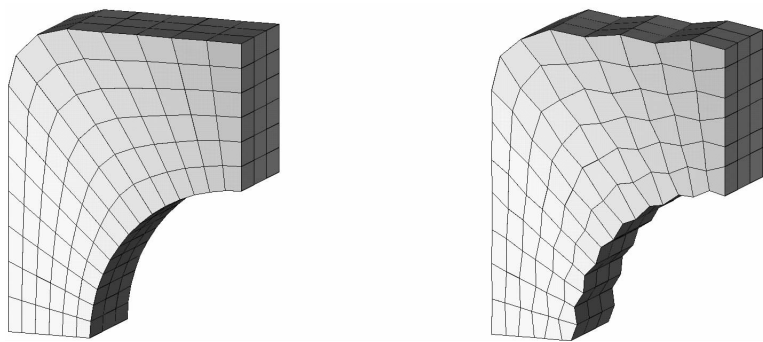


图 9-1 沙漏现象

如果总的沙漏能大于模型内能的 10%,这个分析就有可能是失败的。在 ANSYS/LS-DYNA 求解时生成的 ASCII 文件(GLSTAT、MATSUM)可输出沙漏能的情况,用户可以由此观察和跟踪能量的变化。

9.2 单元和实常数的定义

单元和实常数的定义步骤与 ANSYS 中是基本一样的,只是由于菜单过滤之后单元的类

型均为显式单元族 ,实常数也是与此相对应的。以壳单元为例说明单元和实常数的定义过程。

(1) 定义单元类型

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add /Edit /Delete ,打开如图 9-2(a) 所示 Element Types 对话框 ,单击 Add 按钮。在弹出的 Library of Element Types 对话框上选择显式单元族中的 SHELL163 ,如图 9-2(b) ,单击 OK 按钮。

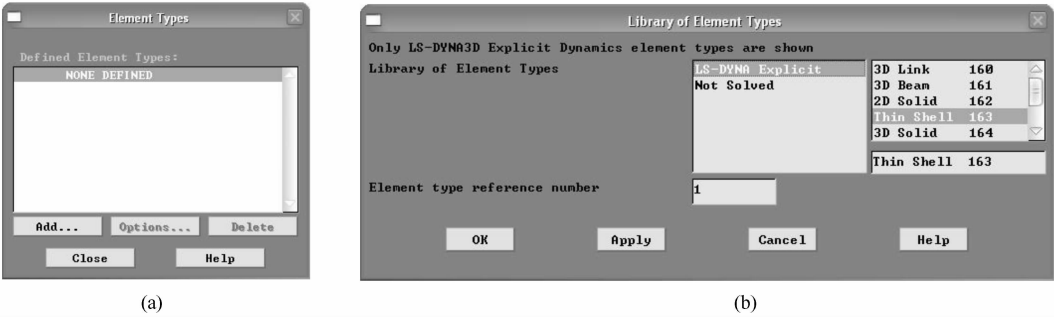


图 9-2 单元类型选择对话框

(2) 选择单元算法

选择单元类型后即回到 Element Types 对话框 ,单击 Option 按钮 ,打开如图 9-3 所示的 SHELL 163 element type options 对话框 ,其上选择壳单元的算法、积分规则、复合材料模式等。

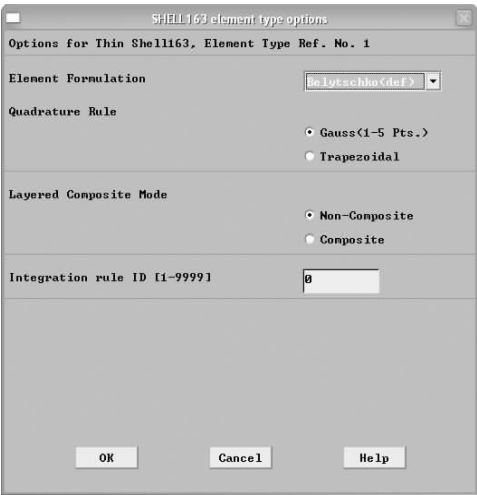


图 9-3 单元算法的选择

(3) 定义实常数

与 ANSYS 中一样 ,不是所有单元都需要定义实常数 ,但壳单元一般是要求定义实常数的 而且是通过实常数定义壳单元的厚度。依次选择 Main Menu > Preprocessor > Real Constants 单击 Add 按钮 ,在弹出的对话框上选择要定义实常数的单元类型 (这里是 SHELL163) ,弹出如图 9-4 所示的对话框 ,允许用户定义剪切因子、积分点数和壳单元厚度。

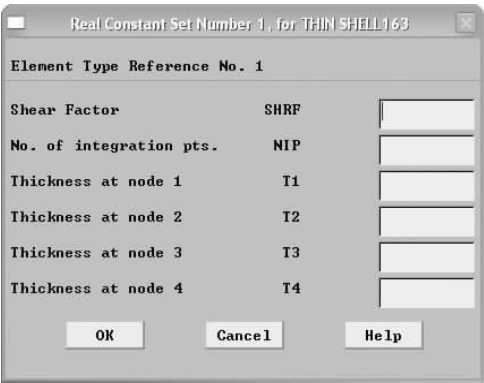


图 9-4 实常数的定义

9.3 SOLID164 实体单元

SOLID164 实体单元是 ANSYS/LS-DYNA 分析问题过程中最常用的单元之一 ,为 8 节点六面体单元 ,当有节点重复时将退化成 6 节点楔形单元或者 5 节点锥形单元 ,如图 9-5 所示。

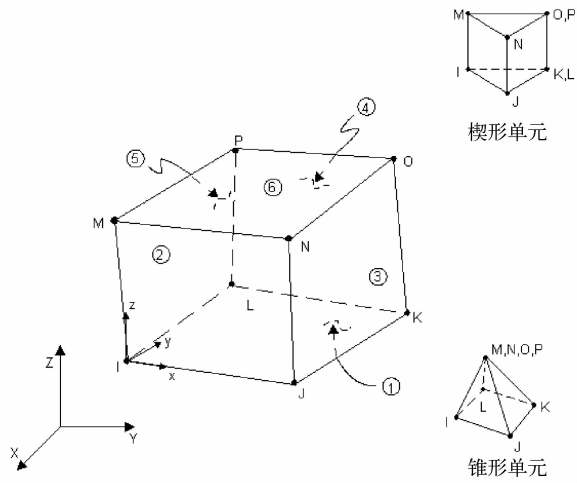


图 9-5 实体单元及其退化形式

实体单元算法通过 KEYOPT(1)来标志 ,取值有两个 ,如表 9-2 所示。

表 9-2 实体单元算法选择

| KEYOPT(1)取值 | 算 法 说 明 | 应 用 |
|-------------|---------|--|
| 1 | 默认算法 | 采用单点积分和沙漏控制。在节省机时的同时在大变形条件下增加可靠性 |
| 2 | 全点积分 | 采用 $2 \times 2 \times 2$ 多点积分 ,没有零能模式 ,不需要沙漏控制 |

9.4 SHELL163 薄壳单元

SHELL163 薄壳单元为 4 节点四边形单元 ,或者 3 节点三角形单元 ,如图 9-6 所示。

SHELL163 薄壳单元共有 11 种算法,用 KEYOPT(1)的取值来定义不同算法,根据算法的不同,又进一步分为 4 节点四边形薄壳单元、薄膜单元和 3 节点三角形薄壳单元。与实体单元类似,积分点数的增加会显著影响机时的耗费,对于一般问题的分析建议采用面内单点积分。

所有壳单元算法,用户可以沿壳厚度方向任选 2~5 个高斯积分点。对于弹性材料沿壳厚度方向选择 2 个积分点就足够了,对于塑性材料,至少要 3 个或者更多的积分点。

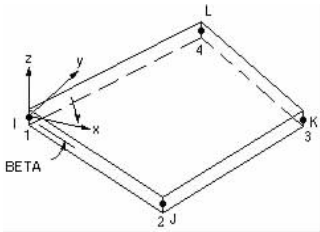


图 9-6 薄壳单元

(1) 4 节点四边形薄壳单元

4 节点四边形薄壳单元的算法及相关说明如表 9-3 所示。

表 9-3 4 节点四边形薄壳单元算法选择

| KEYOPT(1)取值 | 算 法 说 明 | 应 用 |
|-------------|--|--|
| 2 | Belytschko-Tsay 算法, 默认算法 | 面内单点积分,计算速度快,建议在大多数分析中使用,单元出现过度翘曲时不易采用 |
| 10 | Belytschko-Wong-Chiang 算法 | 面内单点积分,比 Belytschko-Tsay 算法慢 1/4,用于翘曲情况时一般可得到正确结果 |
| 8 | Belytschko-Leriathan 算法 | 面内单点积分,比 Belytschko-Tsay 算法慢 2/5,自动含物理意义上的沙漏控制 |
| 1 | Hughes-Liu 算法 | 面内单点积分,比 Belytschko-Tsay 算法慢 250% |
| 11 | 改进型 Fast (Co-Rotational) Hughes-Liu 算法 | 面内单点积分,比 Belytschko-Tsay 算法慢 150% |
| 6 | S/R Hughes-Liu 算法 | 面内 2×2 积分,没有沙漏,比 Belytschko-Tsay 算法慢 20 倍。如果在分析中遇到沙漏麻烦的话,建议使用这种算法 |
| 7 | S/R co-rotational Hughes-Liu 算法 | 面内 2×2 积分,没有沙漏,比 Belytschko-Tsay 算法慢 8.8 倍。如果在分析中遇到沙漏麻烦的话,建议使用这种算法 |

(2) 薄膜单元

薄膜单元的算法及相关说明如表 9-4 所示。

表 9-4 薄膜单元算法选择

| KEYOPT(1)取值 | 算 法 说 明 | 应 用 |
|-------------|---------------------------|--|
| 5 | Belytschko-Tsay 薄膜单元 | 采用单点积分,计算速度快,建议在大多数薄膜分析中使用,可很好地用于纤维织品 |
| 9 | 全点积分 Belytschko-Tsay 薄膜单元 | 采用 2×2 积分,无沙漏控制,计算速度比 Belytschko-Tsay 单点积分薄膜单元要慢很多 |

(3) 3 节点三角形薄壳单元

3 节点三角形薄壳单元的算法及相关说明如表 9-5 所示。

表 9-5 3 节点三角形薄壳单元算法选择

| KEYOPT(1)取值 | 算 法 说 明 | 应 用 |
|-------------|------------------------|--|
| 4 | C ₀ 三角形薄壳单元 | 面内单点积分,根据 Mindlin-Reissner 薄板理论导出,建议不要用它做整体的网格剖分 |
| 3 | BCIZ 三角形壳单元 | 采用面内单点积分,根据 Kirchhoff 薄板理论导出,比 C ₀ 三角形壳单元的计算速度慢 |

9.5 梁单元和杆单元

(1) BEAM161 梁单元

梁单元利用单元端部的两个节点定义 ,并以第 3 节点对单元主轴面进行定向 ,单元质量集中在节点上 ,如图 9-7 所示。

梁单元有两种算法 ,如表 9-6 所示。

表 9-6 梁单元算法选择

| KEYOPT(1) | 算 法 说 明 | 应 用 |
|-----------|-----------------------|--|
| 1 | Hughes-Liu 梁单元 | 该单元是一个比较方便的退化单元 ,可以通过梁单元中间跨度横截面上的积分点来模拟矩形或者圆形 ,用户还可以自定义一个横截面积分法则来模拟任意截面形状。沿单元长度内力矩是不变的 |
| 2 | Belytschko-Schwer 梁单元 | 单元的内力矩沿其长度方向线性分布 |

(2) LINK160 杆单元

与 Belytschko-Schwer 梁单元相似 ,杆单元只能承受轴向载荷 ,不能承受弯曲力矩 ,用于桁架系统 ,如图 9-8 所示。

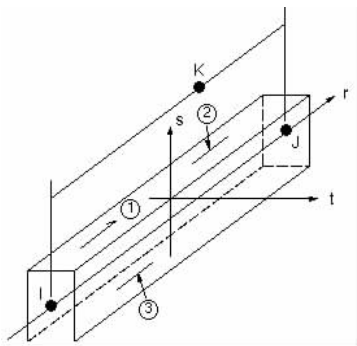


图 9-7 梁单元

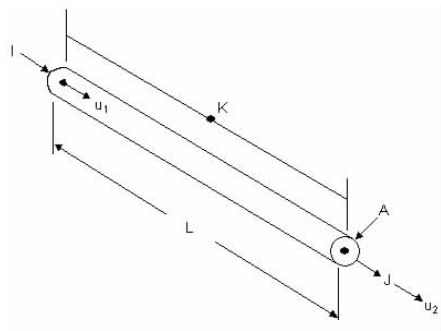


图 9-8 杆单元

(3) LINK167 索单元

索单元用单元端部两个节点定义 ,是仅能拉伸的杆单元 ,用于模拟索 ,如图 9-9 所示 ,由用户直接输入力与变形的关系式。

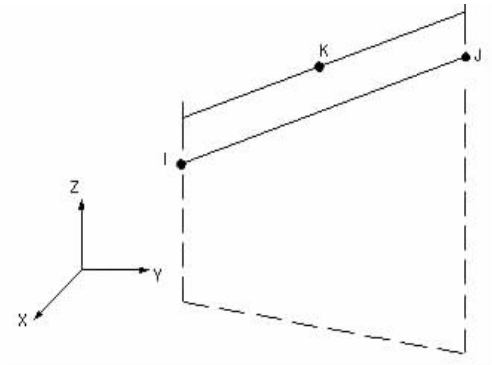


图 9-9 索单元

9.6 离散单元和质量单元

(1) COMB1165 弹簧阻尼单元

弹簧阻尼单元用单元端部两个节点定义。

弹簧单元在改变单元长度时产生沿单元轴向的力,也就是说,当单元受到拉力时,在节点 1 处沿轴的正方向,而对节点 2 是沿轴的负方向。默认时,单元轴就是从节点 1 到节点 2。当单元旋转时,力作用线的方向也将随之旋转,可以模拟弹性、弹塑性和非线性弹性的弹簧性质,如图 9-10(a)所示。

阻尼单元可以模拟线性粘性阻尼和非线性粘性阻尼,如图 9-10(a)所示。

扭转弹簧阻尼单元也可以使用,如图 9-10(b)所示,它由 KEYOPT(1)选项来选择。它的力-位移关系可以认为是力矩-转角关系。旋转弹簧单元只影响它们节点的转动自由度。

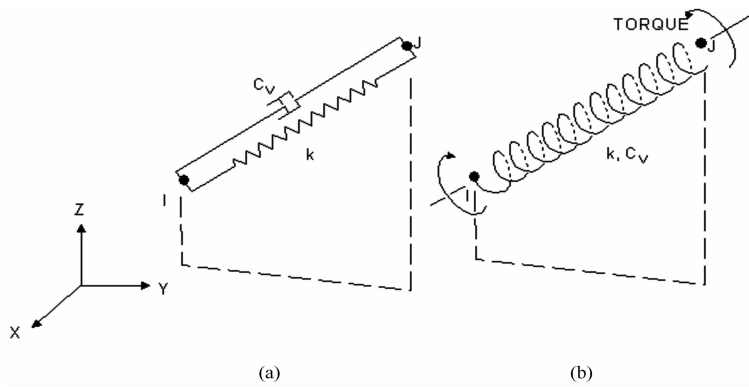


图 9-10 弹簧阻尼单元

(2) MASS166 质量单元

质量单元有一个节点和一个质量值(力 \times 时间²/长度)定义,如图 9-11 所示。采用质量单元可以简化部分结构,以减少动力分析所需的单元数目。

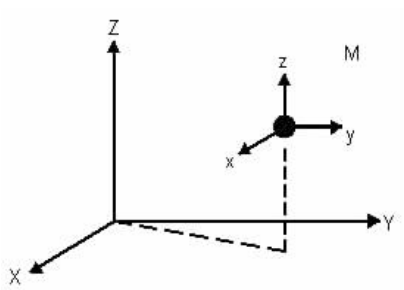


图 9-11 质量单元

9.7 实例:钢柱落地的分析

练习目的

加深对 ANSYS/LS-DYNA 的总体认识。

了解应用 ANSYS/LS-DYNA 分析问题的过程。

了解 ANSYS/LS-DYNA 相关文件。

问题描述

刚性柱体落地过程的模拟,由于柱体为对称结构,取 $1/4$ 为研究对象,落地面约束位移,不考虑接触。

材料特性: 杨氏模量 = 2.1 GPa , 密度 = $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 泊松比 = 0.3 , 屈服应力 = 0.005 GPa , 塑性切向模量 = 0.001 GPa 。

载荷: 初始速度 = 10 mm/s 。

具体步骤

1. 设置 Preference 选项

依次选择 Main Menu > Preference, 在打开的对话框上选择 Structural 和 LS-DYNA Explicit 两个选项。

2. 建立有限元模型

(1) 建立 $1/4$ 圆柱体

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create > Volume > Cylinder > By Dimensions, 依次输入 RAD1 = 0 , RAD2 = 1 , Z1 = 0 , Z2 = 10 , THETA1 = 0 , THETA2 = 90 , 单击 OK 按钮, 效果如图 9-12(a)所示。

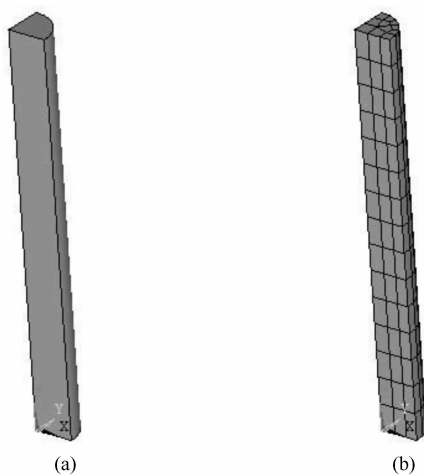


图 9-12 有限元模型的建立

(2) 选择单元

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete, 在弹出的对话框中选择 Add 按钮, 在 LS-DYNA Explicit 中选择“3D Solid 164”, 单击 OK 按钮, 通过单击 Options 按钮在打开的对话框上选择算法, 此处选择默认算法, 则不必进行上述操作。

(3) 定义材料

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Material Props > Define MAT Model, 在打开的对话框上单击 Add 按钮, 在 Define Model for Material Number 栏中默认材料号 1, 在 Available Material Models 左侧选择“Plasticity”, 右侧选择“Bilinear Isotrop”, 单击 OK 按钮, 在打开的对

话框中输入 $DENS = 7.8e-6$, $EX = 2.1$, $NUXY = 0.3$, $Yield\ stress = 0.005$, $Tangent\ Modulus = 0.001$,单击 OK 按钮 ,单击 CLOSE 按钮。

(4) 网格划分

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,指定 Mesh 为 “Volumes” ,在 Shape 中选择 “Hex”和 “Sweep” ,单击 Mesh 按钮 ,拾取要划分网格的实体 ,单击 OK 按钮。效果如图 9-12(b)所示。

3. 加载与求解

(1) 约束落地面

依次选择 Main Menu> Solution>Constraints>On Areas ,拾取落地面(即 $Z=0$ 的面) ,单击 OK 按钮 ,在打开的对话框上选择 UZ 作为约束自由度 ,值为 0 ,单击 OK 按钮。

(2) 约束对称面

依次选择 Main Menu> Solution>Constraints>On Areas ,分别拾取 $Y=0$ 和 $X=0$ 的面 ,单击 OK 按钮 ,按照对称面的边界条件约束。

(3) 定义组件

依次选择 Utility Menu>Select>Entities ,在打开的对话框上选择全部节点。

依次选择 Utility Menu>Select>Comp /Assembly>Create Component ,在打开的对话框上给定新建组件名称 “new” ,组件内容为节点(即刚才选择的节点) ,单击 OK 按钮。

(4) 施加初始速度

依次选择 Main Menu>Solution>Initial Velocity>w /Axial Rotate ,在打开的对话框上设定 UZ 为 “- 10” ,单击 OK 按钮。

依次选择 Utility Menu>Select>Everything。

(5) 设定求解时间

依次选择 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time ,在打开的对话框中输入求解终止时间为 2。

(6) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps ,在打开的对话框上设置 rst 文件输出步数为 20 ,his 文件输出步数为 50。

(7) 求解

依次选择 Main Menu>Solution>Solve。

4. 观看结果

(1) 读入计算结果

依次选择 Main Menu>General Postproc>Read Results ,选择要查看的某计算步的结果 ,即读入。

(2) 查看结果

根据需要查看计算结果或者动画显示 ,还可以将结果扩展以后查看整个钢柱落地的过程。如图 9-13 所示钢柱落地 Z 向位移的变化过程。

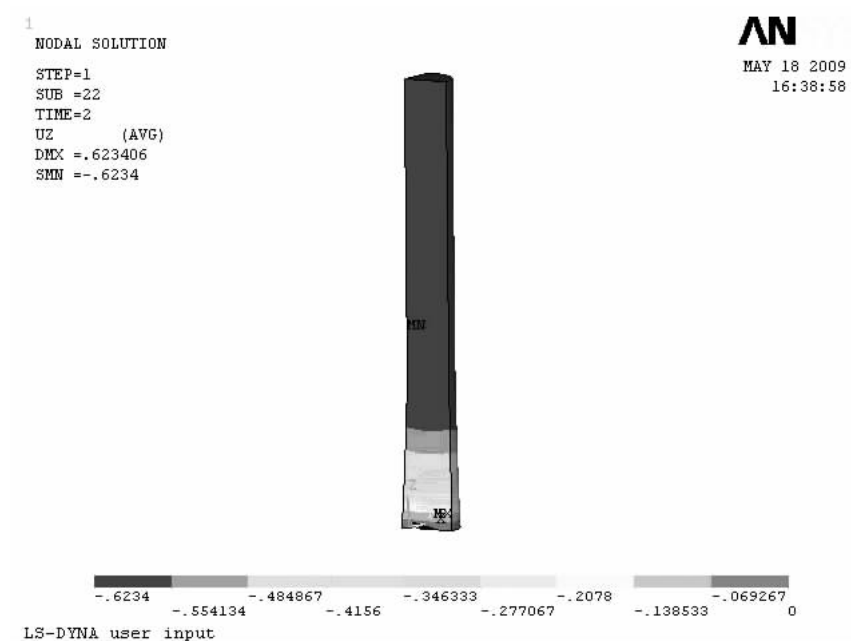


图 9-13 钢柱落地过程 Z 向位移的变化

练习题

1. 与 ANSYS 隐式单元相比,显式单元最大的不同是什么?
2. 实现单元和实常数定义的步骤是什么?
3. 实体单元的算法有几种?适合什么情况下使用?
4. 薄壳单元的算法有几种?适合什么情况下使用?
5. 梁单元和杆单元的算法有几种?适合什么情况下使用?
6. 离散单元和质量单元的算法有几种?适合什么情况下使用?

第 10 章 材料模式和状态方程

DYNA 模块提供了丰富的材料模型 ,其定义与 ANSYS 相比显著不同。本章分类介绍各种材料定义的编号、类型、不同的算法、材料的特点、适用条件和选择方法 ,其中针对不同材料详细阐述相关的理论与应用实践等问题。

LS-DYNA 程序可以使用的材料模型很多 ,在 ANSYS /LS-DYNA 前处理器中直接输入的材料模型约有 30 种 ,其他材料模型可以通过修改 k 文件来定义。可以直接输入模型如表 10-1 所示。

表 10-1 材料模型简介

| 材 料 分 类 | 材料模型编号 | 材料名称与说明 |
|--------------------------------|--------|--|
| 线弹性模型 (Linear Elastic) | 材料 1 | 各向同性(Isotropic) |
| | 材料 2 | 正交各向异性(Orthotropic) |
| | | 各向异性(Anisotropic) ,仅用于实体单元 |
| 非线性弹性模型 (Nonlinear Elastic) | 材料 7 | Blatz-Ko 橡胶材料 |
| | 材料 27 | Mooney-Rivlin 橡胶材料 |
| | 材料 6 | 粘弹性(Viscoelastic) |
| 弹塑性材料模型 (Plasticity) | 材料 3 | 双线性随动硬化(BilinearKinematic) |
| | | 双线性各向同性硬化(Bilinear Isotropic) |
| | | 随动塑性(Plastic Kinematic) |
| | 材料 18 | 幂指数硬化塑性(PowerLaw Plasticity) |
| | 材料 19 | 与应变率相关的各向同性硬化(Strain Rate Dependent Plasticity) |
| | 材料 64 | 与应变率相关的幂指数硬化塑性(Rate Sensitive PowerLaw Plasticity) |
| | 材料 36 | 3 参数 Barlat 和 Lian 的平面应力状态各向异性弹塑性 |
| | 材料 33 | Barlat ,Lege 和 Brem 的各向异性弹塑性 |
| | 材料 24 | 分段线性弹塑性(Piecewise Linear Plasticity) |
| | 材料 37 | 横向各向异性(Transversely Anisotropic Elastic Plastic) |
| | 材料 10 | 弹塑性流体动力(Elastic-plastic Hydrodynamic) |
| 泡沫模型(Foam) | 材料 53 | 低密度、闭合的多孔聚氨酯泡沫(closed Cell Foam) |
| | 材料 57 | 低密度氨基酸泡沫(Low Density Foam) |
| | 材料 62 | 粘性泡沫(Viscous Foam) |
| | 材料 63 | 可压扁泡沫(Crushable Foam) |
| | 材料 26 | 正交异性可压扁蜂窝结构(Honeycomb) |
| 复合材料 (Composite Damage) | 材料 22 | 考虑损伤的复合材料 |
| 混凝土材料(Concrete) | 材料 72 | 考虑损伤的混凝土材料 |

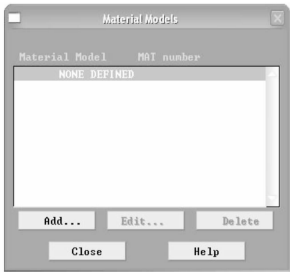
续表

| 材料分类 | 材料模型编号 | 材料名称与说明 |
|--------------------------------|--------|--|
| 需要状态方程的材料模型(Equation of State) | 材料 15 | 与应变率、温度相关的塑性(Temp. & strain rate dependent plasticity) |
| | 材料 9 | 无偏应力流体动力模型(Null materials) |
| | 材料 65 | Zerilli-Armstrong 模型,用于金属成型过程和高速碰撞,其应力与应变、应变率及温度有关 |
| | 材料 51 | Bamman 模型,用于金属塑性成型,其塑性与应变率和温度有关 |
| 其他材料 | 材料 20 | 刚性材料(Rigid bodies) |
| | 材料 71 | 索(Cables) |
| | 材料 1 | 弹性流体(Fluid) |

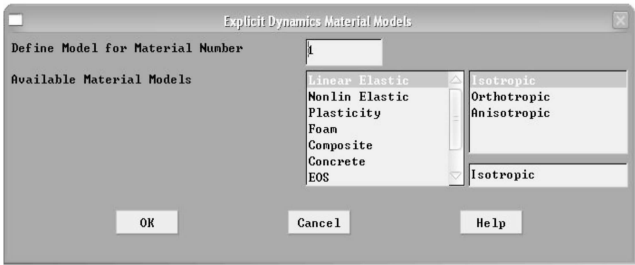
10.1 材料模型的定义

材料模型的定义步骤与 ANSYS 中略有区别,根据选择材料的不同要求输入的参数也不同。

依次操作 Main Menu>Preprocessor>Material Prop>Define MAT Model,打开如图 10-1(a)所示对话框,单击 Add 按钮。在弹出的对话框中选择材料的大类和具体的材料模型,如图 10-1(b)所示,单击 OK 按钮。



(a)



(b)

图 10-1 材料模型的添加

选择不同的材料,要求输入的参数也是不同的,如图 10-2(a)所示为线性弹性各向同性材料要求输入参数的对话框,如图 10-2(b)所示为塑性双线性各向同性硬化材料要求输入参数的对话框。

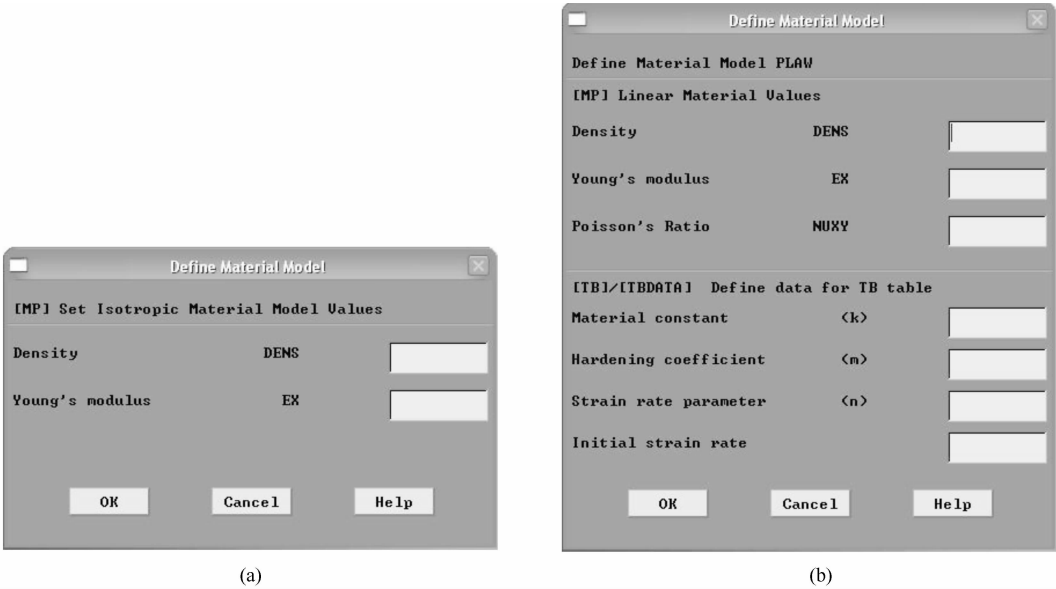


图 10-2 不同材料模型的参数定义对话框

用户需要根据分析问题的需要 ,选择不同的材料模型。因此 ,了解常用材料模型的特点、适用范围及各参数的含义是必需的 ,这样才可能很好地实现材料模型的定义。

10.2 线弹性材料

线弹性材料包括 3 种材料模型 :各向同性弹性、正交各向异性弹性材料和各向异性弹性材料。

10.2.1 各向同性弹性材料

多数工程材料(例如钢)都是各向同性的 ,在弹性变形范围内都可以采用该模型 ,只需要给定材料的质量密度、弹性模量和泊松比。

10.2.2 正交各向异性弹性材料

通用正交各向异性弹性材料由 9 个独立参数和质量密度来定义 ,横各向同性材料(一种特殊的正交各向异性)由 5 个独立常数(EXX ,EZZ ,NUXY ,NUXZ ,GXY)和质量密度定义。

显而易见 ,对于各向异性问题 ,坐标系统的问题是不可忽略的。因此 ,定义该材料模型时需给定坐标系的编号 ,这个坐标系用户可以事先定义好。

10.2.3 各向异性弹性材料

各向异性弹性材料由 21 个独立的材料常数和 质量密度来定义 ,仅用于实体单元。这 21 个材料常数实际表达了材料模型的本构矩阵 ,其相应位置如图 10-3 所示。

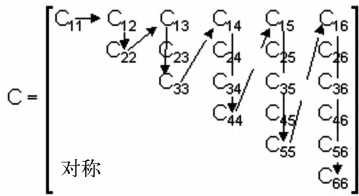


图 10-3 各向异性弹性材料本构矩阵参数

10.3 非线性弹性材料

非线性弹性材料可以经受大的、可恢复的弹性变形,在该材料组中有 3 种模型。

10.3.1 Blatz-Ko 橡胶材料

该模型定义超弹性橡胶模型,使用第二类 Piola-Kirchoff 应力定义应力-应变关系,见式(10-1)。

$$S_{ij} = G \left[\frac{1}{V} C_{ij} - V^{1-2\gamma} \delta_{ij} \right] \quad (10-1)$$

其中, S_i 为第二 Piola-kirchoff 应力张量, G 为剪切模量, V 为相对体积, γ 为泊松比, C_{ij} 为右柯西-格林应变张量, δ_{ij} 为克罗内克尔记号。

10.3.2 Mooney-Rivlin 橡胶材料

该模型定义不可压缩橡胶模型,通过 C_{10} 、 C_{01} 和 γ 来定义应变能密度函数,见式(10-2)。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C \left(\frac{1}{I_3} \right) + D(I_3 - 1)^2$$

$$C = \frac{C_{10}}{2} + C_{01} \quad (10-2)$$

$$D = \frac{C_{10}(5\gamma - 2) + C_{01}(11\gamma - 5)}{2(1 - 2\gamma)}$$

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 为右柯西-格林张量的不变量, γ 为泊松比。

需要输入质量密度、泊松比及 Mooney-Rivlin 常数 C_{10} 和 C_{01} 。

10.3.3 粘弹性材料

线性粘弹性材料是由应力偏量张量来表达的,见式(10-3)。

$$S_{ij} = 2 \int_0^t \phi(t - \tau) \frac{\partial \epsilon'_{ij}(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (10-3)$$

其中, $\phi(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t}$ 表示剪切松弛模量, $p = K \ln V$ 为弹性体积行为假设,通过增量积分得到压力。

需要输入质量密度、 G_0 (短期限的弹性剪切模量)、 G_∞ (长期限的弹性剪切模量)、 K (弹性体积模量)、 β (衰减常数)。

10.4 弹塑性材料

在 ANSYS/LS-DYNA 中有 11 种弹塑性材料的模型,材料模型的选择取决于要分析的材料和可以得到的材料参数。材料模型的选择和定义是构建有限元模型重要的一步,对计算精度高低的影响也是不容忽视的。因此,同等条件下要得到理想的分析结果,需要使用贴近实际材料、最能够代表实际材料的物理行为的材料模型和参数。

弹塑性模型可以分为以下 3 大类。

类别 1 :各向同性材料应变率无关塑性材料模型 ,共有 3 个模型。

类别 2 :各向同性应变率相关塑性模型 ,共有 5 种模型。

类别 3 :各向异性应变率相关塑性模型 ,共有 3 种模型。

位于不同的类别内的材料模型之间区别很大 ,但在一个类别内的材料模型差别不大 ,通常只是可获得的材料参数不同。

10.4.1 与应变率无关的各向同性材料

3 个基本的与应变率无关塑性模型是 :经典双线性各向同性硬化(BISO) ,经典双线性随动硬化(BKIN)和弹性塑性流体动力(HYDRO)。这里介绍常用的双线性各向同性硬化材料和双线性随动硬化材料。这两种材料模型都通过两段线性直线(即弹性模量和切线模量代表弹性和塑性)表征材料的应变 - 应力行为。需要输入弹性模量、泊松比、密度、屈服应力和切线模量。区别仅在于硬化条件的假设不同 ,前者使用等向硬化假设 ,认为二次屈服出现在 $2\sigma_{\max}$;后者使用随动硬化假设 ,认为二次屈服在 $2\sigma_y$ 时出现。与应变率无关模型通常可以用于大多数工程金属(钢、铝、铸铁等) ,对于像钣金成形一类的总的成形过程相对长的计算中也比较理想。

10.4.2 与应变率相关的各向同性材料

与应变率相关的各向同性材料有 5 个 :随动塑性(Plastic Kinematic)、幂指数硬化塑性(Rate Sensitive 率敏感)、分段线性(Piecewise Linear)、率相关(Rate Dependent)、幂指数塑性(PowerLaw 幂法则)。

1. 随动塑性

该模型采用 Cowper-Symonds 模型 ,考虑应变率影响 ,带有失效应变。Cowper-Symonds 模型考虑应变率的影响是通过对屈服应力乘以应变率因子来实现的 ,其定义为 $1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}$,其中 C, P 是 Cowper-Symonds 应变率参数。

随动塑性的屈服应力与应变率的关系由式(10-4)定义

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_P^{\text{eff}}) \quad (10-4)$$

式中 σ_0 为初始屈服应力 ; $\dot{\epsilon}$ 为应变率 ; C, P 为 Cowper Symonds 应变率参数 ; ϵ_P^{eff} 为等效塑性应变 ; E_P 为塑性硬化模量 ,由 $E_P = \frac{E_{\tan} E}{E - E_{\tan}}$ 确定 ; β 为硬化参数 ,取值为 0 代表随动硬化 ,取值为 1 代表各向同性硬化。

2. 幂指数硬化塑性(Rate Sensitive 率敏感)

该模型采用 Cowper-Symonds 模型 ,考虑应变率影响 ,带有强度和硬化系数 ,主要用于金属和塑性成形分析 ,其应力 - 应变关系见式(10-5)

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] k (\epsilon_e + \epsilon_P^{\text{eff}})^n \quad (10-5)$$

式中参数的含义与随动塑性材料模型的定义相同 ,只是多了弹性应变 ϵ_e ,强度系数 K ,硬化系数 n 。

3. 分段线性(Piecewise Linear)

该模型采用 Cowper-Symonds 模型,考虑应变率影响,带有失效应变。分段线性塑性是多线性弹塑性材料模型,可输入与应变率相关的分段线性应力-应变曲线,它是非常通用的塑性法则,特别用于钢。其屈服应力的定义见式(10-6)

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}'}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + f_h(\epsilon_p^{\text{eff}})) \quad (10-6)$$

式中 σ_0 为常应变率的屈服应力, $\dot{\epsilon}'$ 为有效应变率, C, P 为 Cowper Symonds 应变率参数, $f_h(\epsilon_p^{\text{eff}})$ 为基于有效塑性应变的硬化函数。

输入数据:屈服应力(σ_0),切线模量(E_{tan}),失效的有效塑性应变 C, P , Load Curve ID(1)有效真应力和有效塑性应变的关系曲线号, Load Curve ID(2)应变率对屈服应力影响的比例因子关系曲线号。

需要说明的是,如果采用 Load Curve ID(1),则输入的屈服应力和切线模量将不再有作用。如果 C 和 P 为 0,则省略了应变率的影响。如果采用 Load Curve ID(2),则输入参数 C 和 P 将不再有作用,仅考虑真应力和真应变的数据。

4. 率相关(Rate Dependent)

该模型用载荷曲线定义应变率影响,带失效力,主要用于金属和塑性成形分析,屈服应力的定义见式(10-7)

$$\sigma_y = \sigma_0(\dot{\epsilon})_{\text{eff}} + E_h \epsilon_p^{\text{eff}} \quad (10-7)$$

式中 σ_0 为初始屈服强度, $\dot{\epsilon}_{\text{eff}} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}' \dot{\epsilon}_{ij}' \right)^{\frac{1}{2}}$ 为有效应变率, ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变, $E_h = E \frac{E_{\text{tan}}}{(E - E_{\text{tan}})}$ 。

输入数据:密度、弹性模量、泊松比、切线模量, LCID 1 初始屈服应力与有效应变率的关系曲线号, LCID 2 弹性模量与有效应变率的关系曲线号, LCID 3 切线模量与有效应变率的关系曲线号, LCID 4 失效 Von Mises 等效应力与有效应变的关系曲线号。

5. 幂指数塑性(PowerLaw 幂法则)

该模型用于超塑成形的 Ramburgh-Osgood 模型,主要用于超塑成形分析,其本构关系定义为

$$\sigma_{yy} = k \epsilon^m \cdot \dot{\epsilon}^n \quad (10-8)$$

式中 ϵ 为应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, k 为材料常数, m 为硬化系数, n 为应变率灵敏系数。

10.4.3 与应变率相关的各向异性材料

与应变率相关的各向异性材料有 3 个:横向正交各向异性弹塑性(Transversely Anisotropic Elastic Plastic) 3 参数 Barlat 和 Lian 的平面应力状态各向异性弹塑性(3-Parameter Barlat); Barlat, Lege 和 Brem 的各向异性弹塑性(Barlat Anisotropic Plasticity)。

1. 横向正交各向异性弹塑性

该材料模型仅供壳单元使用,用于模拟一般各向异性材料高应变率成形过程,常用于薄板成形,面内任意方向的性质是各向同性的,但法向的性质不相同。采用 Hill 屈服准则。平面应力的简化表达见式(10-9)

$$F(\sigma) = \sigma_y \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \frac{2R}{R+1} \sigma_{11} \sigma_{22} + 2 \frac{2R+1}{R+1} \sigma_{12}^2} \quad (10-9)$$

式中 $R = \frac{\dot{\epsilon}_{22}^p}{\dot{\epsilon}_{33}^p}$ 为正交各向异性硬化参数, $\dot{\epsilon}_{22}^p$ 为面内应变率, $\dot{\epsilon}_{33}^p$ 为法向应变率。

输入数据: 质量密度、弹性模量、泊松比、屈服应力、切线模量、正交各向异性硬化参数和有效屈服应力与有效塑性应变的关系曲线号。

2.3 参数 Barlat 和 Lian 的平面应力状态各向异性弹塑性

该材料模型用于平面应力条件下的铝质薄板成形, 使用指数和线性硬化法则, 平面应力条件下各向异性屈服准则定义见式(10-10)

$$2\sigma_y^m = a |k_1 + k_2|^m + a |k_1 - k_2|^m + c |2k_2|^m \quad (10-10)$$

式中 σ_y 为屈服应力, a, c 为各向异性材料常数, m 为 Barlat 指数。
 k_1 和 k_2 的定义见式(10-11)

$$k_1 = \sigma_{xx} - h \frac{\sigma_{yy}}{2}$$

$$k_2 = \sqrt{k_1^2 + p^2 \sigma_{xy}^2} \quad (10-11)$$

式中 h, p 为附加的各向异性材料常数。

对于指数硬化选项, 材料屈服应力见式(10-12)

$$\sigma_y = k(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (10-12)$$

式中 K 为强度系数, ϵ_0 为初始屈服应变, ϵ_p 为塑性应变, n 为硬化系数。

除了 p 隐含定义以外, 所有各向异性材料常数都由 Barlat 和 Lian 定义的宽厚应变比决定, 则 a, c 和 h 表达式见式(10-13)

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}}$$

$$c = 2 - a$$

$$h = \sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (10-13)$$

对于任意角 ϕ 的宽厚应变比见式(10-14)

$$R_\phi = \frac{2m\sigma_y^m}{\left[\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{xx}} + \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{yy}} \right] \phi} \quad (10-14)$$

式中 σ_ϕ 为沿 ϕ 方向的单轴拉伸应力。

输入数据: 质量密度、弹性模量、泊松比、硬化准则类型 HR(取值为 1, 即线性型; 取值为 2, 即指数型)、切线模量/强度系数(对应 HR 取值, HR=1 取为切线模量; HR=2 取为强度系数)、Barlat 指数 m 、 R_∞ 、 R_{45} 、 R_{90} 、正交异性主轴系统。

3. Barlat、Lege 和 Brem 的各向异性弹塑性

该模型主要用于三维连续体金属成形分析, 各向异性屈服函数见式(10-15)

$$\phi = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m \quad (10-15)$$

式中 m 为流动指数, $S_i (i=1, 2, 3)$ 为对称矩阵 S_{ij} 的主值。 S_{ij} 由式(10-16)表示:

$$\begin{aligned}
S_{xx} &= \frac{1}{3} [c(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) - b(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})] \\
S_{yy} &= \frac{1}{3} [a(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) - c(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] \\
S_{zz} &= \frac{1}{3} [b(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) - a(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})] \\
S_{yz} &= f\sigma_{yz} \\
S_{zx} &= g\sigma_{zx} \\
S_{xy} &= h\sigma_{xy}
\end{aligned} \tag{10-16}$$

式中 a, b, c, f, g, h 为 Barlat 模型的正交各向异性材料常数。

需要说明的是, 当 $a = b = c = f = g = h = 1$, 材料为各向同性。 $m = 1$ 时屈服面简化为 Tresca 屈服面, $m = 2$ 或 4 时简化为 VonMises 屈服面。对于这个材料选项, 屈服强度由式 (10-17) 表示

$$\sigma_y = k(\epsilon^p + \epsilon_0)^n \tag{10-17}$$

式中 k 为强度系数, ϵ^p 为塑性应变, ϵ_0 为初始屈服应变, n 为硬化系数。

输入数据: 质量密度、弹性模量、泊松比、强度系数、初始屈服应变、硬化系数、Barlat 模型的流动指数、Barlat 模型的正交各向异性材料常数。

10.5 泡沫材料

泡沫材料包括各向同性泡沫材料和正交各向异性泡沫材料。其中, 各向同性泡沫材料有 4 种: 低密度闭合多孔的聚氨酯泡沫(Closed Cell Foam)、低密度氨基甲酸酯泡沫(Low Density Foam)、粘性泡沫(Viscous Foam)和可压扁泡沫(Crushable Foam); 正交各向异性泡沫材料 1 种: 正交异性可压扁泡沫。

10.5.1 各向同性泡沫

1. 低密度闭合多孔的聚氨酯泡沫

该材料模型通常用于模拟汽车设计中的撞击限制器。应力的定义见式(10-18):

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^s + \delta_{ij} \left[P_0 \frac{\gamma}{(1 + \gamma - \phi)} \right] \tag{10-18}$$

式中 σ_{ij}^s 为轮廓应力, P_0 为初始泡沫压力, ϕ 为泡沫与聚合物密度比, δ_{ij} 为克罗内克尔记号。

体应变 γ 表达式见式(10-19):

$$\gamma = V - 1 + \gamma_0 \tag{10-19}$$

式中 V 为相对体积, γ_0 为初始体积应变。

屈服条件使用试验主应力, 定义见式(10-20)

$$\sigma_y = a + b(1 + c\gamma) \tag{10-20}$$

式中 a, b, c 为用户定义的常数。

输入数据: 质量密度、弹性模量、 a 、 b 、 c 、初始泡沫压力、泡沫与聚合物密度比、初始体积应变。

2. 低密度氨基甲酸酯泡沫

该材料模型为高度可压缩泡沫模型,通常用于衬垫材料,如椅子座垫等。在压缩过程中,伴随可能的能量耗散的滞后卸载特性。在拉伸过程中,在撕裂发生前为线性。对于单轴加载,模型假设在横向方向无耦合。采用输入形状因子控制,延迟常数能近似泡沫卸载行为。

输入数据:质量密度、弹性模量、应力-应变关系曲线号、拉伸截止应力值、滞后卸载因子、延迟常数、粘性系数、形状卸载因子、到达截止应力时的失效选择、体积粘性作用标志。

3. 粘性泡沫

该材料模型为能量吸收泡沫材料,用于压碎模拟模型。由非线性弹性刚度和粘性阻尼并行组成,与粘性吸收能量同时使用弹性刚度限定整体压碎。弹性刚度 E' 和初始粘性系数 V' 都是相对体积 V 的非线性函数,如式(10-21):

$$\begin{aligned} E'_1 &= E_1 V^{-n_1} \\ V'_2 &= V_2 |1 - V|^{n_2} \end{aligned} \quad (10-21)$$

式中 E_1 为初始弹性刚度, V_2 为初始粘性系数, n_1, n_2 为分别为弹性刚度和粘性系数的幂指数。

输入数据:质量密度、弹性模量、泊松比、弹性刚度幂指数、初始粘性系数、初始弹性刚度、粘性系数的幂指数。

4. 可压扁泡沫

该材料模型用于模拟碰撞的可压扁泡沫,与应变率相关,在单向压扁时泊松比为零。

输入数据:质量密度、弹性模量、泊松比、应力-应变关系曲线号、拉伸应力截止值、粘性阻尼系数。

10.5.2 正交各向异性泡沫

正交各向异性可压扁泡沫材料用于模拟蜂窝结构。在压缩前,该模型的特性为正交各向异性的,应力张量的分量不发生耦合,弹性模量与相对体积的关系呈线性变化,如式(10-22)

$$\begin{aligned} E_{aa} &= E_{aau} + \beta(E - E_{aau}) \\ E_{bb} &= E_{bbu} + \beta(E - E_{bbu}) \\ E_{cc} &= E_{ccu} + \beta(E - E_{ccu}) \\ G_{ab} &= E_{abu} + \beta(G - G_{abu}) \\ G_{bc} &= E_{bcu} + \beta(G - G_{bcu}) \\ G_{ca} &= E_{cau} + \beta(G - G_{cau}) \end{aligned} \quad (10-22)$$

式中 $G = \frac{E}{2(1+\gamma)}$ 为全压缩蜂窝材料的弹性剪切模量, $\beta = \max\left[\min\left(\frac{1-V}{1-V_f}, 1\right), 0\right]$, V 为相对体积, V_f 为完全压缩的蜂窝相对体积。 E_{aau} 为无压缩时 aa 方向弹性模量, E_{bbu} 为无压缩时 bb 方向弹性模量, E_{ccu} 为无压缩时 cc 方向弹性模量, G_{abu} 为无压缩时 ab 方向剪切模量, G_{bcu} 为无压缩时 bc 方向剪切模量, G_{cau} 为无压缩时 ca 方向剪切模量。

10.6 复合材料

该材料模型考虑失效问题,采用 5 个由实验给定的参数定义材料模型,包括: S_1 为轴向拉

伸强度 σ_2 为横向拉伸强度 σ_{12} 为剪切强度 σ_c 为横向压缩强度 α 为非线性剪应力参数。

10.7 其他材料

10.7.1 刚性材料

对于有限元模型当中相对刚硬、且不需要考虑变形的部分,一般定义为刚性材料,这样可以大大减少计算时间,也是材料模型抽象的一个技巧和原则。

定义为刚性材料的部分形成刚性体,刚性体内所有节点的自由度都耦合到刚性体的质量中心上去。因此,不论定义了多少节点,刚性体只有 6 个自由度,这也是计算时间减少的主要原因。每个刚性体的质量、质心、惯性由刚性体体积和单元密度计算得到。作用在刚性体上的力和力矩由每个时间步的节点力和力矩合成,然后计算刚性体的运动,再转换到节点位移。

刚性材料的定义过程与其他材料的定义是相同的。需要输入的数据有:质量密度、弹性模量、泊松比。用户在定义刚性材料时要注意,不能因为刚性材料代表刚硬部分就理解为材料性质是无限硬的,应该使用与实际材料相符合的材料参数。

刚性材料定义的另一个特点是直接给定了刚性体的约束条件,和一般的约束定义是不一样的。依次选择 Main Menu > Preprocessor > Material Prop > Define MAT Model,在打开的对话框中选择 Other 和 Rigid,则打开如图 10-4 所示的 Define Nonlinear MAT Model 对话框。

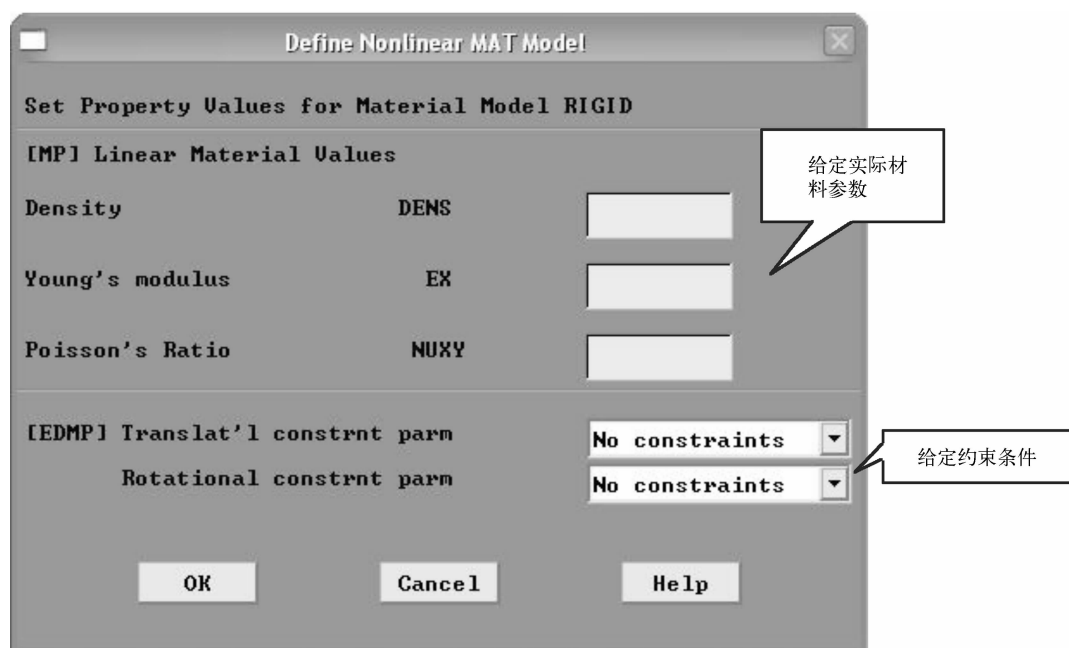


图 10-4 刚性材料参数定义对话框

刚性体约束条件有两个参数:平移和旋转,即通过 Define Nonlinear MAT Model 对话框中的 Translat'l constnt parm 和 Rotational'l constnt parm 下拉列表进行定义。这两个参数分别有 8 个取值,其代表意义如表 10-2 所示。

表 10-2 刚性体约束定义参数取值意义

| 平移约束参数取值 | 代表的约束条件 | 旋转约束参数取值 | 代表的约束条件 |
|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| 0(No Constraints) | 无约束(默认条件) | 0(No Constraints) | 无约束(默认条件) |
| 1(X displacement) | 约束 X 向位移 | 1(X rotation) | 约束绕 X 轴转动 |
| 2(Y displacement) | 约束 Y 向位移 | 2(Y rotation) | 约束绕 Y 轴转动 |
| 3(Z displacement) | 约束 Z 向位移 | 3(Z rotation) | 约束绕 Z 轴转动 |
| 4(X and Y disps.) | 约束 X 和 Y 向位移 | 4(X and Y rotate) | 约束绕 X 和 Y 轴转动 |
| 5(Y and Z disps.) | 约束 Y 和 Z 向位移 | 5(Y and Z rotate) | 约束绕 Y 和 Z 轴转动 |
| 6(Z and X disps.) | 约束 Z 和 X 向位移 | 6(Z and X rotate) | 约束绕 Z 和 X 轴转动 |
| 7(All disps.) | 约束 X、Y、Z 三向位移 | 7(All rotate) | 约束绕 X、Y、Z 轴转动 |

10.7.2 索

该材料模型定义为弹性索材料 ,不能承受压力 ,索材料只有在承受拉力的条件下受力不为零。该力的定义如式(10-23)：

$$F = K \max\{\Delta L \ 0.0\}$$
 (10-23)

式中 ΔL 为长度增量 , K 为刚度 ,由弹性模量参与定义。

10.8 状态方程

常规条件下的结构材料 ,不使用状态方程。而流体、高速、高压变形的结构材料需附带状态方程。状态方程仅用于描述材料的体积变形行为 结构材料在高压(6~10 GPa)或高速(100 m/s 以上)碰撞等变形条件下、物质燃烧等化学反应过程由状态方程控制。

ANSYS/LS-DYNA 提供 3 种状态方程 :线性多项式 (Linear polynomial)、结构材料 (Gruneisen)和列表方式(Tabulated)。在材料添加对话框(如图 10-1(b)所示)子项选择中有列出了 13 个选项 ,各选项对应有不同的参数 ,实现不同的用途。对于用户来讲 ,在使用状态方程前 ,要了解其适用范围和要求输入参数的意义。

练习題

- 1. 如何实现材料模型的定义操作？
- 2. 线弹性材料包括几种模型？各模型的特点和相关参数含义是什么？
- 3. 非线性弹性材料包括几种模型？各模型的特点和相关参数含义是什么？
- 4. 弹塑性材料包括几种模型？各模型的特点和相关参数含义是什么？
- 5. 泡沫材料包括几种模型？各模型的特点和相关参数含义是什么？
- 6. 复合材料包括几种模型？各模型的特点和相关参数含义是什么？
- 7. 刚性材料模型的定义有什么特殊之处？如何实现刚性体的约束？

第 11 章 PART 概念及使用

PART 的概念及使用是 ANSYS/LS-DYNA 模块独有的,在许多命令格式或者操作中要求用户定义 PART 并使用 PART 列表和编号,尤其在处理刚性体的问题上起到不可替代的作用。本章主要介绍 PART 的创建和使用,并通过实例进一步具体说明操作过程。

11.1 PART 的概念

PART 是一种单元集,这些单元具有相同的材料、单元类型和实常数,即使在物理概念上不相关,也可以定义为一个 PART。反之,即使单元具有相同的材料、单元类型和实常数,也可以定义为不同的 PART。PART 表的建立要根据用户分析问题的需要来进行。

例如,一个系统中有 4 个模型,当用户分别定义了材料、单元和实常数,并将其分配给相应的模型进行网格划分,得到如图 11-1(a)所示 4 个不同的 PART;对于同一个系统,当用户分配给圆柱体和正方体以相同的单元属性并进行网格划分,则这两个模型组成了一个 PART,整个系统就只有 3 个 PART,如图 11-1(b)所示。

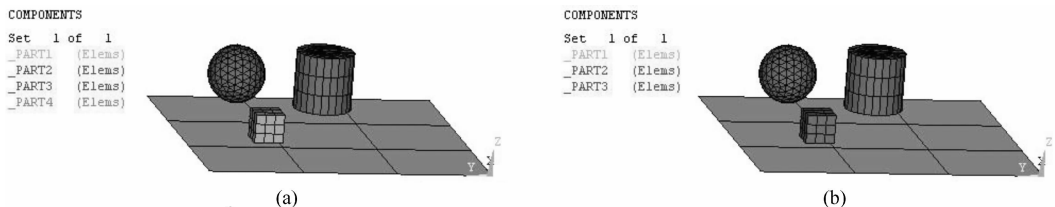


图 11-1 同一个系统中不同的 PART 列表

11.2 创建、修改和列出 PART

从 PART 的概念可以看出,PART 的建立与单元属性的分配是直接相关的。也就是说,只有在完成了网格划分的有限元模型基础上,才可以建立和使用 PART 表和相应的编号。

命令格式:

EDPART option

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options

打开如图 11-2 所示的创建、修改和列表 PART 对话框,其上 3 个选项与命令格式中的 Option 相对应,分别完成创建、修改和列表 PART。

当选择 Create parts,并单击 OK 按钮,则自动生成 PART 号,同时显示如图 11-3 所示的 PART 表信息,供用户检查。如果用户重复执行上述操作,则 PART 表将被覆盖,只保留现有创建的 PART 表。

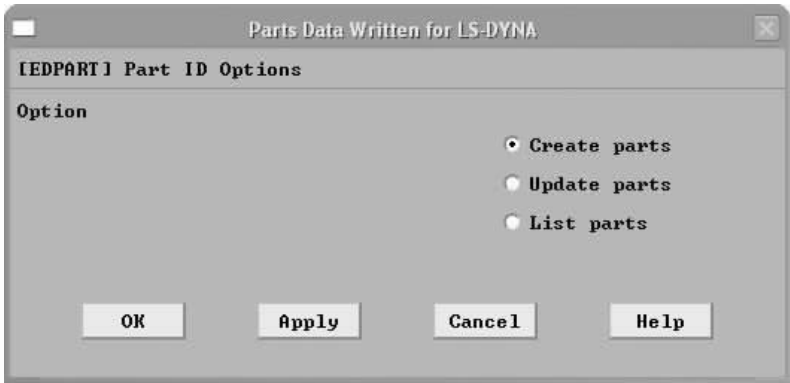


图 11-2 创建、修改和列表 PART 对话框

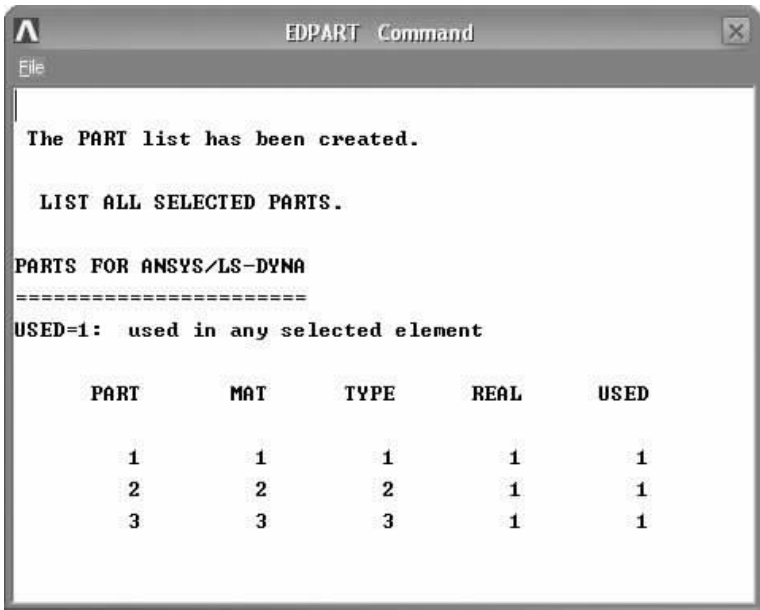


图 11-3 已创建 PART 列表的信息窗口

当对现有模型进行变动,并选择 Update parts,单击 OK 按钮后,则得到修改或者增删后的实际 PART 表,而不覆盖旧的 PART 表,并且扩展已有的 PART 表且不改变 PART 的编号和顺序。

在分析问题中可能多次修改或者变更 PART 的设置,在需要使用相应 PART 编号前,有必要列出 PART 表来检查和对照 PART 编号,以避免出错。此时,可以选择 List parts,单击 OK 按钮,列出类似图 11-3 所示的 PART 表的相关信息。

11.3 PART 和刚性体

PART 表建立以后,在需要的命令格式或者操作中就可以使用相应的 PART 编号。尤其在处理刚性体问题上,一般都要使用 PART 号,这也是不同于 ANSYS 其他模块的特点之一。在刚性材料定义中已经讲述了刚性体约束的处理,下面介绍刚性体其他常见的几种问题处理

方式。

11.3.1 刚性体约束

当系统中存在多个刚性体且相互作用的条件下,例如,某一个刚性体带动其他刚性体运动,可以将刚性体进行约束,使其如同一个刚性体。在两个刚性体之间进行约束就要根据 PART 号来实现。

命令格式:

EDCRB Option,NEQN,PARTM,PARTS

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Coupling/Ceqn>Rigid Body CE

打开如图 11-4 所示 Rigid Body Constraints 对话框。其中 Rigid body equation options 有 3 个选项“ADD”、“DELETE”和“LIST”,分别实现刚性体约束的添加、删除和列表;Equation reference number 用于指定约束方程的编号,也可以让程序自动分配,这个编号应该是唯一的,如果在不同组刚性体约束之间使用同一个方程编号,程序将采用最后一个编号;PART number(Master)和 PART number(Slave)下拉列表用于指定主刚体和从刚性体的 PART 编号。该操作完成后,从刚体将被主刚体吸收,二者就像合并了一样,再对从刚体施加的命令将不再有效。

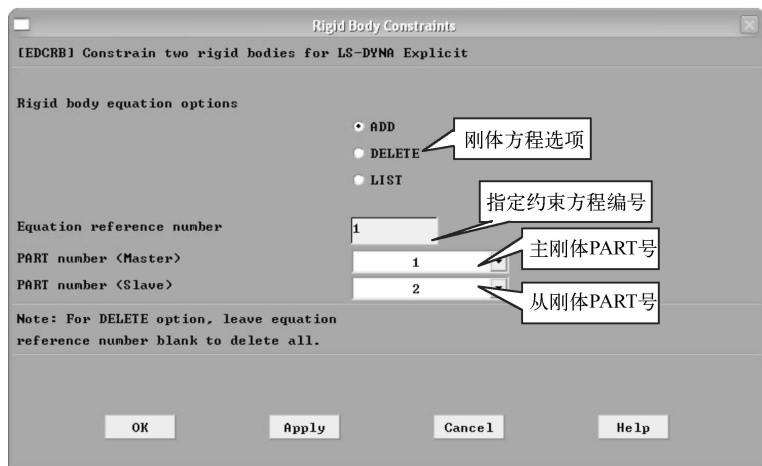


图 11-4 刚性体约束定义对话框

11.3.2 定义刚性体惯性特性

默认条件下,程序是自动计算刚性体的惯性特性的,但有时需要指定刚性体的质心、质量、初速度和相应的惯性特性。比较常见的例子是在模拟金属塑性成形过程中,一般是将模具抽象为刚性体,且多使用壳单元划分的面来代替实体模具,此时就需要用户给出这些“模具”相应的惯性特性。

命令格式：

```
EDIPART ,PART ,Option ,Cvect ,TM ,IRCS ,Ivect ,Vvect ,CID
```

菜单操作：

- Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Inertia Options>Define Inertia
- Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Inertia Options>Delete Inertia
- Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Inertia Options>List Inertia

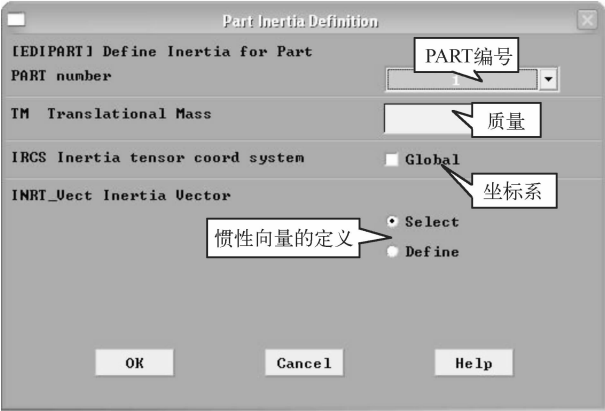


图 11-5 刚性体惯性特性定义

以惯性特性定义为例，打开如图 11-5 所示 Part Inertia Definition 对话框，相应功能如图中的说明。其中，惯性向量的定义方式两种：“Select”是从已经定义好的数组参数中选择，“Define”是直接定义。在后续的对话框上完成质心坐标、惯性特性、初始速度的设置，如图 11-6 所示。

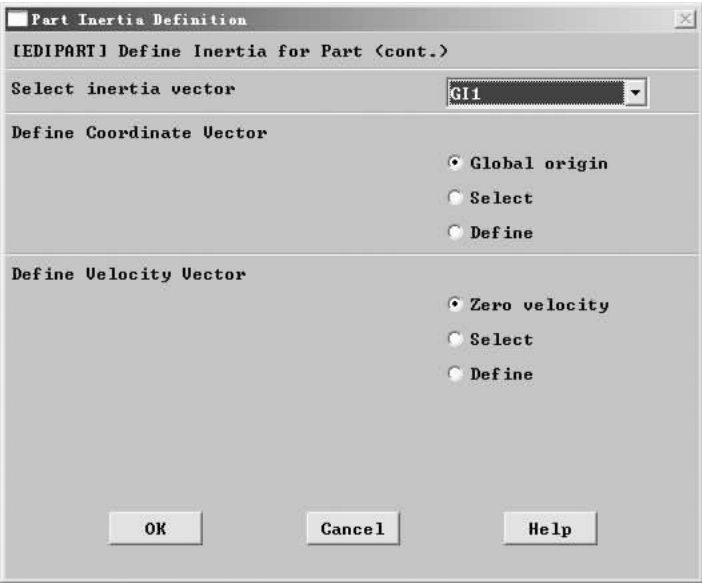


图 11-6 刚性体惯性特性定义后续对话框

11.3.3 刚性体加载

所有刚性体加载,必须加在 PART 号上。

命令格式:

```
EDLOAD ,Option ,Lab ,KEY ,Cname ,Par1 ,Par2 ,PHASE ,LCID ,SCALE ,BTIME ,DTIME
```

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Loading Options>Specify Loads

Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads

打开如图 11-7 所示的载荷施加对话框,可指定要施加载荷的刚性体 PART 编号、载荷类型、载荷大小等参数。需要说明的是,对于刚性体,载荷类型(Load Labels)部分的选项不是都有效的,可以选择的有以下几种。

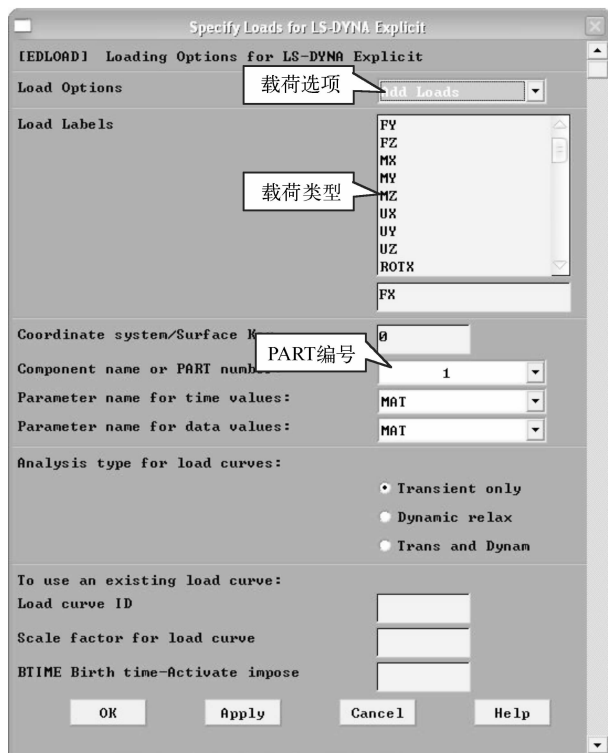


图 11-7 载荷施加对话框

力 :RBFX ,RBFY ,RBFZ。

位移 :RBUX ,RBUY ,RBUZ。

力矩 :RBMX ,RBMY ,RBMZ。

速度 :RBVX ,RBVY ,RBVZ。

角速度 :RBOX ,RBOY ,RBOZ。

转动 :RBRX ,RBRY ,RBRZ。

11.4 PART 使用实例

练习目的

定义刚性材料和相应约束。

创建和修改 PART。

具体步骤

1. 创建实体模型

创建如图 11-8 所示实体模型。

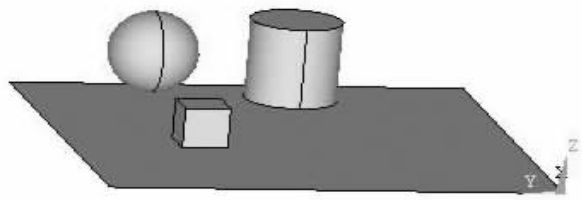


图 11-8 实体模型

2. 创建有限元模型

(1) 分别定义 SHELL163 单元、SOLID164 单元。

(2) 定义壳单元实常数。

(3) 定义刚性材料,并约束 3 向位移和 3 向转动。

(4) 分别定义弹性各向同性材料、弹塑性材料和泡沫材料。

(5) 将壳单元和刚性材料分配给平面。

(6) 将实体单元和另外 3 种材料分别分配给圆柱体、球体和长方体。

(7) 划分网格。

3. 创建 PART 表

(1) 依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options,选择 Create parts,创建 PART 表。

(2) 在图形窗口绘制 PART,得到如图 11-1(a)所示效果。

4. 修改 PART 表

(1) 将长方体的网格清除,分配给与圆柱体相同的单元属性,重新划分网格。

(2) 依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options,选择 Update parts,更新 PART 表。

(3) 重新绘制 PART,观察不同之处。

5. 重新创建 PART 表

按步骤重新创建 PART 表,并进行绘制,可以得到图 11-1(b)所示的效果。

练习题

1. PART 的概念是什么?

2. 如何实现 PART 的创建、修改和列表?

3. 如何实现多个刚性体之间的约束?刚性体惯性特性的定义是如何实现的?

第 12 章 接触问题

接触在工程分析中是比较复杂的一类非线性问题,其接触点的判断、接触过程的模拟、两接触界面的判定、摩擦问题的考虑等多种因素影响了接触的精确仿真。ANSYS/LS-DYNA 一个很突出的优点在于接触问题的处理,本章详细说明接触问题具体的应用与参数选择。

12.1 概述

在有限元分析中,接触问题的处理往往是衡量软件分析能力的一个重要指标。ANSYS 隐式分析使用接触单元来模拟接触问题,在 ANSYS/LS-DYNA 模块中通过定义接触表面、接触类型及控制相关参数来处理接触问题。

12.1.1 接触问题的基本概念

在介绍几个基本概念之前,先了解“段”(Segment)的概念。“段”是指单元节点的组合。对壳单元来说,“段”是由单元的 3 或者 4 个节点组成的;对体单元来说,“段”是由单元一个面上的 3 或者 4 个节点组成的。

1. 目标面与接触面的概念

在 ANSYS/LS-DYNA 模块处理接触问题中,没有接触单元的概念,但有目标面和接触面的概念。也就是说,一个接触对是由目标面和接触面形成的,通过这两个面的行为模拟接触过程。

当用户定义了一个接触对时,程序就会检查接触面上的节点与目标面上的段是否发生接触。由此可以看出,接触面主要考虑的是节点,那么,接触面所在的有限元模型是否是连续体就不很重要;目标面主要考虑的是段,网格可以连续也可以不连续。因此,用户在定义目标面和接触面时应该注意一些要求:一般地,平直的或者凹面定义为目标表面,凸面定义为接触表面,粗网格面定义为目标表面,细网格面定义为接触表面。

2. 接触算法

ANSYS/LS-DYNA 处理接触问题的算法有 3 种:动力约束法、分配参数法和对称罚函数法。

动力约束法是最早采用的接触算法,该算法比较复杂,目前只用于固连接触的处理。

分配参数法用于有相对滑动但没有分离的滑动处理,如炸药爆炸的气体对结构的压力作用。

对称罚函数法是默认算法,方法简单,不易引起网格的沙漏效应,动量守恒准确。该算法在每一时间步长先检查各接触节点是否穿透目标面,没有穿透则不做任何处理;如果发生穿透,则在该接触节点与目标面之间引入一个较大的界面接触力。该力的大小与穿透深度、接触刚度成正比,称为罚函数值,其物理意义相当于在接触节点和目标面之间放置一系列法向弹簧。

来限制穿透。

3. 接触搜索方式

在接触算法中,在判断接触节点是否发生接触,首先对其周围的目标段进行搜索,发现最近的目标段进行接触判断。ANSYS/LS-DYNA 接触搜索方式有两种:网格连接跟踪方式和批处理方式。

网格连接跟踪方式是最早采用的接触搜索方式,采用相邻单元段共享节点去识别可能的接触域。当一个目标段不再与接触节点相接触时,就检验相邻的段。该方法的优点在于搜索速度很快,缺点在于要求网格必须连续以保证算法正确。因此,对于不同区域要求用户应给定不同的接触对。

批处理方式是新的接触搜索方式,它解决了网格连接跟踪法的缺点。它把目标面按照区域分成很多“批”,接触节点可以和同一“批”或者相邻“批”中任意的目标段接触。因此,该方法很可靠,但在目标面单元较多时比网格连接跟踪法速度要慢。

12.1.2 ANSYS/LS-DYNA 中接触的定义

1. 组件的定义

由前可知,目标面和接触面是定义接触必须指定的参数之一。目标面和接触面(即接触实体)的定义,是通过组件名称或者 PART 编号来指定的。关于 PART 的操作在第 11 章已经讲过了,这里不在赘述。组件的含义也是元素的集合,这些元素可以是节点、单元、体、面、线或者关键点。但在接触定义中,主要使用节点的组件。下面以节点组件为例说明组件的定义过程。

定义节点组件首先应该是在完成有限元模型建立之后,也就是网格划分完毕才能谈到节点组件的问题。其次,要将需要定义组件的节点部分选中,然后进行如下操作。

命令格式:

CM ,Cname ,Entity

菜单操作:

Utility Menu>Select>Comp /Assembly>Create Component

打开如图 12-1 所示对话框,给定组件的名称即可。定义好的组件名称在以后操作中可以使用。

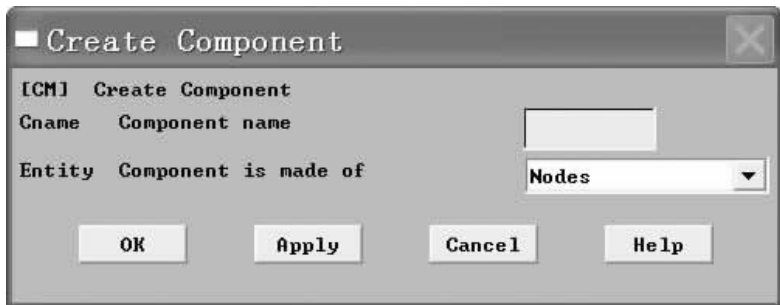


图 12-1 定义组件对话框

2. 接触的定义

ANSYS/LS-DYNA 接触的定义通过以下操作实现。

命令格式：

```
EDCGEN ,Option ,Cont ,Targ ,FS ,FD ,DC ,VC ,VDC ,V1 ,V2 ,V3 ,V4 ,BTIME ,DTIME ,BOXID1 ,  
BOXID2
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Contact>Define Contact

打开如图 12-2 所示的 Contact Parameter Definitions“接触参数定义”对话框,在 Contact Type 中可以选择接触的类型,其下则是根据不同接触类型需要给出的参数。单击 OK 按钮,打开如图 12-3 所示的 Contact Options“接触选项”对话框。

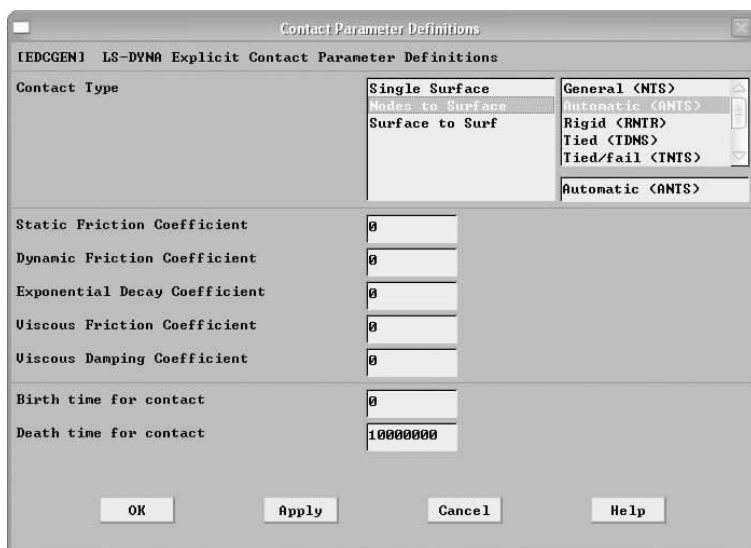


图 12-2 接触参数定义对话框

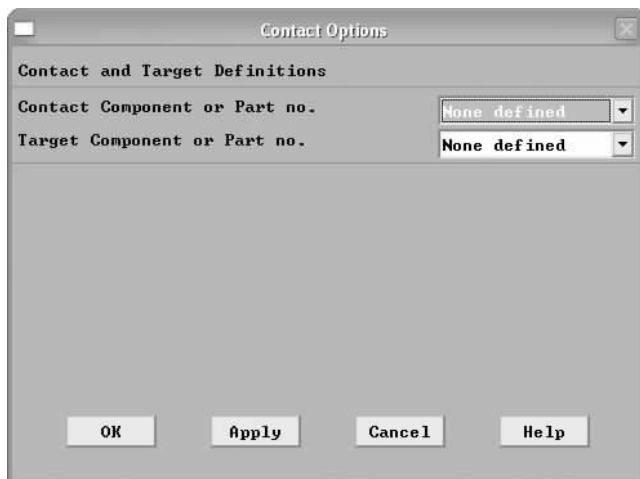


图 12-3 接触选项定义对话框

接触选项对话框的格式不是唯一的 ,与用户选择的接触类型相关 ,但主要功能是完成接触面和目标面的定义。通过选择组件名称或者 PART 号就可以指定接触面和目标面 ,如果有其他参数要求则要填入相应数值 ,单击 OK 按钮 ,完成一个接触对的定义。

12.2 接触类型

为了充分描述结构在大变形接触和动力撞击中复杂几何物体之间的相互作用 ,在 ANSYS/LS-DYNA中定义了 21 种接触类型。表 12-1 是按照接触类型(表中“列”所示)和接触选项(表中“行”所示)对接触的分类 ,表中英文缩写与图 12-2 接触参数定义对话框中的选项是一一对应的 ,例如 ,ASTS 表示“自动面 – 面”接触。

表 12-1 接触分类

| 接触类型 接触选项 | 单面接触(Single Surface) | 点 – 面接触 (Nodes to Surface) | 面 – 面接触 (Surface to Surface) |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 普通接触(General) | SS(Single Surf) | NTS(General) | STS(General), OSTS(one-Way) |
| 自动接触(Automatic) | ASSC(Automatic) AG(Auto General) | ANTS(Automatic) | ASTS(Automatic) |
| 刚性体接触(Rigid) | | RNTR(Rigid) | ROTR(Rigid) |
| 固连接触(Tied) | | TDNS(Tied) | TOSS(Tied) |
| 固连断开 (Tied with Failure) | | TNTS(Tied Fail) | TSTS(Tied Fail) |
| 侵蚀接触(Eroding) | ESS(Eroding) | ENTS(Eroding) | |
| 单边接触(Edge) | SE(Edge) | | |
| 压延筋接触(Drawbead) | | DRAWBEAD | |
| 成形接触(Forming) | | FNTS(Forming) | FSTS, FOSS |

按照接触检查方式的不同 ,接触又可以分为单向接触和双向接触。单向接触只检查接触节点对目标面的穿透 ,计算效率高 ,使用单向接触的接触类型有 :NTS、ANTS、FNTS、ENTS 等。当接触节点与目标面互换会得到不同的结果 ,因此在使用单向接触时要注意接触节点和目标面的选择 ,选择不当有可能出现接触判断出错 ,双向接触则既检查接触节点对目标面的穿透 ,又检查目标面对接触节点的穿透 ,因此在定义接触节点和目标面时是任意的 ,但计算量将增加两倍左右 ,使用双向接触的接触类型有 :STS、ASTS、FSTS、ESTS 等。

按照算法的不同接触又可以分为自动接触和非自动接触。自动接触是较新的接触类型 ,主要针对壳单元中的方向问题 ,使壳单元两侧都发生接触 ,而非自动接触只在壳单元的法线方向发生。对于大多数工程问题 ,接触条件是非常复杂的 ,很难保证壳单元的法向与接触方向一致 ,所以建议使用自动接触类型。

12.2.1 接触类型的选择

从表 12-1 可见 ,在 ANSYS/LS-DYNA 程序中主要有 3 种基本接触类型 :单面接触、点 – 面接触和面 – 面接触。

1. 单面接触

单面接触适用于一个物体表面的自身接触或者它与另一物体表面接触。单面接触中 ,程

序将自动判定模型中发生接触的表面位置。因此,单面接触的定义最简单,无需定义接触面和目标面。

一旦选择并定义了单面接触,在计算中允许一个模型的所有表面都可能发生接触,这对于预先不知道接触表面的自身接触或者大变形问题很有用处。许多碰撞和撞坏事故的动力学问题都需要单面接触,而且较少地增加计算时间。

2. 点-面接触

定义点-面接触时,接触节点将穿透目标表面,常用于一般两个表面间的接触。例如,在压延筋接触中,“筋”总是定义为节点接触表面,坯料总是定义为目标表面。

3. 面-面接触

当一个物体的表面穿透另一个物体的表面时常定义面-面接触,而且对于形状任意、接触面积相对较大的物体接触比较适合。这类接触对于物体之间有大量相对滑动的情况很有效,例如,块体在平板上滑动、球在槽内滑动等。

12.2.2 接触选项的选择

上述接触类型有 3 项,每一项又包括多个接触选项。用户在定义了接触类型后,要进一步指定接触选项。各接触选项的特点如下。

1. 普通接触和自动接触

普通接触的算法最简单、速度很快且可靠性高,因此使用范围较广。可用于点-面接触、面-面接触两种类型。该类型只需设定接触表面的方向,即关心某一个面的哪一边有实体,哪一边没有。对于实体单元,程序自动设定表面方向,对于壳单元用户要自行设定表面方向。

自动接触也是使用最广泛的一类定义,也是推荐使用的接触类型,它的优点在于程序将自动确定壳单元接触表面的方向。但通常需要用户限制搜索深度。

2. 侵蚀接触

侵蚀接触用在一个或者两个表面的单元在接触时发生材料失效,但接触依旧在剩余的单元中继续进行的情况,也可用于实体单元表面发生失效、贯穿的问题。需要用户给出相应的附加输入。

3. 刚性体接触

刚性体接触与普通接触 NTS 和 OSTs 大致相同,区别在于采用一条用户定义的“力-挠度”曲线来防止侵透。典型应用于多个刚性体互相接触,可以包括能量吸收而无需用变形单元建模。不能用于变形体的接触定义。需要用户给出相应的附加输入。

4. 固连和固连断开接触

固连接触通常用于接触节点和目标面“胶合”在一起。初始状态时,接触和目标两个表面必须共面。要模拟的效果是目标表面可以变形,而接触表面或者节点将追随其变形。定义固连接触时,粗网格的物体需定义为目标表面。要特别说明的是,只有平移自由度才会受到固连接触的作用。

固连断开与固连接触的区别在于接触节点(或者表面)达到在失效准则前与目标表面固连在一起,达到失效准则后,允许接触节点(表面)与目标表面产生相对滑动甚至分离。这个特点适用于模拟焊点和螺钉连接。同为固连断开接触,点-面接触(TNTS)和面-面接触(TSTS)的失效依据是不同的,前者为失效力,后者为失效应力。上述参数的定义也需要用户通过附加

输入给出。

5. 单边接触、压延筋和成形接触

这 3 种接触类型一般用于金属成形的模拟过程中。单边接触发生在垂直于壳单元表面法向方向的接触中,常用于薄板成形。

压延筋接触用于金属成形工艺,在深拉和冲压中模拟中,坯料与模具表面的接触会发生脱离现象,使用压延筋接触有效控制坯料的约束,保证坯料在压延筋整个长度上保持接触。

成形接触基于自动接触类型的算法,可靠性较好。常用于金属成形分析,通常冲头和模具定义为目标面,工件定义为接触面。

12.3 摩擦问题

ANSYS/LS-DYNA 的接触摩擦基于库仑公式,摩擦系数 μ_c 由式(12-1)表示:

$$\mu_c = F_D + (F_S - F_D)e^{-DC \times V_{rel}} \quad (12-1)$$

其中 F_S 为静摩擦系数, F_D 为动摩擦系数, DC 为指数衰减系数, V_{rel} 为接触面间的相对速度。

12.3.1 摩擦系数的定义

由式(12-1)可知,摩擦系数的定义包括:静摩擦系数(Static Friction Coefficient,用 F_S 表示)、动摩擦系数(Dynamic Friction Coefficient,用 F_D 表示)、指数衰减系数(Exponential Decay Coefficient,用 DC 表示)。最大摩擦力定义为

$$F_{lim} = VC \times A_{cont} \quad (12-2)$$

其中, A_{cont} 为接触时接触片的面积; $VC = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$ 为粘性摩擦系数(Viscous Friction Coefficient), σ_0 为接触材料的屈服应力。

接触阻尼系数定义见式(12-3):

$$\xi = \frac{VDC \hat{\xi}_{crit}}{100} \quad (12-3)$$

其中, VDC 为粘性阻尼系数(Viscous Damping Coefficient),例如取值 20; $\hat{\xi}_{crit} = 2m\omega$ 为临界阻尼系数, m 为质量, ω 为接触片的固有频率,由程序自动计算。

因此,摩擦系数相关参数的确定,需要用户根据实际问题的具体条件,设置合理的参数来仿真真实情况。

12.3.2 滑动界面能

滑动界面能与摩擦是相关的。当没有摩擦时,即没有定义摩擦系数,滑动界面能为接触弹簧保持的势能。在碰撞过程中,能量的转换应该是接触弹簧的势能转化为动能,动能转化为变形能,这个过程滑动界面能应该控制在一个很小的水平以内。如果是纯弹性碰撞,滑动界面能完全转化为动能;如果是弹塑性碰撞,滑动界面能应完全转化为动能和应变能。当考虑摩擦时,接触界面的法向有滑动界面能,切向产生摩擦能。

通过监测和控制滑动界面能可以判断接触的定义是否合适。一般地,当滑动界面能出现负值的情况时,可以从两个方面寻找原因:一是搜索方式造成的计算上的问题,可以通过接触界面(相关介绍在后面讲述)的相关参数进行控制;二是初始穿透问题,有限元模型建立过程中产生的节点或者界面之间相互干涉,在初始检查时程序进行自动修正将导致负的滑动界面能。

12.3.3 初始穿透

初始穿透将导致滑动界面能出现负值,但同时并不能完全修正初始干涉问题。因此需要用户适当加以控制,方法有 3 种。

- ✎ 在建立模型过程中避免出现节点、界面等部分的相互干涉,消除初始穿透。
- ✎ 对于较小的初始穿透,通过控制接触厚度来消除。
- ✎ 通过相关参数的控制,忽略初始穿透。

12.4 附加输入参数

对于侵蚀接触、刚性体接触、固连断开接触和压延筋接触等计算,还需要输入附加数据,分别以 V1、V2、V3 和 V4 来表示,这 4 个参数因不同接触类型而不同,如表 12-2 所示。

表 12-2 附加输入参数的含义

| 接触类型 参数 | 侵蚀接触 (ENTS, ESS, ESTS) | 刚性体接触 (RNTR, ROTR) | 固连断开接触 | | 压延筋接触 |
|------------|---------------------------------|-----------------------|--|--|------------------------|
| | | | TSTS | TNTS | |
| V1 | 边界对称条件选项,决定当单元失效时沿一个表面是否依旧保持对称性 | 力 - 挠度曲线号 | 拉伸失效应力 NFLF | 拉伸失效力 NFLF | 载荷曲线号,压延筋位移函数的约束力的弯曲分量 |
| V2 | 内部侵蚀选项,决定当外表面发生失效时沿哪个表面是否接着发生侵蚀 | 刚性体接触时力计算方法类型选项 | 剪切失效应力 SFLF,其失效准则为 $\left(\frac{ \sigma_n }{NFLF}\right)^2 + \left(\frac{ \sigma_s }{SFLF}\right)^2 \geq 1$ | 剪切失效力 SFLF | 第二条载荷曲线号压延筋位移函数的法向约束力 |
| V3 | 相邻材料选择,决定当沿着自由表面发生侵蚀时是否包括实体单元面 | 卸载刚度值 | 相邻材料选择,决定当沿着自由表面发生侵蚀时是否包括实体单元面 | 法向力指数 NEN | 压延筋深度 |
| V4 | | | | 剪切力指数 MES,其失效准则为 $\left(\frac{ f_n }{NFLF}\right)^{NEN} + \left(\frac{ f_s }{SFLF}\right)^{MES} \geq 1$ | 压延筋等距积分点数 |

12.5 接触界面的控制

ANSYS/LS-DYNA 中没有接触单元的定义,因此无法显示接触定义的状态。但在求解之前必须检查已经定义的接触界面,可以采用如下方法实现。

命令格式：

```
EDCLIST ,NUM
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Contact>List Entities

执行上述操作后 ,窗口将列出所有被定义的接触实体和给定的摩擦参数。

一旦定义好模型的接触界面以后 ,可以使用 EDCONTACT 命令对接触算法作进一步的控制 ,控制选项包括 :接触刚度、接触搜索方式、接触深度、壳单元深度和接触段节点号顺序的自动定向。实现方式如下：

命令格式：

```
EDCONTACT ,SFSI ,RWPEN ,IPCK ,SHTK ,PENNO ,STCC ,ORIE ,CSPC ,PENCHK
```

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Contact>Advanced Controls

打开 Advanced Controls 对话框 ,各选项含义如图 12-4 所示。

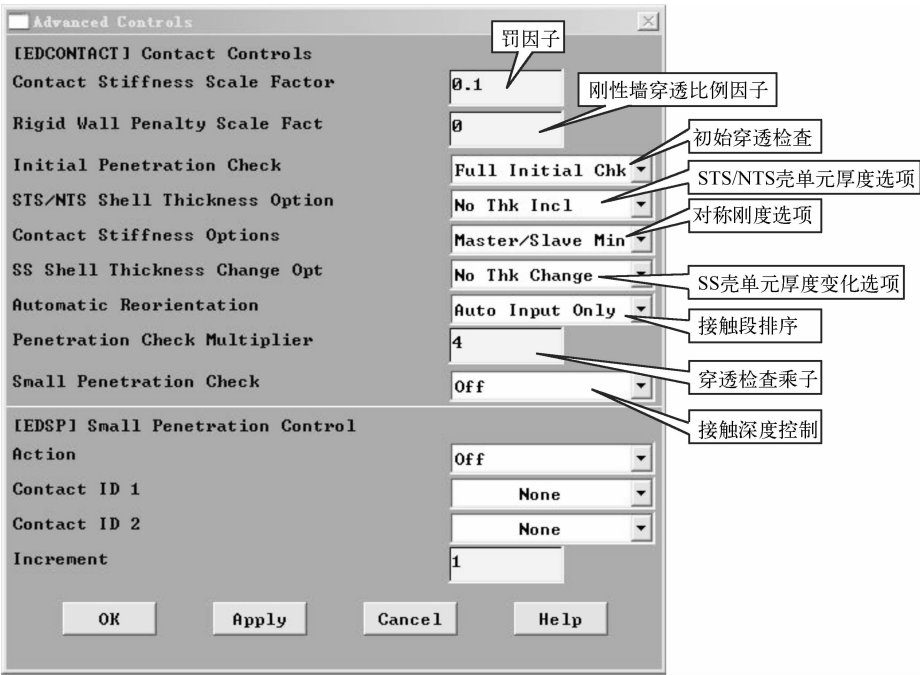


图 12-4 接触界面高级控制对话框

12.5.1 接触刚度控制

接触刚度的控制有两种方式 :罚因子(Contact Stiffness Scale Factor ,以 SFSI 表示)和对称刚度(Contact Stiffness Option ,以 PENNO 表示)。

前面已经提到 ANSYS/LS-DYNA 的默认算法是对称罚函数法,其物理意义相当于在接触节点和目标面之间引入“弹性弹簧”来建立接触刚度。接触力等于接触刚度和穿透量的乘积来定义。接触刚度与接触体的相对刚度有关,体单元和壳单元的定义略有不同,但都与罚因子相关,罚因子默认为 0.1,大多数情况下可以提供良好的计算结果。

当两接触体材料性质或者单元大小存在巨大差异时,将引起接触面与目标面接触应力不匹配,此时使用对称刚度控制,选项有 5 种。

Master/Slave Min:采用接触节点/目标面最小接触刚度值,默认选项。

Master Seg Stiff:采用目标面接触刚度值。

Slave Node Value:采用接触节点接触刚度值。

Weighted Slave:采用面或者质量加权接触节点接触刚度值。

Inverse Proport:采用与壳厚度成反比的接触节点接触刚度值(一般不建议使用)。

上述第 4 或者第 5 选项常用于金属成形过程的计算。

12.5.2 初始穿透检查

初始穿透检查(Initial Penetration Check,以 IPCK 表示)是在求解之前程序对有限元模型节点或者接触界面进行初始穿透的检查,选项有两个。

No checking:不进行初始穿透的检查,是避免初始穿透造成滑动界面能出现负值而采用的方法之一。

Full Initial Chk:执行初始穿透的检查,是默认选项。

12.5.3 接触深度控制

接触深度控制(Small Penetration Check,以 PENCHK 表示)常用于 STS、NTS、OSTS、TNTS 和 TSTS 中,选项有 3 个。

Off:接触深度控制关闭,是默认选项。

On:接触深度控制打开,穿透深度由单元厚度自动限制。通过穿透检查乘子(Penetration Check Multiplier,以 CSPP 表示)控制最大穿透深度,默认取值为 4.0。

Shortest Diag Ck:接触深度控制打开,取值为单元最小对角线长度。

12.5.4 接触段自动排序

接触段自动排序(Automatic Reorientation,以 ORIE 表示)实现接触段的自动排序,选项有 3 个。

Auto Input Only:初始化时,对接触面自动排序定位,使其外法线指向外,保证计算准确,是默认选项。

Manual and Auto:对用 PART 号定义的接触面,初始化时自动进行接触段排序定位,其余由手工实现。

Do not Reorient:完全由手工排序定位。

12.5.5 壳单元厚度的控制

壳单元通过实常数的定义给定单元的厚度,这是物理概念上的厚度,直接影响单元的质量和刚度,但单元厚度与接触厚度是不一样的。如图 12-4 所示,壳单元接触厚度的控制由两个下拉列表实现。

(1) STS/NTS 壳单元厚度下拉列表 STS/NTS Shell Thickness Option(以 SHTK 表示),用于定义面-面接触和点-面接触条件下,考虑壳单元厚度对接触的影响,选项有 3 个。

No Thickness :不考虑单元厚度,是默认选项。

No Rigid Body Thk :考虑变形体壳单元厚度,不考虑刚性体壳单元厚度。

Rigid Body Thk :变形体和刚体壳单元厚度都不考虑。

(2) SS 壳单元厚度变化下拉列表 SS Shell Thickness Change Opt(以 STCC 表示),用于控制单面接触条件下,壳单元厚度变化对接触的影响,选项有两个。

No Thickness :不考虑壳单元厚度变化,是默认选项。

Include Thick :考虑壳单元厚度变化。

练习题

1. 区别接触面和目标面的概念?
2. 如何定义组件?定义接触的步骤是怎么样的?
3. ANSYS/LS-DYNA 定义的接触类型有几种?分别适合什么情况选用?
4. 关于摩擦问题,需要注意什么问题?如何避免初始穿透?
5. 接触界面控制参数的含义各是什么?如何适当选择?

第 13 章 加载、求解与后处理

本章包括三部分内容 第一部分介绍在 ANSYS/LS-DYNA 模块中实现载荷定义与施加、边界条件约束、初始条件的定义等与模型载荷有关的内容 ;第二部分介绍求解所必须的一些控制参数和处理方法、求解过程的监测和控制 ,以及重启动问题的应用 ;第三部分主要介绍应用时间历程后处理器观察 ANSYS/LS-DYNA 模块的分析结果。

13.1 加载

这里的加载是广泛意义上的 ,包括 ANSYS/LS-DYNA 模块中一般载荷的定义和施加、约束的施加、初始条件的给定和点焊的定义。ANSYS/LS-DYNA 中的所有载荷都是与时间相关的 ,因此需要通过数组的方式来实现载荷的定义。

13.1.1 数组的定义

用于定义载荷的数组应该是两个 :一个定义为时间数组 ,为一组时间数据 ;另一个定义为载荷值 ,数值个数与时间数组一一对应。两个数组的定义过程是一样的 ,下面以时间数组为例加以说明。

依次选择 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit ,在打开的 Array Parameter 对话框上单击 Add 按钮 ,如图 13-1 所示。



图 13-1 添加数组对话框

在后续打开的 Add New Array Parameter 对话框上 ,如图 13-2 所示 ,给定数组的名称、数组的维数及每一维的数值个数。单击 OK 按钮返回到如图 13-1 所示的对话框 ,其上就会显示已经定义了的数组名称 ,选择要编辑的数组 ,单击 Edit 按钮 ,打开如图 13-3 所示的 Array Parameter TIME 对话框 ,给出了一个一维含有 5 个数值的数组的定义。定义完成后 ,选择 File 菜单中的 Apply 选项进行保存 ,然后编辑其他数组或者退出。

载荷的数组定义过程是一样的 ,只是需要注意与时间数组的数值个数要匹配。

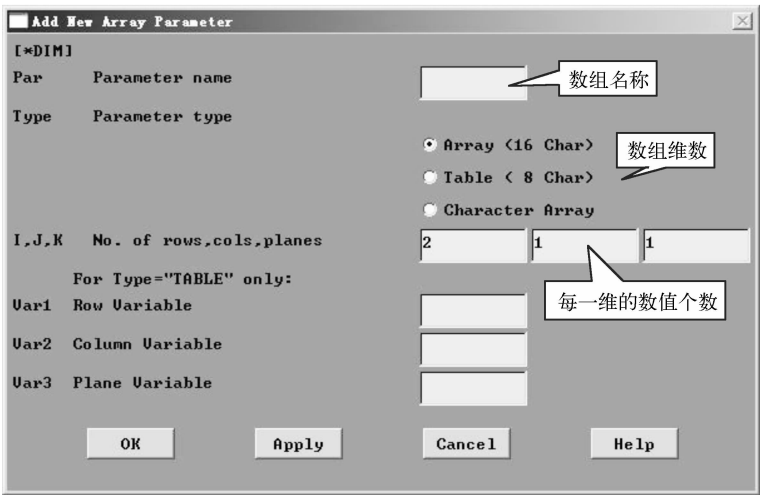


图 13-2 定义数组对话框

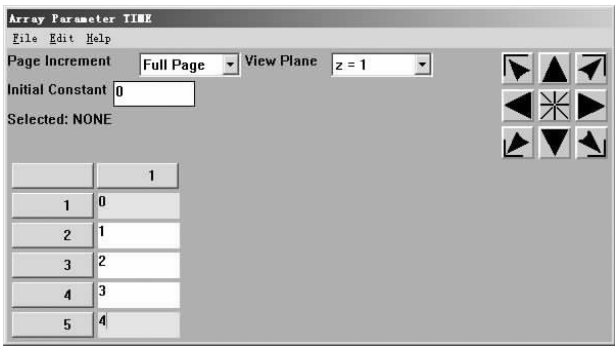


图 13-3 定义数组数值的对话框

13.1.2 一般载荷

1. 载荷的施加

施加载荷之前要定义节点组件(定义过程见第 12 章)、时间数组和载荷数组。

命令格式：

EDLOAD ,Option ,Lab ,KEY ,Cname ,Par1 ,Par2 ,PHASE ,LCID ,SCALE ,BTIME ,DTIME

菜单操作：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Loading Options>Specify Loads

Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads

打开如图 13-4 所示的 Specify Loads for LS-DYMA Explicit 对话框 ,Load Options 有 3 个选项 :施加、查看和删除载荷 ;Load Label 选项列出了所有载荷的类型 ,根据需要进行选择 ;Component name or PART Number 指定要施加载荷的组件名称或者 PART 编号 ,一般是用户已经定义 ,则相应的组件名称或 PART 编号就可以从这里选择 ,Parameter name for time values

用于指定时间数组 ;Parameter name for data values 用于指定载荷数组 ;Load curve ID 用于给定载荷曲线编号。



图 13-4 载荷施加对话框

对于用户定义的节点组件 ,以下载荷类型是可以选择使用的。

- 力 :FX ,FY ,FZ。
- 力矩 :MX ,MY ,MZ。
- 位移 :UX ,UY ,UZ。
- 转动 :ROTX ,ROTY ,ROTZ。
- 速度 :VX ,VY ,VZ。
- 节点加速度 :AX ,AY ,AZ。
- 体加速度 :ACLX ,ACLY ,ACLZ。
- 角速度 :OMGX ,OMGY ,OMGZ。

对于载荷类型中的 PRESS 选项 ,用户必须定义单元组件 ,并把相应的压力载荷施加到单元组件上才有效。

2. 载荷曲线的定义和绘制

在施加载荷过程中 ,载荷大小的定义可以通过两种方式在施加过程中体现 :一是直接通过选择时间数组和载荷数组来体现载荷 ;二是通过指定载荷曲线的编号。

如果把时间数组作为横坐标 ,载荷数组作为纵坐标 ,就可以得到一条曲线来表达一定时间内载荷的变化过程。ANSYS /LS-DYNA 允许用户通过自定义的时间数组和载荷数组来定义载荷曲线 ,方法如下。

命令格式 :

```
EDCURVE Option ,LCID ,Par1 ,Par2
```

菜单操作 :

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Loading Options>Curve Options
Main Menu>Solution>Loading Options>Curve Options

打开如图 13-5 所示的 Plot Load Curve for LS-DYMA 曲线定义对话框 ,Options for Curves 用于添加、删除和列表自定义的数据曲线 ;Curve ID Number 用于指定曲线编号 ;Parameter name for abscissa vals 用于指定自定义曲线的横坐标数组 ;Parameter name for ordinate vals 用于指定自定义曲线的纵坐标数组 ,这两组数组的是通过选择来指定的 ,因此要求用户在定义曲线之前要先定义好相应的数组 ,以载荷曲线来说 ,横坐标数组就是时间数组 ,纵坐标数组就是载荷数组。实际上 ,数据曲线的定义不仅限于载荷曲线的定义 ,也可以用于其他数据曲线的定义 ,例如与材料有关的应变 – 应力关系曲线的定义等。

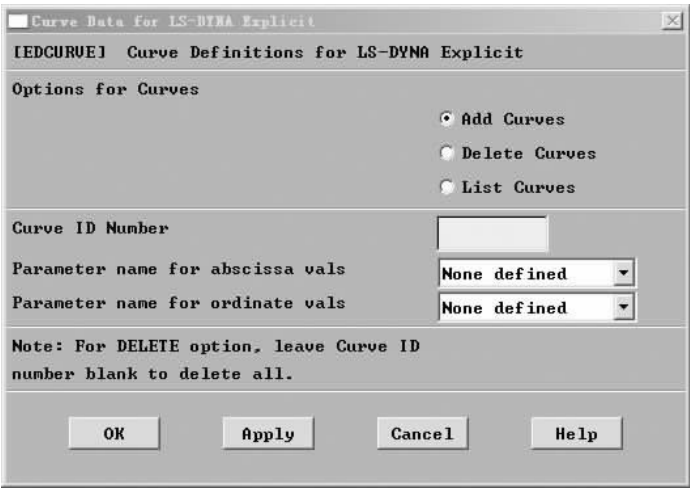


图 13-5 曲线定义对话框

一般地 ,数据曲线定义以后 ,用户应该将其绘制出来以便于检查定义是否正确 ,有无失误。
命令格式 :

EDPL ,LDNUM

菜单操作 :

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Loading Options>Plot Load Curve
Main Menu>Solution>Loading Options>Plot Load Curve

打开如图 13-6 所示的 Plot Load Curve for LS-DYMA 曲线绘制对话框 ,给出曲线的编号 ,这个编号应该是在曲线定义中用户指定的编号 ,单击 OK 按钮 ,图形窗口将以二维坐标图形式显示相应的曲线。

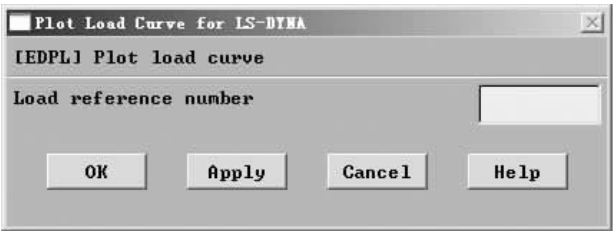


图 13-6 曲线绘制对话框

13.1.3 约束

ANSYS/LS-DYNA 的约束一般是指零约束,即自由度为零的边界条件,使用 D 命令来实现。而非零约束归入到一般载荷那样进行处理。

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Apply

Main Menu>Solution> Constraints>Apply

打开如图 13-7 所示的 Apply 施加约束对话框,其中前 3 个选项 On Lines、On Areas 和 On Nodes 用于在有限元模型直接选择施加约束的直线、面或者节点,施加过程和方法与前面讲述的 ANSYS 是相同的。选择施加对象之后,程序自动施加零约束,施加在线或面上的约束也自动移置到相应节点上。

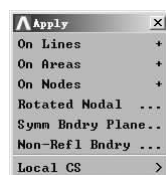


图 13-7 约束施加对话框

1. 转动约束

选择 Apply 对话框中的第 4 项 Rotated Nodal,或者通过命令格式施加转动节点的约束。

命令格式:

EDNROT Option CID Cname ,DOF1 ,DOF2 ,DOF3 ,DOF4 ,DOF5 ,DOF6

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Apply>Rotated Nodal

Main Menu>Solution>Loading Options> Constraints>Apply>Rotated Nodal

打开如图 13-8 所示的 Apply rotated nodal constraint 对话框,从对话框选项和命令参数上可以看出,该约束施加在节点上,并且与坐标系统相关。因此在施加约束之前,需要用户定义局部坐标系并给定相应编号,定义要施加约束的节点组件。可以约束的自由度有 6 个:3 向平移和 3 向旋转,即 UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ。

2. 对称边界的约束

选择 Apply 对话框中的第 5 项 Symm Bndry Plane,或者通过命令格式施加对称边界的约束。对称边界的约束分两种:一是 Sliding symmetry,即普通意义上的对称约束,例如选择一个平板的二分之一为研究对象,那么某一条边即为对称边,在这条边上施加对称边界约束,其上的所有节点只在沿边界法向上有位移,其他自由度为零;二是 Cycle symmetry,即循环对称边界,如 13-9 所示。

命令格式:

EDBOUND Option Lab Cname XC,YC,ZC Cname2 COPT

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Apply>Symm Bndry Plane

Main Menu>Solution>Loading Options> Constraints>Apply>Symm Bndry Plane

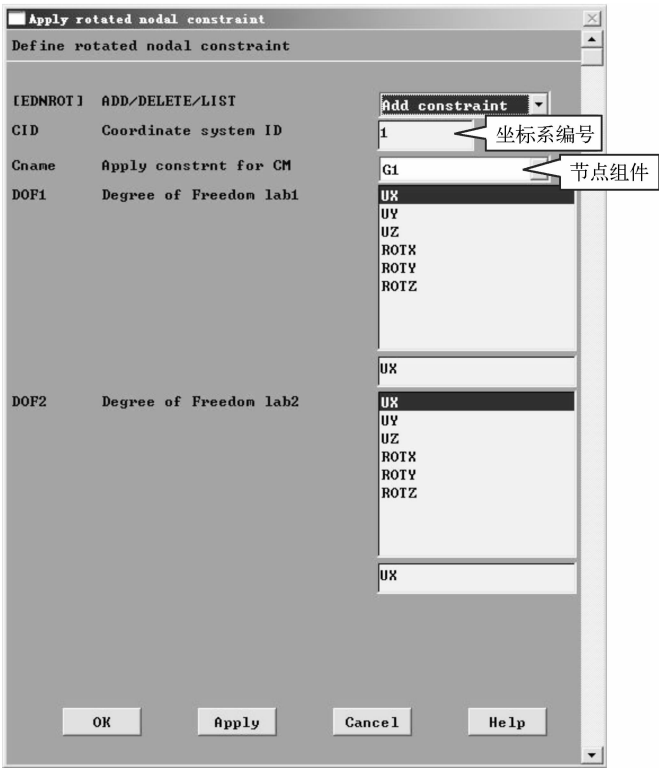


图 13-8 施加转动节点约束对话框

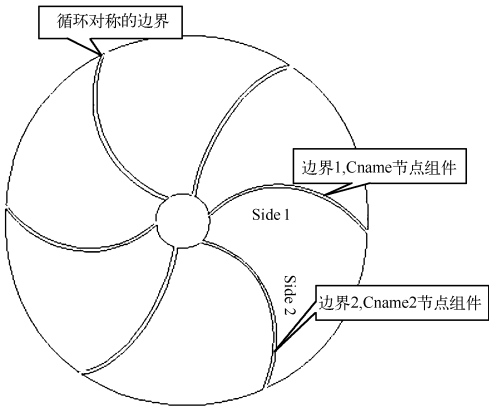


图 13-9 循环对称边界

打开如图 13-10 所示的 Define Symmetry Boundary Plane 对话框 ,从对话框选项和命令参数上可以看出 ,该约束是施加在节点上的 ,因此 ,在施加约束之前 ,需要用户定义节点组件。根据边界约束的类型不同 ,定义不同的节点组件。对于 Sliding symmetry 选项 ,节点组件只需要一个 ,即 Cname ,由要施加约束的边界节点组成 ;对于 Cycle symmetry 选项 ,节点组件需要定义

两个 ζ_{name} 为边界 1 节点组成, ζ_{name2} 为边界 2 节点组成, 如图 13-9 所示, 这两个节点组件的节点数目要一致, 否则不能约束边界。

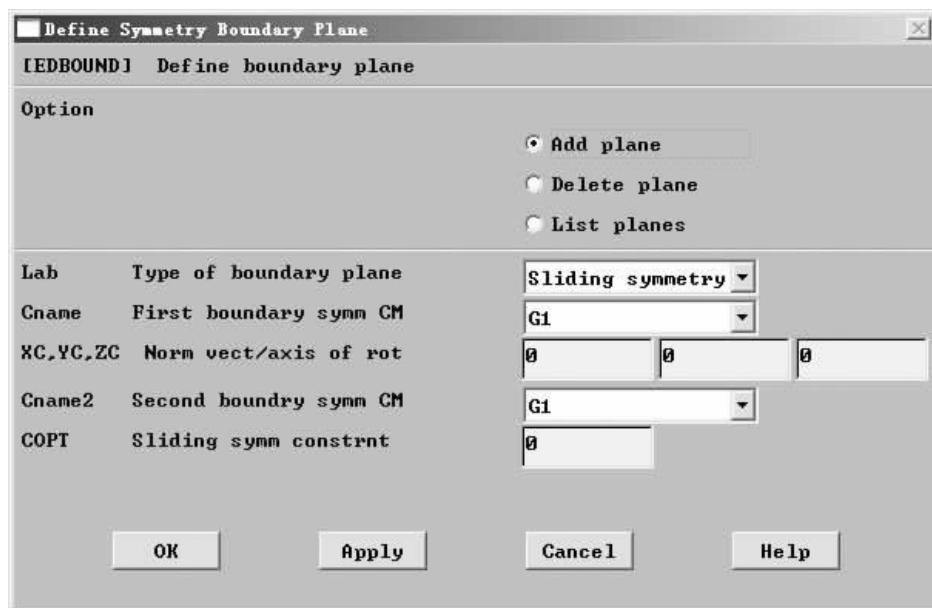


图 13-10 对称边界约束对话框

“XC,YC,ZC”的定义只对 Sliding symmetry 选项有效, 代表对称边界法向矢量的终点坐标, 起点默认为坐标原点。由此可知, 对称边界的定义是任意的, 可以是沿某一个坐标轴, 也可以沿某一矢量。COPT 选项也只对 Sliding symmetry 选项有效, 控制边界上节点的自由度方向, 是沿法向(取值为 0, 默认值)有位移还是沿某一矢量(取值为 1)有位移。

3. 无反射边界的约束

选择 Apply 对话框上的第 6 项 Non-Ref1 Bndry, 或者通过命令格式施加无反射边界的约束。无反射边界一般定义在实体 SOLID164 单元划分的无限大区域模型的外表面。比较典型的应用是地质力学中控制模型的尺寸, 例如, 对于有限大小的半空间模型, 无反射边界的约束用于防止边界上产生虚假应力, 以至对模型和结果产生影响。

命令格式:

EDNB, Option, ζ_{name} , AD, AS

菜单操作:

Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Constraints > Apply > Non-Ref1 Bndry

Main Menu > Solution > Loading Options > Constraints > Apply > Non-Ref1 Bndry

13.1.4 初始条件

一般地, 动态分析求解需要定义初始条件, 即定义初始线速度和角速度。初始条件也是定义在节点上的, 因此要先定义需施加初始速度的模型的节点组件。

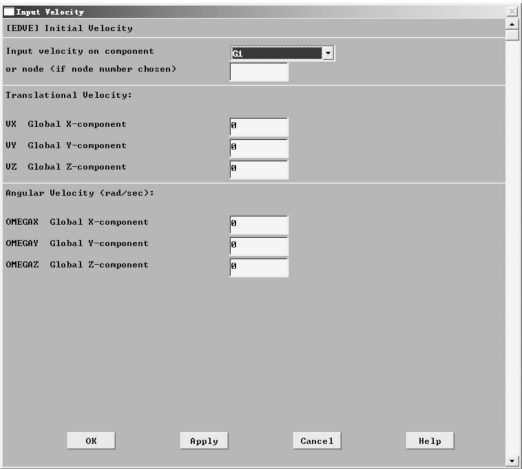
命令格式：

```
EDVEL ,Option ,Cname ,VX ,VY ,VZ ,OMEGAX ,OMEGAY ,OMEGAZ ,XC ,YC ,ZC ,ANGX ,ANGY ,
ANGZ
```

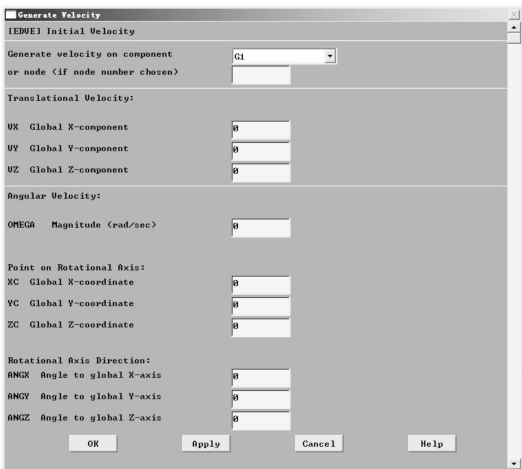
菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options> Initial Velocity>w /Nodal Rotate
Main Menu>Solution>Loading Options> Initial Velocity>w /Nodal Rotate
Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options> Initial Velocity>w /Axial Rotate
Main Menu>Solution>Loading Options> Initial Velocity>w /Axial Rotate
```

菜单操作的前两个路径将打开如图 13-11(a)所示的 Input Velocity 对话框 ,后两个路径打
开如图 13-11(b)所示的 Generate Velocity 对话框。这两个对话框都可以实现对节点组件初始
速度的定义 ,但又略有不同。Input Velocity 对话框只能定义在整体笛卡儿坐标系下沿坐标
系的平动和绕轴转动 ,Generate Velocity 对话框可以实现相对于整体笛卡儿坐标系的平动和绕
任意轴的转动 ,通过“XC ,YC ,ZC”定义旋转轴的原点 ,通过“ANGX ,ANGY ,ANGZ”定义旋转
轴和整体坐标轴之间的夹角。



(a) Input Velocity对话框



(b) Generate Velocity对话框

图 13-11 初始速度施加对话框

13.1.5 点焊

点焊类似于在两个节点之间建立约束方程的处理。低版本的 ANSYS /LS-DYNA 只允许
建立无质量的、刚性的点焊 ,要求点焊之间的两个节点必须不重合 ,且没有任何其他约束。

命令格式：

```
EDWELD ,Option ,NWELD ,N1 ,N2 ,SN ,SS ,EXPN ,EXPS
```

菜单操作：

```
Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Spotweld>Create Spotweld
```

上述操作要求用户直接在图形窗口选择两个节点,即需要建立点焊的两点,然后打开如图 13-12 所示的 Create Spotweld between nodes 对话框,“点焊编号”是用户给定的建立点焊节点对的编号,用户一旦选择了两个节点建立点焊,相应的节点编号就会显示在对话框中,“点焊失效条件”是由失效准则 $\left(\frac{|f_n|}{S_n}\right)^{\text{expn}} + \left(\frac{|f_s|}{S_s}\right)^{\text{exps}} \geq 1$ 的 4 个参数来控制的, S_n 为法向失效力, S_s 为剪切失效力, expn 和 exps 分别为法向、剪切点焊力的指数。

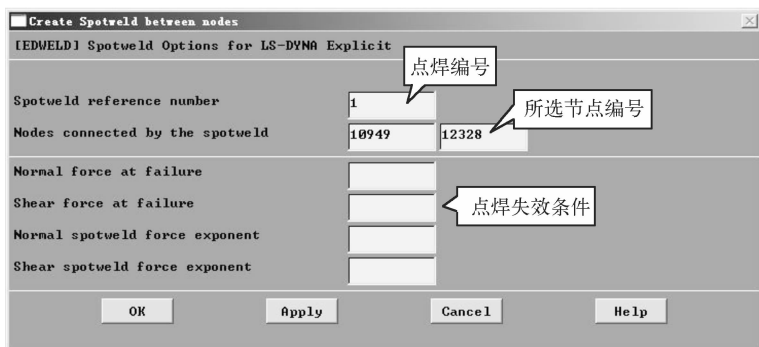


图 13-12 点焊定义对话框

13.2 求解控制

在完成实体模型和有限元模型建立之后,定义接触、给定约束、载荷和相应的初始条件,还需要对求解的一些参数进行设置,才可以开始求解。

13.2.1 基本求解控制

基本求解控制包括计算终止时间、输出文件的时间间隔,以及壳单元和梁单元输出的积分点数。其中计算终止时间是必须给出的参数,否则求解无法进行。

1. 计算终止时间

计算终止时间即用户要对模型进行计算的时间。时间定义的不同模拟的阶段也不同,一般地,用户是对关注的模型运动变形的整个过程进行分析和计算。

命令格式:

TIME,Time

菜单操作:

Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time

打开如图 13-13 所示的 Solution Time for LS-DYNA Explicit 对话框,直接给定时间数值即可。

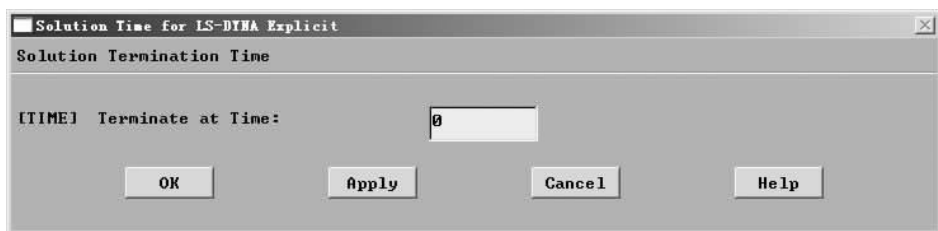


图 13-13 给定计算终止时间对话框

2. 结果文件的时间间隔

ANSYS /LS-DYNA 的结果文件包括后缀为“.rst”和“.his”的两种文件。前者用于 POST1 后处理 观察总体结构的变形图形、应力或者应变的分布 ;后者用于 POST26 绘制节点和单元数据的时间历程曲线。两者都是二进制文件。给定这两个结果文件的时间间隔 ,即在求解过程中记录数据的多少。

命令格式 :

```
EDRST ,NSTEP ,DT
EDHTIME ,NSTEP ,DT
```

菜单操作 :

Main Menu>Solution>Output Controls>File output Freq

打开如图 13-14 所示的 Specify File Output Frequency 对话框 ,直接给定输出文件的时间间隔即可。

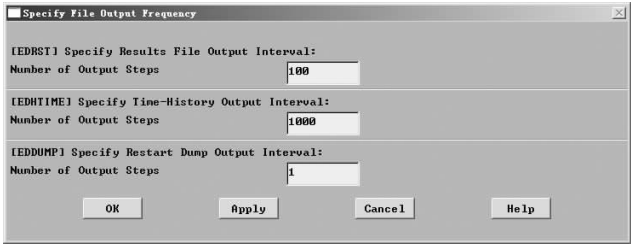


图 13-14 给定输出文件时间间隔

需要说明的是 ,用户要事先定义要绘制时间历程曲线的节点或者单元组件 ,也就是将关注部分定义为组件 然后指定将其记录到“.his”文件 ,在计算完成之后 ,才可以查看和绘制相应部分的曲线。组件数目的定义没有限制 ,可以重复定义多个。

命令格式 :

```
EDHIST ,Comp
```

菜单操作 :

Main Menu>Solution>Output Controls>Select Component

打开如图 13-15 所示的 Select Component for Time History Output 对话框 ,选择已定义的节点或者单元组件 ,重复操作指定多个组件 ,将结果记录到时间历程文件。



图 13-15 指定组件记入结果文件

3. 输出积分点数

对于显式分析的壳单元和梁单元,允许用户控制输出多少个积分点数的计算结果。

命令格式:

```
EDINT,SHELLIP,BEAMIP
```

菜单操作:

Main Menu>Solution>Output Controls>Integ Pt Storage

打开如图 13-16 所示的 Specify Integration Point Storage 对话框,可以分别给出壳单元和梁单元要输出结果的积分点数,默认值分别为 3 和 4。壳单元和梁单元的积分点数是在实常数中定义的,对于壳单元积分点数为 1 或者 2 时,输出的积分点数一般取默认值 3。

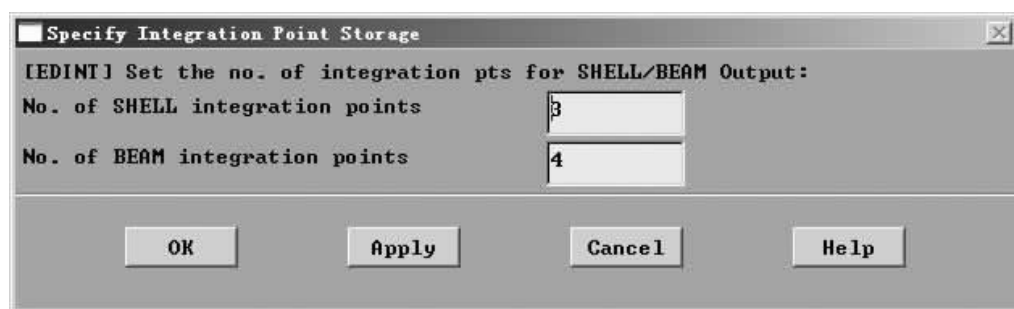


图 13-16 指定输出积分点数

对于没有使用壳单元或者梁单元模型不必设置此项。

13.2.2 输出文件控制

计算分析的最终目的是得到相应的结果,用户可以通过控制输出文件,得到不同需要的结果文件。因此,要求用户在求解之前就应该明确对分析结果的需求,以便进行相应的控制。

1. 二进制输出文件

ANSYS/LS-DYNA 程序既可以连接 ANSYS 后处理器也可以连接 LSTC 公司的后处理器,两种后处理器虽然都使用二进制文件,但要求的文件形式是不同的,前者的结果文件是以“.rst”和“.his”为后缀,后者的结果文件以“d3plot”和“d3thdt”为后缀。

用户可以控制输出哪两种二进制文件,即用于 ANSYS、用于 TAURUS 或者二者都可以用。

命令格式:

```
EDOPT,Option,r,Value
```

菜单操作:

Main Menu>Solution>Output Controls>Output File Type

打开如图 13-17 所示的 Specify Output File Types for LS-DYMA Solver 对话框,选择 ANSYS 输出“.rst”和“.his”,选择 TAURUS 输出“d3plot”和“d3thdt”,选择 ANSYS and

TAURUS 输出两种形式的结果文件。

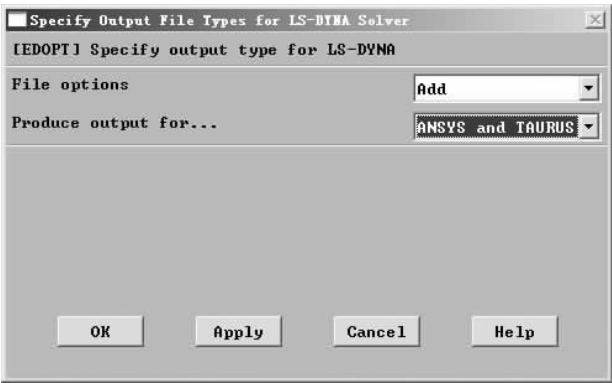


图 13-17 指定输出文件类型

2. ASCII 格式化输出文件

ANSYS/LS-DYNA 可以选择输出有关分析各种特定信息的 ASCII 格式化输出文件。

命令格式：

EDOUT ,Option

菜单操作：

Main Menu>Solution>Output Controls>ASCII output

打开如图 13-18 所示的 ASCII Output 对话框 ,选择相应的文件名称 ,如果选择 Write All files 即输出所有 ASCII 文件。文件包含的结果数据如表 13-1 所示。

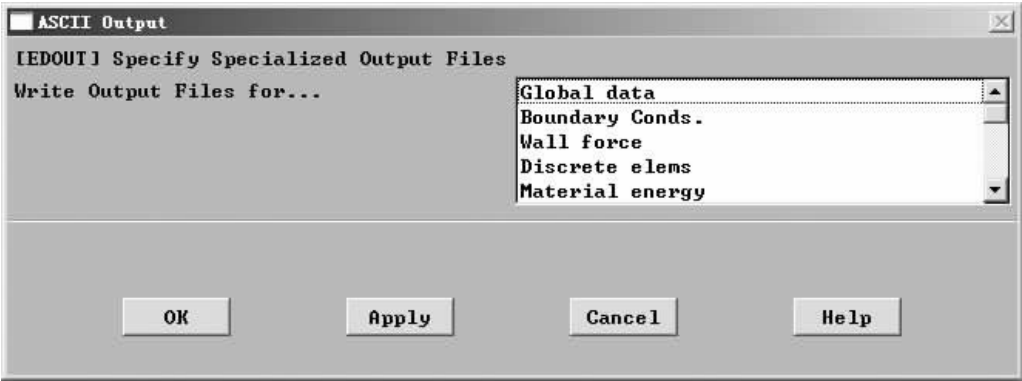


图 13-18 指定输出文件形式

表 13-1 ASCII 格式化输出文件选项及含义

| 选 项 名 称 | 含 义 |
|---------|----------|
| GLSTAT | 总体模型数据 |
| BNDOUT | 边界条件力和能量 |

续表

| 选项名称 | 含 义 |
|------------------|--------------------|
| RWFORC | 刚性墙力 |
| DEFORC | 离散单元力 |
| MATSUM | 材料能量数据 |
| NCFORC | 节点界面力 |
| RCFORC | 界面合力 |
| DEFGEO | 变形几何数据 |
| SPCFORC | 单节点约束力 |
| SWFORC | 节点约束反力(点焊) |
| RBDOUT | 刚性体数据 |
| GCEOUT | 几何接触实体 |
| SLEOUT | 滑动界面能量 |
| JNTFORC | 连接力数据 |
| ELOUT | 单元数据 |
| NODOUT | 节点数据 |
| Write all Files | 记录全部 ASCII 格式化输出文件 |
| List file status | 对所有时间历程输出列表说明 |
| DEL OUTPUT CTRLS | 删除所有 ASCII 输出说明 |

13.2.3 质量缩放

显式积分的最小时间步长要小于临界时间步长(在 ANSYS/LS-DYNA 中程序自动计算),这也是解法稳定的条件。最小时间步长由最小单元长度和材料的音速所决定,对于不同单元类型,二者的表达形式也不同。

以壳单元为例,如图 13-19 所示,单元 1、2、3 对应的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 ,则最小时间步长 Δt_{\min} 为

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_{\min}}{c} \tag{13-1}$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1 - \nu^2) \cdot \rho}} \tag{13-2}$$

其中 c 为材料的音速, E 为弹性模量, ρ 为质量密度, ν 为泊松比。

从式(13-1)和式(13-2)可知,当给定材料特性,最小时间步长由模型中最小单元的尺寸决定,对于给定网格,最小时间步长取决于材料音速。对于一个有限元模型来说,一般认为是材料已知,那么实际控制时间步长的就是最小单元的尺寸。因此,在网格质量较差或者单

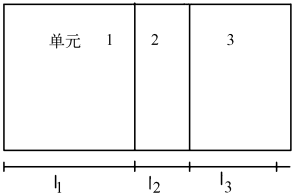


图 13-19 壳单元长度示意图

元尺寸差距较大时,最小时间步长由最小单元尺寸决定,这个数值较小时将大大增加计算时间。此时,有必要适当地控制时间步长以减少计算时间,这样的控制一定程度上会影响单元的密度,所以称之为质量缩放。

仍以上述壳单元为例,当用户指定最小时间步长时,相应单元(即实际最小时间步长小于设定的最小时间步长)的质量密度会有所增加,表达形式见式(13-3):

$$\rho_i = \frac{\Delta t_s^2 E}{l_i^2 (1 - \nu^2)} \quad (13-3)$$

其中, ρ_i 为 i 单元的质量密度, l_i 为 i 单元的长度, Δt_s 为用户指定的最小时间步长, E 为弹性模量, ν 为泊松比。

命令格式:

EDCTS,DTMS,TSSFAC

菜单操作:

Main Menu>Solution>Time Controls>Time Step Ctrls

打开如图 13-20 所示的 Specify Time Step Scaling for LS-DYNA Explicit 对话框,在 Mass scaling time step size 文本框中给定最小时间步长的数值。这个数值可以为正值也可以为负值。取值为正时,表示通过调整单元的密度,所有单元都具有相同的时间步长,一般用于不考虑惯性效应的条件下;取值为负时,表示质量缩放只用于时间步长小于给定时间步长的单元,这个方法更有效果并推荐使用。

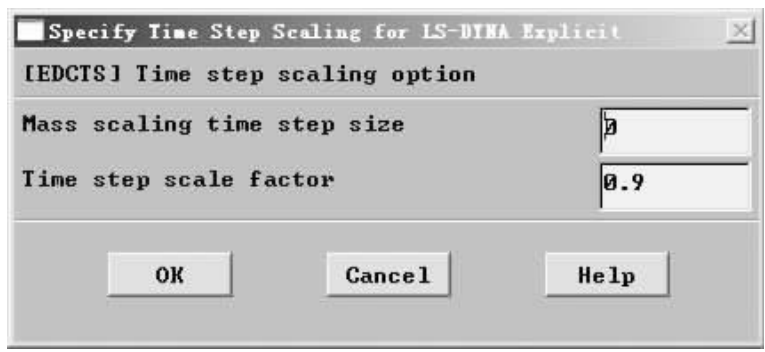


图 13-20 设置最小时间步长对话框

需要说明的是,质量缩放可以控制求解的时间,但并不意味着可以任意地设定实际计算时间。一般地,对于要考虑模型的惯性效应时,增加的质量要控制在 5% 之内。

13.2.4 子循环

除了应用质量缩放来控制求解时间意外,还可以通过子循环来加快分析速度。子循环,即混合积分时间。使用子循环有两个优点:一是单元大小差别很大时加快分析步伐,二是允许局部网格细化的同时不会增大罚值。

前面已经说明,当模型中单元尺寸差别较大时,相对小的单元将导致一个模型中所有单元采用小的时间步长。子循环的原理就是根据时间步长的大小把单元分为若干组,最小单元的

最小时间步长将增加,对于其他较大单元组的时间步长可能是最小时间步长的数倍(具体数值根据单元的大小确定)。

命令格式:

EDCSC,Key

菜单操作:

Main Menu>Solution>Time Controls>Subcycling

打开如图 13-21 所示的 Specify Subcycling Options for LS-DYNA Explicit 对话框,将子循环选项打开即可。

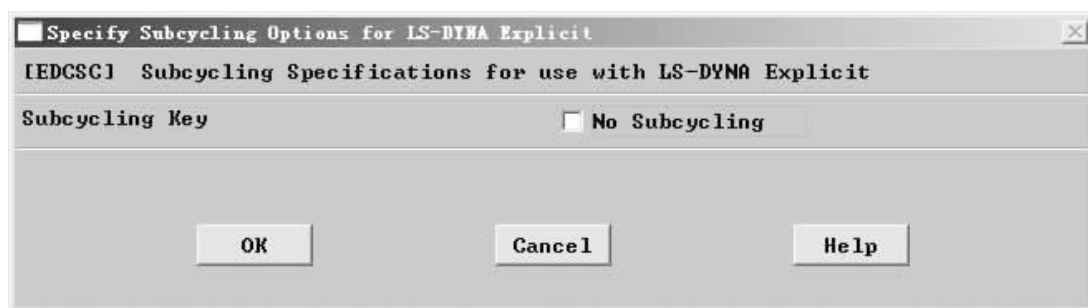


图 13-21 打开子循环对话框

13.2.5 沙漏控制

一般情况下,良好的有限元模型是可以防止沙漏产生的,主要体现在网格均匀和避免使用单点集中载荷。一旦在某点激起了沙漏效应,会传播到临近单元和节点,因此网格质量的好坏影响到沙漏问题。

ANSYS/LS-DYNA 提供了两种基本思想来控制沙漏,一是增加刚度来抵制沙漏模式,但不适用于刚体运动和线性变形区域;二是控制沙漏模式扩展的速度。

相应地,控制沙漏的方法之一,是调整模型的体积粘性来抵制沙漏变形。体积粘性是由程序自动计算的,但是可以通过控制粘性系数来调整模型的体积粘性。

命令格式:

EDBVIS,QVCO,LVCO

菜单操作:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Bulk Viscosity

Main Menu>Solution>Analysis Options>Bulk Viscosity

打开如图 13-22 所示的 Bulk Viscosity 对话框,在 Quadratic Viscosity Coefficient 文本框中设定二次项粘性系数,默认值为 1.5;在 Linear Viscosity Coefficient 文本框中设定线性粘性系数,默认值为 0.06。

尽管可以改变和设定体积粘性系数,但并不推荐使用这种方式,因为默认值是可以满足绝

大多数分析问题的要求的 ,用户给定的数值对于整个模型往往会有反作用。

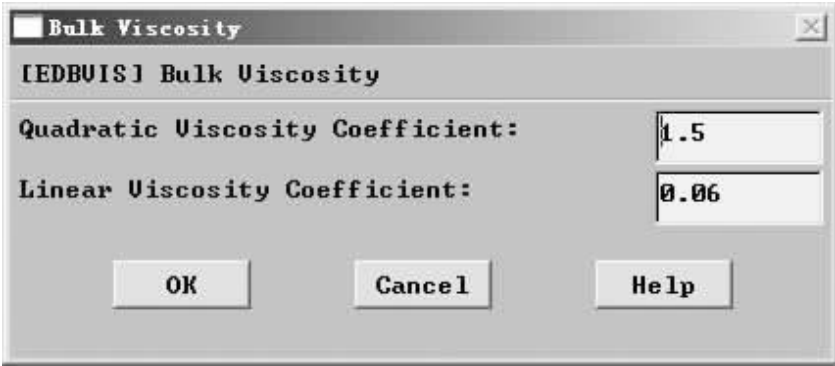


图 13-22 体积粘性系数设置对话框

引起沙漏的原因在于单点积分的算法 ,因此避免产生沙漏的根本方法是选择单元的全积分算法 ,但是这会大大增加计算时间。

另外 ,通过增加模型的弹性刚度在一定程度上也可以抵制沙漏变形。在小位移情况 ,尤其是应用动力松弛时 ,增加弹性刚度比改变体积粘性更能有效控制沙漏。

命令格式 :

```
EDHGLS ,HGCO
```

菜单操作 :

```
Main Menu>Preprocessor>Material Props>Hourglass Ctrl>Global  
Main Menu>Solution>Analysis Options>Hourglass Ctrl>Global
```

打开如图 13-23 所示的 Hourglass Controls 对话框 ,设定沙漏系数 默认值为 0.1。



图 13-23 沙漏控制对话框

在设定沙漏系数时也应该十分小心 ,对于大变形问题 ,当数值超过 0.15 ,可能使模型产生过刚度响应而导致不稳定。

13.2.6 自适应网格划分

在金属成形和高速碰撞分析中 ,结构或者模型将发生非常大的塑性变形 ,导致一些单元产

生不适当的纵横尺寸比,造成单元的畸变,进而影响计算结果。ANSYS/LS-DYNA 可以在求解过程中自动进行自适应的网格划分,以解决大变形过程中单元畸变问题。自适应网格划分通过两步实现,首先激活程序自适应网格划分选项,其次定义相关的自适应网格划分的参数。

1. 激活自适应网格划分

命令格式:

```
EDADAPT ,PART ,Key
```

菜单操作:

Main Menu>Solution>Analysis Options>Adaptive Meshing>Apply to Part

打开如图 13-24 所示的 Apply Adaptive Meshing to a Part 对话框,在 Part ID Number 文本框中设置要进行自适应网格划分的 PART 编号。需要说明的是,通过该命令可以激活多个 PART,但必须针对每个 PART 都执行一次操作,而且该命令只能应用于由 SHELL163 单元组成的 PART。将 Adaptivity is 选项设置为“on”,单击 OK 按钮,完成自适应网格划分功能的激活。



图 13-24 激活自适应网格划分对话框

2. 自适应网格划分参数的设定

命令格式:

```
EDCADAPT ,FREQ ,TOL ,OPT ,MAXLVL ,BTIME ,DTIME
```

菜单操作:

Main Menu>Solution>Analysis Options>Adaptive Meshing>Global Settings

打开如图 13-25 所示的 Adaptive Meshing Global Settings for LS-DYNA Explicit 对话框,在 Time interval for refinement 文本框中设置进行自适应网格划分的时间间隔;在 Error tolerance 文本框中指定角度容差,以“degrees”为单位计算,当单元间相对角度超过给定容差值时,单元将自动进行细化;在 Angle change checking option 文本框中设置自适应网格划分的方式,一是“incrementally”,即与前一次细分网格对比角度变化,二是“From original”,即与原有网格对比角度变化;在 Max number of refinements levels 文本框中设置控制网格细化的程度,例如,当取值为 1 时,一个原始单元只允许形成一个新单元,取值为 2 时,一个原始单元形成 4 个新单元,当取值为 3 时,一个原始单元形成 16 个新单元;在 Begin time of refinements levels 和 End time for adaptive meshing 文本框中设置控制程序在求解过程中自适应网格划分功能“打开”和“关闭”的时间。

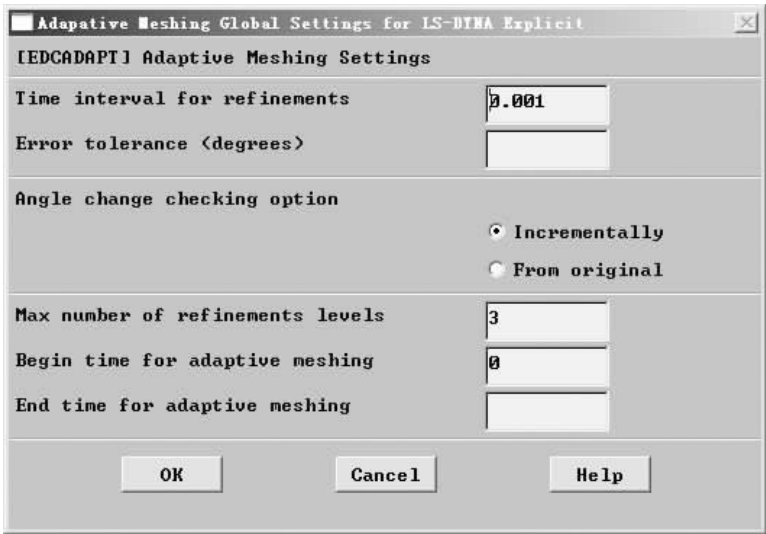


图 13-25 自适应网格划分参数设定对话框

13.3 求解过程控制

在完成有限元模型建立和求解的相关控制之后 ,用户就可以进行求解。对于求解过程 ,用户也可以进行控制和监测。

13.3.1 求解

命令格式 :

SOLVE

菜单操作 :

Main Menu>Solution>Solve

打开如图 13-26 所示的 Solve Current Load Step 对话框 ,单击 OK 按钮开始求解。



图 13-26 求解对话框

ANSYS /LS-DYNA 程序将运行以下几个步骤。

首先 ,头部记录 ,包括几何特性 ,都写入到相应的结果文件“.rst”和“.his”中。需要注意的是 ,这一步需要“.db”文件中包含全部信息 ,因此在求解之前 ,必须运行“SAVE”命令保存数据

库信息。

其次,利用全部已有的信息写出 LS-DYNA 程序的输入文件“.K”。

第三,控制权由 ANSYS 程序转移给 LS-DYNA 程序。LS-DYNA 求解器将运行的结果写入到结果文件中。

当求解结束之后,控制权由 LS-DYNA 转移回 ANSYS,利用其后处理观看结果。

13.3.2 求解过程控制和监测

当求解开始,程序将打开如图 13-27 所示窗口,该窗口将显示相应的求解过程信息,包括错误、警告、失效单元、接触问题等,提供给用户对求解过程进行控制和监测。

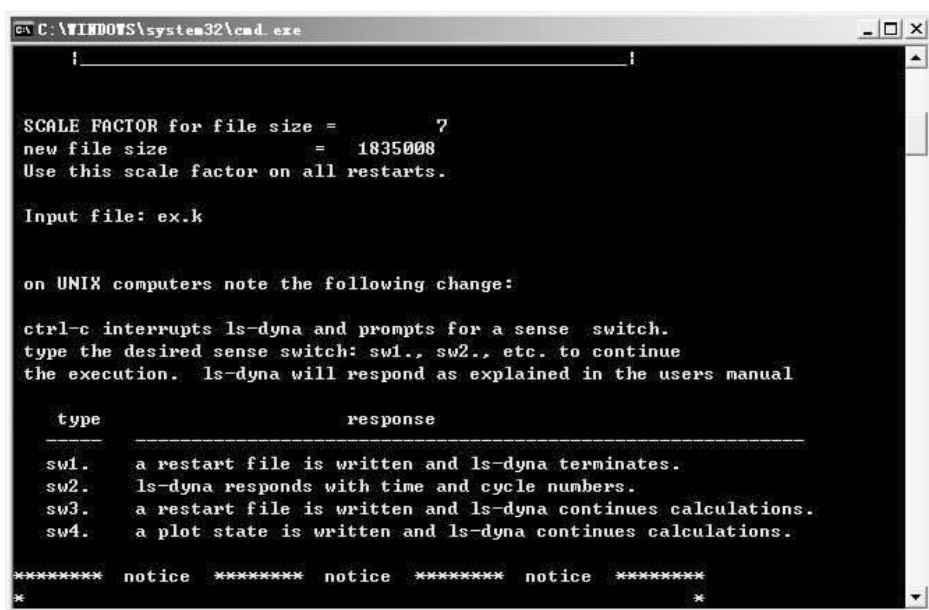


图 13-27 求解过程操作窗口

在如图 13-27 所示窗口下,按住 Ctrl + C 键,可以暂时中断程序的运行,而且不脱离 ANSYS/LS-DYNA 的图形用户界面,通过用户的指令求解器能够继续在此背景下运行。

“Ctrl + C”操作中断以后,用户可以通过 4 个开关来达到不同的目的:输入“SW1”,ANSYS/LS-DYNA 终止,并记录一个重启动文件;输入“SW2”,ANSYS/LS-DYNA 重新显示时间和循环次数,程序继续运行,方便用户了解求解的进度;输入“SW3”,ANSYS/LS-DYNA 记录一个重启动文件,并继续运行;输入“SW4”,ANSYS/LS-DYNA 记录一个结果数据组,程序继续运行。

13.3.3 重启动

当求解过程遇到人为或者意外中断,用户可以选择重启动来接续求解过程,重启动是指要进行分析的一个分析是前一个分析的继续。不仅如此,用户可以改变一些参数,通过重启动来实现以下目的:

- ☞ 早先的一个分析被中断,通过重启动完成整个分析;

- ✎ 早先的分析计算的时间不够长 ,重新给定终止时间 ,通过重新启动完成分析 ;
- ✎ 早先的分析出错 ,从发生错误之前的时刻进行重新启动分析 ,找到错误的原因。

命令格式 :

EDSTART ,RESTART ,MEMORY ,FSIZE ,Dumpfile

菜单操作 :

Main Menu>Solution>Analysis Options>Restart Option

打开如图 13-28 所示的 Restart Options for LS-DYNA Explicit 重新启动选项对话框 ,Words of memory requested 文本框用于设置该分析要求的内存大小 ,一般内存大小是由程序自动决定的 ,但对于一些问题可能需要较大的内存 ,程序会提示出错信息 ,即内存不足 ,此时就可以通过这个参数指定所需内存大小 ;Binary file scale factor 文本框用于设置二进制文件的比例因子 ,默认为 7 ,一般不做改变 ;File name for dump files 文本框用于设置重新启动文件名称 ,重新启动文件为“d3dump ** ”,“ ** ”表示文件的编号 ,例如“01”、“04”等 ,即用户通过指定重新启动文件设置程序从什么位置开始接续分析计算。

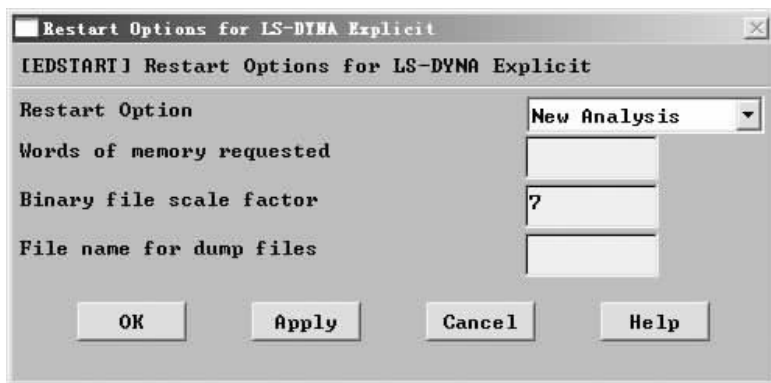


图 13-28 重新启动对话框

“Restart Option”下拉列表中有 3 个选项 ,用于给定显式分析的重启动情况。

New Analysis 选项 :对于新的分析 ,通过图 13-28 所示对话框可以改变内存大小和二进制文件的比例因子。

Simply Restart 选项 :简单重新启动不改变数据库 ,一般是在求解过程遇到意外或者人为中断时 ,为了完成分析过程 ,采用简单重新启动重新进入求解过程继续进行分析 ,这样得到的计算结果将附加到已有结果文件中 ,在重新启动处文件的连接是无缝的。

Small Restart 选项 :当完成了一个分析之后 ,发现计算的时间不够 ,不能充分用于结果的分析 ,此时可以选择小型重新启动 ,重新设定比原来给定时间更长的终止时间 ,接续已经完成的分析继续计算来获得希望的结果。这个过程数据库应该保持不变 ,但允许用户修改分析的终止时间 ,得到的结果也将自动附加到结果文件中。

13.4 后处理

ANSYS/LS-DYNA 分析之后得到的两个结果文件 :“ .rst ”和“ .his ”。前者主要用于

POST1 处理器观察整个模型在特定时间点上的结果,后者主要用于 POST26 以观察时间历程上的结果。ANSYS 程序关于 POST1 的操作同样适用于 ANSYS/LS-DYNA 程序,显示变形形状、等值线、矢量及列表等,这里不再重复讲述。使用 POST26 后处理器查看时间历程结果的步骤如下。

1. 设置结果文件

时间历程的计算结果保存在“.his”文件中,其中节点集和单元集通过“EDHIST”命令给定(具体见本章“输出文件控制”部分)。在使用 POST26 观察结果时,首先要指定结果文件,方法如下。

命令格式:

FILE ,Fname ,Ext ,Dir

菜单操作:

Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>File

打开如图 13-29 所示的 File Settings 对话框,指定“.his”文件。然后可以取得“EDHIST”命令给定的节点和单元所有时间历程后处理数据,这部分定义变量和绘制变量的过程与 ANSYS 相同。

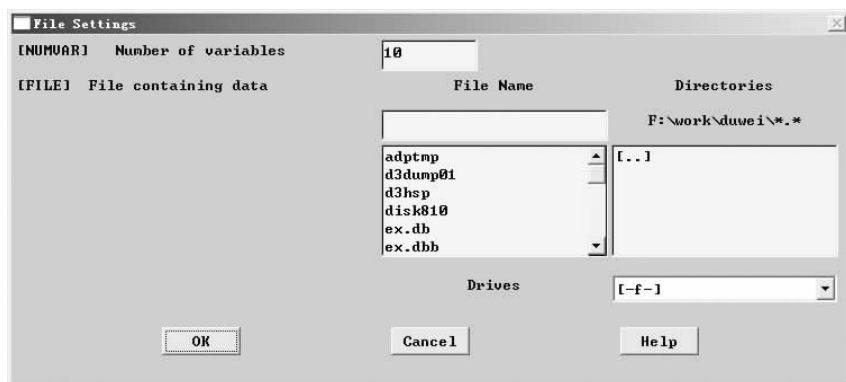


图 13-29 设置结果文件对话框

2. 读入格式化文件数据

除了绘制给定节点和单元的时间历程数据以外,ANSYS/LS-DYNA 还可以获得 ASCII 格式化输出文件的时间历程结果,包括 GLSTAT(总体数据)、MATSUM(材料数据)、SPCFORC(单节点约束力)、RCFORC(界面合力)和 SLEOUT(滑动界面能量)。

命令格式:

EDREAD ,NSTART ,Label ,NUM ,STEP1 ,STEP2

菜单操作:

Main Menu>TimeHist Postpro>Read LSDYNA Data>GLSTAT file/MATSUM file/NODOUT file/RBDOUT file/RCFORC file/SLEOUT file/SPCFORC file

打开如图 13-30 所示的 Read data from GLSTAT file 对话框,Variable reference number 文

本框用于设置变量参考编号 ,默认值为 2 ,最大值为 30 ;From load step 和 To load step 文本框用于设置选择读入哪些载荷步的结果。

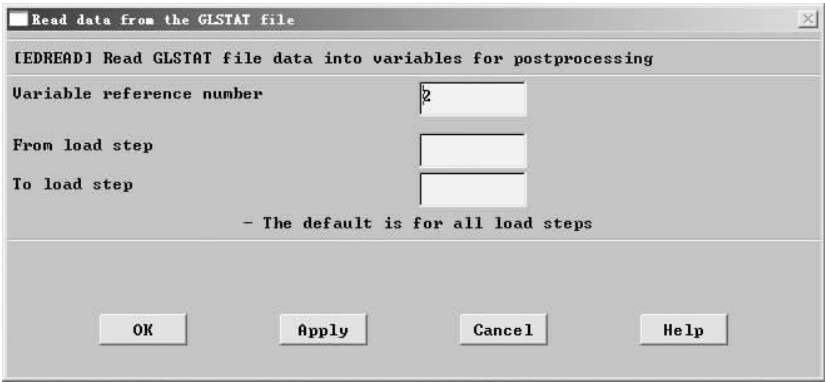


图 13-30 读入格式化文件对话框

对于不同的格式化输出文件 ,相应的变量参考号代表不同的含义 ,具体如表 13-2 所示。

表 13-2 格式化输出文件变量含义

| 变 量 编 号 | GLSTAT | MATSUM | SPCFORC | RCFORC | SLEOUT |
|---------------|-----------|----------|---------|--------|---------|
| NSTART(默认为 2) | 时间步 | 内能 | X 向力 | X 向力 | 接触面能量 |
| NSTART+1 | 动能 | 动能 | Y 向力 | Y 向力 | 目标面能量 |
| NSTART+2 | 内能 | X 向动量 | Z 向力 | Z 向力 | 总的接触面能量 |
| NSTART+3 | 弹簧和阻尼能量 | Y 向动量 | X 向动量 | — | 总的目标面能量 |
| NSTART+4 | 系统阻尼能量 | Z 向动量 | Y 向动量 | — | 总能 |
| NSTART+5 | 滑动界面能量 | 刚体 X 向速度 | Z 向动量 | — | — |
| NSTART+6 | 外力功 | 刚体 Y 向速度 | — | — | — |
| NSTART+7 | 总能量 | 刚体 Z 向速度 | — | — | — |
| NSTART+8 | 总能量 /初始能量 | 沙漏能量 | — | — | — |
| NSTART+9 | 总体 X 向速度 | — | — | — | — |
| NSTART+10 | 总体 Y 向速度 | — | — | — | — |
| NSTART+11 | 总体 Z 向速度 | — | — | — | — |
| NSTART+12 | 沙漏能量 | — | — | — | — |

3. 保存并定义时间历程变量

格式化文件数据读入完成 ,要将其定义为时间历程变量。

命令格式：

```
STORE ,Lab ,NPTS
```

菜单操作：

```
Main Menu>TimeHist Postpro>Store Data
```

打开如图 13-31 所示的 Store Data from the Results File 对话框 ,选择默认值 ,单击 OK 按

钮。将已经读入的格式化文件数据存储到 POST26 变量 ,相应位置的数据数目和类型将列表显示在 ANSYS 输出窗口。

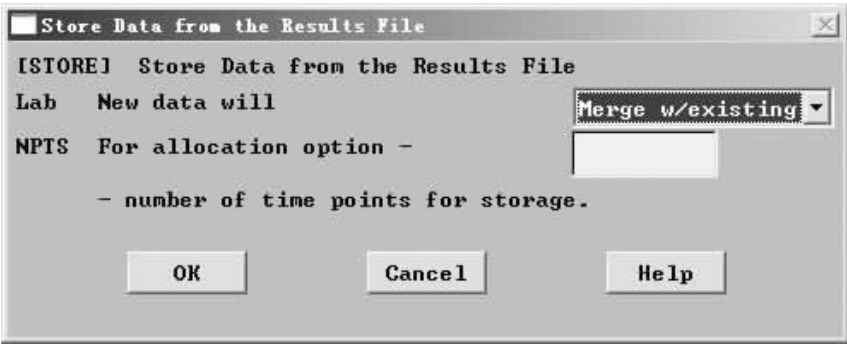


图 13-31 保存时间历程变量对话框

4. 绘制时间历程曲线

命令格式：

```
PLVAR ,NVAR1 ,NVAR2 ,NVAR3 ,NVAR4 ,NVAR5 ,NVAR6 ,NVAR7 ,NVAR8 ,NVAR9 ,NVAR10
```

菜单操作：

```
Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables
```

打开如图 13-32 所示的 Graph Time-History Variables 对话框 ,在相应位置指定要查看的编号 ,编号对应的变量含义如表 13-2 所示。从该对话框可见 ,同时可以绘制多条曲线 ,横坐标默认为时间历程 纵坐标由用户指定。一般地 ,有可比性的变量绘制在一起 ,例如 3 向速度的比较、能量转化的对比等。

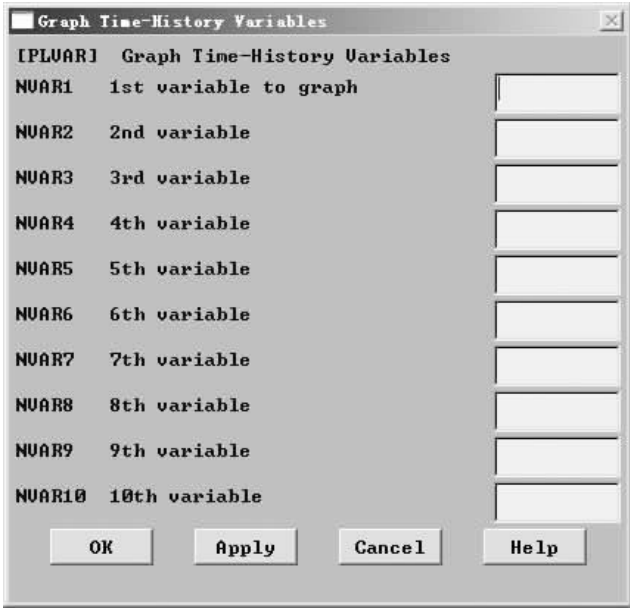


图 13-32 绘制时间历程变量对话框

练习题

1. ANSYS/LS-DYNA 加载定义和 ANSYS 其他模块有什么不同？
2. 如何实现数组参数的定义？如何实现载荷曲线的定义和绘制？
3. 初始条件和点焊是如何实现的？
4. 求解控制包括几个方面？相关参数含义是什么？控制和解决什么问题？
5. 如何对求解过程进行控制和监控？
6. 如何实现格式化文件数据结果的分析？

第 14 章 DYNA 模块综合练习

14.1 模拟点焊

- 练习目的
- 加深对 ANSYS/LS-DYNA 的总体认识。
- 了解应用 ANSYS/LS-DYNA 分析问题的过程。
- 了解模拟点焊的过程

问题描述

两平板各长 80 mm、宽 40 mm、厚 2 mm ,互相搭接 4 组点焊固连 ,如图 14-1(a)所示。左端固定 ,右端给定速度拉开。时间－速度关系见表 14-1。

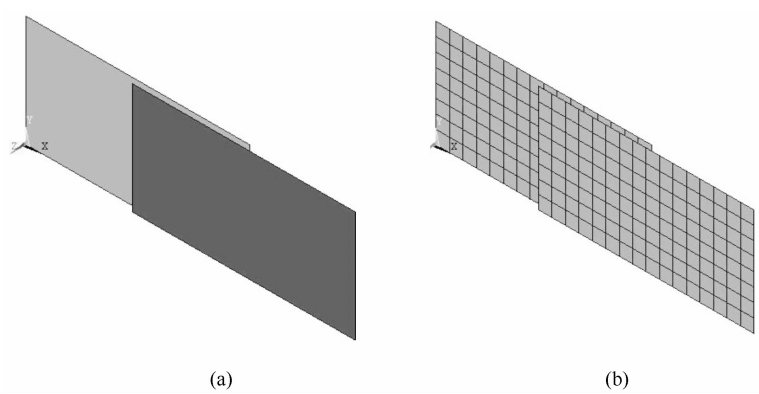


图 14-1 模型建立

表 14-1 速度－时间关系

| 时间 /ms | 沿 X 向速度 / (mm/ms) |
|--------|-------------------|
| 0.0 | 0.0 |
| 10.0 | 0.304 8 |
| 20.0 | 0.304 8 |

材料特性 :扬氏模量 =68.9 GPa ,密度 =2.7e-6 kg /mm³ ,泊松比 =0.33 ,初始屈服极限 =0.286 GPa ,塑性切向模量 =0.006 89 GPa ,β =1.0 ,随动硬化 ,单面接触。

失效条件 : $\left(\frac{|f_n|}{S_n}\right)^n + \left(\frac{|f_s|}{S_s}\right)^m \geq 1$, $S_n = 7.854 \text{ kN}$, $S_s = 4.534 \text{ kN}$, $n = m = 2.0$ 。

分析过程

1. 建立有限元模型

(1) 建立两个搭接的平面

两平面在 Z 向相距 2 mm ,即板的厚度 ,如图 14-1(a)所示。

(2) 选择单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete ,在弹出的对话框中选择 Add 按钮 ,在左侧 LS-DYNA Explicit 中选择 Shell163 ,单击 OK 按钮 ,通过单击 Options 按钮在打开对话框 ,选择算法 ,此处选择“S/R Hughes”。

(3) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model ,在打开的对话框中单击 Add 按钮 ,在 Define Model for Material Number 文本框中选择默认材料号 1 ,在 Available Material Models 左侧选择 Plasticity ,右侧选择 Plastic Kinematic ,单击 OK 按钮 ,在打开的对话框中输入 DENS = 2.7e-6 ,EX = 68.9 ,NUXY = 0.33 ,Yield stress = 0.286 ,Tangent Modulus=0.00689 ,beta=1.0 ,单击 OK 按钮 ,单击 CLOSE 按钮。

(4) 网格划分

依次选择 Main Menu>Preprocessor>MeshTool ,在打开的网格划分工具上 ,首先分配单元属性和指定单元尺寸 ,然后指定 Mesh 为 Areas ,在 Shape 中选择 Quad 和 Mapped ,单击 Mesh 按钮 ,拾取要划分网格的面 ,单击 OK 按钮。效果如图 14-1(b)所示。

2. 定义点焊和接触

(1) 定义点焊

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Spotweld>Create Spotweld ,在网络上拾取要定义点焊的节点(注意连续选择两个节点 ,且存在点焊关系的这两个节点不重合 ,即必须是两个独立的节点) ,单击 OK 按钮 ,在弹出的 Create Spotweld between nodes 对话框中输入点焊失效条件 ,如图 14-2 所示。连续定义 4 组点焊。

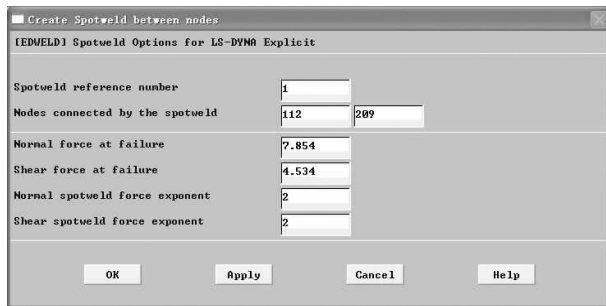


图 14-2 点焊的定义

(2) 定义接触

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Contact>Define Contact ,在弹出的 Contact Parameter Definitions 对话框上选择单面接触的自动接触模式 ,如图 14-3 所示。

3. 加载与求解

(1) 约束固定端

依次选择 Main Menu>Solution>Constraints>On Lines ,拾取左侧边(即 $x=0$ 的线) ,单击

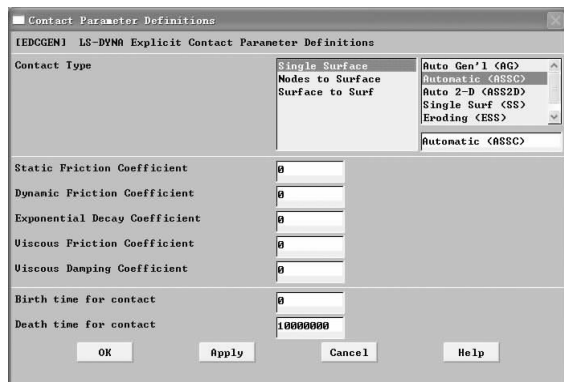


图 14-3 接触的定义

OK 按钮,在打开的对话框上选择 UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ 作为约束自由度,值为 0,单击 OK 按钮。

(2) 定义时间和速度数组

依次选择 Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit,在打开的对话框上单击 Add 按钮,定义两个一维数组,名为“time”和“V”,然后单击 Edit 按钮编辑数组中的数值,即将时间和速度的值输入,保存并关闭。

(3) 定义组件

依次选择 Utility Menu>Select>Entities,在打开的对话框上选择右侧边,然后选择该边上的节点。

依次选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component,在打开的对话框上给定新建组件名称“new”,组件内容为节点(即刚才选择的节点),单击 OK 按钮。

(4) 施加速度

依次选择 Main Menu>Solution>Loading Option>Specify Loads,在打开的对话框上设定“UX”,施加给“new”数值分别选择“time”和“V”效果如图 14-4 所示。

依次选择 Utility Menu>Select>Everything。

(5) 设定求解时间

依次选择 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time,在打开对话框上输入求解终止时间为 8。

(6) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps,在打开的对话框上设置 rst 文件输出步数为 40, his 文件输出步数为 40。

(7) 求解

依次选择 Main Menu>Solution>Solve

4. 观看结果

(1) 读入计算结果

依次选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>,选择要查看的某计算步的结

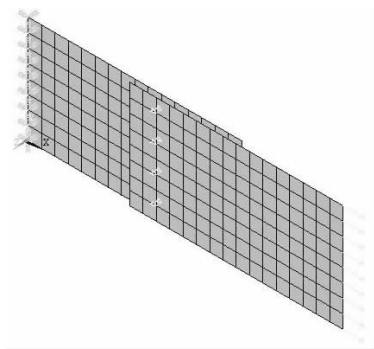


图 14-4 载荷的定义

果,即读入。

(2) 打开单元形状

如图 14-5(a)所示为总体位移与变形前的对比,图 14-5(b)所示为等效应力变化云图。

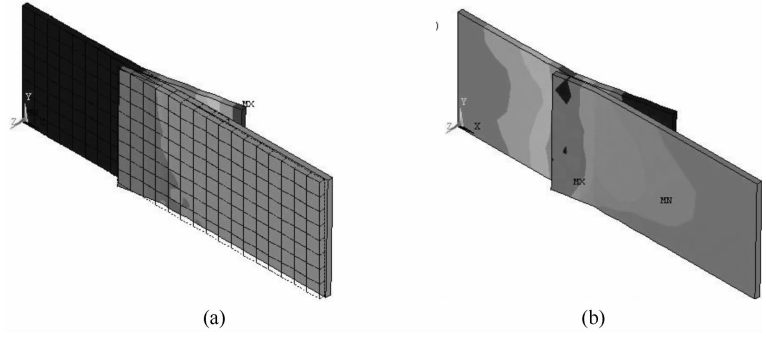


图 14-5 查看结果

(3) 动画显示

14.2 跌落仿真

练习目的

了解 DYNA 模块用于跌落仿真的过程。

了解应用 ANSYS/LS-DYNA 分析大变形和复杂接触的过程。

问题描述

铝合金方盒:弹性模量 = 10.3×10^6 psi,密度 = 2.5×10^{-4} (lb f·s²/in⁴),泊松比 = 0.334,屈服应力 = 5 000 psi,切线硬化模量 = 20 000 psi。各边长 = 20 in,厚度 = 0.1 in,5 个面与 x、y、z 轴各成 45 度角下落(即接触面不是平面)。

碳钢桌面:弹性模量 = 30.0×10^6 psi,密度 = 7.3×10^{-4} (lb f·s²/in⁴),泊松比 = 0.292。正方形边长 = 100 in,厚度 = 0.1 in。假设桌面变形极小,采用刚性材料定义。

设方盒仅由于重力作用作简单加速度运动,忽略空气阻力,重力加速度 = 386.4 in/sec²。方盒从距桌面 72 in 处开始下落,计算从距桌面 20 in 开始,此时初速度 = 200 in/sec。

分析过程

1. 建立有限元模型

(1) 旋转工作平面

先后绕 x、y、z 轴正向旋转工作平面一次,角度为 45°。

(2) 创建方盒

先直接创建方体,然后删掉不需要的体和面。

(3) 选择单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete,在弹出的对话框中选择 Add 按钮,在左侧 LS-DYNA Explicit 中选择 SHELL163,单击 OK 按钮,通过单击 Options 按钮在打开的对话框上选择算法,此处选择“S/R CO-rotation”。

(4) 定义实常数

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Real Constants,在弹出的对话框中选择 Add 按钮,

针对已定义的单元类型定义实常数,对于这里的“SHELL163”单元就是定义厚度。

(5) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model,在打开的对话框上单击 Add 按钮,在 Define Model for Material Number 文本框中选择默认材料号 1,在 Available Material Models 左侧选择 Plasticity,右侧选择 Bilinear Kinematic,单击 OK 按钮,在打开的对话框上输入相应值。

同样,定义刚体材料,但需要指定刚体的约束情况。

首先指定单元属性和设定单元尺寸,划分方盒,然后用直接定义单元和节点的方法定义桌面,如图 14-6 所示为有限元模型。

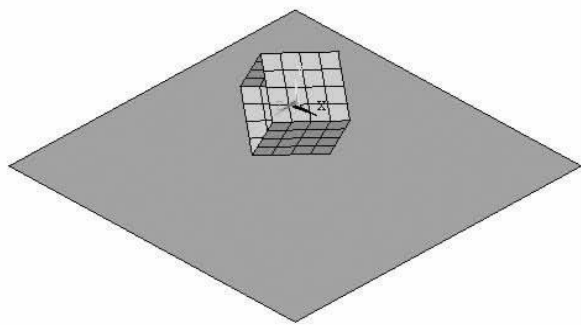


图 14-6 模型建立

2. 定义接触

(1) 定义方盒和桌面的节点组件

依次选择 Utility Menu>Select Entities,在对话框上分别选择“Elements”、“By Attributes”、“Material Num”,然后指定材料编号为“1”,选择材料 1 的所有单元,改变选择内容,指定为“Nodes”、“Attached to”、“Elements”,单击 OK 按钮,即选择了所有材料为 1 的节点,就是方盒的所有节点。

依次选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Creat Component,在打开的对话框中指定组件名称为“box”。

用同样的方法定义桌面节点组件为“table”。

(2) 定义接触

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Contact>Define Contact,在弹出的对话框上选择节点-面接触的自动接触模式,单击 OK 按钮,指定接触面为“box”,目标面为“table”。

依次选择 Utility Menu>Select Everything。

3. 加载与求解

(1) 施加方盒的初速度

依次选择 Main Menu>Solution>initial,在打开的对话框中设置 y 向速度为“-200”,单击 OK 按钮。

(2) 定义时间和加速度数组

依次选择 Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit ,在打开的对话框上单击 Add 按钮 ,定义两个一维数组 ,名为“time”和“accg” ,然后单击 Edit 按钮编辑数组中的数值 ,时间为 0~10 ,加速度值为 386.4 ,保存并关闭。

(3) 施加重力加速度

依次选择 Main Menu>Solution>Loading Option>Specify Loads ,在打开的对话框上设定“ACLY” ,施加给“box” ,数值分别选择“time”和“accg” 。效果如图 14-7 所示。

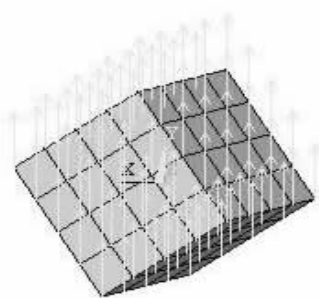


图 14-7 载荷的定义

依次选择 Utility Menu> Select > Everything。

(4) 设定求解时间

依次选择 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time ,在打开的对话框中输入求解终止时间为 1。

(5) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps ,在打开的对话框上设置 rst 文件输出步数为 20 ,his 文件输出步数为 50。

(6) 求解

依次选择 Main Menu>Solution>Solve。

4. 观看结果

图 14-8(a)所示为方盒和桌面相碰时等效应力的状态 ,图 14-8(b)所示为碰撞结束时等效应力的状态。

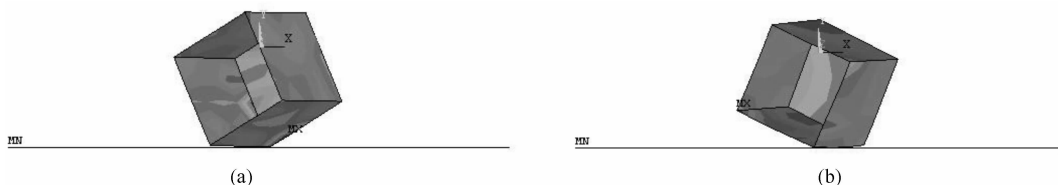


图 14-8 计算结果的显示和查看

14.3 显式—隐式连续求解

练习目的

了解 ANSYS/LS-DYNA 在模拟塑性成形方面的应用。

了解显式-隐式(塑性成形及弹复)连续求解的过程。

问题描述

(1) 塑性成形-半球形冲压(显式求解)

薄板冲压成形,由冲头、底模、压板和板料 4 部分组成。

板料是圆形薄板,半径 80 mm,厚度 1 mm;冲头是半球形,半径 50 mm。压板为圆环形板;底模为开口圆环,倒角半径 6.35 mm。考虑对称性,取 1/4 为研究对象。

由于冲头、底模和压板底刚度较大,使用刚性体定义材料,杨氏模量 = 69 GPa,密度 = $7.83 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,泊松比 = 0.3。采用 4 节点壳单元划分网格。

板料采用幂指数塑性材料,杨氏模量 = 69 GPa,密度 = $7.83 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,泊松比 = 0.3, $K = 0.598$, $n = 0.216$, $S_{rc} = S_{rp} = 0.0$ 。采用 4 节点壳单元,算法为 10,即 Belytschko-Wong-Chiang 算法,厚度方向积分点定义为 5 个。

板料与冲头、压板和底模之间底接触均采用面-面接触,动、静摩擦系数均为 0.15,考虑板料厚度和膜应变引起的厚度变化。

底模和压板固定不动,冲头沿 Z 向作匀速运动,速度为 5 mm/ms。

计算时间为 6 ms。

(2) 成形后板料的弹复(隐式求解)

分析过程(1)——显式部分

1. 选择正确的模块

由于分析过程要显式-隐式连续完成,所定义的单元等信息要互相联通,所以在启动程序选择模块时要选择 Multiphysics/LS-dyna。指定作业文件名称“punch”。

2. 建立有限元模型

(1) 建立实体模型

依次建立 1/4 的球面、圆环面、圆面和开口圆环面,如图 14-9(a)所示。

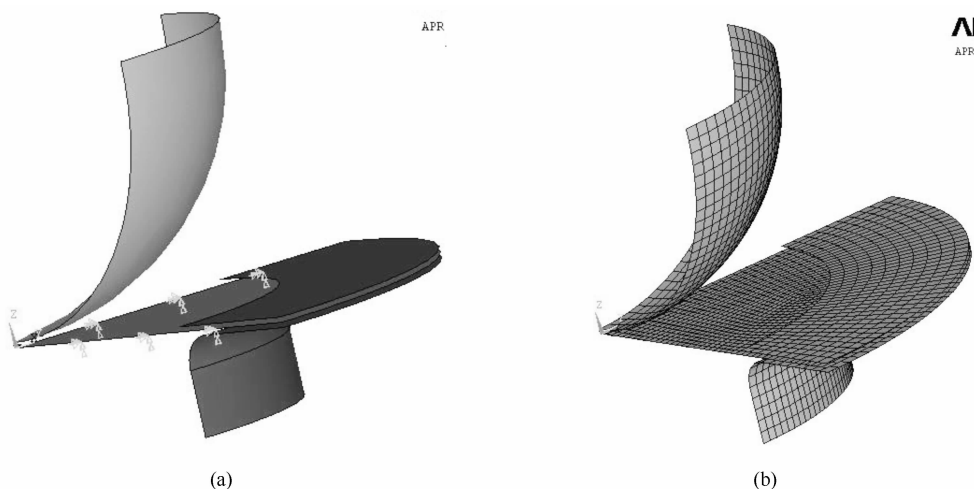


图 14-9 实体模型与有限元模型的建立

(2) 选择单元

分别定义冲头、压板和底模使用 SHELL163 单元,其余选项选择默认,编号分别为 1、2、3。依次选择 Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete,在弹出的对话框

中选择 Add 按钮,在左侧 LS-DYNA Explicit 中选择 SHELL163,单击 OK 按钮,通过单击 Options 按钮在打开的对话框上选择算法 10,其余选项默认,此为板料所用单元,编号为 4。

(3) 定义实常数

分别针对冲头、压板和底模使用的 SHELL163 单元定义实常数,主要定义厚度,其余选项默认,编号分别为 1、2、3。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Real Constants,在弹出的对话框中选择 Add 按钮,在打开的对话框中定义 NIP 为 5,板料厚度为 1。

(4) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model,在打开的对话框上单击 Add 按钮,在 Define Model for Material Number 中选择默认材料号 1,定义冲头的材料。在 Available Material Models 左侧选择 Other,右侧选择 Rigid,单击 OK 按钮,在打开的对话框中输入相应数值,在下侧的约束 Translat'l constrnt parm 中选择“x and y disps”,Rotation-a'l constrnt parm 中选择“All rotations”。

类似的方法定义压板和底模,材料编号分别为 2、3,但二者是固定的,所以平动也选择为“All disps”。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model,在打开的对话框上单击 Add 按钮,在 Define Model for Material Number 中选择默认材料号 4,在 Available Material Models 左侧选择 Plasticity,右侧选择 Power Law,单击 OK 按钮,在打开的对话框中输入相应数值。

(5) 网格划分

指定相应面的属性,进行网格划分,如图 14-9(b)所示。

(6) 创建 part 列表

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options,打开对话框上选择创建 PART。

3. 加载与求解

(1) 约束对称面

由于分析是取 1/4 为研究对象的,因此要对板料进行对称边约束。例如,关于 X 轴对称,约束 X 向平动,Y、Z 向转动。

依次选择 Main Menu>Solution>Constraints>On Lines,拾取相应线段约束板料两个对称边。

(2) 定义组件

依次选择 Utility Menu>Select>Entities,在打开的对话框上选择板料上的节点。

依次选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component,在打开的对话框上给定新建组件名称“new”,组件内容为节点(即刚才选择的节点),单击 OK 按钮。

(3) 定义接触

分别定义板料和冲头、压板、底模的接触,其中板料使用组件,其他使用 part 编号。这里定义板料总为接触面,刚性体为目标面。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Option>Contact>Define Contact,在弹出的对话框上选择面-面接触的普通模式(STS),输入相应的静、动摩擦系数,单击 OK 按钮,

在后续的对话框上选择接触面和目标面。

(4) 定义接触控制选项

依次选择 Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Contact > Advanced Controls , 在打开对话框上 将“STS/NTS Shell Thickness Option”选为“No Rigid Body Thk” ,即在面 – 面或者点 – 面接触时考虑弹性体的厚度 ;将“SS Shell Thickness Change Opt”选为“Include Thick” ,即考虑壳单元厚度变化。

(5) 定义速度曲线

依次选择 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define /Edit ,在打开的对话框上单击 Add 按钮 ,定义两个一维数组 ,名为“time”和“V” ,然后单击 Edit 按钮编辑数组中的数值 ,即将时间和速度的值输入 ,保存并关闭。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Curve Options ,在打开的对话框上选择“Add Curves” ,然后指定曲线编号、横向坐标(时间数组)、纵向坐标(速度数组)。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Plot Load Curve ,在打开对话框上指定要显示的曲线编号 ,观察所定义的速度曲线是否正确。

(6) 施加速度

依次选择 Main Menu > Solution > Loading Option > Specify Loads ,在打开的对话框上设定“RBVZ” ,施加给 part1 ,即冲头 ,数值分别选择“time”和“V”。

依次选择 Utility Menu > Select > Everything。

(7) 设定求解时间

依次选择 Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time ,在打开对话框中输入求解终止时间为 6。

(8) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu > Solution > Output Controls > File Output Freq > Number of Steps ,在打开的对话框上设置 rst 文件输出步数为 30 ,his 文件输出步数为 30。

(9) 求解

依次选择 Main Menu > Solution > Solve。

4. 观看结果

(1) 查看结果

图 14-10(a)所示为显式分析结果 ,模具为刚体 ,没有变形 ,板材变形前后的对比如图 14-10(b)所示。

(2) 将分析数据保存到“punch.db”

分析过程(2)——隐式部分

1. 更改作业名称

将作业名称改为“springback” ,防止覆盖显式分析结果。

2. 建立隐式分析的模型

(1) 单元类型的转换

将显式分析中使用的单元类型转换成对应的隐式分析的单元类型 ,这里将 SHELL163 单元转换为 SHELL181 单元。

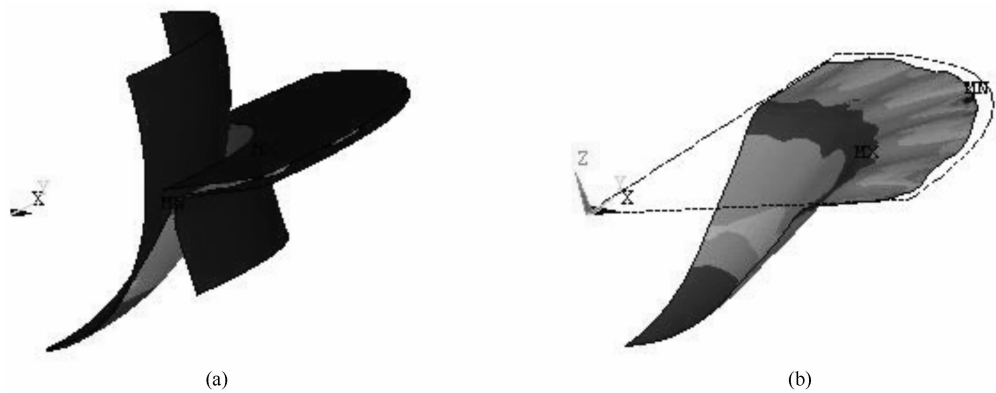


图 14-10 查看显式计算结果

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Switch Elem Type ,打开如图 14-11 所示的 Switch Elem Type 单元转换对话框 ,在其上选择 Explic to Implic ,程序将自动进行单元

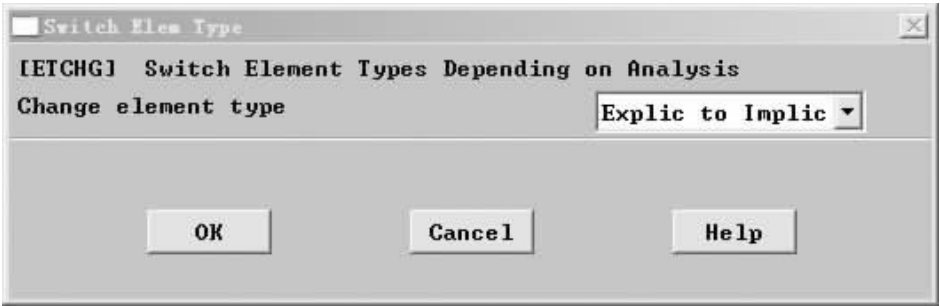


图 14-11 单元类型转换对话框

(2) 重新定义实常数

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Real constants 重新定义编号为 4 的 SHELL181 单元的实常数 ,给定厚度为 1。

(3) 重新定义材料模型

隐式分析板料的弹复只有线性弹性材料性质保持有效 ,显式分析当中定义的非线性材料性质都要删除掉。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Other>Change Mat Props>Data Tables>Delete ,打开如图 14-12 所示的 Delete Data Table 对话框 ,删除在显式分析中 TB 命令定义的材料性质。

(4) 删除所有约束

依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Delete>On Nodes ,删除所有显式分析中定义的约束。

(5) 关闭形状检查

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Checking Ctrl>Shape Checking ,打开如图 14-13 所示的 Shape Checking Controls 对话框 ,选择 Off 选项关闭单元形状检查。因为在显式分析中单

元已经发生了相当大的变形,关闭形状检查避免出错。



图 14-12 删除显式分析中材料的非线性特性

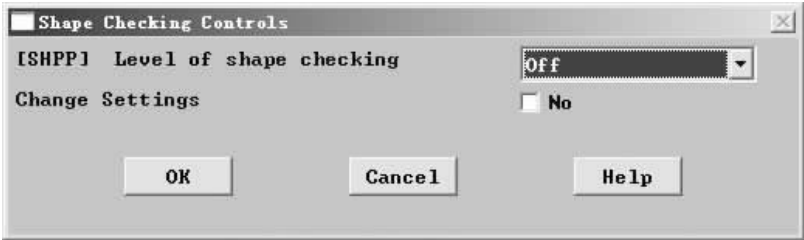


图 14-13 形状检查控制对话框

3. 隐式加载和求解

(1) 定义隐式单元的初始构形

显式分析的位移结果作为隐式单元的初始几何构形,是考虑和模拟弹复问题不可忽略的部分。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > modeling-Update Geom,打开如图 14-14 所示的 Update nodes using results file displacements 对话框,在相应位置给定显式计算的结果文件“punch.rst”、“Load step”和“Substep”都为“LAST”。

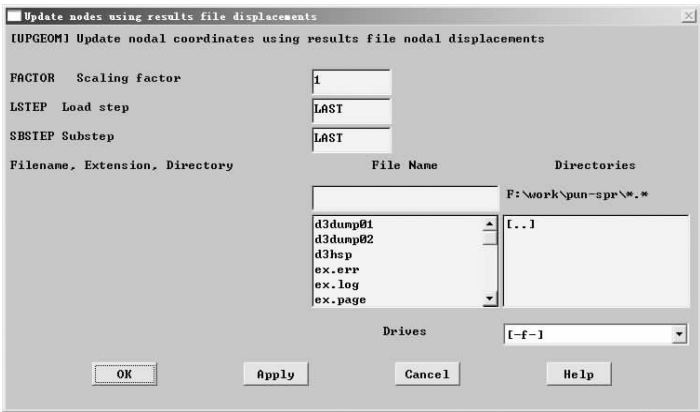


图 14-14 更新几何构形对话框

(2) 删除不需要的单元

主要考虑板料的变形和弹复 ,其他刚性体单元没有变形也就不存在弹复问题 ,因此将所有刚性体单元删除。

(3) 重新约束板料边界

板料只选择了四分之一 ,因此分别约束两条边界的 X 向和 Y 向位移 ;与底模和压板接触部分的底部约束 Z 向位移 ,限制板料的移动。

(4) 导入板料的初始应力

弹复的原因在于板料失去模具等的约束之后 ,塑性变形的应力使其变形略有回复。因此需要将显式分析的应力导入 ,作为隐式分析的初始状态。

依次选择 Main Menu>Solution>Apply>Other>Import Stress ,打开如图 14-15 所示的 Import initial stresses from a result file 导入初始应力对话框 ,在相应位置给定显式计算的结果文件“punch.rst”、“Load step”和“Substep”都为“LAST”。

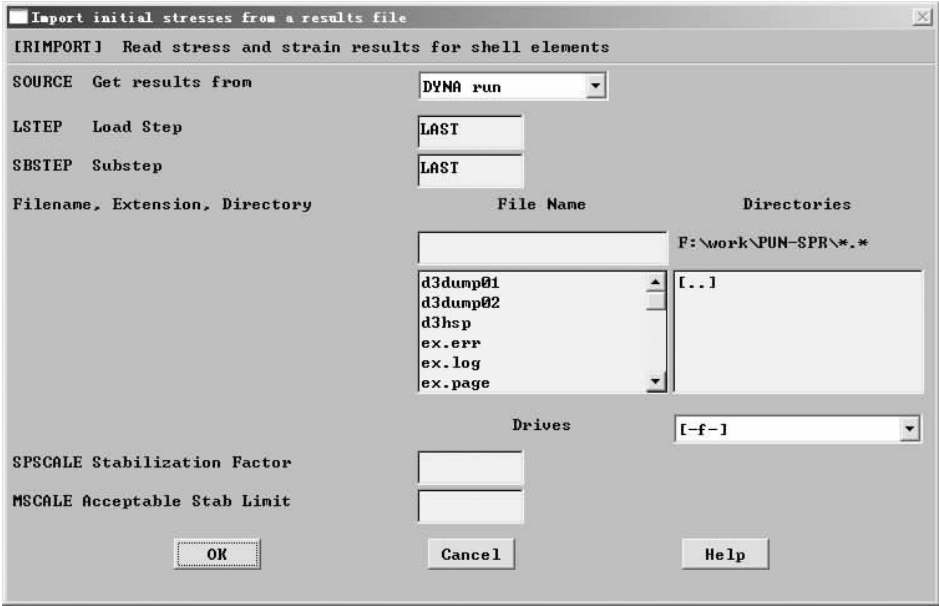


图 14-15 导入初始应力对话框

(5) 接通大变形效应

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Options ,打开如图 14-16 所示的 Static or Steady-State Analysis 对话框 ,在非线性选项部分将大变形效应选项打开。

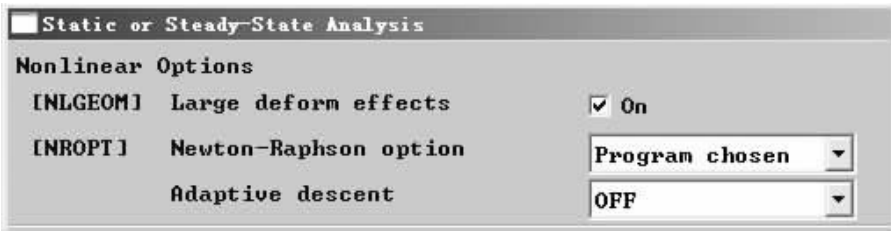


图 14-16 非线性选项对话框(部分)

(6) 求解

4. 查看结果

如图 14-17 所示,查看弹复前后板料的变形情况。



图 14-17 弹复前后板料变形对比

14.4 隐式—显式连续求解

练习目的

了解动力分析之前施加载荷,即初应力状态的影响。

了解隐式—显式连续求解的过程。

问题描述

发动机内外圈及叶片材料均为钢,选择线性弹性材料模型,杨氏模量 = 30×10^6 psi,密度 = 7.33×10^{-4} lb fsec²/in⁴,泊松比 = 0.33,转动速度 = 420 rad/sec。

用户可以在这个例子基础上,尝试建立飞鸟的实体模型和材料模型,在某一位置与叶片相撞,模拟飞鸟与叶片的撞击和造成的损坏,还可以进一步考虑飞鸟的大小、撞击速度等参数的影响。

分析过程(1)——隐式部分

1. 选择正确的模块

由于分析过程要隐式—显式连续完成,所定义的单元等信息要互相联通,所以在启动程序选择模块时要选择 Multiphysics/LS-dyna。指定作业文件名称为“blade”。

2. 建立实体模型

(1) 定义两点及两点间直线

定义关键点 1(0 0 0)和关键点 2(0 0 1),两点连成线 1。

(2) 创建叶片的连接部分

对线 1 进行复制,3 向坐标增量为(5 0 0),得到线 2。

依次选择 Main Menu > Preprocessor > Operate > Divide > Line into N Line's,将线 2 等分为二,变为线 2 和 3。

再对线 2、3 进行复制,三向坐标增量为(5 0 0),连接原线与复制线之间的中点(即关键点 5 和 7)。

(3) 创建叶片

在指定点(0 0 0.5)创建局部柱坐标系(THZX=90)。

复制线 4 和 5(0,-5,1),得到线 6 和 7;复制线 6 和 7(0,-12.5,1.5);重复复制,直到得到线 19 和 20(每步增量为(0,-12.5,1.5))。

指定线 7~20 的分割尺寸为两份(或者 0.25)。

恢复到整体坐标系下,利用创建“蒙皮面”的方法创建两个面 1 和 2(一个由线 7、9、11、13、15、17、19 组成;另一个由 8、10、12、14、16、18、20 组成)。

(4) 创建内外圈

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>Keypoints>Set of KPs,将点 1 移动到(0 0,-2),点 2 移动到(0 0 3),对改变长度后的线 1 进行复制,增量为(21 0 0)。

由关键点 6、7、10、9 创建面 3;关键点 7、8、11、10 创建面 4。

指定线 2、3 分割尺寸为 1 份(或者 0.5),绕点 1、2 形成的轴旋转线 2、3 得到面 5~12(即内圈空心圆部分)。

指定线 6 分割尺寸为 5 份(或者 1),绕点 1、2 形成的轴旋转线 6 得到面 13~16(连接内圈的面)。

指定线 4、5 分割尺寸为 2 份(或者 0.25),绕点 1、2 形成的轴旋转线 4、5 得到面 17~24(内圈大圆部分)。

指定线 21 分割尺寸为 5 份(或者 1),绕点 1、2 形成的轴旋转线 21 得到面 25~28(即外圈)。实体模型如图 14-18(a)所示。

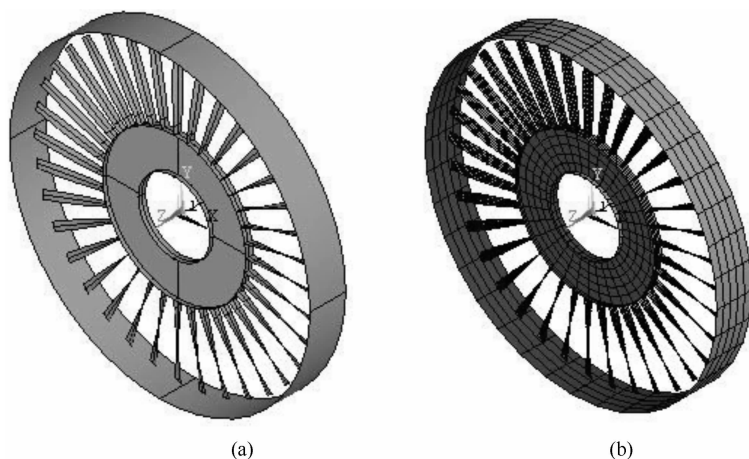


图 14-18 模型建立

3. 建立有限元模型

(1) 定义单元

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete,在弹出的对话框中连续选择 4 个“SHELL181”单元。

(2) 定义实常数

单元 1、2 实常数为 0.5 ,单元 3 实常数为 0.25 ,单元 4 实常数为 0.75。

(3) 定义材料

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model ,在打开的对话框上连续定义线性弹性材料 4 组 ,指定相应弹性模量、密度和泊松比。

(4) 指定单元属性

发动机内圈为 1(单元尺寸指定为 9) ,叶片连接部分为 2(单元尺寸为 4) ,叶片部分为 3(单元尺寸为 36) ,外圈为 4(单元尺寸为 9)。

(5) 网格划分

对上述各部分进行网格划分。

激活整体柱坐标系。

复制叶片连接部分及叶片(面 1~4 及网格)36 份 ,增量为(0 ,10 ,0)。

恢复整体卡氏坐标 ,依次选择 Main Menu>Preprocessor> Numbering Ctrl>Merge Items 合并重复的关键点和节点。如图 14-18(b)。

4. 加载和求解

(1) 约束发动机内外圈

分别选择发动机内、外圈上的所有节点 ,约束其为固定不动。

(2) 施加角速度

对所有叶片施加绕 Z 轴旋转的角速度 420rad /sec。

(3) 指定分析类型

依次选择 Main Menu>Solution>Analysis Type-New Analysis ,弹出 New Analysis 对话框 ,选择 static ,然后单击 OK 按钮 ,在接下来的界面仍然单击 OK 按钮。

(4) 指定输出控制

依次选择 Main Menu> Preprocessor>Loads>Load Step Opts-Output Ctrl>DB /Results File ,在弹出窗口的 Item to be controlled 列表框中选择 All items ,在 File write frequency 中选择 Every substep。单击 OK 按钮。

(5) 求解

5. 观看结果

如图 14-19 所示隐式求解结果。

(1) 通过输出控制指定观察壳单元的层上的结果

依次选择 Main Menu>General Postproc>Option for Output ,在打开的对话框上指定“shell”选项为“top”、“bottom”、“middle” ,即指定结果来源于单元的哪个层面。

(2) 文件保存

将上述分析结果另存为“blade.db”文件 ,如果此处不保存 ,后面将不能再保存。

分析过程(2)——显式部分

1. 更改作业名称

更改工作名称为“bird” ,准备开始显示分析部分。

2. 建立显式分析的模型

(1) 单元类型的转换

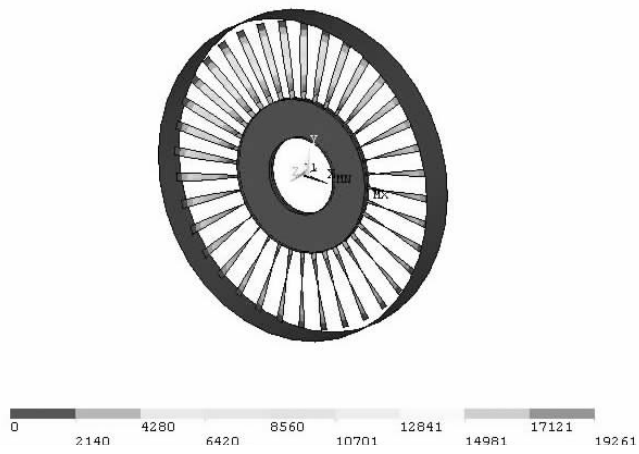


图 14-19 查看结果

将隐式分析中使用的单元类型转换成对应的显式分析的单元类型 ,这里将 SHELL181 单元转换为 SHELL163 单元。

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Switch Elem Type ,打开如图 14-11 所示的单元转换对话框 ,选择 Implic to Explic ,程序将自动进行单元的转换。

(2) 重新定义实常数

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Real constants 重新定义单元的实常数 ,编号为 1、2 的单元厚度为 0.5 ,积分点数为 3 ,编号为 3 的单元厚度为 0.25 ,编号为 4 的单元厚度为 0.75 ,积分点数均为 5。

依次选择 Main Menu>Solution>Output Controls>Integ Pt Storage ,打开如图 14-20 所示的 Specify Integration Point Storage 对话框 ,指定壳单元输出积分点数。

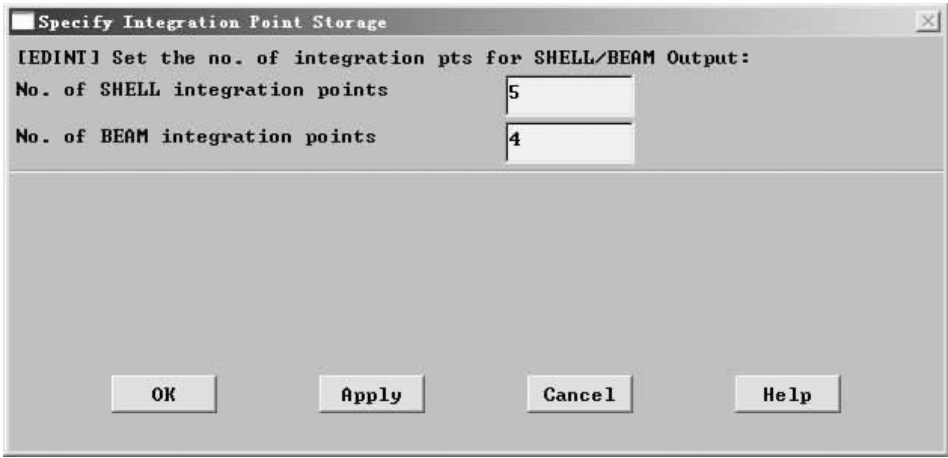


图 14-20 指定壳单元输出积分点数

(3) 删除内外圈的约束

分别选择内外圈上的所有节点 ,依次选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Delete>On Nodes ,删除隐式分析中定义的约束。

(4) 重新定义材料模型

依次选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Define MAT Model ,定义内圈为刚性体材料 ,编号为 1 ,质量密度、弹性模量和泊松比数值不变 ,约束 3 向位移、X 向和 Y 向旋转。

定义叶片连接部分为各向同性线性弹性材料 ,编号为 2 ,相应数值不变。

定义叶片和外圈为分段线性弹塑性材料 ,编号分别为 3、4 ,线性部分材料参数保持不变 ,应力 - 应变关系通过定义曲线来表达 ,如表 14-2 所示。

表 14-2 应力 - 应变关系

| | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 应 变 | 0.0 | 0.029 3 | 0.077 2 | 0.156 2 | 0.235 6 | 0.794 3 |
| 应力(psi) | 60 120 | 80 020 | 90 260 | 115 000 | 124 940 | 170 030 |

(5) 定义接触

定义自动单面接触(assc)模式。

3. 约束、初速度和载荷

(1) 读入隐式分析结果

依次选择 Main Menu>Solution>Constraints>Read Disp ,打开如图 14-21 所示的 Send displacements to a file 对话框 ,读入隐式分析结果。读入的数据将以 ASCII 形式存入到文件 “drelax”中 ,如果查看工作目录下可以找到这个文件。

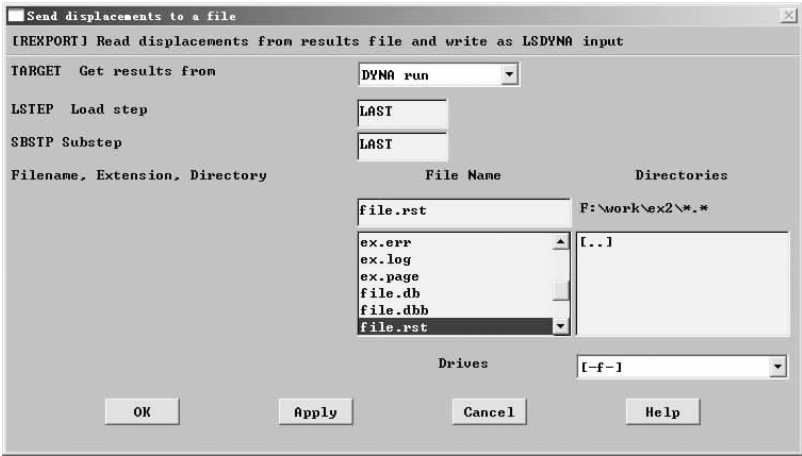


图 14-21 读入隐式分析结果

(2) 初始化结构

将文件“drelax”中数据(包括位移、转角或者温度等)对现有结构进行初始化 ,作为显式分析的起点。

依次选择 Main Menu>Solution>Analysis Options>Dynamic Relax ,打开如图 14-22 所示的 Specify Dynamic Relaxation for LS-DYMA Explicit 对话框 ,不必更改相应参数 ,单击 OK 按钮。

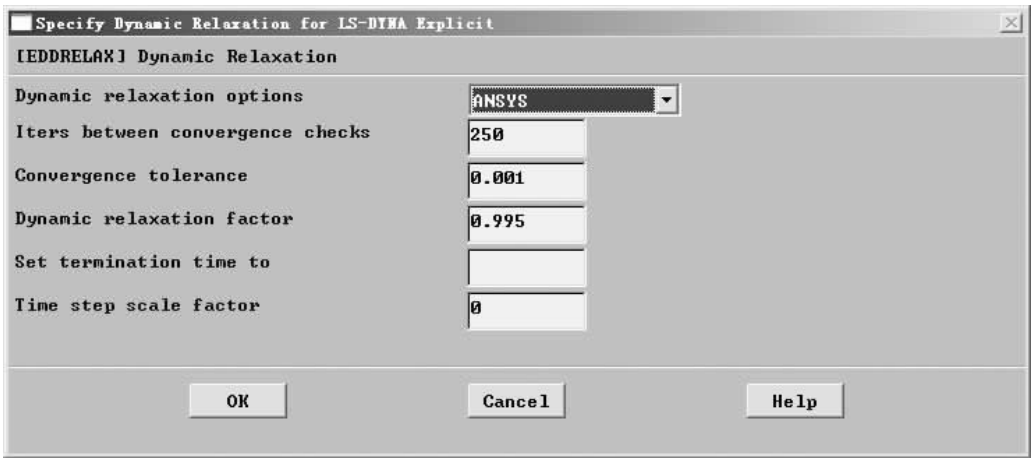


图 14-22 指定结构的初始化构形

(3) 定义初速度

定义内圈、叶片连接部分和叶片的节点组件 给定初始转动角速度。

(4) 定义内圈刚性体旋转

生成 PART 列表。

定义时间数组和转速数组 ,施加给内圈刚性体 ,速度曲线如图 14-23 所示。

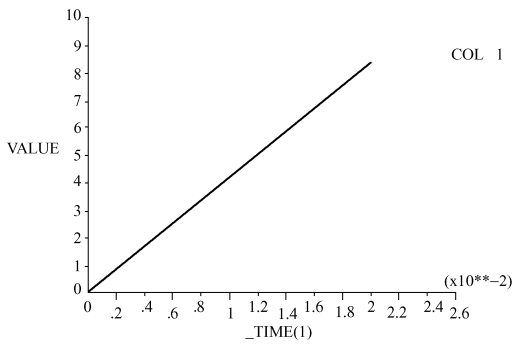


图 14-23 施加给刚性体的载荷曲线

(5) 约束外圈部分节点

选择 Y 向坐标在 20.1~21.1 之间的节点 ,对其进行全约束以固定外圈。

4. 求解

(1) 设定求解时间

依次选择 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time ,在打开的对话框中输入求解终止时间为 0.01。

(2) 设定输出文件控制

依次选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps ,在

打开的对话框中设置 rst 文件输出步数为 20 ,his 文件输出步数为 50。

(3) 求解

依次选择 Main Menu>Solution>Solve。

5. 查看结果

(1) POST1 后处理

查看考虑了初应力影响的叶片变形 ,如图 14-24(a)所示初始第一步等效应力的分布云图 ,如图 14-24(b)所示最后一步等效应力的分布云图。

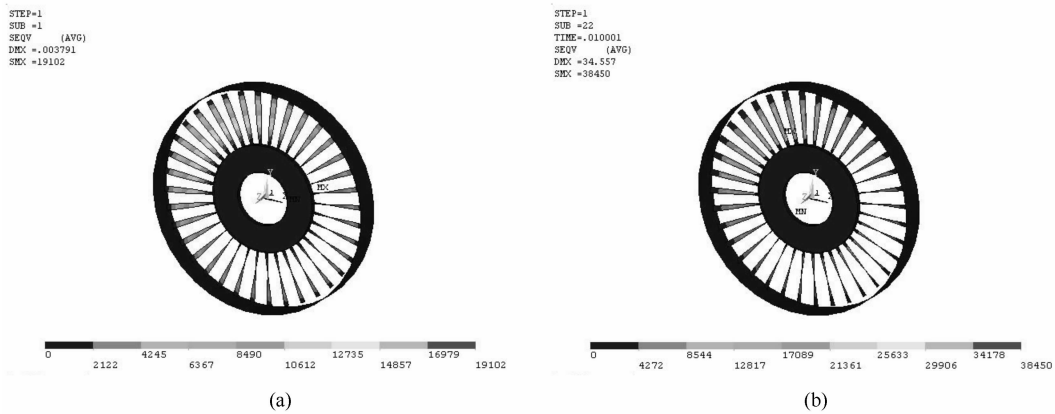


图 14-24 结果对比

(2) POST26 查看节点位移

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Settings>File ,设置“ .his ”结果文件。

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables ,打开如图 14-25(a)所示的 Defined Time-History Variable 对话框 ,单击 Add 按钮 ,在如图 14-25(b)所示的 Add Time-History Variable 对话框选择要查看的结果 ,例如节点的约束结果 ,单击 OK 按钮 ,程序会提示在图形窗口选择相应的节点和变量的内容(需注意的是 ,节点必须是由“EDHIST”命令定义输出的 ,否则没有结果) ,例如某一节点的 3 向位移。重复操作 ,定义好的变量将显示在图 14-25(a)中。



图 14-25 定义变量

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables ,在打开的对话框上输入图 14-25(a)所示变量的编号 ,绘制时间历程上的曲线 ,结果如图 14-26 所示。

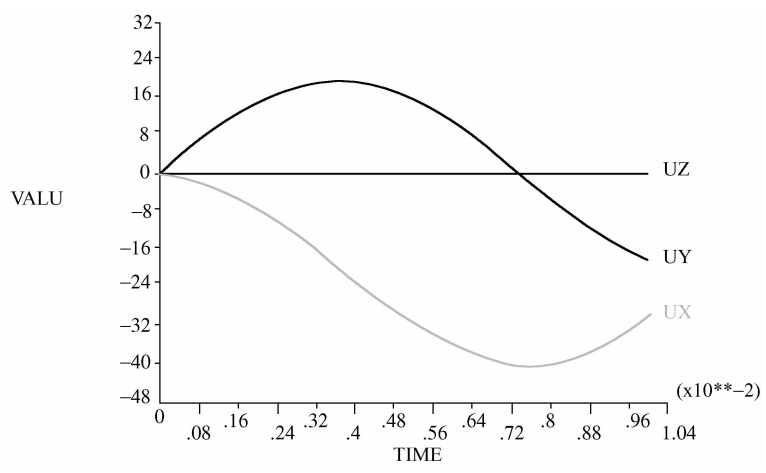


图 14-26 时间历程上某一节点的 3 向位移

(3) POST26 查看格式化输出数据

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Read LSDYNA Data>GLSTAT file ,读入格式化输出文件。

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Store Data ,保存并定义变量。

依次选择 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables ,在打开的对话框中输入总体 3 向速度的变量编号 ,绘制时间历程上的变化 ,如图 14-27 所示。

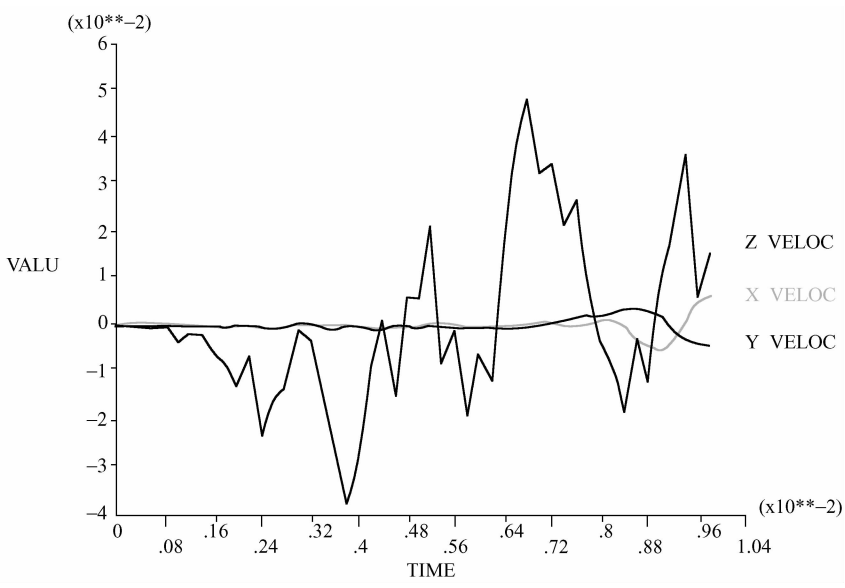


图 14-27 时间历程上总体 3 向速度

附录 A 有限元方法的基本概念

有限元法按照所选用的基本未知量和分析方法的不同,可以分为 3 种基本解法:位移法、力法和混合法。以线性弹性位移法为例,其求解的一般步骤如下。

(1) 连续体的离散化

连续体的离散化即有限元模型的建立过程,将连续体分割为在节点上相连的单元组合体,并进行相应的约束和加载。

(2) 位移函数的设定

位移法以节点位移分量为基本未知量,因此要在各单元内选取位移函数作为计算的基础函数。

(3) 单元的特性分析

建立反映节点力与节点位移关系的单元刚度矩阵的过程为单元的特性分析。

(4) 总体特性分析

建立以节点为基础的节点位移和节点力的关系,进而求解未知量的过程。

(5) 求解

将无限个自由度问题转化为有限个自由度问题,求解方程组,得到未知量。

A.1 连续体的离散化

将连续体分割为离散体的工作,称为连续体的离散化。对于一个普通的连续弹性体,离散化包括 3 方面的含义:划分单元、简化约束和移置载荷。

A.1.1 划分单元

1. 有限单元

将对象结构物在几何上划分为若干个(有限个)单元,使其成为一个由有限个有限大小的构件在有限个节点上相互连接组成的离散的结构物。有限大小的构件称为有限单元,简称单元。

对于平面问题,可以使用 3 节点三角形单元、矩形单元、6 节点三角形单元、任意四边形等参单元等。对于三维问题,有四面体单元、三棱体单元、六面体单元(8 节点、20 节点等)。此外,还有一些特殊用途的单元,例如梁单元、质量单元、安全带单元,等等。

2. 网格

在有限元法中,把剖分单元的分割线或者面称为网格。网格越密,替代结构物就越接近于原结构物。

原则上说,网格细一些是比较理想的,但也不能理解为越细越好。因为网格的粗细直接影响到计算量的大小,细网格所得到的精度要以计算时间为代价。因此在满足精度要求的条件

下 ,网格的密度适中即可。

3. 节点

节点是网格线的诸汇交点 ,它连接相邻的单元 ,并起到传递力分量的作用。如果相邻单元之间有横力和力矩的作用 ,则要求连接这些单元的节点还能起到传递横力和力矩的作用 ,因此必须把该节点理解为刚性节点。一般来讲 ,节点的特性是不单独指定的 ,一旦指定单元属性 ,网格划分完毕后也就自然指定节点的属性。

4. 节点位移和节点力

以 3 节点三角形单元为例 ,如图 A-1 所示 ,三角形节点编号逆时针排列 ,各列阵中各元素的排列顺序也要严格遵守这样的排列。

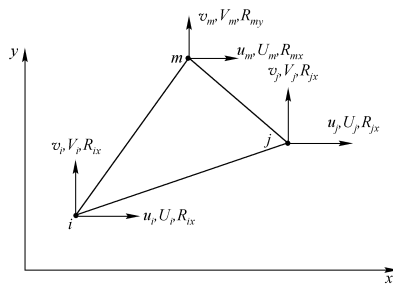


图 A-1 三角形单元节点位移、节点力和节点载荷

一个节点具有两个自由度 ,其节点的位移分量是 u_i, v_i ,与它们相对应的节点力分量是 U_i, V_i 。对于 3 节点的三角形单元来说 ,共计有 6 个自由度 ,分别是节点 i, j, m 沿轴 x 和 y 单元的位移分量和节点力分量 ,两者的形式如下 :

$$\{d\} = [u_i \quad v_i \quad u_j \quad v_j \quad u_m \quad v_m]^T \tag{A-1}$$

$$\{F\} = [U_i \quad V_i \quad U_j \quad V_j \quad U_m \quad V_m]^T \tag{A-2}$$

A.1.2 简化约束

约束可以理解为位移边界条件。简化约束就是把连续的线或面的位移边界条件离散为节点位移边界条件。例如 ,某一离散体的底边为固定约束 ,其上有 p 个节点 ,则可以简化为 :

$$\{d\}_k = [0 \quad 0]^T \quad (k = 1, 2, \dots, p) \tag{A-3}$$

A.1.3 移置载荷

连续体受力一般为集中力或者分布载荷。集中力不需要进行移置 ,在划分单元时直接将作用点取为节点就可以 ;分布载荷要等效地移置到相关节点上去 ,使其成为等效节点载荷。

节点荷载分量是由作用在单元中间的外荷载移置成的 ,其形式与位移分量和节点力分量很相似 :

$$\{R\} = [R_{ix} \quad R_{iy} \quad R_{jx} \quad R_{jy} \quad R_{mx} \quad R_{my}]^T \tag{A-4}$$

A.2 单元位移函数和形状函数

有限元法是一种近似算法,要求假定一组近似计算的基础函数。对于位移法来说,则在单元内定义位移函数作为基础函数。仍以 3 节点三角形单元为例。

首先,假定单元位移函数是线性函数,形式如下:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v &= v(x, y) = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

如果图 A-1 中 3 个节点的坐标分别为 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 、 (x_m, y_m) ,代入式(A-5)得到两个线性代数方程组

$$\begin{cases} u_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \\ u_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \\ u_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m \end{cases} \quad (\text{A-6})$$

$$\begin{cases} v_i = \alpha_4 + \alpha_5 x_i + \alpha_6 y_i \\ v_j = \alpha_4 + \alpha_5 x_j + \alpha_6 y_j \\ v_m = \alpha_4 + \alpha_5 x_m + \alpha_6 y_m \end{cases} \quad (\text{A-7})$$

通过式(A-6)可以得到系数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$,式(A-7)可以得到系数 $\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 。只要三角形单元的面积不为零,上述 6 个系数都是确定的。那么利用克莱姆法则,以 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为例可以用行列式表示为

$$\alpha_1 = \frac{|A_1|}{|A|}, \alpha_2 = \frac{|A_2|}{|A|}, \alpha_3 = \frac{|A_3|}{|A|} \quad (\text{A-8})$$

其中,

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix}, |A_1| = \begin{vmatrix} u_i & x_i & y_i \\ u_j & x_j & y_j \\ u_m & x_m & y_m \end{vmatrix}, |A_2| = \begin{vmatrix} 1 & u_i & y_i \\ 1 & u_j & y_j \\ 1 & u_m & y_m \end{vmatrix}, |A_3| = \begin{vmatrix} 1 & x_i & u_i \\ 1 & x_j & u_j \\ 1 & x_m & u_m \end{vmatrix}$$

$|A|$ 行列式是三角形 ijm 面积 A 的两倍,即 $|A| = 2A$ 。那么

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{|A_1|}{|A|} = \frac{1}{2A} \left(u_i \begin{vmatrix} x_j & y_j \\ x_m & y_m \end{vmatrix} - u_j \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_m & y_m \end{vmatrix} + u_m \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_j & y_j \end{vmatrix} \right) \\ &= \frac{1}{2A} [u_i(x_j y_m - x_m y_j) - u_j(x_i y_m - x_m y_i) + u_m(x_i y_j - x_j y_i)] \\ &= \frac{1}{2A} (a_i u_i + a_j u_j + a_m u_m) \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

从上式可以看出 $a_i = x_j y_m - x_m y_j$, $a_j = x_m y_i - x_i y_m$, $a_m = x_i y_j - x_j y_i$ 。同理

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} (b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m) \quad (\text{A-10})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} (c_i u_i + c_j u_j + c_m u_m) \quad (\text{A-11})$$

式中系数形式为 $b_i = y_j - y_m$, $b_j = y_m - y_i$, $b_m = y_i - y_j$; $c_i = x_m - x_j$, $c_j = x_i - x_m$, $c_m =$

$x_j - x_i$ 。

将式(A-9) (A-10) (A-11)代入到式(A-5)当中,经整理得到

$$\begin{aligned} u &= N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m \\ v &= N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

式中 $N_n = \frac{1}{2A}(a_n + b_n x + c_n y)$ ($n = i, j, m$)是关于 x, y 的线性函数。经证明,该函数分别表达了单元变形的基本形态,通常称为形状函数,它们是组成单元位移函数的基函数。如果利用矩阵表达式(A-12)得到三角形单元的位移函数列阵 $\{f\}$ 为

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N] \{d\} \quad (\text{A-13})$$

其中 $[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix}$ 表示形状函数矩阵 $\{d\} = [u_i \quad v_i \quad u_j \quad v_j \quad u_m \quad v_m]^T$ 表示单元节点位移分量。

A.3 单元特性分析

A.3.1 单元的应变和应力

弹性平面问题的应变可以由位移函数得到,利用矩阵表示为

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (\text{A-14})$$

将式(A-13)位移函数代入到式 A-14 中,得

$$\{\epsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N] \{d\} = [B] \{d\} \quad (\text{A-15})$$

其中 $\{\epsilon\} = [\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \gamma_{xy}]^T$ 为应变列阵, $[B]$ 为几何矩阵。

则几何矩阵表达了应变和位移的关系,其形式为

$$\{B\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix} \quad (\text{A-16})$$

弹性问题的应力-应变遵循虎克定律,即

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = [D] [B] \{d\} \quad (\text{A-17})$$

其中 $\{\sigma\} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}]^T$ 为应力列阵, $[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}$ 为弹性矩阵, μ 为泊松比, E 为弹性模量。

A.3.2 单元的刚度矩阵

在一般情况下, 设单元共有 g 个自由度, 其节点位移分量和节点力分量列阵可表示为

$$\begin{aligned} \{d\} &= [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad \dots \quad d_g]^T \\ \{F\} &= [F_1 \quad F_2 \quad F_3 \quad \dots \quad F_g]^T \end{aligned} \quad (\text{A-18})$$

那么, 节点位移分量列阵和节点力分量列阵的关系是怎样的? 首先, 为了简单起见, 假设作用在单元上只有节点力, 没有外荷载。利用虚功方程, 即利用外力虚功的总和等于单元内应力虚功的总和来建立两者之间的关系式。

设单元在 $\{F\}$ 力的作用下处于平衡状态, 其单元的内应力为 $\{\sigma\}$ 。此时, 假定单元产生虚位移, 该虚位移应当符合与单元位移函数所给出的位移规律, 则节点虚位移和虚应变分别用 $\{d\}^*$ 和 $\{\epsilon\}^*$ 来表示。

外力虚功的总和为

$$\{d\}^{*T} \{F\} = [d_1^* \quad d_2^* \quad d_3^* \quad \dots \quad d_g^*] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_g \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^g d_i^* F_i \quad (\text{A-19})$$

内应力虚功的总和为

$$\begin{aligned} \int_V \{\epsilon\}^{*T} \{\sigma\} dV &= \int_V [\epsilon_x^* \quad \epsilon_y^* \quad \epsilon_z^* \quad \gamma_{xy}^* \quad \gamma_{yz}^* \quad \gamma_{zx}^*] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} dV \\ &= \int_V (\epsilon_x^* \sigma_x + \epsilon_y^* \sigma_y + \dots + \gamma_{zx}^* \tau_{zx}) dV \end{aligned} \quad (\text{A-20})$$

根据虚功方程, 式(A-19)和式(A-20)相等, 且将应变和应力用节点位移列阵表示, 即式(A-15)和式(A-17)。经过整理得到

$$\{F\} = [k] \{d\} \quad (\text{A-21})$$

式 A-21 表述了节点位移与节点力的关系, 通常称 $[k]$ 为单元刚度矩阵, 其形式为

$$[k] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (\text{A-22})$$

式(A-21)和式(A-22)都是一个普遍的表达式, 针对不同的问题有不同的形式。例如在刚

塑性有限元方法中,式(A-21)中的 $\{F\}$ 为能量列阵,而 $\{d\}$ 为假设的速度场,对于弹性问题,只要已知某类型单元的几何矩阵和弹性矩阵,一般可得到单元刚度矩阵的显式。如果不能直接计算矩阵连乘积并积分,则采用数值积分来实现,比如高斯积分法。

单元刚度矩阵有两个很重要的性质:单元刚度矩阵是奇异的;单元刚度矩阵是对称的。

A.3.3 等效节点载荷

利用位移法建立的是节点的平衡方程,因此必须把外荷载转化成为节点荷载,其原则是静力等效。所谓静力等效原则是指:转化后的节点荷载与原荷载在任意虚位移上的虚功相等。根据圣维南原理,在连续体的有限元法中用节点荷载进行计算,对结构的应力或内力的影响区域是局部的。

设在单元内部或边界上的任何一点 $M(x, y, z)$ 作用有荷载 P , 其荷载分量列阵表示为 $\{P\}$, 由 $\{P\}$ 转化成的节点荷载列阵表示为 $\{R_e\}$ 。

假定该单元发生某一虚位移 $\{f\}^*$, 与 $\{f\}^*$ 相适应的 M 点的虚位移为 $\{f_M\}^*$, 而节点的虚位移为 $\{d\}^*$ 。根据静力等效原则,可建立如下关系式

$$\{d\}^{*T} \{R_e\} = \{f_M\}^{*T} \{P\} \quad (\text{A-23})$$

式 A-23 左端为等效节点荷载的虚功,右边部分为原荷载的虚功,其实质也是虚功相等。

由于所假设的虚位移 $\{f\}^*$ 必须符合所假定的单元位移函数的规律,因此有 $\{f\}^* = [N] \{d\}^*$, 将其代入到式(A-23),可得

$$\{d\}^{*T} \{R_e\} = ([N_M] \{d\}^*)^T \{P\} = \{d\}^{*T} [N_M]^T \{P\}$$

或者:

$$\{R_e\} = [N_M]^T \{P\} \quad (\text{A-24})$$

式中 $[N_M]$ 是形状函数矩阵 $[N]$ 在 M 点的数值。

(1) 体积力的节点载荷转化

如果在单元内作用有分布的体积力 $W(x, y, z)$, 其分量列阵为 $\{W\}$ 。由 $\{W\}$ 转化成的节点荷载 $\{R_e\}$, 可借助式(A-24)在体积上做积分得到

$$\{R_e\} = \int_V [N]^T \{W\} dV \quad (\text{A-25})$$

(2) 分布面力的节点载荷转化

如果在单元表面上有分布的面力 P_s , 其分量列阵为 $\{P_s\}$ 。由 $\{P_s\}$ 转化成的节点荷载 $\{R_e\}$, 可借助式(A-24)在面积上做积分得到

$$\{R_e\} = \int_A [N]^T \{P_s\} dA \quad (\text{A-26})$$

(3) 分布载荷的节点载荷转化

如果在单元表面上沿某曲线作用有分布荷载 P_c , 其分量列阵为 $\{P_c\}$ 。由 $\{P_c\}$ 转化成的节点荷载 $\{R_e\}$, 可借助式(A-24)做线积分得到

$$\{R_e\} = \int_l [N]^T \{P_c\} dl \quad (\text{A-27})$$

式(A-24)~式(A-27)是在普遍意义下荷载向节点转化的矩阵表达式或积分表达式。

A.3.4 解答的收敛性

从上述分析中可以看出,在单元类型确定之后,单元的位移函数就成为分析问题的关键。关于应变列阵、应力列阵、单元刚度矩阵及等效节点荷载列阵的建立的依赖于单元位移函数。显而易见,所假定的单元位移函数不是轻易的、随便的。如果选择的位移场与真实的位移场有很大的差别就不可能得到良好的数值解答。但是,假定的单元位移场与真实位移场的差别应当和单元的大小有关,当网格划分逐渐加密时,二者的差别应当逐渐减小,如果能够达到这一要求,则有限元法的解答是可靠的。因此在选择单元位移函数时,提出有限元法解答收敛性的问题,即:当网格划分逐渐加密时,有限元法解答的序列收敛到精确解;或者说,当单元的尺寸固定时,随着单元的自由度数逐渐增多,其解答的序列收敛到精确解。

为了保证解答的收敛性,所假定的单元位移函数应满足下列三方面条件。

(1) 单元位移函数必须包括刚性位移项

每个单元总可以分解为刚性位移项和自身变形位移项两个部分。由于一个单元牵连在另一些单元上,随着其他单元的变形,必将带动该单元做刚性位移。例如,悬臂梁的自由端单元随相邻单元做刚性位移。因此,为模拟单元的真实位移,假定的单元位移函数必须包括弹性力学位移解答的刚性位移项,即

$$\begin{aligned} u(x, y) &= u_0 - \omega_0 y \\ v(x, y) &= v_0 + \omega_0 x \end{aligned} \quad (\text{A-28})$$

式中, u_0 , v_0 分别为水平和垂直方向的刚性位移, ω_0 为刚性转角。当节点位移具有相应于刚性位移给定值时,单元的应变和节点力必然为零。但是当采用不包括刚性位移项的单元位移函数时,就会出现多余的单元应变和节点力,在整体分析中节点的平衡方程势必受到影响。

(2) 单元位移函数必须包括常应变项

每个单元的应变总可以分解为不依赖于单元内各点位置的常应变和由各点位置决定的变量应变。当单元的尺寸足够小时,单元中各点的应变趋于相等,单元变形均匀,常应变成为应变的主要部分。如果单元位移函数包括常应变项,单元的位移和应变的精度将随网格的加密而得到提高。

(3) 单元位移函数应当在相邻单元的公共边界上协调

有限元法一定要满足有公共节点的单元在节点处的连续性,单元位移函数在单元内连续是有保证的,若从模拟真实变形考虑,构造出一个单元位移函数在相邻单元的公共边界上连续,即在单元之间不产生开裂和重叠,那么就是理想的单元位移函数。

然而,在有些板壳的有限元分析中,要使单元位移函数满足收敛条件(3)是有困难的。因此,有时可以放松这个条件,不难想像,如果单元非常小,并且在相邻单元的公共节点处具有相同的位移,也就能够保证它们在整个公共边界上取得大致相同的位移,在相邻单元之间近似于连续。

条件(1)和(2)称为收敛性的必要条件,这3个条件一起被称为收敛性的充分条件,对于满足条件(3)的单元被称为协调元,否则是非协调元。由此,可以分析一下我们设定的三角形单元的位移函数满足了收敛性的充分条件,因此其有限元法的解答是收敛的,可靠的。(具体证

明略)

在前人研究工作的基础上,许多常用的、典型的单元类型都已经建立经过证明的、可靠的位移函数形式,可以直接采用的,不需要加以证明。但应了解并掌握单元位移函数建立的基本原则和方法,以便在特殊需要建立新的位移函数时使用并进行证明和验证。

A.4 总体特性分析

在单元分析中,我们提供了单元刚度矩阵和等效节点荷载。可以说,整体分析的基础是建立在单元节点力与节点位移之间的关系式,以及将作用在单元中间的荷载向节点上转化的关系式。

A.4.1 节点的平衡方程

在单元分析中,我们用节点位移分量来表述节点力分量,该节点力的反作用力作用在节点上,与等效节点荷载一起在节点上组成了平面汇交力系。因此,最终出现在节点平衡方程中的物理量是待求的节点位移分量和等效节点荷载。

如图 A-2 表示节点 i 连接了 6 个三角形单元。取节点 i 为平衡对象,作用在节点 i 上有单元对节点的作用力 U_i, V_i 和节点荷载 R_{ix}, R_{iy} , 则节点 i 的平衡方程为

$$\begin{aligned}U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{i6} &= P_{ix} \\V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{i6} &= P_{iy}\end{aligned}\tag{A-29}$$

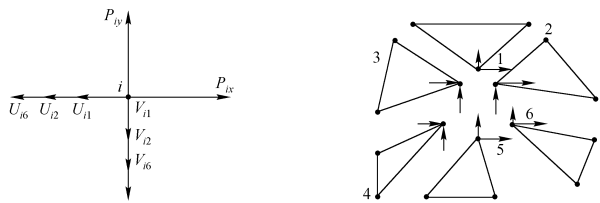


图 A-2 节点的平面汇交力系示意图

式中 U_{i1} 表示单元 1 对节点 i 的作用力,它是所定义的节点力的反作用力。 P_{ix}, P_{iy} 分别表示由各单元转化来的节点荷载的总和。如果用节点位移分量来表示节点力分量,则可以得到节点 i 的位移分量为未知量的节点平衡方程。

A.4.2 结构的代数方程组

出现在节点 i 的平衡方程中的位移分量是 u_i, v_i 和该节点所连接单元的其他节点的位移分量。如果从节点 1 开始到最后一个节点 N 结束,依次写出各个节点的平衡方程并把它集合在一起,则得到关于 $u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_N, v_N$ 的线性代数方程组,表示了整体和节点的平衡,通常称为结构的代数方程组。

对于弹性平面问题,不论使用何种类型的单元,不管是内部节点还是带有支反力的边界节点,每一个节点都可以建立两个平衡方程。如果模型共有 N 个节点,那么结构的代数方程组的个数就为 $2N$ 个。出现在内部节点的平衡方程中的未知量只有节点的位移分量,而出现在

带有支反力的边界节点的平衡方程中既包含节点的位移分量也包含未知的支反力。但是,未知的节点位移分量和未知的支反力分量的总个数也等于 $2N$ 个。

设结构的节点位移分量为

$$\{u\} = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \dots \quad u_N \quad v_N]^T$$

节点载荷分量为

$$\{P\} = [P_{1x} \quad P_{1y} \quad P_{2x} \quad P_{2y} \quad \dots \quad P_{Nx} \quad P_{Ny}]^T$$

节点平衡方程的排列次序是节点 1 的 x 方向平衡方程,节点 1 的 y 方向平衡方程,节点 2 的 x 向平衡方程,节点 2 的 y 向平衡方程,直到节点 N 的 x 向平衡方程和 y 向平衡方程,则结构的代数方程组的矩阵表达式为

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (\text{A-30})$$

其中 $[K]$ 为结构代数方程组的系数矩阵,通常称为总体刚度矩阵。

A.4.3 总体刚度矩阵的组成

对于 3 节点三角形单元来说,节点 i 的节点力总和由 6 个单元产生,相应的数值由单元特性分析得到,那么,如何将单元特性分析得到的数值挑选出来并放到正确的位置上表达结构的代数方程组?即如何把单元刚度矩阵总装成总体刚度矩阵的过程。对于不同类型的单元,总装的规则略有差异,但基本思路相同。例如,3 节点三角形单元的单元刚度矩阵 $[k]$ 是 6×6 的矩阵,而有 N 个节点的结构总体刚度矩阵 $[K]$ 是 $2N \times 2N$ 的矩阵,总体刚度矩阵的组装实际上是将每个单元刚度矩阵扩展为 $2N \times 2N$ 的矩阵再累加到一起。

设 3 节点三角形单元刚度矩阵的元素为 k_{rs} ,其中 r, s 分别表示单元刚度矩阵的行号和列号;总体刚度矩阵的元素 K_{RS} ,其中 R, S 分别表示总体刚度矩阵的行号和列号。那么,相应的对号规律如表 A-1 所示。

表 A-1 3 节点三角形单元组装总刚矩阵的对号规律

| r, s | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|--------|------|--------|------|--------|------|
| R, S | $2i-1$ | $2i$ | $2j-1$ | $2j$ | $2m-1$ | $2m$ |

例如,对于一个使用 3 节点三角形单元的离散体,如果已经计算得到了全部单元刚度矩阵,组装总体刚度矩阵的过程可以是这样的:某一单元的 3 节点的总体编号为 10(即 $i=10$)、13(即 $j=13$)和 16(即 $m=16$),则该单元刚度矩阵中的元素如果是 k_{11} ,组装到总体刚度矩阵的位置是 $K_{19,19}$,如果是 k_{46} ,组装到总体刚度矩阵的位置是 $K_{26,32}$ 。以此类推,可以得到最后的总体刚度矩阵。

A.4.4 方程组右端项的形成

式(A-30)中,方程组的右端项除了有节点力的反作用力之外,还有来自节点所连接的各个单元的节点载荷。仿照由单元刚度矩阵组装成总体刚度矩阵的办法,形成节点载荷列阵,即得到方程组的右端项。

一般地,作用在单元上可能有若干个集中力、分布力或者体积力,首先分别将它们转化为节点载荷,然后求代数和。对于 3 节点三角形单元的节点载荷列阵是 6×1 的列阵,可以表示

为

$$\{R_e\} = [R_{1x} \ R_{1y} \ R_{2x} \ R_{2y} \ R_{3x} \ R_{3y}]^T$$

方程组右端项是 $2N \times 1$ (如果共有 N 个节点时) 的列阵, 可以表示为

$$\{P\} = [P_{1x} \ P_{1y} \ P_{2x} \ P_{2y} \ \dots \ P_{Nx} \ P_{Ny}]^T$$

因此, 将单元节点载荷列阵扩展为 $2N \times 1$ 的列阵后全部累加就可以得到方程组的右端项, 对号组装的规律同样如表 A-1 所示。

A.4.5 已知条件的引进

所谓已知条件的引进, 就是把已知的条件反应到结构的代数方程组, 或者根据已知条件修改式(A-30)。引进已知条件的计算方法不是唯一的, 下面以比较常用的降阶法加以说明。

对于一个已经建立的形如式(A-30)的方程组, 假设已知节点 i 上 y 方向的边界条件(已知位移分量的情况相同), 在形成的总体刚度矩阵中将 $2i$ 行和 $2i$ 列的元素划掉, 使它以后的行和列依次向前推进一行和一列; 同时, 在形成的方程组右端项也划去 $2i$ 行元素, 使它以后的行元素依次向前推进一行。这样得到的结构的代数方程组的阶数小于 $2N$ 个, 对其进行求解可以得到相应的未知量, 将已知条件补充, 就可以得到全部的未知量。

附录 B 显式积分简介

B.1 显式积分

如图 B-1 所示,先考虑简单的单自由度线性弹簧阻尼系统,根据达朗贝尔动力学原理可得

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (\text{B-1})$$

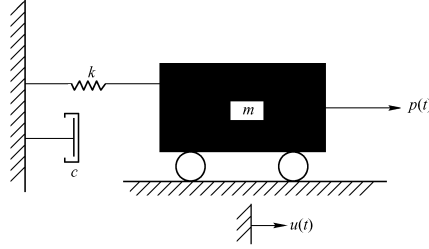


图 B-1 单自由度线性弹簧阻尼系统

其中, \ddot{u} 为加速度, \dot{u} 为速度, u 为位移, $p(t)$ 为外力。

对于图 B-1 所示的线性问题,可以用解析方法求解该常微分方程。若为非线性问题,比如 k 为位移 u 的函数,方程为

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k(u)u = p(t) \quad (\text{B-2})$$

此时用解析方法一般很难求解,所以应用数值解法来求解,常用的是有限差分法和有限元法。上述公式具有普遍意义,对于有限元法而言,上述运动方程的矩阵形式为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \quad (\text{B-3})$$

其中, \ddot{U} 为节点加速度列阵, \dot{U} 为节点速度列阵, U 为位移列阵, $P(t)$ 为外力向量列阵, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵。

目前求解该运动方程使用较多的方法有两种,一种是振型叠加法,一种是逐步积分法。对于复杂问题一般采用逐步积分法,大体又可以分为增量法、迭代法和混合法。

隐式的求解一般采用增量迭代法,需要转换刚度矩阵,通过一系列线性逼近(Newton-Raphson)来求解,对于存在内部接触这样的高度非线性动力学问题往往无法保证收敛。LS-DYNA 采用显式中心差分法来进行时间积分,在已知 $0, \dots, t_n$ 时间步解的情况下,求解 t_{n+1} 时间步的解,运动方程为

$$M\ddot{U}(t_n) = P(t_n) - F^{\text{int}}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n) \quad (\text{B-4})$$

式中, $P(t_n)$ 为外力向量列阵, $F^{\text{int}}(t_n)$ 为内力矢量,为单元内力和接触力之和,表达式为 $F^{\text{int}}(t_n) = \sum_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{\text{contact}}$, 单元的内力由当前构型的应力场的散度求得, $H(t_n)$ 为沙漏

阻力。把质量矩阵移到方程的右边,求得时刻 t_n 的加速度为

$$\ddot{U}(t_n) = M^{-1}[P(t_n) - F^{\text{int}}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n)] \quad (\text{B-5})$$

t_{n+1} 时刻的速度和位移由下面公式求得

$$\dot{U}(t_{n+\frac{1}{2}}) = \dot{U}(t_{n-\frac{1}{2}}) + \ddot{U}(t_n)\Delta t_n \quad (\text{B-6})$$

$$U(t_{n+1}) = U(t_n) + \dot{U}(t_{n+\frac{1}{2}})\Delta t_{n+\frac{1}{2}} \quad (\text{B-7})$$

其中 $\Delta t_{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t_n + \Delta t_{n+1}}{2}$ 。

这样可以求得 t_{n+1} 时刻的位移。更新 t_n 时刻的系统几何构型,得到 t_{n+1} 时刻系统新的几何构型。由于采用集中质量矩阵 M ,运动方程的求解是非耦合的,不需要组集成总体刚度矩阵,并采用中心单点积分,因此大大节省了存储空间和计算时间。

但是显示中心差分法是有条件稳定的,可以通过一个简单的线性自由弹簧系统来说明,此时的运动方程为

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (\text{B-8})$$

设 ϕ 为特征向量矩阵,则

$$\phi^T M \phi \ddot{U} + \phi^T K \phi U = 0 \quad (\text{B-9})$$

由于 $\phi^T M \phi = I$, $\phi^T K \phi = \omega^2$, ω 为圆频率,于是 t_n 时刻的运动方程为

$$\ddot{U}(t_n) + \omega^2 U(t_n) = 0 \quad (\text{B-10})$$

如果时间积分采用中心差分法,那么

$$\dot{U}(t_n) = \frac{U(t_{n+1}) - U(t_{n-1}))}{2\Delta t} \quad (\text{B-11})$$

$$\ddot{U}(t_n) = \frac{U(t_{n+1}) - 2U(t_n) + U(t_{n-1}))}{\Delta t^2} \quad (\text{B-12})$$

其中 Δt 为时间步。把 $\ddot{U}(t_n)$ 代入运动方程,可得

$$U(t_{n+1}) - (2 - \omega^2 \Delta t^2)U(t_n) + U(t_{n-1})) = 0 \quad (\text{B-13})$$

设 $U(t_n) = \lambda^n$, 带入方程就可以把差分方程变成多项式方程

$$\lambda^2 - (2 - \omega^2 \Delta t^2)\lambda + 1 = 0 \quad (\text{B-14})$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,若 $U(t_n)$ 是有界的,则可以得到稳定解,这就要求 $|\lambda| \leq 1$ 。对于 $|\lambda| \leq 1$ 的方程所有的根,满足稳定条件的最大 Δt 的值为

$$\Delta t_{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \quad (\text{B-15})$$

式中 ω_{max} 为有限元网格的最大自然角频率。所以只有当

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \quad (\text{B-16})$$

此时,求解才是稳定的,所以显示算法都采用很小的时间步来进行计算,一般只对瞬态问题有效。

B.2 沙漏模式

在运动方程 $M\ddot{U}(t_n) = P(t_n) - F^{\text{int}}(t_n) + H(t_n) - C\dot{U}(t_n)$ 中有一项为沙漏阻力 $H(t_n)$,

该项为人为加上的力,是为了防止沙漏变形,这是由于 LS-DYNA 采用单点高斯积分进行时间积分,因而会出现零能模式(沙漏模式)。下面简单介绍零能模式出现的原因。

单元内力由当前构型应立场的散度求得:

$$F^{\text{int}}(t_n) = \sum_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega$$

计算单元 $\sum_e B^T \sigma dV$ 时,应力增量 $\dot{\sigma} \Delta t$ 由应变率 $\dot{\epsilon}$ 根据材料本构关系求出,而应变率 $\dot{\epsilon}$ 与单元速度场 $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$ 有关。对于 8 节点六面体实体单元来说,单元内任意点的速度分量为:

$$\dot{x}_i(\xi, \eta, \zeta, t) = \sum_{k=1}^8 \phi_k(\xi, \eta, \zeta) \dot{x}_i^k(t) \quad (\text{B-17})$$

式中形函数为

$$\begin{aligned} \phi_k(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{8} (1 + \zeta_k \xi) (1 + \eta_k \eta) (1 + \zeta_k \zeta) \\ &= \frac{1}{8} (1 + \xi_k \xi + \eta_k \eta + \zeta_k \zeta + \xi_k \eta_k \xi \eta + \eta_k \zeta_k \eta \zeta + \xi_k \zeta_k \xi \zeta + \xi_k \eta_k \zeta_k \xi \eta \zeta) \end{aligned}$$

$(\xi_k, \eta_k, \zeta_k), k=1, 2, \dots, 8$

是节点的自然坐标值,如表 B-1 所示。

表 B-1 自然坐标值

| 节 点 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|----|----|----|----|----|----|---|----|
| ξ | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| η | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| ζ | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

式(B-17)用矩阵形式表达为

$$\dot{x}_T(\xi, \eta, \zeta, t) = \frac{1}{8} (\Sigma^T + \Lambda_1^T \xi + \Lambda_2^T \eta + \Lambda_3^T \zeta + \Gamma_1^T \xi \eta + \Gamma_2^T \eta \zeta + \Gamma_3^T \zeta \xi + \Gamma_4^T \xi \eta \zeta) \dot{x}_i^k(t) \quad (\text{B-18})$$

式中

$$\Sigma = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$$

$$\Lambda_1 = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \xi_4 \quad \xi_5 \quad \xi_6 \quad \xi_7 \quad \xi_8]^T = [-1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1]^T$$

$$\Lambda_2 = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3 \quad \eta_4 \quad \eta_5 \quad \eta_6 \quad \eta_7 \quad \eta_8]^T = [-1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1]^T$$

$$\Lambda_3 = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3 \quad \zeta_4 \quad \zeta_5 \quad \zeta_6 \quad \zeta_7 \quad \zeta_8]^T = [-1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$$

$$\Gamma_1 = [\xi_1 \eta_1 \quad \xi_2 \eta_2 \quad \xi_3 \eta_3 \quad \xi_4 \eta_4 \quad \xi_5 \eta_5 \quad \xi_6 \eta_6 \quad \xi_7 \eta_7 \quad \xi_8 \eta_8]^T$$

$$= [1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1]^T$$

$$\Gamma_2 = [\eta_1 \zeta_1 \quad \eta_2 \zeta_2 \quad \eta_3 \zeta_3 \quad \eta_4 \zeta_4 \quad \eta_5 \zeta_5 \quad \eta_6 \zeta_6 \quad \eta_7 \zeta_7 \quad \eta_8 \zeta_8]^T$$

$$= [1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1]^T$$

$$\Gamma_3 = [\zeta_1 \xi_1 \quad \zeta_2 \xi_2 \quad \zeta_3 \xi_3 \quad \zeta_4 \xi_4 \quad \zeta_5 \xi_5 \quad \zeta_6 \xi_6 \quad \zeta_7 \xi_7 \quad \zeta_8 \xi_8]^T$$

$$= [1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1]^T$$

$$\Gamma_4 = [\xi_1 \eta_1 \zeta_1 \quad \xi_2 \eta_2 \zeta_2 \quad \xi_3 \eta_3 \zeta_3 \quad \xi_4 \eta_4 \zeta_4 \quad \xi_5 \eta_5 \zeta_5 \quad \xi_6 \eta_6 \zeta_6 \quad \xi_7 \eta_7 \zeta_7 \quad \xi_8 \eta_8 \zeta_8]^T$$

$$= [-1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1]^T$$

单元的速度场是由基矢量 Σ 、 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 和 Γ_4 组成的, 其中基矢量 Σ 反应单元的刚体平动位移, 基矢量 Δ_1 反应单元的挤压变形, 基矢量 Δ_2 和 Δ_3 反应单元的剪切变形, Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 和 Γ_4 则称为沙漏基矢量, 模态如图 B-2 所示。

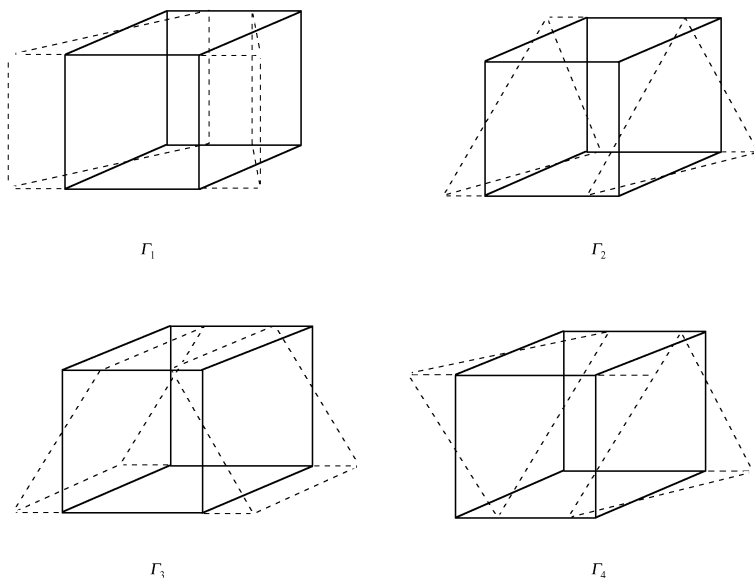


图 B-2 沙漏基矢量模态示意图

当计算单元内任意点的应变率时, 公式:

$$\dot{\epsilon}_{11} = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1}, \dot{\epsilon}_{22} = \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2}, \dot{\epsilon}_{33} = \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3}, \dots$$

把(B-17)式代入, 即可把速度对总体坐标的偏导数转化为形函数对总体坐标的偏导数

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_1} &= \sum_{k=1}^8 \frac{\partial \phi_k(\xi, \eta, \zeta)}{\partial x_1} \dot{x}_i^k \quad (i = 1, 2, 3); \\ \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_2} &= \sum_{k=1}^8 \frac{\partial \phi_k(\xi, \eta, \zeta)}{\partial x_2} \dot{x}_i^k \quad (i = 1, 2, 3); \\ \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_3} &= \sum_{k=1}^8 \frac{\partial \phi_k(\xi, \eta, \zeta)}{\partial x_3} \dot{x}_i^k \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

由雅可比矩阵转换, 又可把速度场对总体坐标的偏导数转化为对自然坐标的偏导数

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi_k}{\partial x_2} & \frac{\partial \phi_k}{\partial x_3} \end{bmatrix}^T = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_k}{\partial \xi} & \frac{\partial \phi_k}{\partial \eta} & \frac{\partial \phi_k}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (\text{B-19})$$

这样就把应变率的求解转化为形函数对自然坐标的偏导。如果在单元形心处 ($\xi = \eta = 0$) 进行单点高斯积分, 那么该处速度场对自然坐标的导数可以表达为

$$\left. \frac{\partial x_i(\xi, \eta, \zeta, t)}{\partial \xi} \right|_{\xi=\eta=\zeta=0} = \frac{1}{8} (\Lambda_1^T + \Gamma_1^T \times 0 + \Gamma_3^T \times 0 + \Gamma_4^T \times 0) \{ \dot{x}_i^k(t) \} \dots \quad (\text{B-20})$$

由于对单元形心处($\xi = \eta = \zeta = 0$)进行单点高斯积分,沙漏模态被丢失,即它对单元应变能的计算没有影响,故称为零能模式。在动力相应计算时,沙漏模态将不受控制,从而出现计算的数值振荡。

虽然单点积分会引起沙漏模式,但由于只进行单点的积分,相比 $2 \times 2 \times 2$ 或 $3 \times 3 \times 3$ 的高斯积分,单元的数据存储量和计算时间可降低至 $1/8$ 至 $1/27$,也有利于进行大变形分析。LS-DYNA 采用沙漏粘性阻尼方式或刚度方式来对进行控制。

将各单元节点的沙漏阻力集成总体结构沙漏阻力,就得到了公式(B-4)中的 $H(t_n)$ 。通过施加沙漏阻力,沙漏模态在计算中不断得到控制。

附录 C 命令流文件和 K 文件

C.1 命令流文件

在使用 ANSYS 软件过程中 ,除了可以通过 GUI 实现相关操作以外 ,还可以通过命令流文件实现分析问题的模型抽象。命令流类似于批处理过程 ,是将相关操作的命令写成 “.txt” 文件 ,读入到 ANSYS 中 ,让程序连续执行所有命令。

依次选择 File>Read Input From 打开如图 C-1 所示的 Read File 对话框 ,选择要读入的命令流文件 ,单击 OK 按钮即可。

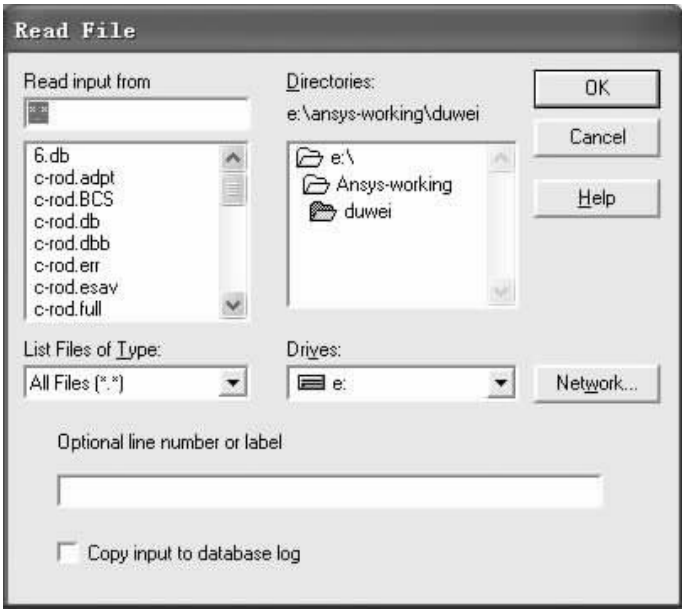


图 C-1 读入文件对话框

下面来分析一个命令流文件的片断 ,来说明命令流的组成。

| | |
|--|--------------|
| <code>/PREP7</code> | 进入前处理器 |
| <code>wprot ,0 ,45 ,0</code> | |
| <code>wprot ,0 ,0 ,45</code> | 3 行实现坐标平面的旋转 |
| <code>wprot ,45 ,0 ,0</code> | |
| <code>BLOCK , -10 ,10 , -10 ,10 , -10 ,10 ,</code> | 创建块体 |
| <code>VDELE , 1</code> | 删除体 |
| <code>ADELE , 4 , ,1</code> | 删除面 |

| | |
|--|--------|
| ET ,1 SHELL163 | |
| ET ,2 SHELL163 | 定义单元类型 |
| | |
| R ,1 | 定义实常数 |
| RMODIF ,1 ,1 , , , 0.1 , , , , | |
| RMODIF ,1 ,7 , 0 | |
| | |
| MPMOD ,1 ,33 | 定义材料 |
| UIMP ,1 ,DENS , , , 2.5e-4 , | |
| UIMP ,1 ,EX , , , 10.3e6 , | |
| UIMP ,1 ,NUXY , , , 0.334 , | |
| TB ,BKIN ,1 | |
| TBDAT ,1 ,5000 , | |
| TBDAT ,2 ,20000 , | |
| | |
| type ,1 | 分配单元属性 |
| mat ,1 | |
| real ,1 | |
| lsel ,s , , , 1 ,12 | 指定单元尺寸 |
| lesize ,all , , , 4 , , , , 1 | |
| MSHAPE ,0 ,2D | 划分网格 |
| MSHKEY ,1 | |
| asel ,s , , , 1 ,3 | |
| asel ,a , , , 5 ,6 | |
| amesh ,all | |
| | |
| ESEL ,S ,MAT , , 1 | |
| NSLE ,S | |
| CM ,box ,NODE | 定义节点组件 |
| ESEL ,S ,MAT , , 2 | |
| NSLE ,S | |
| CM ,table ,NODE | |
| EDCGEN ,ANTS ,BOX ,TABLE ,0 ,0 ,0 ,0 , , , , 0 ,10000000 | 定义接触 |
| /SOLU | 进入求解器 |
| EDVE ,VELO ,BOX ,0 , -200 ,0 ,0 ,0 , , , , , | 定义初速度 |
| | |
| * DIM ,time ,ARRAY ,3 , , , , , | 定义数组参数 |


```
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$ MATERIAL DEFINITIONS $  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$  
* MAT _ RIGID  
1 0.783E-05 69.0 0.300000 0.0 0.0 0.0  
1.00 4.00 7.00  
$  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$ PARTS DEFINITIONS $  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$  
$  
* PART _ INERTIA  
Part 1 for Mat 1 and Elem Type 1  
1 1 1 0 0 0 0  
0.000E+00 0.000E+00 0.510E+02 0.500E+02 0  
0.100E+03 0.000E+00 0.000E+00 0.100E+03 0.000E+00 0.100E+03  
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00  
$  
* PART  
Part 2 for Mat 2 and Elem Type 2  
2 2 2 0 0 0 0  
$  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$ RIGID BOUNDRIES $  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$  
* DEFINE _ CURVE  
1 0 1.000 1.000 0.000 0.000  
0.000000000000E+00 - 0.000000000000E+00  
1.000000000000E+00 - 5.000000000000E+00  
8.000000000000E+00 - 5.000000000000E+00  
* BOUNDARY _ PRESCRIBED _ MOTION _ RIGID  
1 3 0 1 1.000 0 0.000 0.000  
$  
$  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$ BOUNDARY DEFINITIONS $  
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$  
$  
* SET _ NODE _ LIST  
1 0.000 0.000 0.000 0.000
```

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1879 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 |
| 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 |
| 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
| 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 |
| 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
| 2003 | 2004 | | | | | | |

* BOUNDARY _ SPC _ SET

1 0 0 1 0 1 0 1

K 文件是由 LS-DYNA 特有的关键字格式写出的 ,每个关键字的使用、格式和参数都有严格要求。因此 ,对用户的软件使用熟练程度要求较高 ,同时还要熟悉关键字的含义。

除了在 ANSYS 下可以求解 K 文件以外 ,还可以在 DOS 状态下直接运行 LS-DYNA 求解器对 K 文件进行求解。

首先 ,进入到 K 文件所在目录下 ,ANSYS 程序可以不退出。

其次 ,输入“lsdyna ** i=jobname.k memory=25000000 p=ane3flds r=d3dump ** ”

其中 ,“ ** ”表示 LS-DYNA 求解器的版本号 ,例如 960 ;“i=jobname.k”指定已经生成和存在的 K 文件名称 ;“memory = 25000000 ”指定本次分析要申请的内存 ,例如 25000000 ;“r = d3dump ** ”用于重启动分析 ,指定重启动文件 ;“ ** ”为文件编号。

第三 ,所得结果可以附加到“ .rst ”和“ .his ”文件中。

第四 ,求解结束后 ,返回到 ANSYS 中 ,可以使用后处理器查看结果。

附录 D 关于单位制

D.1 ANSYS 中单位制的使用

所有物理量可以分为基本物理量(Primary)和导出物理量(Secondary)两大类。在手工计算时,由于计算过程中可以随意进行单位的转换,因此不必强调单位的统一或协调。

在使用通用软件进行计算时(包括 ANSYS),由于计算过程中一般不进行单位的转换,因此要求在一个题目的计算过程中,不同物理量的单位之间必须协调或者单位制要统一。其含义是指 Primary 物理量的单位和由其导出的其他物理量的单位必须协调或者统一。单位制的协调使用直接影响计算结果的可靠度和准确性,而 ANSYS 程序本身不具备自动协调单位制的功能,需要用户自己手工完成。

对于 ANSYS/LS-DYNA 模块,有人认为单位制对时间步长 dt 有重大影响,这是错误的。根据量纲分析可知:不论采用何种单位制,只要单位制之间是协调的,时间步长不变。时间步长的选择涉及两个方面的约束。

(1) 在直接积分方法中,实质是用差分代替微分,且对位移加速度的变化采用引伸的线性关系,这就限制了 dt 的取值不能过大,否则结果可能失真过大,不能正确表现冲击振动的真实响应;

(2) 数值稳定性问题。在每一步数值计算中,不可避免地存在舍入误差,这些舍入误差又不可避免地带入下一个时间步长长算式中,如果算法不具备数值稳定性,则可能导致结果的发散,仍不能正常表现真实响应,甚至造成无法求解。计算误差的控制要求 dt 的取值不可能过大,这取决于算法本身构造对误差的容限。

可以证明,中心差分算法是有条件稳定的,也即时间步长必须小于由该问题求解方程性质所决定的一个时步临界值 $\Delta t_{\text{crit}} = \frac{2}{\omega_{\text{max}}}$ (即式 B-15),其中 ω_{max} 是有限元系统的最小固有振动周期,一般只需要求解系统中最小尺寸单元的最小固有振动周期即可。在实际的计算中,同时考虑时间步长的两种约束及中心差分法的稳定条件,可以采用变时间步长法,即每一时刻的时间步长由当前结构的稳定性条件控制,每一个单元的极限时间步长,为下一时刻的时间步长。各种单元的的计算方法略有差异(详细内容可参考 LS-DYNA 理论手册)。

因此,根据量纲分析可知,不论采用何种单位制,只要单位制之间是协调的,时间步长不变。

D.2 常用的协调单位制

对于结构分析,这里的基本物理量有三个:长度、质量和时间,对于热问题,还应加上温度,其他类型问题可能还有相应的基本物理量,其余物理量的单位必须由这些基本物理量的单位导出,而不能人为规定。基本物理量的单位可以自由选择,其他物理量的单位则不能自由选

择,需要按相应的计算公式来导出,以结构计算为例,选定长度 L 、质量 M 和时间 t 的单位后,其他物理量的计算公式如下

$$\text{密度 } \rho : \rho = \frac{M}{L^3}$$

$$\text{速度 } v : v = \frac{L}{t}$$

$$\text{加速度 } a : a = \frac{L}{t^2}$$

$$\text{力 } f : f = Ma = \frac{ML}{t^2}$$

$$\text{压力 } p、\text{应力 } \sigma、\text{弹性模量 } E \text{ 等} : p = \sigma = E = \frac{f}{L^2} = \frac{Ma}{L^2} = \frac{M}{Lt^2}$$

由此,介绍几个常用的单位制例子。

D.2.1 kg-m-s 单位制

质量单位为千克,用 kg 表示,长度单位为米,用 m 表示,时间单位秒,用 s 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{kg}/\text{m}^3$; 速度 $v = \text{m}/\text{s}$; 加速度 $a = \text{m}/\text{s}^2$; 重力加速度 $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$; 力 $f = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$, 即牛顿; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$, 即帕斯卡。

D.2.2 kg-mm-s 单位制

质量单位为千克,用 kg 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位秒,用 s 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{kg}/\text{mm}^3$; 速度 $v = \text{mm}/\text{s}$; 加速度 $a = \text{mm}/\text{s}^2$; 重力加速度 $g = 9\,810 \text{ mm}/\text{s}^2$; 力 $f = \text{kg} \cdot \text{mm}/\text{s}^2 = 10^{-3} \text{ N} = \text{mN}$, 即毫牛; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{mN}/\text{mm}^2 = 10^3 \text{ Pa} = \text{kPa}$, 即千帕。

D.2.3 kg-mm-ms 单位制

质量单位为千克,用 kg 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位毫秒,用 ms 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{kg}/\text{mm}^3$; 速度 $v = \text{mm}/\text{ms}$; 加速度 $a = \text{mm}/\text{ms}^2$; 重力加速度 $g = 9.81 \times 10^{-3} \text{ mm}/\text{ms}^2$; 力 $f = \text{kg} \cdot \text{mm}/\text{ms}^2 = 10^3 \text{ N} = \text{kN}$, 即千牛; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{kN}/\text{mm}^2 = 10^9 \text{ Pa} = \text{GPa}$, 即吉帕。

D.2.4 T-mm-s 单位制

质量单位为吨,用 T 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位秒,用 s 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{T}/\text{mm}^3$; 速度 $v = \text{mm}/\text{s}$; 加速度 $a = \text{mm}/\text{s}^2$; 重力加速度 $g = 9810 \text{ mm}/\text{s}^2$; 力 $f = \text{T} \cdot \text{mm}/\text{s}^2 = \text{N}$, 即牛顿; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{N}/\text{mm}^2 = 10^6 \text{ Pa} = \text{MPa}$, 即兆帕。

D.2.5 T-mm-ms 单位制

质量单位为吨,用 T 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位毫秒,用 ms 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{T/mm}^3$; 速度 $v = \text{mm/ms}$; 加速度 $a = \text{mm/ms}^2$; 重力加速度 $g = 9.81 \times 10^{-3} \text{ mm/ms}^2$; 力 $f = \text{T} \cdot \text{mm/ms}^2 = 10^6 \text{ N} = \text{MN}$, 即兆牛; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = 10^6 \text{ N/mm}^2 = 10^{12} \text{ Pa} = 10^6 \text{ MPa}$ 。

D.2.6 10^6 kg-mm-s 单位制

质量单位为千克 $\times 10^6$, 用 10^6 kg 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位秒,用 s 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = 10^6 \text{ kg/mm}^3$; 速度 $v = \text{mm/s}$; 加速度 $a = \text{mm/s}^2$; 重力加速度 $g = 9810 \text{ mm/s}^2$; 力 $f = 10^6 \text{ kg} \times \text{mm/s}^2 = \text{kN}$, 即千牛; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{kN/mm}^2 = 10^9 \text{ Pa} = \text{GPa}$, 即吉帕。

D.2.7 g-mm-ms 单位制

质量单位为克,用 g 表示,长度单位为毫米,用 mm 表示,时间单位毫秒,用 ms 表示,则相应的导出物理量如下:

密度 $\rho = \text{g/mm}^3$; 速度 $v = \text{mm/ms}$; 加速度 $a = \text{mm/ms}^2$; 重力加速度 $g = 9.81 \times 10^{-3} \text{ mm/ms}^2$; 力 $f = \text{g} \cdot \text{mm/ms}^2 = \text{N}$, 即牛顿; 压力、应力和弹性模量 $p = \sigma = E = \text{N/mm}^2 = 10^6 \text{ Pa} = \text{MPa}$, 即兆帕。

由上述方法,还可以推导出更多的协调单位制,这里就不多写了。总之,基本物理量的单位可以根据需要选择,但导出物理量的单位必须以基本物理量为基础推导出来,不能人为地规定。归纳一些常用的单位制如表 D-1 所示。

表 D-1 常用的单位制

| 基本物理量 | | | 导出物理量 | | | |
|-------------------|----|----|-----------------------|----|--------------------|---------------------------------------|
| 质量 | 长度 | 时间 | 密度 | 力 | 应力 | 重力加速度 |
| kg | m | s | kg/m^3 | N | Pa | 9.81 m/s^2 |
| kg | mm | s | kg/mm^3 | mN | KPa | $9\,810 \text{ mm/s}^2$ |
| kg | mm | ms | kg/mm^3 | kN | GPa | $9.81 \times 10^{-3} \text{ mm/ms}^2$ |
| T | mm | s | T/mm^3 | N | MPa | $9\,810 \text{ mm/s}^2$ |
| T | mm | ms | T/mm^3 | MN | 10^6 MPa | $9.81 \times 10^{-3} \text{ mm/ms}^2$ |
| 10^6 kg | mm | s | 10^6 kg/m^3 | kN | GPa | $9\,810 \text{ mm/s}^2$ |
| g | mm | ms | g/mm^3 | N | MPa | $9.81 \times 10^{-3} \text{ mm/ms}^2$ |

参 考 文 献

- 1 ANSYS用户手册
- 2 ANSYS/LS-DYNA 理论手册
- 3 Logan D L. 有限元方法基础教程. 伍义生, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 4 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南. 北京: 兵器工业出版社, 2003
- 5 张允真. 简明有限元法. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984
- 6 Moaveni S. 有限元分析: ANSYS 理论与应用. 欧阳宇, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 7 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988