

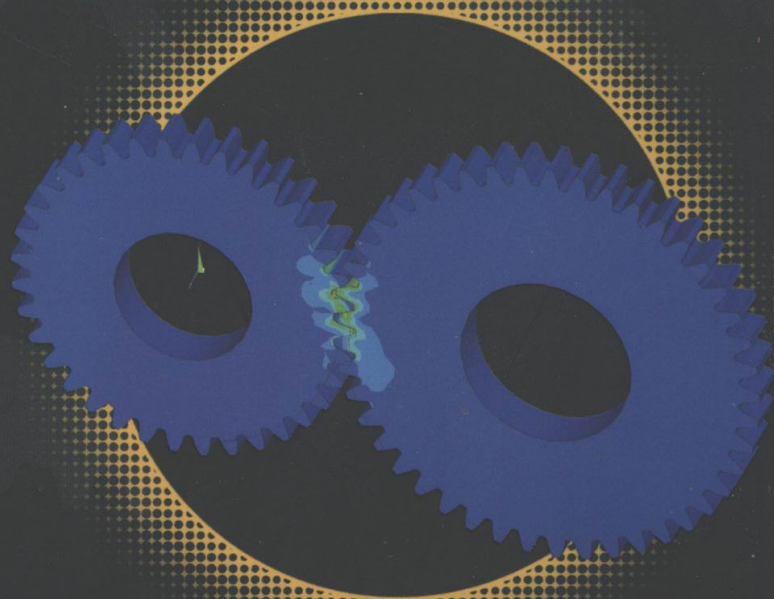


CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

有限元分析—— ANSYS 13.0 从入门到实战

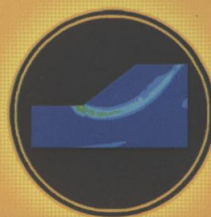
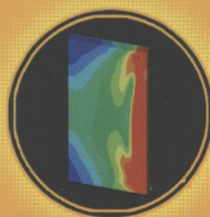
◎ 张洪才 何波 编著

- 经典案例层出不穷，
覆盖全面讲解透彻
- 一点就通举一反三，
轻松应对实际问题



◎ 提供电子邮件答疑服务

手把手教你做21个实际工程
分析，尽在随书  光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战

张洪才 何 波 编著



机械工业出版社

本书是以 ANSYS 13.0 为平台撰写的一部从入门到精通的实用自学与提高教程,全面介绍了有限元分析的理论基础、有限元分析流程、实体建模、网格划分、耦合和约束方程、加载、求解、后处理技术、设计 ANSYS 分析方案、结构线性静力分析、模态分析、谐响应分析、谱分析、瞬态动力学分析、断裂力学分析、边坡稳定性分析、界面开裂与失效模拟、衬垫连接模拟、齿轮分析、转子动力学分析、焊接工程问题分析、优化设计、拓扑优化、疲劳分析、自适应网格划分和可靠性分析等内容。围绕 ANSYS 软件的功能讲解,书中给出了大量具有工程背景的实例,并在配套光盘中提供了 22 个实例的视频教程和 ANSYS 实例文件。

本书不仅适合作为高等学校理工类高年级本科生或研究生学习 ANSYS 13.0 有限元分析软件的教材,也可供从事结构分析的工程技术人员参考使用,书中提供的大量实例还可供高级用户参考。

图书在版编目(CIP)数据

有限元分析: ANSYS 13.0 从入门到实战 / 张洪才, 何波编著. —北京: 机械工业出版社, 2011.7

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-35546-5

I. ①有… II. ①张… ②何… III. ①有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 156881 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 丁 诚 杨 硕

责任编辑: 丁 诚 杨 硕

责任印制: 杨 曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2011 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·33.25 印张·824 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35546-5

ISBN 978-7-89433-096-3 (光盘)

定价: 79.00 元(含 1DVD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着信息技术在各领域的迅速渗透, CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用, 从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式, 对推动现有企业的技术改造, 带动整个产业结构的变革, 发展新兴技术, 促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早, 使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空航天及汽车制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计, 而且投入了大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发, 以保持其在技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用, 不但可以提高设计质量, 缩短工程周期, 还可以节约大量的建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性, 掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧, 已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的, 只有将计算机技术和工程实际结合起来, 才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑, 机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用, 以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作, 配以大量具有代表性的实例, 并融入了作者丰富的实践经验, 使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点, 是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社



前 言

ANSYS 是目前国内外使用最广泛的计算机辅助分析软件之一，其丰富的分析功能、强大的求解功能和良好的用户界面深受广大用户的欢迎。ANSYS 软件是一款集结构、热、流体、电磁和声学于一体的大型通用有限元分析软件。该软件很好地实现了前、后处理，分析求解及多场耦合分析统一数据库功能。同时，它还是世界上第一个通过ISO 9001质量认证的分析设计类软件。ANSYS 软件可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、材料成形、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究领域。ANSYS 13.0 是目前最新的 ANSYS 版本，不仅为当前的商业应用提供了新技术，而且在继续开发和提供世界一流的求解器技术、提供针对复杂仿真的多物理场耦合解决方法等方面取得了显著进步。

本书内容全面、新颖，实例工程背景强，讲述循序渐进，应用领域广泛。通过学习，读者可逐步提高自身的 ANSYS 操作水平及利用有限元分析理论进行结构分析的能力，最终具备在结构分析领域解决实际工程问题的思路、方法和能力。

本书内容几乎涵盖了 ANSYS 应用的所有分析类型，使读者阅读完本书后就能够使用 ANSYS 进行产品分析。本书的编写采用了目前最新的 ANSYS 13.0 版本，所涉及的知识也都是基于最新版本进行介绍的，在讲解分析的过程中，结合了图形用户界面（GUI）操作和命令行操作两种模式，读者可以根据自己的需要进行选择。

全书共有 22 个工程实例，覆盖了大部分工程问题，也详细地讲解了一些热门问题，可以帮助读者在短时间内掌握这些复杂问题的分析流程和技巧，领会到实际工程问题的分析思路，使读者能够解决相关领域的实际问题。

本书适合初、中级用户入门与提高使用。

本书第 1 章~第 17 章、第 19 章、第 29 章和第 30 章由长春装甲兵技术学院张洪才撰写；第 18 章、第 20 章~第 28 章由沈阳航空航天大学何波撰写。编者长期从事 CAE 的研究工作，并根据自己的研究工作整理完成本书内容。

在此，作者向所有参与和关心本书出版的领导、老师、亲人和朋友致以诚挚的谢意。

由于时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正，如有问题可以发邮件到 zafansys@163.com 与作者联系。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 有限单元法概述 1

1.2 ANSYS 基本原理 1

1.2.1 ANSYS 计算中的基本方程 1

1.2.2 ANSYS 计算的基本方法 2

1.2.3 ANSYS 计算的基本流程 3

1.3 ANSYS 13.0 简介与基本使用 3

1.3.1 软件功能简介 4

1.3.2 前处理模块 4

1.3.3 分析计算模块 4

1.3.4 后处理模块 5

第 2 章 坐标系和工作平面 6

2.1 坐标系 6

2.1.1 坐标系简介 6

2.1.2 坐标系的定义 6

2.1.3 坐标系的激活 9

2.2 工作平面 9

2.2.1 工作平面的定义 10

2.2.2 工作平面的操作 10

2.2.3 工作平面的增强功能 11

第 3 章 建立模型 13

3.1 建立实体模型的方法 13

3.2 自下向上建模 15

3.2.1 关键点 15

3.2.2 硬点 15

3.2.3 线 16

3.2.4 面 17

3.2.5 体 17

3.3 自上向下建模 18

3.3.1 定义面 18

3.3.2 定义体 19

3.4 布尔运算 20

3.4.1 交运算 20

3.4.2 加运算 21

3.4.3 减运算 21

3.4.4 分割运算 22

3.4.5 搭接运算 23

3.4.6 互分运算 24

3.4.7 粘接运算 24

3.5 其他建立实体模型的方法 25

3.5.1 移动和复制实体模型 25

3.5.2 质量和惯量的计算 26

3.6 有限元模型 27

3.6.1 节点 27

3.6.2 单元 28

3.7 从 CAD 中导入模型 31

3.7.1 概述 31

3.7.2 CAD 模型的导入 31

3.8 参数化建模 32

3.8.1 参数化建模简介 32

3.8.2 使用参数 33

3.8.3 APDL 中的控制命令 37

第 4 章 网格划分 40

4.1 网格划分概述 40

4.2 定义单元属性 40

4.2.1 定义单元属性表 40

4.2.2 分配单元属性 41

4.3 网格划分工具 41

4.4 单元尺寸控制 42

4.4.1 智能单元尺寸控制 42

4.4.2 人工单元尺寸控制 44

4.4.3 裂纹尖端网格划分控制 48

4.5 网格划分器 49

4.5.1 三角形表面网格划分 49

4.5.2 四边形表面网格划分 50

4.5.3 四面体单元网格划分 50

4.5.4 控制四面体单元的改进 50

4.6 网格划分方法 50





4.6.1 自由网格划分	50	6.6.1 通用选项	82
4.6.2 映射网格划分	51	6.6.2 动力学分析选项	84
4.6.3 体扫描生成网格	54	6.6.3 非线性选项	84
4.7 修改网格	55	6.6.4 输出控制	85
4.7.1 重新划分网格	55	6.7 创建多载荷步文件	85
4.7.2 清除网格	56	6.8 定义接头固定处预拉伸	86
4.7.3 细化局部网格	56	6.8.1 使用 PSMESH 命令	86
第 5 章 耦合和约束方程	57	6.8.2 使用 EINTF 命令	87
5.1 耦合的概念	57	6.8.3 执行拉伸分析的典型过程	87
5.2 定义耦合自由度	57	第 7 章 求解	89
5.2.1 在给定节点处定义并修改耦合 自由度	57	7.1 选择求解器	89
5.2.2 耦合重合节点	57	7.2 求解器的类型	89
5.2.3 定义更多的耦合集	58	7.2.1 波前求解器	89
5.2.4 列表和删除耦合集	58	7.2.2 稀疏矩阵直接解法求解器	90
5.2.5 耦合的注意事项	58	7.2.3 雅可比共轭梯度法求解器	90
5.3 约束方程的定义	59	7.2.4 不完全乔累斯基共轭梯度法 求解器	90
5.4 定义约束方程	59	7.2.5 预条件共轭梯度法求解器	90
5.4.1 直接方法	59	7.2.6 代数多栅求解器	91
5.4.2 修改约束方程	60	7.2.7 分布式求解器	91
5.4.3 直接与自动定义约束方程的对比	61	7.2.8 自动迭代（快速）求解器选项	91
第 6 章 加载	63	7.3 在某些类型结构分析时使用 特殊求解工具	91
6.1 载荷的概念	63	7.3.1 使用简化求解菜单	91
6.2 载荷步、子步和平衡迭代	63	7.3.2 使用求解控制对话框	92
6.3 时间的作用	64	7.4 获得解答	93
6.4 阶跃载荷和斜坡载荷	65	7.5 求解多载荷步	94
6.5 施加载荷的方法	65	7.5.1 使用多步求解法	94
6.5.1 实体模型载荷	65	7.5.2 使用载荷步文件法	94
6.5.2 有限单元载荷	66	7.6 奇异解	95
6.5.3 自由度约束	66	第 8 章 后处理技术	96
6.5.4 施加对称或反对称边界条件	68	8.1 后处理的基本概念	96
6.5.5 施加集中力载荷	69	8.2 结果文件	97
6.5.6 施加压力载荷	71	8.3 后处理可用的数据类型	97
6.5.7 施加结构体载荷——温度	74	8.4 通用后处理器 POST1	97
6.5.8 惯性载荷	77	8.4.1 POST1 概述	97
6.5.9 施加轴对称载荷	78	8.4.2 将数据结果读入数据库	98
6.5.10 施加表格型载荷	79	8.4.3 在 POST1 中观察结果	100
6.5.11 施加函数型载荷	79	8.4.4 POST1 的其他后处理内容	106
6.6 设置载荷步选项	82		

8.5 时间历程后处理器 (POST26)	109	11.2.4 缩减法 (Reduced/Householder) ..	137
8.5.1 时间历程变量观察器	109	11.2.5 非对称法 (Unsymmetric)	137
8.5.2 进入时间历程处理器	111	11.2.6 阻尼法 (Damp)	137
8.5.3 定义变量	111	11.2.7 QR 阻尼法	137
8.5.4 处理变量并进行计算	113	11.3 矩阵缩减技术和主自由度的 选择准则	137
8.5.5 变量的评价	114	11.3.1 矩阵缩减	137
8.5.6 POST26 后处理器的其他功能	115	11.3.2 人工选择主自由度的准则	138
第 9 章 设计 ANSYS 分析方案	117	11.4 模态分析过程	139
9.1 设计分析方案的重要性	117	11.4.1 建模	139
9.2 确定分析目标	117	11.4.2 加载及求解	139
9.3 确定模型类型	117	11.5 扩展模态	142
9.4 确定模型单元	117	11.5.1 注意要点	143
9.4.1 线性插值单元	118	11.5.2 扩展模态	143
9.4.2 二次插值单元	118	11.6 观察结果	144
9.5 不同单元之间的连接	121	11.6.1 观察结果数据的过程	144
9.6 分析中使用对称性	121	11.6.2 选项: 列表显示所有频率	145
9.7 确定模型细节	122	11.6.3 选项: 图形显示变形	145
9.8 确定模型的网格密度	123	11.6.4 选项: 列表显示主自由度	145
第 10 章 结构线性静力分析	124	11.6.5 选项: 线单元结果	145
10.1 静力分析概述	124	11.7 有预应力的模态分析	145
10.2 静力分析的求解步骤	124	11.8 大变形预应力的模态分析	146
10.2.1 建模	124	11.9 实例: 印刷机滚筒的模态 分析	146
10.2.2 设置求解控制	124	11.9.1 工程背景	146
10.2.3 设置其他求解选项	126	11.9.2 问题的描述	146
10.2.4 施加载荷	128	11.9.3 GUI 操作	147
10.2.5 求解	129	第 12 章 谐响应分析	152
10.2.6 检查分析结果	130	12.1 谐响应分析的定义与应用	152
10.3 实例: 阶梯轴施加扭矩和 弯矩	131	12.2 三种求解方法	152
10.3.1 工程背景	131	12.2.1 完全法	152
10.3.2 问题的描述	131	12.2.2 缩减法	152
10.3.3 GUI 操作	132	12.2.3 模态叠加法	153
第 11 章 模态分析	136	12.2.4 三种方法均存在的局限性	153
11.1 模态分析的定义及应用	136	12.3 完全法谐响应分析	153
11.2 模态分析的方法	136	12.3.1 建模	153
11.2.1 分块 Lanczos 法	136	12.3.2 加载并求解	154
11.2.2 子空间法 (Subspace)	136	12.3.3 观察结果	157
11.2.3 Power Dynamics 法	136	12.4 缩减法谐响应分析	158



12.4.1 加载并求得缩减解	158	13.4.4 观察结果	179
12.4.2 观察缩减法求解的结果	159	13.5 随机振动分析结果的应用	181
12.4.3 扩展解	159	13.5.1 随机振动结果与失效计算	181
12.4.4 观察扩展解的结果	161	13.5.2 随机疲劳失效	181
12.5 模态叠加法谐响应分析	162	13.6 DDAM (动力设计分析方法) 谱分析	183
12.5.1 获取模态分析解	162	13.7 多点响应谱 (MPRS) 分析	184
12.5.2 获取模态叠加法谐响应解	162	13.8 实例: 钢架结构厂房的随机 振动分析	184
12.5.3 扩展模态叠加解	163	13.8.1 工程背景	184
12.5.4 观察结果	164	13.8.2 问题的描述	184
12.6 有预应力的完全法谐响应 分析	164	13.8.3 GUI 操作	185
12.6.1 有预应力的完全法谐响应分析	164	第 14 章 瞬态动力学分析	192
12.6.2 有预应力的缩减法谐响应分析	164	14.1 瞬态动力学分析的概念	192
12.6.3 有预应力的模态叠加法谐响应 分析	164	14.2 瞬态动力学分析前的准备 工作	192
12.7 实例: 汽车悬架系统的谐响应 分析	164	14.3 瞬态动力学分析的理论基础	192
12.7.1 工程背景	164	14.4 三种求解方法	193
12.7.2 问题的描述	165	14.4.1 完全法	193
12.7.3 GUI 操作	165	14.4.2 模态叠加法	194
第 13 章 谱分析	169	14.4.3 缩减法	194
13.1 谱分析的定义	169	14.5 完全法瞬态动力学分析	194
13.2 谱的基本概念	169	14.5.1 建造模型	194
13.2.1 响应谱分析	169	14.5.2 建立初始条件	195
13.2.2 动力设计分析方法	169	14.5.3 设置求解控制	197
13.2.3 功率谱密度	170	14.5.4 设置其他求解选项	199
13.2.4 确定性分析与概率分析	170	14.5.5 施加载荷	201
13.3 单点响应谱 (SPRS) 分析 步骤	170	14.5.6 存储当前载荷步的载荷配置	201
13.3.1 建立模型	170	14.5.7 针对每个载荷步重复	201
13.3.2 获得模态解	170	14.5.8 存储数据库备份文件	201
13.3.3 获得谱解	171	14.5.9 开始瞬态求解	201
13.3.4 扩展模态	172	14.5.10 退出求解器	202
13.3.5 合并模态	173	14.5.11 观察结果	202
13.3.6 观察结果	174	14.6 模态叠加法瞬态动力分析	202
13.4 随机振动 (PSD) 分析步骤	176	14.6.1 建造模型	202
13.4.1 扩展模态	176	14.6.2 获取模态解	203
13.4.2 获得谱解	176	14.6.3 获取模态叠加法瞬态分析解	203
13.4.3 合并模态	178	14.6.4 扩展模态叠加解	206
		14.6.5 观察结果	206

14.7 缩减法瞬态动力学分析过程	206	15.5 材料非线性分析	251
14.7.1 获取缩减解	207	15.5.1 塑性理论简介	252
14.7.2 观察缩减法求解的结果	210	15.5.2 常用的非线性材料本构关系 简介	255
14.7.3 扩展处理	210	15.5.3 如何使用塑性	256
14.7.4 观察已扩展解的结果	211	15.6 实例：支撑架特征值屈曲 分析	258
14.8 有预应力瞬态动力学分析	212	15.6.1 工程背景	258
14.8.1 有预应力的完全法瞬态动力学 分析	212	15.6.2 问题的描述	258
14.8.2 有预应力的模态叠加法瞬态 动力学分析	213	15.6.3 GUI 操作	259
14.8.3 有预应力的缩减法瞬态动力学 分析	213	15.7 实例：复合地基沉降的弹塑性 分析	262
14.9 瞬态分析的关键技术细节	213	15.7.1 工程背景	262
14.9.1 积分时间步长选取准则	213	15.7.2 问题的描述	262
14.9.2 自动时间步长	214	15.7.3 GUI 操作	263
14.9.3 阻尼	215	第 16 章 接触分析	267
14.10 实例：路面冲击载荷作用下 汽车的瞬态动力学分析	217	16.1 概述	267
14.10.1 工程背景	217	16.2 接触分类	267
14.10.2 问题的描述	218	16.3 ANSYS 接触分析功能	267
14.10.3 GUI 操作	219	16.3.1 点-点接触	268
第 15 章 非线性分析	227	16.3.2 点-面接触	268
15.1 概述	227	16.3.3 线-面接触	268
15.1.1 结构非线性的概念	227	16.3.4 面-面的接触	268
15.1.2 非线性分析的基本知识	228	16.4 面-面的接触分析	269
15.2 结构非线性分析	230	16.4.1 应用面-面接触单元	269
15.2.1 非线性静态分析步骤	231	16.4.2 建立几何模型并划分网格	269
15.2.2 非线性瞬态分析步骤	237	16.4.3 识别接触对	270
15.2.3 非线性分析的提示	238	16.4.4 指定接触面和目标面	270
15.3 几何非线性	242	16.4.5 定义目标面	271
15.3.1 大应变效应	242	16.4.6 定义柔体的接触面	275
15.3.2 应力与应变	242	16.4.7 设置实常数和单元关键选项	278
15.3.3 小应变大位移	243	16.4.8 控制刚性目标面的运动 （刚体-柔体接触）	290
15.3.4 应力刚化	243	16.4.9 热接触模拟	291
15.3.5 旋转软化	244	16.4.10 为柔体单元施加必要的边界 条件	294
15.4 屈曲分析	244	16.4.11 定义求解和载荷步选项	294
15.4.1 屈曲分析的类型	244	16.4.12 求解	295
15.4.2 非线性屈曲分析	245	16.4.13 观察结果	296
15.4.3 特征值（线性）屈曲分析	247		



16.5 实例：薄钢板冲压分析	297	19.2.1 符号与单位	333
16.5.1 工程背景	297	19.2.2 热分析经典理论回顾	333
16.5.2 问题的描述	297	19.2.3 热传递的方式	334
16.5.3 GUI 操作	298	19.2.4 稳态热分析	334
第 17 章 复合材料	304	19.2.5 瞬态热分析	334
17.1 复合材料的相关概念	304	19.2.6 热辐射	335
17.2 建立复合材料模型	304	19.2.7 线性与非线性	336
17.2.1 选择合适的单元类型	304	19.2.8 边界条件和初始条件	336
17.2.2 定义材料的叠层结构	305	19.2.9 热分析误差估计	336
17.2.3 定义失效准则	307	19.3 稳态热分析	336
17.2.4 应遵循的建模和后处理规则	308	19.3.1 稳态热分析的概念	336
17.3 实例：复合材料传动轴的失效分析	310	19.3.2 热分析的单元	336
17.3.1 工程背景	310	19.3.3 稳态热分析的步骤	337
17.3.2 问题的描述	310	19.3.4 建模	337
17.3.3 GUI 操作	310	19.3.5 施加载荷和求解	338
第 18 章 断裂力学分析	315	19.3.6 后处理	342
18.1 断裂分析基础	315	19.4 瞬态热分析	343
18.1.1 断裂模式	315	19.4.1 瞬态热分析的定义	343
18.1.2 断裂力学参数	315	19.4.2 瞬态热分析中使用的单元和命令	343
18.2 断裂力学模型的建立	317	19.4.3 瞬态热分析的步骤	343
18.2.1 裂纹尖端区域建模	317	19.4.4 建模	343
18.2.2 计算断裂参数	318	19.4.5 施加载荷和求解	344
18.3 ANSYS 断裂力学参数数值计算	319	19.4.6 后处理	349
18.3.1 J 积分计算	319	19.4.7 相变问题	349
18.3.2 应力强度因子计算	322	19.5 表面效应单元	349
18.4 实例：弹塑性焊接接头的 J 积分计算	325	19.5.1 简介	349
18.4.1 工程背景	325	19.5.2 表面效应单元的应用	350
18.4.2 问题的描述	325	19.5.3 设置表面效应单元	350
18.4.3 GUI 操作	326	19.5.4 创建表面效应单元	351
第 19 章 热分析	332	19.6 热应力分析	352
19.1 热分析概述	332	19.6.1 热应力分析的分类	352
19.1.1 热分析的目的	332	19.6.2 间接法进行热应力分析的步骤	352
19.1.2 ANSYS 中的热分析	332	19.7 实例：多芯片组件热分析	353
19.1.3 热分析的类型	332	19.7.1 工程背景	353
19.1.4 耦合场分析	333	19.7.2 问题的描述	353
19.2 基础知识	333	19.7.3 GUI 操作	354
		第 20 章 边坡稳定性分析	358
		20.1 边坡稳定性分析概述	358

20.1.1 边坡稳定性研究概况	358	22.4 界面单元的家族	374
20.1.2 边坡稳定性分析的研究方法	358	22.4.1 单元选择	374
20.2 稳定安全系数的计算	359	22.4.2 应用	375
20.2.1 计算的主要方法	359	22.5 材料性质的定义	375
20.2.2 强度折减法的计算原理	359	22.5.1 材料的特点	375
20.2.3 颗粒状材料（混凝土、岩石 和土壤）的 4 种屈服准则	360	22.5.2 数据输入格式	376
20.2.4 屈服准则在 ANSYS 中的 实现	361	22.5.3 与温度相关的数据	378
20.2.5 采用折减系数法计算边坡稳定 系数	361	22.5.4 画出衬垫数据曲线	379
20.3 实例：确定边坡安全系数	361	22.6 划分界面单元	380
20.3.1 工程背景	361	22.7 求解过程和结果的输出	381
20.3.2 问题的描述	362	22.8 观察结果	382
20.3.3 GUI 操作	362	22.9 实例：螺栓预紧法兰盘衬垫 分析	382
第 21 章 界面开裂与失效模拟	365	22.9.1 工程背景	382
21.1 界面开裂的分析	365	22.9.2 问题的描述	382
21.2 模拟开裂的界面单元	365	22.9.3 GUI 操作	383
21.2.1 单元的定义	366	第 23 章 齿轮分析	391
21.2.2 单元的选择	366	23.1 概述	391
21.3 定义材料属性	366	23.2 齿轮模型的术语	391
21.3.1 材料的特点	366	23.3 渐开线直齿齿轮模型的建立	393
21.3.2 材料常数	366	23.3.1 渐开线的生成原理	393
21.4 网格划分和定义边界条件	367	23.3.2 创建渐开线曲线	393
21.4.1 网格划分	367	23.3.3 生成齿根过渡曲线	394
21.4.2 边界条件	367	23.3.4 生成完整齿廓线	394
21.5 求解过程和结果的输出	367	23.3.5 生成完整齿轮面	394
21.6 观察结果	368	23.4 实例：多齿轮动态接触分析	394
21.7 实例：功能梯度材料界面开裂 分析	368	23.4.1 工程背景	394
21.7.1 工程背景	368	23.4.2 问题的描述	394
21.7.2 问题的描述	368	23.4.3 GUI 操作	395
21.7.3 GUI 操作	369	第 24 章 转子动力学分析	403
第 22 章 衬垫连接模拟	373	24.1 概述	403
22.1 引言	373	24.1.1 通用动力学方程	403
22.2 执行单元组件分析	373	24.1.2 有限单元法模拟转子动力学的 优点	403
22.3 衬垫单元的构造	373	24.2 转子动力学分析工具	404
22.3.1 单元的拓朴布局	374	24.2.1 常用的命令	404
22.3.2 厚度方向	374	24.2.2 常用的单元	404
		24.2.3 常用的术语	404
		24.3 建立转子动力学模型	406



24.3.1 建立模型	406	25.6.4 边界换热系数	427
24.3.2 建立轴承模型	407	25.6.5 相变潜热	428
24.3.3 建立模型的其他部件	409	25.7 ANSYS 焊接模拟过程	428
24.4 施加载荷和约束	410	25.7.1 焊接过程温度场模拟分析	428
24.5 求解转子动力学问题	410	25.7.2 焊接过程应力应变场的模拟分析	430
24.5.1 添加阻尼	411	25.8 实例：三维平板堆焊焊接的残余应力分析	431
24.5.2 指定旋转速度并考虑陀螺效应	411	25.8.1 工程背景	431
24.5.3 求解随后预应力结构坎贝尔分析	411	25.8.2 问题的描述	432
24.5.4 求解承受同步或不同步力的谐响应问题	411	25.8.3 GUI 操作	433
24.5.5 选择合适的求解器	412	第 26 章 优化设计	441
24.6 转子动力学的后处理	413	26.1 优化设计的基本概念	441
24.6.1 处理复数结果	413	26.2 优化设计的步骤	442
24.6.2 观察运动轨迹	414	26.2.1 生成分析文件	442
24.6.3 输出轨迹特性	414	26.2.2 建立优化过程中的参数	444
24.6.4 动画显示轨迹	415	26.2.3 指定分析文件 (OPT)	445
24.6.5 完成瞬态分析后观察轨迹	415	26.2.4 声明优化变量	446
24.6.6 后处理轴承和反力	415	26.2.5 选择优化工具或优化方法	446
24.6.7 坎贝尔图	416	26.2.6 指定优化循环控制方式	447
24.7 实例：转子-轴承系统的临界转速计算	416	26.2.7 进行优化分析	448
24.7.1 工程背景	416	26.2.8 查看设计序列结果	449
24.7.2 问题的描述	416	26.2.9 操作设计序列	449
24.7.3 GUI 操作	417	26.2.10 多层优化计算	450
第 25 章 焊接工程问题分析	423	26.3 优化技术	451
25.1 焊接工程的意义	423	26.3.1 零阶方法	451
25.2 焊接过程有限元分析的特点	423	26.3.2 一阶方法	453
25.3 焊接过程有限元模型的简化	424	26.3.3 随机搜索法	454
25.4 焊接温度场的分析理论	424	26.3.4 等步长搜索法	454
25.4.1 焊接过程的有限元基本方程	424	26.3.5 乘子计算法	454
25.4.2 非线性瞬态热传导的有限元分析	424	26.3.6 最优梯度法	454
25.5 焊接应力和变形的分析理论	425	26.4 选择优化变量注意事项	454
25.6 计算模型	425	26.4.1 选择设计变量	454
25.6.1 焊接热源模型	425	26.4.2 选择状态变量	455
25.6.2 热源模型的选取	427	26.4.3 选择目标函数	455
25.6.3 材料物理性能参数的影响	427	26.5 实例：高速转盘的 dynamics 优化设计	456
		26.5.1 工程背景	456
		26.5.2 问题的描述	456

26.5.3 GUI操作.....	457	29.4.1 选择自适应性.....	488
第 27 章 拓扑优化	462	29.4.2 通过用户子程序定制 ADAPT 宏.....	488
27.1 拓扑优化的基本概念.....	462	29.4.3 定制 ADAPT 宏.....	490
27.2 拓扑优化的步骤.....	462	29.5 自适应网格划分的注意事项.....	490
27.2.1 定义拓扑优化问题.....	462	29.6 实例：应力集中模型的自适应 计算.....	491
27.2.2 选择单元类型.....	462	29.6.1 工程背景.....	491
27.2.3 指定优化和非优化的区域.....	462	29.6.2 问题的描述.....	491
27.2.4 定义载荷.....	463	29.6.3 GUI 操作.....	492
27.2.5 定义和控制优化过程.....	464	第 30 章 可靠性分析	494
27.2.6 查看结果.....	470	30.1 基于有限元的概率设计简介.....	494
27.3 实例：自行车车架的拓扑 优化.....	470	30.2 可靠性分析术语.....	495
27.3.1 工程背景.....	470	30.3 随机输入参数类型.....	496
27.3.2 问题的描述.....	471	30.3.1 高斯正态分布.....	496
27.3.3 GUI 操作.....	471	30.3.2 截断高斯分布.....	497
第 28 章 疲劳分析	474	30.3.3 对数正态分布.....	497
28.1 疲劳的基本概念.....	474	30.3.4 三角分布.....	498
28.1.1 ANSYS 程序处理疲劳问题的 过程.....	474	30.3.5 均匀分布.....	498
28.1.2 基本术语.....	474	30.3.6 指数分布.....	498
28.2 疲劳分析的步骤.....	475	30.3.7 Beta 分布.....	499
28.2.1 进入 POST1 和恢复数据库.....	475	30.3.8 伽玛分布.....	499
28.2.2 建立疲劳计算的规模、材料 疲劳性质和疲劳计算的位置.....	475	30.3.9 威布尔分布.....	499
28.2.3 储存应力、指定事件循环次数 和比例因子.....	476	30.4 概率设计方法.....	500
28.2.4 激活疲劳计算.....	481	30.4.1 蒙特卡罗模拟技术.....	500
28.2.5 查看计算结果.....	481	30.4.2 响应面法.....	502
28.3 实例：压力容器的疲劳分析.....	481	30.5 实例：路基可靠性分析.....	504
28.3.1 工程背景.....	481	30.5.1 工程背景.....	504
28.3.2 问题的描述.....	482	30.5.2 问题的描述.....	505
28.3.3 GUI 操作.....	482	30.5.3 GUI 操作.....	505
第 29 章 自适应网格划分	487	附录	511
29.1 网格自适应划分的概念.....	487	附录 A 获取函数.....	511
29.2 自适应网格划分的先决条件.....	487	附录 B ANSYS 有限元网格划分的 基本原则.....	513
29.3 自适应网格划分的基本过程.....	487	附录 C 有限元收敛速度和精确 估计.....	516
29.4 修改基本过程.....	488		

第1章 绪论



1.1 有限单元法概述

有限单元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个, 且按一定方式相互连接在一起的单元的组合物。由于单元能按不同的连接方式进行组合, 且单元本身又可以有不同形状, 因此可以对复杂的模型进行求解。有限单元法作为数值分析方法的另一个重要特点是利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个节点的数值和其插值函数来表达。这样一来, 在一个问题的有限元分析中, 未知场函数或其导数在各个节点上的数值就成为了新的未知量, 从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量, 就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值, 从而得到整个求解域上的近似解。显然, 随着单元数目的增加 (即单元尺寸的缩小), 或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高, 解的近似程度将不断改进。如果单元是满足收敛要求的, 近似解最后将收敛于精确解。

目前, 有限单元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题, 由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力问题和波动问题; 分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等, 从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域; 在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到优化设计, 并和计算机辅助设计技术相结合。

1.2 ANSYS基本原理

1.2.1 ANSYS计算中的基本方程

1. 应力分量

弹性体在载荷作用下, 体内任意一点的应力状态可由 6 个应力分量 σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} 来表示。其中, σ_x , σ_y , σ_z 为正应力; τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} 为剪切应力。应力分量的正负号规定如下: 如果某一个面的外法线方向与坐标轴的正方向一致, 这个面上的应力分量就以沿坐标轴正方向为正, 沿坐标轴负方向为负; 相反, 如果某一个面的外法线方向与坐标轴的负方向一致, 这个面上的应力分量就以沿坐标轴负方向为正, 沿坐标轴正方向为负。应力分量及其正方向见图 1-1。

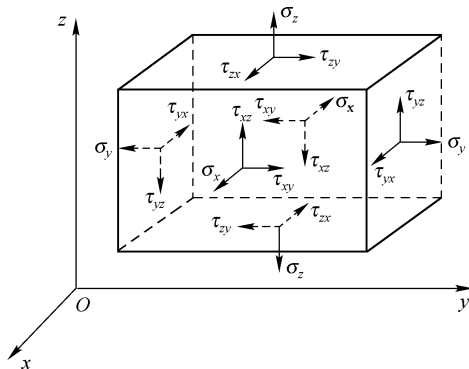


图 1-1 应力与应变分量



2. 几何方程

在微小位移和微小变形的情况下，略去位移导数的高阶项，则应变分量和位移向量间的几何关系有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

该方程描述了小变形条件下的位移和应变的关系。

3. 本构方程

ANSYS 结构分析的线弹性问题应力-应变关系也称做材料的本构方程：

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (1-2)$$

式中， $\{\sigma\}$ 为应力分量，即 $(\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz})^T$ ，在 ANSYS 软件中以 S 代替； $[D]$ 为弹性矩阵、弹性刚度矩阵或应力-应变矩阵，与软件输入的弹性模型和泊松比有关； $\{\varepsilon^{el}\}$ 为弹性应变矢量，在 ANSYS 中以 $EPEL$ 形式输出。

1.2.2 ANSYS 计算的基本方法

ANSYS 计算的基本方法如图 1-2。

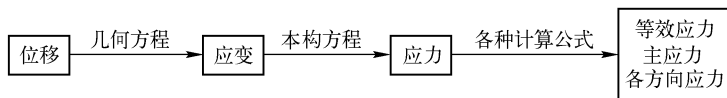


图 1-2 ANSYS 计算的基本方法

ANSYS 在结构分析中以位移作为未知量把微分方程离散为代数方程组并借助其强大的求解器来求解。因此，位移在软件中是基本解，然后根据几何方程可以计算出应变，这就致使应变的计算精度比位移低一个等级。再根据本构方程可以求得应力分量，得到这些应力分量后再利用等效应力和主应力的计算公式，即可得到其等效应力、主应力和各方向应力，这些计算结果为校核结构的强度提供了依据。

1.2.3 ANSYS计算的基本流程

1. 分析模型

在开始有限元计算前, 需要对计算的工程问题进行认真的分析。这其中包括: 模型的简化, 能否忽略几何不规则性, 能否把三维问题简化为平面问题; 能否把一些载荷看做集中载荷; 能否把某些支撑看做固定的; 判断模型材料的应力-应变关系, 即采用线性材料分析还是非线性材料分析等。

2. 选择单元

根据分析的结果选择满足条件的单元。例如, 如果通过分析模型得出模型为三维结构问题并考虑其材料的非线性, 那么在选择单元时就要选择三维单元, 如 SOLID185 或 SOLD186 等。

3. 定义材料常数

根据是否考虑材料的非线性进行定义。如果材料为线弹性, 则只需输入弹性模量和泊松比; 如果材料为弹塑性, 则还需要输入屈服应力和切线模量。ANSYS 的材料模型库可以模拟多种材料, 包括金属、混凝土、橡胶等。

4. 建立模型

ANSYS 中有四种建立模型的方法, 即实体建模、有限元建模、从其他 CAD 软件中导入和参数化建模。前三种建模方法适用于除优化设计、可靠性分析的各种分析。

5. 网格划分

ANSYS 中主要有两种网格划分方法, 即自由网格划分和映射网格划分。自由网格划分的成功率高, 但在动力学计算中精度稍差, 具体采用哪种方法, 应根据需要进行选择。

6. 确定分析类型

选择需要的分析类型, 如静力学分析、模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析、特征值屈曲分析, 以及子结构分析等。

7. 施加边界条件

根据模型的实际工况定义边界条件, 如对称边界、完全约束等。

8. 求解

用户在完成以上操作后, 就进入求解阶段。ANSYS 有直接求解、载荷步求解和自适应求解方法, 可根据需要适时选择。

9. 后处理

用户可以使用两种后处理方法: 观察结果或校核计算结果是否符合工程结构设计要求。如果满足要求, 则保存结果; 如果不满足要求, 则需要修改模型并重新计算, 直到符合要求为止。

1.3 ANSYS 13.0 简介与基本使用

作为一个大型的 CAE 分析软件, ANSYS 自 20 世纪 70 年代诞生以来, 随着计算机和有限元理论的发展, 在各个领域得到了广泛的应用。随着版本的更新, 分析能力和各项操作功能都得到了更好的完善和发展。经过 30 多年的发展, ANSYS 已经升级到 13.0 版本。



ANSYS 公司把 ANSYS, 也就是通常称之为 ANSYS Classic 的软件, 重命名为 Mechanical APDL, 并将其作为一个模块, 置入协同仿真 “Workbench” 界面下。本书主要介绍 Mechanical APDL。

1.3.1 软件功能简介

Mechanical APDL 主要包括三个部分: 前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具, 用户可以方便地构造有限元模型; 分析计算模块包括结构分析、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析, 可模拟多种物理介质的相互作用, 具有跌落分析、拓扑优化、优化分析、多目标优化模块及可靠性分析能力; 后处理模块包括通用后处理模块和时间历程后处理模块。其中, 通用后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示等图形方式显示出来; 时间历程后处理模块可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 200 多种的单元类型, 用来模拟工程中的各种结构和材料。

1.3.2 前处理模块

双击主菜单 (Main Menu) 中的 “Preprocessor”, 进入 ANSYS 的前处理模块。这个模块包括 15 个子模块, 常用的有 6 个子模块, 分别为单元类型、实常数、材料特性、模型截面、建立模型, 以及网格划分。在前处理模块中进行的主要的工作也是在这 6 个模块中完成的, 这些工作分别是定义单元、定义单元实常数、定义单元材料常数, 如选用梁单元、壳单元时要定义模型截面, 建立模型和网格划分。

1.3.3 分析计算模块

在前处理模块中完成建模和网格划分以后, 用户可以在分析计算获得分析结果。单击快捷工具区 (Toolbar) 的 “SAVE_DB”, 将前处理模块生成的模型存盘, 退出 “Preprocessor”, 单击实用菜单中的 “Solution”, 进入分析计算模块。在该模块, 用户可以定义分析类型、定义载荷和载荷步选项, 然后开始求解。

ANSYS 软件提供了如下分析类型。

(1) 结构静力分析

结构静力分析用于求解模型在不随时间变化的外载荷作用下的位移、应变和应力等。结构静力分析可以求解线性问题和非线性问题, 如材料非线性、几何非线性和状态非线性问题。

(2) 结构动力学分析

结构动力学分析用于求解模型在随时间变化的载荷作用下的位移, 应变和应力等。结构动力学分析可以考虑阻尼和惯性的影响。分析类型包括模态分析、谐响应分析、谱分析和瞬态动力学分析, 在 ANSYS 13.0 中增强了对转子动力学和多刚体动力学的求解能力。

(3) 热分析

热分析能够计算热传递的三种基本类型: 传导、对流和辐射。热分析功能能够对这三种类型问题进行线性和非线性、稳态和瞬态分析。热分析还可以模拟材料固化和熔解过程的相

变问题以及模拟热-结构耦合问题。

(4) 电磁场分析

电磁场分析主要用于电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等电磁场问题的分析；还可用于调节器、螺线管、发电机、磁体、变换器、电解槽、加速器及无损检测装置等的设计和分析领域。

(5) 流体动力学分析

流体动力学分析主要用于模拟计算流体的瞬态或稳态问题，计算结果为每个节点的压力和通过每个单元的流率。用户可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。流体动力学分析允许用户使用三维表面效应单元和热-流管单元模拟结构的流体绕流问题。

(6) 声场分析

声场分析功能用于分析浸在流体中的固体结构的动态特性和研究在含有流体的介质中声波的传播问题。

(7) 压电分析

压电分析用于分析二维或三维结构对交流、直流或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析类型可用于谐振器、麦克风、换热器、振荡器等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。压电分析可进行四种类型的分析：模态分析、静态分析、瞬态响应分析和谐波响应分析。

1.3.4 后处理模块

ANSYS 软件的后处理过程包括两个部分：通用后处理模块 POST1 和时间历程后处理模块 POST26。通过用户界面，可以很容易获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果可能包括位移、应变、应力、温度、速度和热流等，输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

(1) 通用后处理模块 POST1

单击主菜单中的“General Postproc”选项即可进入通用后处理模块。这个模块对前面的分析结果能以图形形式显示和输出。例如，计算结果为应力，在模型上的变化情况可用等值线图表示，不同的等值线颜色代表不同的应力值。

(2) 时间历程响应后处理模块 POST26

单击主菜单中的“TimeHist Postpro”选项即可进入时间历程响应后处理模块。这个模块用于检查在一个时间段或子步历程中的结果，如节点位移、应力或支反力。这些结果能通过绘制曲线或列表查看。绘制一个或多个变量随频率或其他量变化的曲线，有助于形象地表示分析结果。另外，POST26 还可以进行曲线的代数运算。



第 2 章 坐标系和工作平面

2.1 坐标系

2.1.1 坐标系简介

ANSYS 软件提供了如下几种坐标系供用户选取。

- 总体和局部坐标系：用于定位几何形状参数，如节点、关键点等的空间位置。
- 显示坐标系：用于几何形状参数的列表和显示。
- 节点坐标系：用于定义每个节点的自由度方向和节点结果数据的方向。
- 单元坐标系：用于确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。
- 结果坐标系：用于列表、显示或在通用后处理操作中将计算结果转换到一个特定的坐标系中。

2.1.2 坐标系的定义

1. 总体坐标系

总体坐标系被认为是一个绝对的参考系。ANSYS 软件提供了前面定义的三种总体坐标系，即笛卡儿坐标、柱坐标和球坐标系，如表 2-1 所示。

表 2-1 总体坐标系

总体坐标系类型	笛卡儿坐标系	柱坐标系	球坐标系	柱坐标系
总体坐标系简图				
总体坐标系编号	0 (C.S.0)	1 (C.S.1)	2 (C.S.2)	5 (C.S.5)
激活命令	CSYS,0	CSYS,1	CSYS,2	CSYS,5

注意：这三种坐标系都是右手系，且由定义可知，它们有共同的原点。它们由其坐标系编号来识别：0 是笛卡儿坐标系，1 是柱坐标系，2 是球坐标系，5 是柱坐标系；0 的坐标分量为 X 、 Y 和 Z ；1 的坐标分量为 R 、 θ 和 Z ；2 的坐标分量为 R 、 θ 和 φ ；5 的坐标分量为 R 、 θ 和 Y 。

2. 局部坐标系

有时需要建立自己的坐标系，如在断裂力学求解应力强度因子时，局部坐标系的原点应

与总体坐标系的原点偏移一定距离或旋转一定角度。用户可按以下方式定义局部坐标系。

用户可以在 ANSYS 进程中的任何阶段建立、删除和局部坐标系。

(1) 定义局部坐标系

1) 使用总体笛卡儿坐标定义局部坐标系。

命令: LOCAL

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

2) 通过已有节点定义局部坐标系。

命令: CS

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

3) 通过已有关键点定义局部坐标系。

命令: CSKP

GUI: Utility Menu | WorkPlane | LocalCoordinateSystems | CreateLocal CS | By 3 Keypoints

4) 以当前定义的工作平面的原点为中心定义局部坐标系。

命令: CSWPLA

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

5) 通过激活的坐标系由“CLOCAL”命令定义局部坐标系。

当用户定义了一个局部坐标系后，它就会被激活。创建了局部坐标系后，程序会分配给它一个坐标系编号（必须大于或等于 11）。

(2) 删除一个局部坐标

命令: CSDELE

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

(3) 查看所有的总体和局部坐标系

命令: CSLIST

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

与三个预定义的总体坐标系类似，局部坐标系可以是笛卡儿坐标系、柱坐标系或球坐标系，但是局部坐标系的编号要大于或等于 11。

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

3. 显示坐标系

因为显示坐标系默认为总体笛卡儿坐标系，所以即使是在其他坐标系中定义的节点和关键点，其列表都在总体笛卡儿坐标中显示。用户可用下列方法改变当前的显示坐标系。

命令: DSYS, KCN

说明：KCN 为坐标系参考号，0 为笛卡儿坐标系，1 为柱坐标系，2 为球坐标系，也可以为之前定义过的坐标系编号。





GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Display CS to | Global Cartesian/ Global Cylindrica/ Global Spherica/ Specified Coord Sys

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

4. 节点坐标系

总体和局部坐标系用于几何体的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，默认情况下，节点坐标系平行于总体笛卡儿坐标系。可用下列方法将任意节点坐标系旋转到指定方向：

1) 将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向。

命令: NROTAT

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

2) 对已有节点指定旋转角度。

命令: NMODIF

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

3) 按方向余弦旋转节点坐标系。

命令: NANG

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

4) 列出节点坐标系相对总体笛卡儿坐标旋转的角度。

命令: NLIST

GUI: Utility Menu | List | Nodes

5. 单元坐标系

每个单元都有它自己的坐标系。单元坐标系用于规定正交材料的方向、加面压力和结果的输出方向。所有的单元坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则。

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

然而，并非所有的单元坐标系都符合上述规则。许多单元类型都有单元关键字选项，通过设置这些选项可以修改单元坐标系的默认方向，对面单元和体单元而言，也可以按如下方法将单元坐标系的方向调整到已定义的局部坐标系上。

命令: ESYS

GUI: Main Menu | Preprocessor | Attributes | Define | Default Attribs

如果既用了单元关键字 KEYOPT 命令，又用了单元坐标系 ESYS 命令，则单元关键字 KEYOPT 命令的定义有效。对某些单元而言，通过输入角度可相对先前的方向进一步旋转。

6. 结果坐标系

在求解的过程中，计算的结果数据包括位移，梯度，应力，应变等。这些数据存储在数

数据库和结果文件中，要么是在节点坐标系，要么是在单元坐标系中。但结果数据通常是旋转到激活的结果坐标系中显示、列表和单元表数据存储的。

用户可将活动的结果坐标系转到另一个坐标系（如总体柱坐标系或一个局部坐标系），或转到在求解时所用的坐标系下（如节点和单元坐标系）。如果使用用户列表或显示、操作这些结果数据，则它们将首先被旋转到结果坐标系下。如图 2-1 所示。利用下列方法即可改变结果坐标系。

命令：RSYS

GUI: Main Menu | General Postproc | Options for Output



图 2-1 输出选项

2.1.3 坐标系的激活

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

命令：CSYS

GUI: Utility Menu | Change Active CS to | Global Cartesian

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

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

2.2 工作平面

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



2.2.1 工作平面的定义

进入 ANSYS 程序时, 有一个默认的工作平面, 即总体笛卡儿坐标系的 X - Y 平面。工作平面的 X 轴和 Y 轴分别取为总体笛卡儿坐标系的 X 轴和 Y 轴。

1. 定义工作平面

1) 由三点定义一个工作平面。

命令: WPLANE

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

2) 由三节点定义一个工作平面。

命令: NWPLAN

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

3) 由三关键点定义一个工作平面。

命令: KWPLAN

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

4) 将指定线上的点的垂直于视向量的平面定义为工作平面。

命令: LWPLAN

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

5) 通过现有坐标系的 X - Y 平面定义工作平面。

命令: WPCSYS

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

2. 控制工作平面的显示和样式

命令: WPSTYL,STAT

说明: 该命令用于获得工作平面的状态。

GUI: Utility Menu | List | Status | Working Plane

要将工作平面重置为默认状态下的位置和样式, 可以利用命令 WPSTYL, DEFA。

2.2.2 工作平面的操作

1. 移动工作平面

用户可利用下列方法将一个工作平面移到新的位置。

1) 将工作平面的原点移动到关键点的中间位置。

命令: KWPAVE

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

2) 将工作平面的原点移动到节点的中间位置。

命令: NWPAVE

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

3) 将工作平面的原点移动到指定点的中间位置。

命令: WPAVE

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

4) 偏移工作平面。

命令: WPOFFS

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

2. 工作平面的旋转

用户可用两种方式将工作平面旋转到一个新的方向: 在工作平面内旋转工作平面的 X 轴或 Y 轴或使整个工作平面都旋转到一个新的位置。要旋转工作平面, 可利用如下方法。

命令: WPROTA

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

3. 还原一个已定义的工作平面

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

1) 在工作平面的原点创建局部坐标系

命令: CSWPLA

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

2) 用局部坐标系还原一个已定义的工作平面

命令: WPCSYS

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

2.2.3 工作平面的增强功能

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

命令: CSYS

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

1. 捕捉增量

如果没有捕捉增量功能, 在工作平面上将光标定位到已定义的点上将是一件非常困难的事。为了能精确地拾取, 可用 WPSTYL 命令或 GUI 建立捕捉增量功能。一旦建立了捕捉增量, 拾取点将定位在工作平面上最近的捕捉点, 如图 2-2 所示。数学上表示如下, 当光标在区域

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

对任意正整数 N, 拾取点的 X 坐标为:

$$X_p = N * \text{SNAP}.$$

在工作平面坐标系中的 X, Y 坐标的捕捉增量相同, 捕捉增量也可以显示成方框, 拾取到方框里的点将定位于方框的中心。

2. 显示栅格

可以在屏幕上建立栅格来帮助用户观察工作平面上的位置和方向。栅格的间距、状况和边界可由“WPSTYL”命令来设定。不带参量的 WPSTYL 命令可以控制栅格在屏幕上打开和关闭。

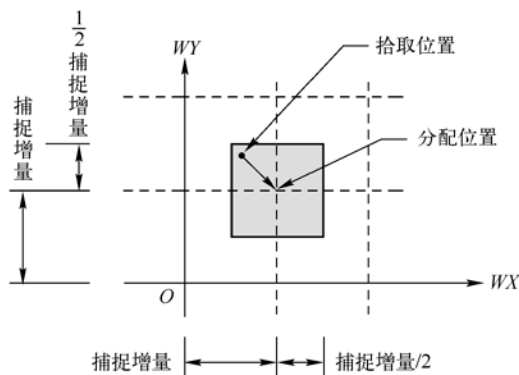


图 2-2 捕捉增量

3. 恢复容差

需拾取的图元可能不是精确地在工作平面上，而是在工作平面附近的。这时，通过“WPSTYL”命令或 GUI 路径可以指定恢复容差，在此容差内的图元将被认为是在工作平面上的。这种容差就如同在恢复拾取时，给了工作中的一个厚度。

4. 坐标系类型

有两种可选的工作平面：笛卡儿坐标系工作平面和极坐标系工作平面。一般情况下使用笛卡儿工作平面，但当几何体容易在极坐标系中表述时可能会用到极坐标工作平面。在极坐标系工作平面中的拾取操作与在笛卡儿坐标系工作平面中的操作是一致的。对捕捉参数进行定位的栅格点的标定是通过指定待捕捉点之间的径向距离和角度来实现的。

5. 工作平面的轨迹

如果用户在与坐标系重合在一起的工作平面定义几何体，可能发现工作平面坐标系是完全分离的。例如：用户将工作平面从默认位置移开，然后想要在新的工作平面的原点用键盘输入定义一个关键点会发现关键点落在坐标系的原点而不是工作平面的原点。

如果用户想强迫激活的坐标系在建模时跟着工作平面一起移动，可以在用 CSYS 命令或 GUI 路径时利用一个选项来自动完成。命令 CSYS, WP 或 CSYS, 4 将迫使激活的坐标系与工作平面有相同的类型和相同的位置。如果改变所用工作平面的类型，坐标系也将相应更新。例如，当用户将工作平面从笛卡儿坐标系转为极坐标系时，激活的坐标系也将从笛卡儿坐标系转到柱坐标系。

第3章 建立模型



在 ANSYS 中建立模型的方法主要有四种，即建立实体模型、建立有限元模型、从 CAD 软件进行模型的导入以及参数化建模。布尔操作、移动和复制方法是建立模型的辅助方法。下面将分别予以详细讲解。

3.1 建立实体模型的方法

建立实体模型的方法主要有以下两种。

自下向上建模：在建立实体模型时，首先定义关键点，再利用这些关键点定义较高级的实体图元（如线、面和体），这就是所谓的自下向上的建模方法，如图 3-1 所示。一定要牢记的是自下向上构造的有限元模型是在当前激活的坐标系内定义的。

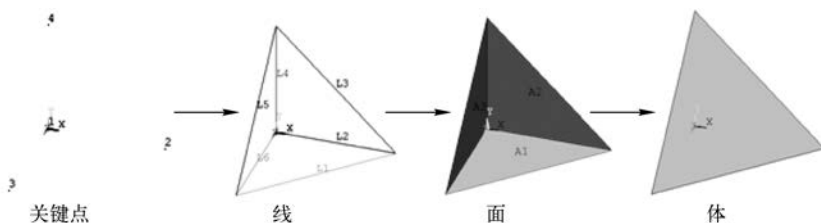


图 3-1 自下向上构造模型

自上向下建模：在建立实体模型时，一开始就从较高级的实体图元构造模型的方法就是所谓的自上向下的建模方法，如图 3-2 所示。

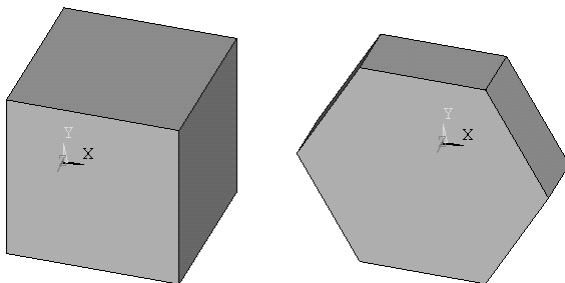


图 3-2 自上向下构造模型

用户可以根据需要自由地组合自下向上和自上向下的建模技术。

注意：几何元素是在工作平面内创建的，而自下向上的建模技术是在激活的坐标系上定义的。如果用户混合使用这两种技术，那么应该考虑使用 CSYS 和 WP 命令强迫坐标系跟随工



作平面变化。建议不要在环坐标系中进行实体建模操作，因为会生成用户不想要的面或体。

使用布尔运算：可以使用求交、相减或其他布尔运算修改实体模型。使用布尔运算用户可直接用较高级的图元生成复杂的形体，如图 3-3 所示。布尔运算对于通过自下向上或自上向下方法生成的图元均有效。

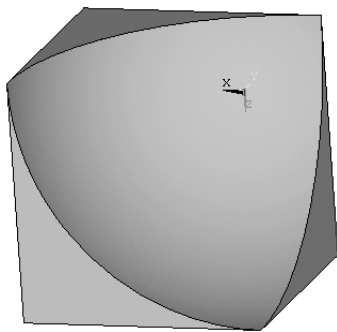


图 3-3 使用布尔运算生成复杂形体

拖拉或旋转：布尔运算虽然很方便，但需耗费较多的计算时间。在构造模型时，如果使用拖拉或旋转的方法建模，往往可以节省计算时间，提高效率，如图 3-4 所示。

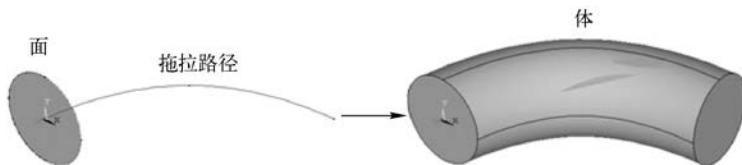


图 3-4 使用拖拉由面定义体

移动和复制实体模型：一个复杂的面或体在模型中重复出现时仅需要构造一次。之后可以使用移动或复制操作把模型移至指定位置。用户会发现，在方便之处生成几何元素再将其移动到所需之处，这样往往比直接改变工作平面生成所需元素更方便，如图 3-5 所示。

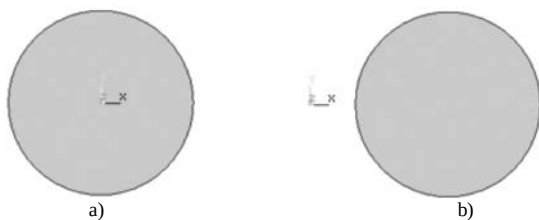


图 3-5 移动一个面

a) 初始位置 b) 移动后的位置

修改模型：在修改模型时，用户需要知道实体模型和有限元模型中图元的层次关系。不能删除依附于较高级图元上的低级图元。例如，不能删除已划分了网格的体，也不能删除依附于面上的线等。若一个实体已加加载荷，删除或修改该实体，附加在该实体上的载荷也将从数据库中删除。图元间的层次关系如图 3-6 所示。

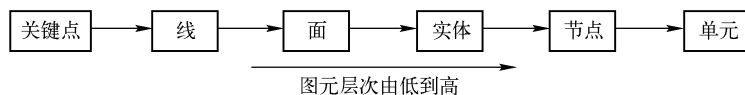


图 3-6 图元间的层次关系

3.2 自下向上建模

3.2.1 关键点

使用自下向上的方法建立模型时，首先定义最低级的图元——关键点。关键点是在当前激活的坐标系内定义的。用户不必总是按从低级到高级的办法定义所有的图元来生成高级图元，可以直接在它们的顶点由关键点来直接建立面和体。中间的图元需要时可自动生成。

1. 定义关键点

1) 在当前激活的坐标系下定义关键点。

命令: K

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

2) 在已知线上给定位置定义关键点

命令: KL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | On Line

2. 从已有关键点定义关键点

一旦用户定义了初始形式的关键点，可以利用下列方法定义另外的关键点。

1) 在已有两关键点之间定义新关键点。

命令: KBETW

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP between KPs

2) 在两个关键点之间定义多个关键点。

命令: KFILL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Fill between KPs

3.2.2 硬点

实际上，硬点是一种特殊的关键点。用户可利用硬点施加载荷，也可以从模型线和面上的任意点获得数据。硬点不改变模型的几何形状和拓扑结构。虽然大多数关键点命令如 FK、KLIST 和 KSEL 等都适用于硬点，但是硬点有自己的命令集和 GUI 中的部分。

1. 定义硬点

1) 在已有线上定义硬点。

命令: HPTCREATE, LINE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on line | Hard PT by ratio

2) 在已有面上定义硬点。



命令: HPTCREATE, AREA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on area | Hard

PT by ratio

2. 选择硬点

1) 选择硬点。

命令: KSEL

GUI: Utility Menu | Select | Entities

2) 选择线上的硬点。

命令: LSEL

GUI: Utility Menu | Select | Entities

3.2.3 线

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

1. 定义线

对已确定需要明确地定义线的情况，可适当地选用下列方法。

1) 在两指定关键点之间生成直线或三次曲线。

命令: L

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord

2) 通过三个关键点或两个关键点外加一个半径定义一条弧线。

命令: LARC

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Through 3 KPs

3) 定义一条由若干关键点通过样条拟合的三次曲线。

命令: BSPLIN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | Spline thru KPs

4) 两相交线之间定义倒角线。

命令: LFILLT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Line | Line Fillet

5) 不管激活的是何种坐标系都定义直线。

命令: LSTR

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Straight Line

2. 从已有线定义新线

可使用如下方法将已有线复制生成另外的线。

命令: LGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines

3. 修改线

通过“L”命令或下列方法可以修改线。

1) 把一条线分成更小的线段。

命令: LDIV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line into N Ln's

2) 把一条线与另一条线合并。

命令: LCOMB

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

3.2.4 面

平面可以表示二维实体模型。曲面和平面都可表示三维的面, 如壳、三维实体的面等。用到面单元或由面生成体时, 才需定义面。定义面的命令也将自动地定义依附于该面的线和关键点; 同样, 面也可在定义体时自动生成。

1. 定义面

1) 通过关键点定义面。

命令: A

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

2) 通过其边界线定义面。

命令: AL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines

2. 通过已有面定义面

命令: AGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Areas

3.2.5 体

“体”用于描述三维实体, 仅当需要用到体单元时才必须建立体。生成体的命令会自动生成低级的图元。

1. 定义体

1) 通过关键点定义体。

命令: V

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Arbitrary | Through KPs

2) 通过边界定义体。

命令: VA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Arbitrary | By Areas

3) 把面沿某个路径扫掠生成体。

命令: VDRAG

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude / Sweep | Along Lines

2. 扫掠体

通过扫掠相邻面的网格使已有未划分网格的体填充单元的方法如下。

命令: VSWEEP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volume Sweep | Sweep



3. 从已有体定义体

要从已有体定义另外的体，可以使用如下命令。

1) 从一种模式的体定义另外的体。

命令: VGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

2) 把体转到另一个坐标系下。

命令: VTRAN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Transfer Coord | Volumes

3.3 自上向下建模

几何体是可用单个 ANSYS 命令来创建的常用实体模型，如球体或长方体。因为体是高级图元，可不用首先定义任何关键点而形成，几何体是在工作平面内生成的。

3.3.1 定义面

1. 定义矩形

1) 在工作平面上任意位置定义一个长方形。

命令: RECTNG

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Rectangle | By Dimensions

2) 通过角点定义一个长方形。

命令: BLC4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Rectangle | By 2 Corners

3) 通过中心和角点定义一个长方形。

命令: BLC5

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Rectangle | By Centr & Cornr

2. 定义圆或环形

1) 定义一个以工作平面原点为圆心的环形。

命令: PCIRC

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Circle | By Dimensions

2) 在工作平面的任意位置定义一个环形。

命令: CYL4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Circle | Annulus

3. 定义正多边形

1) 以工作平面的原点为中心定义一个正多边形。

命令: RPOLY

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Polygon | By Circumscr Rad

2) 在工作平面的任意位置定义一个正多边形。

命令: RPR4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Polygon | Hexagon

3.3.2 定义体

1. 定义长方体

1) 在工作平面上定义长方体。

命令: BLOCK

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Block | By Dimensions

2) 通过角点生成一个长方体。

命令: BLC4

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

2. 定义柱体

1) 以工作平面原点为圆心定义一个圆柱体。

命令: CYLIND

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Cylinder | By Dimensions

2) 在工作平面的任意位置定义圆柱体。

命令: CYL4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Cylinder | Hollow Cylinder

3. 定义多棱柱体

1) 以工作平面的原点为圆心定义一个正棱柱体。

命令: RPRISM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Prism | By Circumscr Rad

2) 在工作平面的任意位置定义多棱柱体。

命令: RPR4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Prism | Hexagonal

4. 定义球体或部分球体

1) 以工作平面原点为中心定义球体。

命令: SPHERE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Sphere | By Dimensions

2) 在工作平面的任意位置定义球体。

命令: SPH4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Sphere | Hollow Sphere

5. 定义锥体或截锥体

1) 以工作平面的原点为中心定义锥体。

命令: CONE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Cone | By Dimensions

2) 在工作平面的任意位置定义锥体。

命令: CON4

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Cone | By Picking

6. 定义环体或部分环体

命令: TORUS





GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Torus

3.4 布尔运算

ANSYS 程序允许用户对实体模型进行布尔运算，这样修改实体模型就更加容易了。几乎可以对任何实体模型进行布尔运算操作，包括自上向下和自下向上构造的实体模型。

3.4.1 交运算

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

1) 线与线的交。

命令: LINL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Common | Lines

2) 面与面的交。

命令: AINA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Common | Areas

3) 体与体的交。

命令: VINV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Common | Volumes

4) 线与面相交。

命令: LINA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Line with Area

5) 面与体相交。

命令: AINV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Area with Volume

图 3-7 为线与面相交的例子。

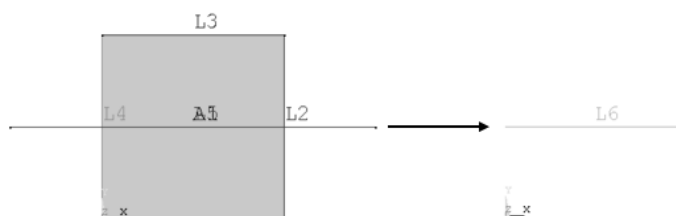


图 3-7 线与面相交

6) 线的两两相交。

命令: LINP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Pairwise | Lines

7) 面的两两相交。

命令: AINP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Pairwise | Areas

8) 体的两两相交。

命令: VINP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Intersect | Pairwise | Volumes

图 3-8 为线的两两相交的例子。

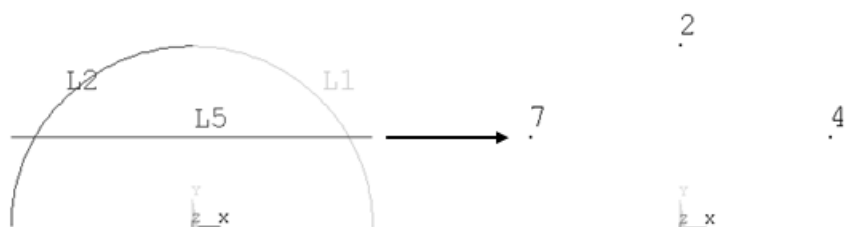


图 3-8 线的两两相交

3.4.2 加运算

1) 把分开的面相加生成一个面。

命令: AADD

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Add | Areas

2) 把分开的体相加生成一个体。

命令: VADD

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Add | Volumes

加运算的结果是得到一个包含各个原始图元所有部分的新图元。这种运算也可称为并、连接或和。这样形成的新图元是一个单一的整体，没有接缝，如图 3-9 所示。实际上，加运算形成的图元在网格划分时常常不如搭接形成的图元好。在 ANSYS 程序中只能对三维实体或二维共面的面进行加操作。

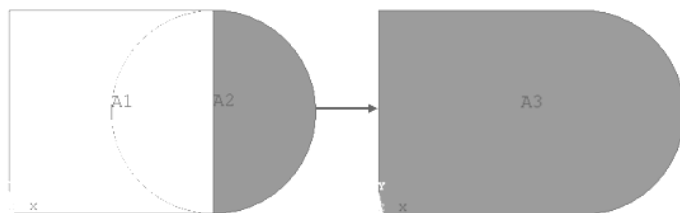


图 3-9 两个面的加运算

3.4.3 减运算

如果从某个图元 (E1) 减去另一个图元 (E2)，其结果可能有两种情况：一种情况是生成一个或多个新图元 E3 ($E1-E2=E3$)，E3 与 E1 有同样的维数，且与 E2 无搭接部分；



另一种情况是 E1 与 E2 的搭接部分是一个低维的实体。这时，结果将 E1 分成两个或多个新的实体。

1) 从线中减去线。

命令: LSBL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Subtract | Lines

2) 从面中减去面。

命令: ASBA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Subtract | Areas

3) 从体中减去体。

命令: VSBV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Subtract | Volumes

4) 从线中减去面。

命令: LSBA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Line by Area

5) 从线中减去体。

命令: LSBV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Line by Volume

6) 从面中减去体。

命令: ASBV

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Area by Volume

7) 从面中减去线

命令: ASBL

说明: 使用 ASBL 命令时不出现 SEPO 域。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Area by Line

8) 从体中减去面。

命令: VSBA

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Volume by Area

图 3-10 为减运算的例子。

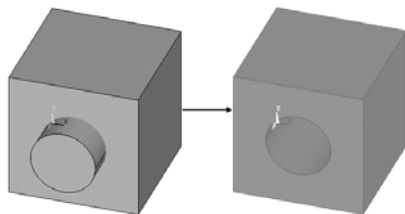


图 3-10 体体相减

3.4.4 分割运算

本小节主要讲解如何使用工作平面进行分割运算。工作平面可用于将一个图元分割成

两个或多个图元。可以将线、面或体通过以下的命令或 GUI 操作利用工作平面进行分割。

工作平面常用来分割未划分映射网格的模型。

1) 用工作平面分割线。

命令: LSBW

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Line by WrkPlane

2) 用工作平面分割面。

命令: ASBW

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Area by WrkPlane

3) 用工作平面分割体。

命令: VSBW

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Divide | Volu by WrkPlane

图 3-11 为用工作平面做分割运算的例子。

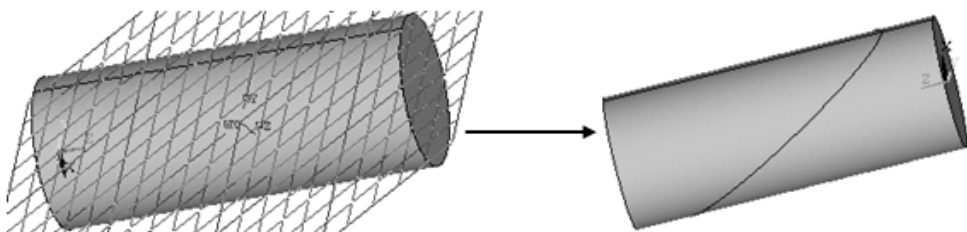


图 3-11 利用工作平面分割体

3.4.5 搭接运算

搭接运算用于连接两个或多个图元，以便生成三个或多个新的图元的集合。搭接运算除了在搭接域周围生成多个边界外，与加运算非常类似。也就是说，搭接运算生成的是多个相对简单的区域，加运算生成一个相对复杂的区域。因而，搭接运算生成的图元比加运算生成的图元更容易划分网格。搭接区域必须与原始图元有相同的维数。布尔搭接命令及其相应的 GUI 操作如下。

1) 搭接线。

命令: LOVLAP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Overlap | Lines

2) 搭接面。

命令: AOV LAP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Overlap | Areas

3) 搭接体。

命令: VOV LAP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Overlap | Volumes

图 3-12 为搭接运算的例子。

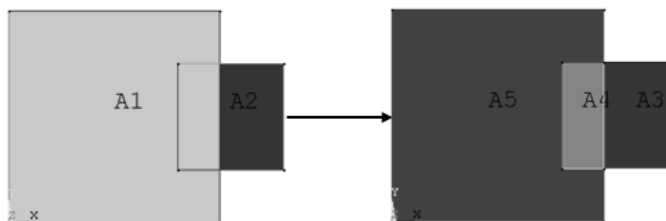


图 3-12 面与面的搭接

3.4.6 互分运算

互分运算用于连接两个或多个图元，以生成三个或更多新图元的集合。如果搭接区域与原始图元有相同的维数，那么互分结果与搭接结果相同。但是与搭接操作不同的是，没有参加搭接的图元将不被删去。布尔互分命令及其相应的 GUI 操作如下。

1) 对线进行互分。

命令: LPTN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Partition | Lines

2) 对面进行互分。

命令: APTN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Partition | Areas

3) 对体进行互分。

命令: VPTN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Partition | Volumes

图 3-13 为互分操作的例子。

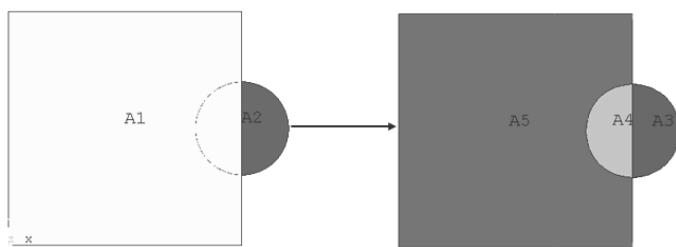


图 3-13 面互分

3.4.7 粘接运算

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

1) 通过粘接线生成新的线。

命令: LGLUE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Glue | Lines

2) 通过粘接面生成新的面。

命令: AGLUE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Glue | Areas

3) 通过粘接体生成新的体。

命令: VGLUE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Glue | Volumes

图 3-14 为粘接操作的例子。

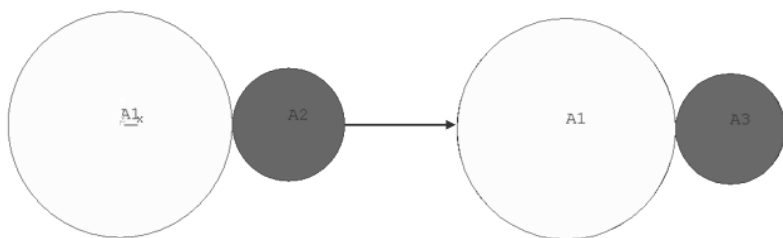


图 3-14 面与面的粘接

3.5 其他建立实体模型的方法

3.5.1 移动和复制实体模型

如果模型中的相对复杂的面或体重复出现,用户仅需对重复部分构造一次,然后在所需位置按所需方向复制生成即可。例如,在建立齿轮模型时,先建立一个齿形,然后使用复制功能,生成整个齿轮轮廓线,如图 3-15 所示。

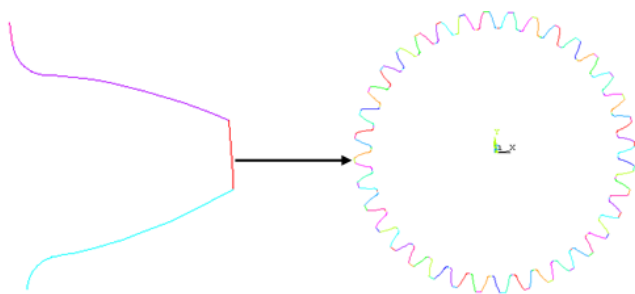


图 3-15 复制面

定义几何体时,其位置和方向是由当前工作平面决定的。因为对定义的每一个新几何体都重新定义工作平面很不方便,允许在错误的位置定义几何体,然后将几何体移到正确的位置可能更符合实际。当然,这种操作并不局限为几何体,任何实体模型图元都可以复制或移动。

1. 按照样本定义几何体

1) 以样本关键点定义关键点。

命令: KGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Keypoints



2) 以样本线定义线。

命令: LGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines

3) 以样本面定义面。

命令: AGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Areas

2. 使用对称定义几何体

1) 定义关键点的映像。

命令: KSYMM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Keypoints

2) 定义线的映像。

命令: LSYMM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines

3) 定义面的映像。

命令: ARSYM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Areas

3. 将几何体样本转移到其他坐标系

1) 把样本关键点转移到另一个坐标系。

命令: KTRAN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Transfer Coord | Keypoints

2) 把样本线转移到另一个坐标系。

命令: LTRAN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Transfer Coord | Lines

3) 把样本面转移到另一个坐标系。

命令: ATRAN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Transfer Coord | Areas

4) 把样本体转移到另一个坐标系。

命令: VTRAN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Transfer Coord | Volumes

3.5.2 质量和惯量的计算

1. 计算中的注意事项

*SUM 命令用于计算打印与实体模型相关的几何项。对于十分窄的面或细的体, 如果最小尺寸与最大尺寸之比小于 0.01, 则 ASUM 和 VSUM 命令可能会产生错误的面或体的信息。为保证计算的准确性, 要保证将这样的体或面细分, 使最小与最大尺寸之比应大于或等于 0.05。

2. 计算中常用的命令

1) 计算所选关键点的形心位置、转动惯量等。

命令: KSUM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Calc Geom Items | Of Keypoints

2) 计算所选线的长度、形心位置、转动惯量等。

命令: LSUM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Calc Geom Items | Of Lines

3) 计算所选面的形心、转动惯量等。

命令: ASUM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Calc Geom Items | Of Areas

4) 计算所选体的形心、转动惯量等。

命令: VSUM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Calc Geom Items | Of Volumes

3.6 有限元模型

直接生成有限元模型是一种直接定义节点和单元的方法, 尽管程序提供了许多方便的命令用于节点和单元的复制、对称、缩放等操作, 但用直接生成法构造模型的工作量是实体建模法构造同样模型工作量的数十倍, 但是该方法对于小模型的计算十分方便。

3.6.1 节点

1. 定义节点

1) 在激活的坐标系中定义单个节点。

命令: N

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS

2) 在已有关键点处定义节点。

命令: NKPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | On Keypoint

3) 移动一个节点到坐标系平面的一个交点。

命令: MOVE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | To Intersect

2. 从已有节点定义另外的节点

1) 在已有两节点间的连线上定义节点。

命令: FILL

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds

2) 从一种模式的节点定义另外的节点。

命令: NGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy

3) 从一种模式的节点定义缩放的节点集。

命令: NSCALE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Scale & Copy





4) 在三节点的二次线上定义节点。

命令: QUAD

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Quadratic Fill

3. 查看和删除节点

1) 列表节点。

命令: NLIST

GUI: Utility Menu | List | Nodes

2) 显示节点。

命令: NPLOT

GUI: Utility Menu | Plot | Nodes

3) 删除节点。

命令: NDELE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Delete | Nodes

注意: 删除节点也将删除包括节点在内的任何边界条件及任何耦合或约束方程。

3.6.2 单元

1. 定义单元属性的前提条件

定义一个单元之前需要做如下两件事。

- 必须已定义该单元所需的最少节点。
- 必须已指定合适的单元属性

(1) 定义单元属性表的方法

1) 在单元库中定义一种单元类型。

命令: ET

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

2) 定义单元实常数。

命令: R

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants

3) 定义线性材料属性。

命令: MP, MPDATA, MPTEMP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models | analysis type

(2) 单元属性表的指针

一旦生成了单元属性表, ANSYS 软件把表中的属性赋给单元。设置单元类型指针、单元实常数属性指针、单元材料属性指针或单元坐标系属性指针, 可用下列方法。

命令: TYPE、REAL、MAI 或 ESYS

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

(3) 查看当前已定义单元类型的列表

命令: ETLIST

GUI: Utility Menu | List | Properties | Element Types

(4) 列表实常数的设置

命令: RLIST

GUI: Utility Menu | List | Properties | All Real Constants

(5) 列表线性材料属性

命令: MPLIST

GUI: Utility Menu | List | Properties | All Materials

(6) 列表数据表

命令: TBLIST

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Data Tables | List

(7) 列表坐标系

命令: CSLIST

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

2. 定义单元

如果定义了节点并设置了其单元属性, 就可以定义单元了。利用下列方法, 可通过确定其节点的方式来定义单元, 必须输入的节点数和节点输入顺序由单元类型决定。例如, 二维梁单元 BEAM188 要求 2 个节点, 三维块单元 SOLID185 要求 8 个节点。节点输入顺序决定了单元法向方向。可用如下方法定义单元。

命令: E

GUI: Main Menu | Preprocessor | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

如果交互进行工作, 可用上面的 GUI 操作在图上拾取节点定义单元。如果用命令输入, 只有 8, 节点可用 E 命令输入。对于需要超过 8 节点的单元类型, 用 EMORE 命令定义另外的节点。

3. 查看和删除单元

1) 单元列表。

命令: ELIST

GUI: Utility Menu | List | Elements

2) 显示单元。

命令: EPLOT

GUI: Utility Menu | Plot | Elements

3) 删除单元。

命令: EDELE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Delete | Elements

4. 从已有单元定义另外的单元

1) 从已有模式的单元定义单元。

命令: EGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Auto Numbered

2) 从已有模式的单元通过对称定义单元。

命令: ESYM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Auto Numbered





3) 从已有模式单元（手工控制编号）定义单元。

命令: ENGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | User Numbered

4) 使用对称（手工控制编号）定义单元。

命令: ENSYM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | User Numbered

这些命令并不生成节点，必须事先定义必要的节点，并且所生成的单元属性依赖于原来模式的单元属性，而不依赖于当前指定的设置。

5. 用特殊方法定义单元

某些特殊的单元可用下列特殊方法生成。

1) 从已生成单元外表面上生成表面效应单元。

命令: ESURF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | OnContct Surf | option

在某些热分析中，可用 ESURF、XNODE 命令生成带有任选节点的 SURF151 或 SURF152 单元。

2) 在已有面单元的边上生成重叠的表面单元并分配额外的节点作为最近的流体单元节点。

命令: LFSURF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surface Effect | Line to Fluid

在某些热分析中，用 LFSURF 命令生成带有任选节点的 SURF151 单元。

3) 在已有实体单元的表面上生成重叠的表面单元并分配额外的节点作为最近的流体单元节点。

命令: AFSURF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surface Effect | Area to Fluid

在某些热分析中，可用 AFSURF 命令生成带有可选节点的 SURF152 单元。

4) 如果模型是由直接生成方法装配的，可以直接在已有单元的表面叠加生成表面单元并分配另外的节点作为最近流体单元的节点。

命令: NDSURF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf Effect | Attach to Fluid | Node to Fluid

在有些热分析中用 NDSURF 生成可选择节点的 SURF151 或 SURF152 单元。

5) 下列方法用二维线单元连接重合的节点。

命令: EINTF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | At Coincid Nd

6) 下列方法生成一般的接触单元。

命令: GCGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | At ContactSrf

6. 注意重叠单元

如果定义了重叠单元, 即有相同节点和相同空间位置的单元, 则程序中诸如图形、加面载荷、选择逻辑等操作可能不会像预期那样, 最好避免使用重叠单元, 若不能避免, 则无论何时用到重叠单元必须格外小心。

7. 改变节点修改单元

用不同节点重新定义单元, 可用下列方法。注意将单元属性指针置成正确的值, 即执行这些命令将当前的单元类型、实常数、材料特性及某些类型单元的单元坐标系赋给修改后的单元。

1) 修改已定义的单元。

命令: EMODIF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Modify Nodes

2) 通过定义编号和连接的节点重新定义单元。

命令: EN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Create | Elements | Thru Nodes

8. 修改单元属性

修改已定义的单元属性有下述几种方法。

1) 在前处理模块或求解器模块中用下列方法修改指定单元的材料号。

命令: MPCHG

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Other | Change Mat Props | Change Mat Num

2) 在前处理器中 EMODIF 和*REPEAT 命令提供了一种修改单元属性的通用方法。不能直接在 GUI 中得到*REPEAT 命令。

3.7 从CAD中导入模型

3.7.1 概述

用户可以在 ANSYS 中直接建立模型。当然, 作为一种可供替换的方案, 也可以先在使用户擅长的 CAD 系统里建立实体模型, 把模型存为 ANSYS 可以导入的文件格式, 然后把这个模型输入到 ANSYS 中。

3.7.2 CAD模型的导入

1. IGES格式模型的导入

使用下面的 GUI 可以实现把 IGES 格式的模型导入到 ANSYS 中, 如图 3-16 所示。

GUI: File | Import | IGES

单击“OK”按钮, 会弹出如图 3-17 所示的对话框。

单击“Browse”按钮, 打开当前的文件夹, 寻找需要导入的文件, 单击“OK”按钮即可完成模型的导入。

2. X_T格式模型的导入

使用下面的 GUI 可以实现把 x_t 格式的模型导入到 ANSYS 中。



GUI: File | Import | PARA

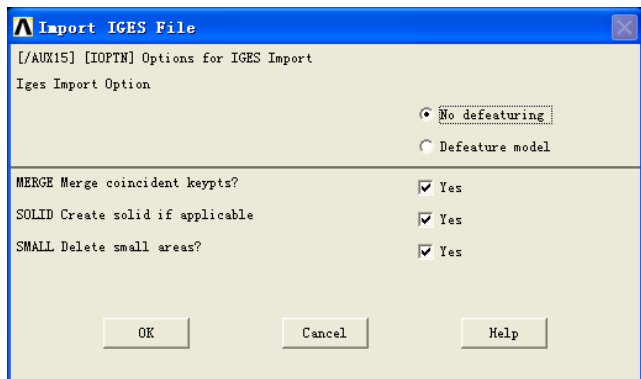


图 3-16 导入 IGES 的对话框

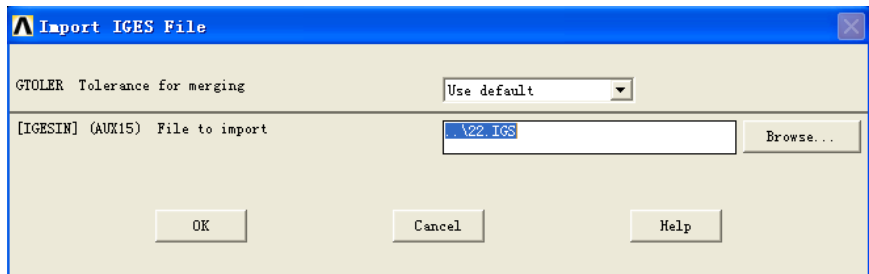


图 3-17 选择导入模型的 CAE 文件

在文件夹中，找到需要的文件，单击“OK”按钮就可以顺利地把 X_T 格式的模型导入到 ANSYS 中。

3. SAT格式模型的导入

使用下面的 GUI 可以实现把 SAT 格式的模型导入到 ANSYS 中。

GUI: File | Import | SAT

在文件夹中，找到需要的文件单击“OK”按钮，就可以顺利地把 SAT 格式的模型导入到 ANSYS 中。

3.8 参数化建模

3.8.1 参数化建模简介

参数化建模主要依托于 ANSYS 自带的 APDL 语言。APDL 即 ANSYS 参数化设计语言，它是一种解释性语言，可用来自动完成一些通用性强的任务，也可以用于根据参数建立模型。APDL 还包括其他许多特性，诸如重复执行某条命令、宏、IF-THEN-ELSE 分支、DO 循环、标量、向量及矩阵操作等。APDL 不仅是设计优化和自适应网格划分等经典特性的实现基础，而且它也为日常分析提供了很多便利。

3.8.2 使用参数

1. 参数

参数是 APDL 的变量，它们更像 Fortran 变量，而不像 Fortran 参数。不必明确声明参数类型。所有数值变量都以双精度数储存。被使用但未声明的参数都被赋予一个接近 0 的值或极小值（例如，若参数 A 被定义为 A=B，但 B 没被定义，则赋给 A 一个极小值）。

2. 参数命名规则

参数名称必须以字母开头，且只能包含字母、数值和下划线。

下面列出一些有效和无效的参数名。

有效参数名：ABC, PI, X_OR_Y。

无效参数名：NEW_VALUE (超过 8 个字符)，2CF3 (以数值开头)，M&E (含非法字符“&”)。

注意：要避免参数名与经常使用的 ANSYS 标识字相同，如自由度 (DOF) 标识字 (TEMP, UX, PRES 等)；常用标识字 (ALL, PICK, STAT 等)；用户定义标识字 (如用 ETABLE 命令定义的标识字)；数组类型标识字 (如 CHAR, ARRAY, TABLE 等)。参数名不能以下划线 () 开头，这类参数名只能用于 GUI 和应用于 ANSYS 的宏中。

名称为从 ARG1 到 ARG9 和从 AR10 到 AR99 的参数被保留为局部参数。

3. 定义参数

若要定义参数，可以把值赋给参数，也可以提取 ANSYS 提供的值，再把这些值赋给参数。还可以用 “*GET” 命令或各种内嵌获取函数从 ANSYS 中提取的值。下面对其进行详细说明。

(1) 在运行过程中给参数赋值

可以用 “*SET” 命令定义参数。如下面的例子：

```
*SET,ABC,-24
*SET,QR,2.07E11
*SET,XORY,ABC
*SET,CPARM,'CASE1'
```

也可以用 “=” 作为一种速记符来调用 *SET 命令 (这更方便)，其格式为 Name=Value，这里 Name 是参数名，Value 是赋给该参数的数值或字符。对于字符参数，赋给的值必须被括在单引号中，并不能超过 8 个字符。下面的例子说明 “=” 的用法：

```
ABC=-24
QR=2.07E11
XORY=ABC
CPARM='CASE1'
```

在 GUI 中，可以直接在 ANSYS 输入窗口或标量参数对话框的 “Selection” 域 (通过 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 菜单项访问) 中输入 “=”。



(2) 赋 ANSYS 提供的值给参数

1) *GET 命令的用法。

GUI: Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data。

从某个特定的项目(如一个点、一个单元、一个面等)中提取 ANSYS 提供的数据并赋给某个用户命名的参数。各种关键词、标识字和数字结合在一起来确定被提取的项目。例如

*GET, A, ELEM, 5, CENT, X

表示返回单元 5 的质心的 X 坐标值并赋给参数 A。

*GET 命令的使用格式为:

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

这里, Par 是将被赋值的参数名; Entity 是被提取项目的关键词, 有效的关键词是 NODE, ELEM, KP, LINE, AREA, VOLU 等, 在 ANSYS Commands Reference (ANSYS 命令参考手册) 中的 *GET 部分对其有完整的说明; ENTNUM 是实体的编号(若为 0 指全部实体); Item1 是某个指定实体的项目名。例如, 如果 Entity 是 ELEM, 那么 Item1 要么是 NUM (选择集中的最大或最小的单元编号), 要么是 COUNT (选择集中的单元数目)。

可以把 *GET 命令看成是对一种树结构从上至下的路径搜索, 即从一般到特殊的确定。

可用下面的例子来说明 *GET 命令的用法。下面的第一条命令用于获得单元 97 的材料属性 (MAT 参考号) 并赋给单元 BCD:

*GET,BCD,ELEM,97,ATTR,MAT	!BCD =单元 97 的材料号
*GET,V37,ELEM,37,VOLU	!V37 =单元 37 的体积
*GET,EL52,ELEM,52,HGEN	!EL52 =在单元 52 生成的热值
*GET,OPER,ELEM,102,HCOE,2	!OPER =单元 102 面 2 上的热系数
*GET,TMP,ELEM,16,TBULK,3	!TMP =单元 16 面 3 上的体积温度
*GET,NMAX,NODE,,NUM,MAX	!NMAX =最大激活节点数
*GET,HNOD,NODE,12,HGEN	!HNOD =在节点 12 生成的热值
*GET,COORD,ACTIVE,,CSYS	!COORD =激活的坐标系值

2) 内嵌获取函数的用法。

对于某些项目, 可以用内嵌的获取函数来代替 *GET 命令。获取函数返回项目的值并直接用于当前运行之中。这样就不必先把值赋给参数, 然后再在运行中调用该参数, 从而可以省去起中间作用的参数。例如, 要计算两个节点的 X 坐标的平均值, 可以采用如下的 *GET 函数。

① 使用下面的命令把节点 1 的 X 坐标值赋给参数 L1:

*GET,L1,NODE,1,LOC,X

② 再使用 *GET 命令把节点 2 的 X 坐标值赋给参数 L2。

③ 使用计算中间值的函数 MID=(L1+L2)/2。

更简便的方法是使用节点坐标的获取函数 NX(N), 该函数返回节点 N 的 X 坐标值。这样就可以不用中间参数 L1 和 L2。例如:

MID=(NX(1)+NX(2))/2

获取函数的参数可以是参数，也可以是其他的获取函数。例如，获取函数 NELEM(ENUM,NPOS)返回在单元 ENUM 上 NPOS 处的节点编号，联合函数 NX(NELEM(ENUM,NPOS))返回该节点的 X 坐标值。本书附录 A 给出了可用的获取函数。

(3) 排列显示参数

一旦定义了参数，就可以用*STATUS 命令把它们排列显示出来。如果仅用*STATUS 命令（没有附加参数），列表将显示目前所有已定义的参数。

通过 Utility Menu | List | Other | Parameters 或 Utility Menu | List | Status | Parameters | All Parameters 菜单项也可以得到参数的列表显示。

注意：以下画线()开头或结尾的参数不能由*STATUS 命令显示出来。

4. 删除参数

可通过如下两种途径来删除参数。

1) 使用“=”命令，其右边为空。例如，使用该命令来删除参数 QR:

```
QR=
```

2) 使用*SET 命令(Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters)，但不给参数赋值。例如，使用该命令来删除参数 QR:

```
*SET,QR,
```

令某个数值参数为 0 并没有删除该参数。同样，令某个字符参数为空的单引号(')或单引号中为空格也没有删除该参数。

5. 数字参数值的置换

只要在有关数字命令的地方用到参数，该参数值都会被自动置换。假如没有给该参数赋值（即该参数还没被定义），程序会自动赋给它一个接近 0 的值()，通常不会发出警告。

注意：大多数情况下，某参数在一个命令中使用之后，再被定义，不会再更新该命令。例如：

```
Y=0
X=2.7
N,1,X,Y      !节点 1 在 (2.7,0)
Y=3.5        !重新定义参数 Y 不会更新节点 1
```

6. 参数公式

参数公式包括对参数和数值的运算，如加、减、乘、除等。例如：

```
X=A+B
P=(R2+R1)/2
D=-B+(E**2)-(4*A*C)      !求值 D = -B + E2-4AC
```

(1) 运算符

+ (加)、- (减)、* (乘)、/ (除)、** (求幂)、< (小于)、| (大于)。





(2) ANSYS 运算的顺序

- 1) 圆括号中的运算（最里面最优先）
- 2) 求幂（从右到左）
- 3) 乘和除（从左到右）
- 4) 一元联合（如+A 或-A）
- 5) 加和减（从左到右）
- 6) 逻辑判断（从左到右）

因此一个诸如 $Y2=A+B**C/D*E$ 的公式按如下顺序求值：最先求 $B**C$ ，第二步求 $/D$ ，第三步求 $*E$ ，最后求 $+A$ 。为了更清楚，可以在公式中使用圆括号。圆括号最多可嵌套 4 层，在每套圆括号中最多可有 9 次运算。一般来说，在公式的运算符之间不要有空格。特别是在 $*$ 之前不能有空格，这是因为如果这样，接下来的输入行（以 $*$ 开头）将被作为一条命令来解释，而不再是公式的一部分了。

7. 带参数的函数

一个带参数的函数是数学运算的程序序列，其运行结果会返回一个值，例如 $SIN(X)$, $SQRT(B)$ 和 $LOG(13.2)$ 。表 3-1 完整地列出了当前可用的 ANSYS 函数。

表 3-1 ANSYS 可用的函数

函 数	说 明
ABS(x)	x 的绝对值
SIGN(x,y)	x 的绝对值，但取 y(正负)符号。y=0 时结果取正号
EXP(x)	x 的指数值
LOG(x)	x 的自然对数值 $\ln(x)$
LOG10(x)	x 的常用对数值 $\log_{10}(x)$
SQRT(x)	x 的平方根值
NINT(x)	x 的整数部分
MOD(x,y)	x/y 的余数部分。若 $y=0$ ，则返回 0
RAND(x,y)	在 x 到 y 范围内产生随机数(一致分布)，(x 为下限，y 为上限)
GDIS(x,y)	生成平均值为 x 且偏差为 y 的正态分布的随机数
SIN(x),COS(x), TAN(x)	x 的正弦、余弦及正切值。x 的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令转换为平面角的度数。
SINH(x), COSH(x), TANH(x)	x 的双曲线正弦、余弦及正切值
ASIN(x), ACOS(x), ATAN(x)	x 的反正弦、反余弦及反正切值。对于 ASIN 和 ACOS，x 的取值范围必须为 $-1.0 \sim +1.0$ 。输出的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令转换为平面角的度数。对于 ASIN 和 ATAN，输出值的范围为 $-\pi/2 \sim +\pi/2$ ；对于 ACOS，输出值的范围为 $0 \sim \pi$
ATAN2(y,x)	y/x 的反正切值。输出的默认单位为弧度，但可用*AFUN 命令转换为平面角的度数。输出值的范围为 $-\pi \sim +\pi$
VALCHR (CPARM)	返回 CPARM 的数字值。(如果 CPARM 是一个数值则返回 0.0)
CHRVAL (PARM)	数字参数 PARM 的字符值。小数位置数取决于数值大小
UPCASE (CPARM)	把 CPARM 转换为大写
LWCASE (CPARM)	把 CPARM 转换为小写

下面是一些带参数函数的例子：

PI=ACOS(-1)	!PI = -1 的反余弦值, PI 的精确度由机器确定
Z3=COS(2*THETA)-Z1**2	
R2=SQRT(ABS(R1-3))	
X=RAND(-24,R2)	!X 为-24~R2 的随机值
*AFUN,DEG	!把角度的单位转换为度数
THETA=ATAN(SQRT(3))	!THETA 等于 60 度
PHI=ATAN2(-SQRT(3),-1)	!PHI 等于-120 度
*AFUN,RAD	!把角度的单位转换为弧度
X249=NX(249)	!节点 249 的 X 轴坐标
SLOPE=(KY(2)-KY(1))/(KX(2)-KX(1))	!连接关键点 1 和 2 的线的斜率
CHNUM=CHRVAL(X)	!CHNUM = X 的字符值
UPPER=UPCASE(LABEL)	!UPPER = 参数 LABEL 的大写字符

3.8.3 APDL 中的控制命令

1. 无条件分支*GO命令

最简单的转向命令*GO 指示程序转到某个指定标识字所在行，不执行中间的任何命令。程序继续从该指定标识字所在行开始执行。例如：

```
*GO,:BRANCH1
.....      !这个程序体被跳过(不执行)
:BRANCH1
.....
```

由*GO 命令指定的标识字必须以冒号(:)开头，并不能超过 8 个字符（包括冒号）。该标识字可位于同一文件中的任何地方。

注意：不鼓励使用*GO 命令。最好使用其他的分支命令来控制程序流。

2. 条件分支*IF 命令

APDL 允许根据条件执行某些供选择的程序体中的一个。条件的值通过比较两个数的值或等于某数值的参数来确定。

*IF 命令的语法为：

*IF, VAL1, Oper, VAL2, Base

其中，VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；Oper 是比较运算符；VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；若比较的值为真，则执行 Base 指定的操作。

APDL 提供了下列 8 个比较运算符。

EQ: 等于 (VAL1=VAL2)。

NE: 不等于 (VAL1#VAL2)。

LT: 小于 (VAL1<VAL2)。



GT: 大于 (VAL1 | VAL2)。

LE: 小于或等于 (VAL1vVAL2)。

GE: 大于或等于 (for VAL1 | =VAL2)。

ABLT: 绝对值小于。

ABGT: 绝对值大于。

通过给 Base 变量赋值 THEN, *IF 命令就变成了 IF-THEN-ELSE 结构(和 FORTRAN 中的该结构类似)的开始。该结构包括: 一个*IF 命令, 一个或多个*ELSEIF 命令选项, 一个*ELSE 命令选项, 一个必需的*ENDIF 命令, 标识该结构的结束。

在最简单的形式中, *IF 命令判断比较的值, 若为真, 则转向 Base 变量所指定的标识字处。结合一些*IF 命令, 将能得到和其他编程语言中 CASE 语句相同的功能。注意, 不要转向某个位于 IF-THEN-ELSE 结构或 DO 循环中的带标识字的行。

通过给 Base 变量赋值 STOP, 可以离开 ANSYS。

IF-THEN-ELSE 结构仅仅判断条件并执行接下来的程序体或跳到*ENDIF 命令的下一条语句处(用“Continue”注释表示):

```
*IF,A,EQ,1,THEN
```

```
! Block1
```

```
.
```

```
*ENDIF
```

```
! 继续执行
```

注意: 可以在 IF-THEN-ELSE 结构中执行/CLEAR 命令。/CLEAR 命令不会清除*IF 堆栈, *IF 层的号码仍然保留。必须用*ENDIF 来结束分支。同时, 要记住/CLEAR 命令会删除所有的参数, 包括在分支命令中使用的任何参数。为避免由于删除参数而引发的问题, 可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令, 然后在/CLEAR 命令后立刻运行/PARRES 命令。

3. DO循环

DO 循环允许按指定的次数循环执行一系列的命令。*DO 命令和*ENDDO 命令分别是循环开始和结束点的标识字。

下面的 DO 循环例子读取 5 个载荷步文件 (1~5) 并对 5 个文件做了同样的更改:

```
*DO,I,1,5          !I = 1 to 5
LSREAD,I           !读取载荷步文件 I
OUTPR,ALL,NONE     !改变输出控制
ERESX,NO
LSWRITE,I          !重写载荷步文件 I
*ENDDO
```

在构造 DO 循环时, 要遵循以下原则。

- 不要通过在*IF 或 *GO 命令中带有:Label 来从 DO 循环结构中跳出。
- 不要在 DO 循环结构中用:Label 来跳到另外一行语句。可以用 IF-THEN-ELSE-ENDIF 结构来代替。

- 在 DO 循环结构中，第一次循环后，自动禁止命令结果输出。如果想得到所有循环的结果输出，就在 DO 循环结构中使用/GOPR 或/GO（无响应行）命令。
- 在 DO 循环结构中使用/CLEAR 命令要特别小心。/CLEAR 命令不会清除 DO 循环堆栈，但是它会删除所有的参数，包括在本身的*DO 语句中的循环参数。为避免由此引发的循环值未定义的问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后执行/CLEAR 命令和/PARRES 命令。





第4章 网格划分

4.1 网格划分概述

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

和自由网格相比，映射网格包含对单元形状的限制，而且必须满足特定的规则。映射面网格只能包含四边形或三角形单元，而映射体网格只能包含六面体单元，如图 4-1 所示。而且，映射网格具有典型的规则形状，明显成排的单元。如果想要这种网格类型，必须将模型生成具有一系列相当规则的体或面才能接受映射网格划分。

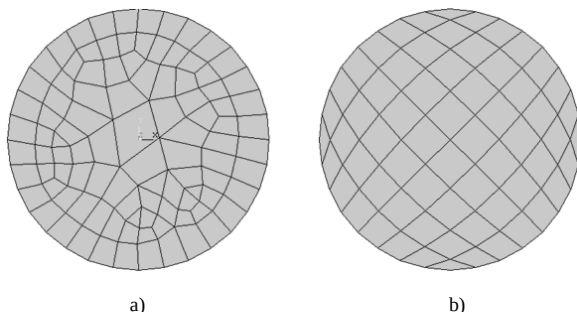


图 4-1 自由网格和映射网格

a) 自由网格 b) 映射网格

4.2 定义单元属性

在生成节点和单元网格之前，必须定义合适的单元属性。

- 定义单元类型（如 BEAM188，SHELL181 等）。
- 定义实常数（给定诸如厚度或截面积等单元的几何特性）。
- 定义材料性能参数（如弹性模量、泊松比等）。
- 定义单元坐标系。
- 设置面号。

注意：在对梁划分网格时，还需给定方向关键点作为线的属性。

4.2.1 定义单元属性表

为单元定义单元属性，首先必须建立单元属性表。单元属性表中包括单元类型、单元实常数、材料常数，单元坐标系，单元截面号等。对于用 BEAM188 或 BEAM189 单元对梁进

行网格划分，可用 SECTYPE 和 SECDATA 命令建立截面表。

注意：方向关键点是线的属性而不是单元的属性，不能生成方向关键点表。

4.2.2 分配单元属性

建立单元属性表之后，通过指向表中合适的条目即可对模型的不同部分分配单元属性。指针就是参考号，包括材料号（MAT）、实常数号（REAL）、单元类型号（TYPE）、坐标系号（ESYS），以及用 BEAM188 或 BEAM189 单元对梁进行网格划分的截面号（SECNUM）。可以直接给所选定的实体模型分配单元属性或定义默认的单元属性集，在后来生成单元的网格划分操作中使用。

给实体模型分配单元属性允许对模型的每个区域预置单元属性，从而可以避免在网格划分过程中重置单元属性。

1) 给关键点分配属性。

命令：KATT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Keypoints

2) 给线分配属性。

命令：LATT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Lines

3) 给面分配属性。

命令：AATT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Areas

4) 给体分配属性。

命令：VATT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Volumes

4.3 网格划分工具

ANSYS网格划分工具（Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool）提供了最常用的网格划分控制和最常用的网格划分操作。网格划分工具是一个交互的“工具箱”，主要由单元属性设置区域、智能网格划分控制区域、单元尺寸控制区域、网格划分方法控制区域和细化单元控制区域五个区域组成。图 4-2 为单元属性设置区域，单击“Set”按钮，弹出网格属性设置对话框如图 4-3 所示，面板中可以设置单元类型号、材料号、实常数号、单元坐标系和截面号。

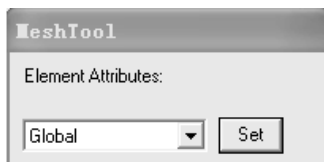


图 4-2 单元属性设置区域



图 4-4 为智能网格划分控制区域，如果用户需要进行智能网格划分，则只需勾选“Smart Size”复选框，并设置智能划分等级，默认为 6 级，1 级表示网格最精细，10 级表示网格最粗糙。



图 4-3 网格属性设置面板

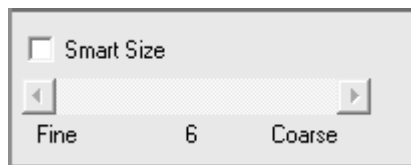


图 4-4 智能网格划分控制区域

图 4-5 为单元尺寸控制区域，该区域包括 5 种控制单元尺寸的方法，即总体控制 (Global)、面网格控制 (Areas)、线网格控制 (Lines)、层网格控制 (Layer)、关键点网格控制 (Keypts)。每一种控制方法，大致分为单元尺寸控制和单元数量控制。图 4-6 为网格划分方法控制区域，该区域主要包括设置网格划分类型 (Mesh)、设置单元形状 (Shape)、设置网格划分方法三部分组成。用户可以设置网格划分类型为体、面、线和关键点；单元形状与网格划分类型相对应，例如网格划分类型为体网格，则单元形状为四面体和六面体。网格划分方法有自由网格 (Free)、映射网格 (Mapped) 和体扫描网格 (Sweep)。图 4-7 为细化单元控制区域，用户可以选择在节点、单元、关键点、线、面和所有单元处进行网格细化。



图 4-5 单元尺寸控制区域

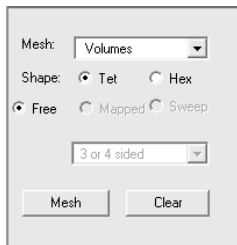


图 4-6 网格划分方法控制区域

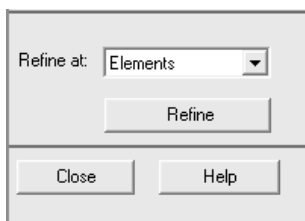


图 4-7 细化单元控制区域

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

4.4 单元尺寸控制

4.4.1 智能单元尺寸控制

智能的单元尺寸算法首先对划分网格的面或体的所有线估算其单元边长。然后对几何体

中的弯曲和接近区域的线进行细化。由于所有的线和面在网格划分开始时已指定大小，生成网格的质量将与待划分网格的面或体的顺序无关。

1. 基本控制

通过网格划分工具可以实现智能单元尺寸的基本控制，可以简单地指定网格划分尺寸从 1（细网格）到 10（粗网格），程序会自动地设置一系列独立的控制值来生成想要的尺寸级别。

命令：SMRTSIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Basic, 弹出如图 4-8 所示的界面，用鼠标选择单元划分等级，单击 OK 按钮，即完成设置。



图 4-8 智能单元尺寸基本控制面板

2. 高级控制

用户使用高级方法，可以更精确地进行网格划分，例如可以控制孔和圆角处的粗细程度。

命令：SMRTSIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Adv Opts

操作后弹出智能单元尺寸高级控制面板，该面板主要包括五个区域，即总体单元尺寸控制区域、比例因子控制区域、面的内部扩展和过渡控制区域、单元的最大过渡角度控制区域和其他选项控制区域。下面为读者详细介绍这五个区域。

图 4-9 为总体单元尺寸控制区域，通过该控制区域用户可以设置网格的总体单元尺寸，这个尺寸是所有有限单元线长度的最大值。

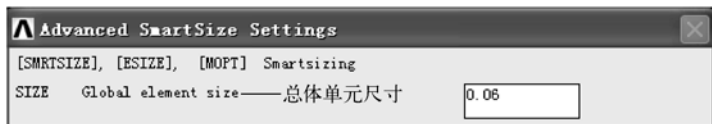


图 4-9 总体单元尺寸控制区域

图 4-10 为比例因子控制区域，当用户未设置总体单元尺寸时，该区域才起作用。

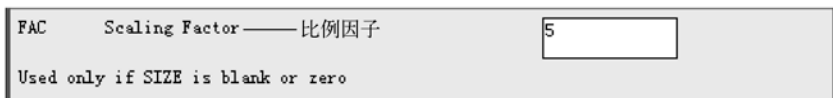


图 4-10 比例因子控制区域



图 4-11 为面的内部扩展和过渡控制区域，该区域包括两个控制选项，即扩展因子和过渡因子。

Interior Area Expansion and Transition			
EXPND	Expansion (Contraction)——	扩展因子	2
TRANS	Transition Factor ——	过渡因子	2

图 4-11 面的内部扩展和过渡控制区域

图 4-12 为单元的最大过渡角度控制区域，该区域包括两个控制选项，即低阶单元和高阶单元。如果模型采用低阶单元进行网格划分，则用户只设置第一个选项；与之相似，如果模型采用高阶单元进行网格划分，则用户只设置第二个选项；如果模型采用的低阶和高阶单元混合网格划分，则这两个选项都需要设置。

Maximum angle per element for arcs			
ANGL	Lower-order Elements——	低阶单元	5
ANGH	Higher-order Elements——	高阶单元	3

图 4-12 单元的最大过渡角度控制区域

图 4-13 为其他选项控制区域，该区域包括五个控制选项，即临近增长率（GRATIO）、是否打开小孔粗糙划分选项（SMHLC）、是否打开小角度粗糙划分选项（SMANC）、最大迭代次数（MXITR），以及是否打开表面临近（SPRX）。临近增长率默认值为 1.5，建议用户设置范围为 1.5~2.0；根据计算精度需要确定是否打开小孔粗糙划分选项和是否打开小角度粗糙划分选项；最大迭代次数默认值为 4；表面临近选项默认为关闭。

Other Options		
GRATIO	Proximity Growth Ratio	2
SMHLC	Small Hole Coarsening	☒ On
SMANC	Small Angle Coarsening	☒ On
MXITR	Max Num of Iterations	10
SPRX	Surface Proximity	Off
OK Apply Cancel Help		

图 4-13 其他选项控制区域

4.4.2 人工单元尺寸控制

1. 总体单元尺寸控制

(1) 尺寸控制

命令：ESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size

弹出的总体单元尺寸控制，该面板中包括两个控制选项，即单元尺寸控制（SIZE）和单元数量控制（NDIV）如图 4-14 所示。用户可根据需要进行数据输入。

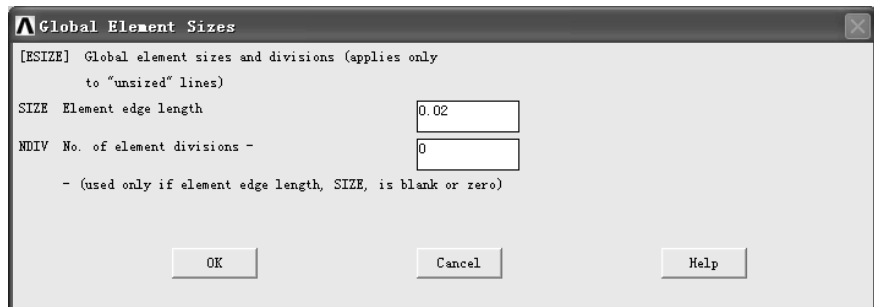


图 4-14 总体单元尺寸控制

(2) 面内部控制网格划分

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

命令：MOPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Area Cntrls

操作后弹出总体单元尺寸控制对话框，对话框中通过设置单元扩展因子和网格过渡因子来控制网格划分，如图 4-15 所示。

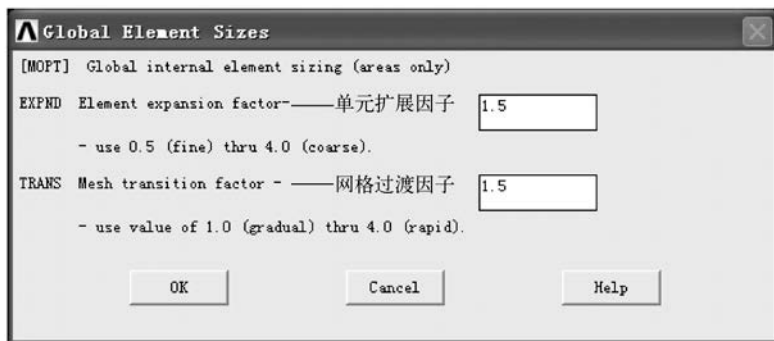


图 4-15 控制网格划分

1) 控制网格的扩展。

MOPT 命令中的 Lab=EXPND 项可以用来引导在一个面的边界处将网格划分得较细，而在内部划分得相对粗糙（如图 4-16 所示）。

图 4-16a 所示网格是由 ESIZE 命令对面进行设定而生成的。注意到单元形状较好，但由于单元尺寸较均匀，所以需要 986 个单元来填充这个面。利用 MOPT 命令的扩展功能（Lab=EXPND），图 4-16b 所示网格生成较少的单元，因为这种网格划分容许面上网格从边界上的较小尺寸的单元扩展到内部较大的单元。但是，有些用这种方法划分的网格单元，尺寸比较差。图 4-16b 的另一缺点是从小单元到大单元的单元尺寸变化较大。尤其是在小孔附近更加明显。

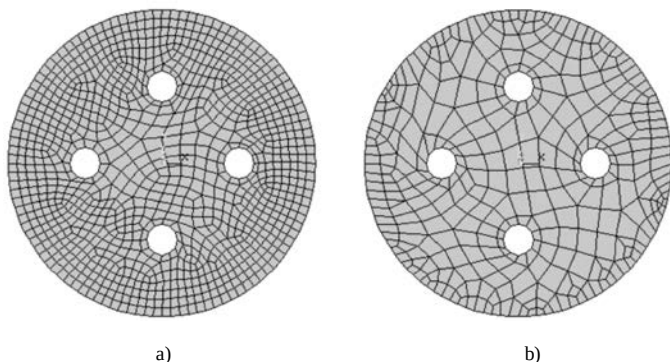
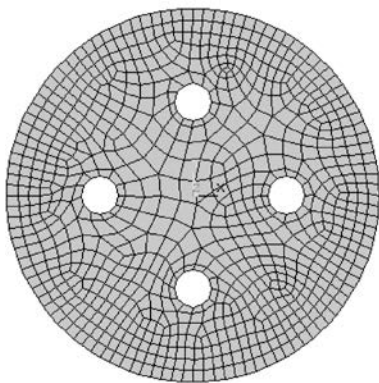


图 4-16 没有网格扩展及有网格扩展的面网格划分

a) 没有设置网格扩展 986 个单元 b) 设置单元扩展因子为 2363 个单元

2) 控制网格的过渡。

为改善图 4-16b 中的网格，需要从边界的小单元到内部的大单元进行更平缓的过渡。MOPT 命令中的 Lab=TRANS 项可用来控制从细到粗网格的过渡。图 4-17 为用设置单元扩展因子 EXPND=1.5、网格过渡因子 TRANS=1.1 划分的网格，这个网格比图 4-16a 中的网格数少，但从小单元到大单元的过渡却相当平缓，而且单元的尺寸比图 4-16b 图中的网格好得多。



807 个单元

图 4-17 用扩展和过渡控制划分的面网格

(3) 体内部单元尺寸控制

命令: MOPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Volu Cntrls

操作后 弹出如图 4-18 所示的体内部单元尺寸对话框，该对话框只有一个控制选项，即四面体单元扩展因子，其取值范围为 0.1~3.0，推荐用户使用的值为 0.5~2.0。

(4) 其他控制方法

其他控制方法适合于划分映射网格，并且当关闭智能单元尺寸控制时，不推荐用户应用于划分自由网格。

命令: DESIZE

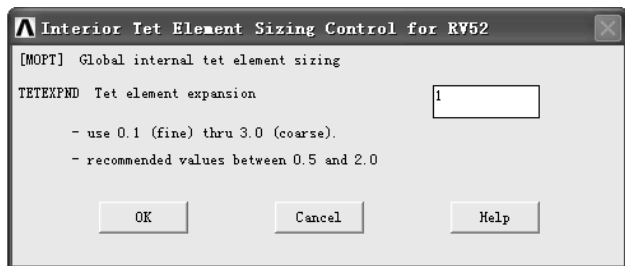


图 4-18 内部四面体单元尺寸控制

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Other

操作后弹出其他总体单元尺寸设置对话框，该对话框包括五个区域，即每条线的最小分割数、每条线的最大分割数、弧线的最大跨度角、边界线的单元尺寸，以及相邻线的纵横比。

图 4-19 为每条线的最小分割数对话框，该面板包括两个控制选项——低阶单元控制选项（MINL）和高阶单元控制选项（MINH）；低阶单元控制选项默认值为 3，高阶单元控制选项默认值为 2。

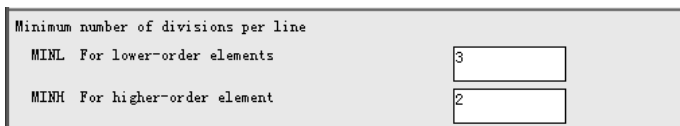


图 4-19 每条线的最小分割数

图 4-20 为每条线的最大分割数对话框，该面板只包括一个控制选项——选项默认值为 15。



图 4-20 每条线的最大分割数

图 4-21 为弧线的最大跨度角对话框，该面板包括两个控制选项——低阶单元控制选项（ANGL）和高阶单元控制选项（ANGH）。低阶单元控制选项默认值为 15，高阶单元控制选项默认值为 28。

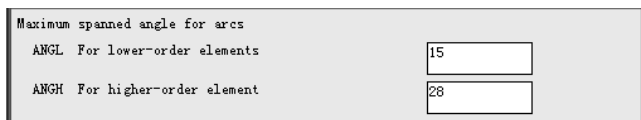


图 4-21 弧线的最大跨度角

图 4-22 为边界线的单元尺寸对话框，该对话框包括两个控制选项——最小边界长度控制选项（EDGMN）和最大边界长度控制选项（EDGMX），这两个控制选项没有默认值。



图 4-22 边界线的单元尺寸



图 4-23 为相邻线的纵横比对话框，该对话框包括两个控制选项——自由网格控制选项（ADJF）和映射网格控制选项（ADJM），自由网格控制选项的默认值为 1，映射网格控制选项的默认值为 4。

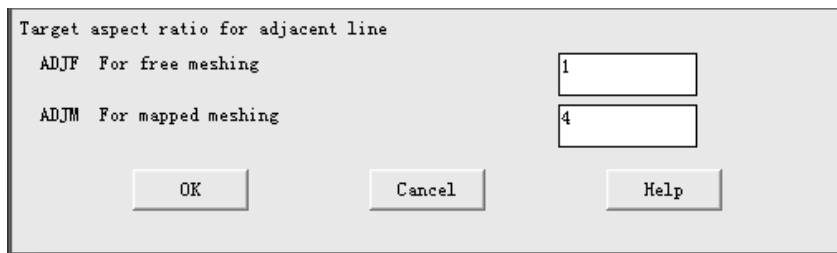


图 4-23 相邻线的纵横比

2. 其他单元尺寸控制

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

1) 通过表面的边界线所用的单元边长控制总体单元尺寸或控制每条线划分的单元数。

命令：ESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size

2) 控制给定关键点附近的单元尺寸。

命令：KESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Keypoints | All KPs

3) 控制给定线上的单元数。

命令：LESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines

4.4.3 裂纹尖端网格划分控制

用户在进行断裂力学分析与计算时，会对裂纹尖端进行网格划分，由于裂纹尖端的应力奇异性，对应网格有特殊要求，因此 ANSYS 专门提供了适应于裂纹尖端的网格划分控制选项。

命令：KSCON

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | Concentrat KPs | Create

操作后弹出如图 4-24 所示的裂纹尖端网格控制面板，该控制面板包括五个控制选项，即裂纹尖端关键点（NPT）；围绕裂纹尖端第一圈单元半径（DELR）；第二圈单元半径与第一圈单元半径之比（RRAT）；裂纹尖端第一圈单元的数量（NTHET）和裂纹尖端单元中间节点位置（KCTIP）。DELR 的取值建议小于 1/8 裂纹半长；RRAT 的取值建议在 1~2.5 之间；NTHET 的取值建议在 12~18 之间，KCTIP 一般要选择 Skewed 1/4pt。

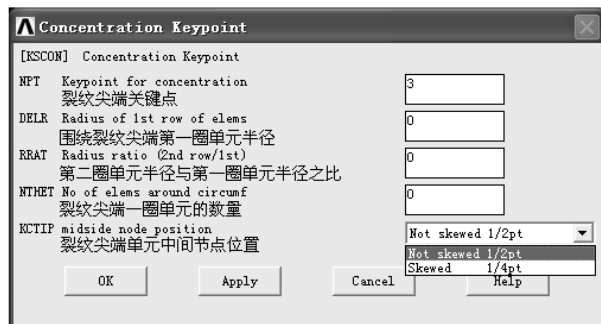


图 4-24 裂纹尖端网格控制

4.5 网格划分器

可用 MOPT 命令控制 ANSYS 使用何种网格划分器执行网格划分操作。

命令: MOPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts

操作后弹出图 4-25 网格划分器选项。

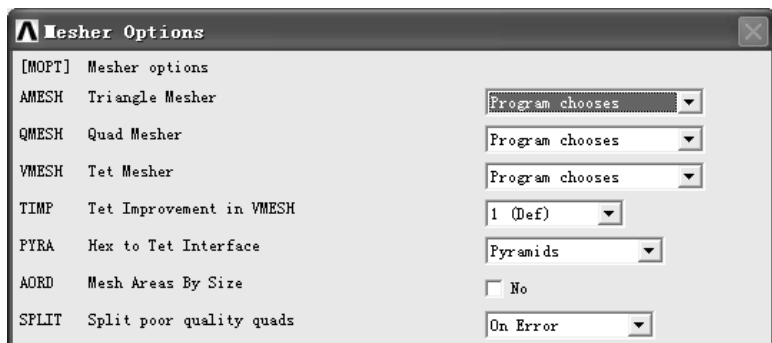


图 4-25 网格划分器选项

注意: 四边形的网格划分与三角形网格划分器划分的网格是不同的。因为所有的自由四边形网格划分算法用三角形网格作为起点。

4.5.1 三角形表面网格划分

1) 程序选择 (Program Chooses)。多数情况下, ANSYS 会选择主三角网格划分器, 即 Riemann 空间网格划分器。无论何种原因网格划分器失效, ANSYS 都要变换网格划分器并重新执行网格划分操作。

2) 主三角表面网格划分器 (Main), 即 Riemann 空间网格划分器。若 ANSYS 使用主网格划分器, 并且在主网格划分器失效时并不会更换网格划分器。Riemann 空间网格划分器适于大多数表面。



3) 第一类替换三角表面网格划分器 (Alternate)。若 ANSYS 使用第一类替换三角网格划分器, 在此网格划分器失效时程序不会更换其他网格划分器。出于速度考虑, 建议用户不使用它。但是, 如果在参数空间中存在退化表面, 则这种网格划分器却有最好的结果。建议用户对高度各向异性的区域划分网格时使用这个划分器。

4) 第二类替换三角表面网格划分器 (Alternate2)。若 ANSYS 使用第二类替换三角网格划分器, 在此网格划分器失效时程序不会更换其他网格划分器。建议用户对于退化的表面或参数化较差的表面不使用该方法, 因为生成的网格质量较差。

4.5.2 四边形表面网格划分

1) 程序选择网格划分器 (Program Chooses), 此为建议设置和默认设置。在多数情况下, ANSYS 会选择主四边形网格划分器, 即 Q-Morph (Quad-Morphing) 网格划分器。

2) 主四边形表面网格划分器 (Main)。若 ANSYS 使用主网格划分器, 即使主网格划分器失效程序也不会更换网格划分器。

3) 替换四边形表面网格划分器 (Alternate)。若 ANSYS 使用替换网格划分器, 在替换网格划分器失效时并不更换为主网格划分器。因为此网格划分器能在一个面全部生成四边形单元的网格, 面的边界处总的线分割数必须是偶数, 并且分裂四边形网格项必须关闭。

4.5.3 四面体单元网格划分

1) 程序选择网格划分器 (Program Chooses), 此为默认设置。在这种设置下, 首先程序选择使用主四面体网格划分器, 其次选用替换的四面体网格划分器。

2) 主四面体网格划分器 (Main)。对多数模型而言, 此网格划分器明显比替换的网格划分器速度快。

3) 替换的四面体网格划分器 (Alternate)。此网格划分器不支持从面网格生成四面体体网格。

4.5.4 控制四面体单元的改进

用户可以在 ANSYS 程序执行下一步自由体网格划分操作之前, 用 MOPT 命令控制四面体单元改进的程度。四面体单元改进的程度范围为 1~6, 等级 1 只提供最小的改进, 等级 5 对线性四面体网格划分提供了最大程度的改进, 而等级 6 对二次四面体网格提供了最大程度的改进, 等级 1 只有主四面体网格划分器支持。

4.6 网格划分方法

4.6.1 自由网格划分

1. 自由网格划分概述

自由网格化分操作, 对实体模型无特殊要求。任何几何模型, 无论形状是否规则, 都可以进行自由网格划分。四边形、三角形和四面体单元支持自由网格划分。

所用单元形状依赖于是对面还是对体进行网格划分。对面进行网格划分, 自由网格可以

只由四边形单元组成，也可以只由三角形单元组成或两者混合。对体进行网格划分，自由网格一般限定为四面体单元。金字塔形单元作为过渡也可加入到四面体网格中。

可以通过下列方法指定所用形状。

命令：MSHAPE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts

还必须指定对此模型用自由网格划分。

命令：MSHKEY, 0

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts

对于支持多于一种形状的面单元，默认地会生成混合形状。可用来要求全部生成三角形网格，但使用低次单元时建议不要这样做。

2. 与其他网格控制交互使用

单元尺寸控制可与智能网格尺寸控制相关连。但是，当设置的单元尺寸发生冲突时，智能网格尺寸控制算法将做如下处理。

- 1) 考虑任何对面的单元尺寸定义，但为适应曲率和几何的近似可能会替换它。
- 2) 指定线的单元尺寸将作为定义尺寸使用。
- 3) 任何对关键点指定的单元尺寸都会得到分配，但为适应曲率和几何近似将被替换。
- 4) 如果设置总体单元尺寸，为适应弯曲和几何近似它将会在必要时被替换。
- 5) 使用 DESIZE 命令指定的默认单元尺寸在 SmartSizing 打开时将被忽略。

4.6.2 映射网格划分

可指定程序全部用四边形面单元、三角形面单元或全部用六面体单元生成映射网格。映射网格划分要求面或体形状规则，即必须满足一定准则。四边形，三角形和六面体支持映射网格划分。

对映射网格划分，生成的单元尺寸依赖于当前总体单元尺寸、模型的线控制单元尺寸和模型的面控制单元尺寸的设置，智能单元尺寸控制（SmartSizing）不能用于映射网格划分。

1. 面映射网格划分

面映射网格包括全部是四边形单元或全部是三角形单元的映射网格。若要面接受映射网格划分，必须满足以下条件。

- 1) 该面必须是三或四条边。
- 2) 面的对边必须划分为相同数目的单元，或其划分与一个过渡形网格的划分相匹配。
- 3) 该面如有三条边，则划分的单元必须为偶数且各边单元数相等。
- 4) 网格划分必须设置为映射网格。结果得到全是四边形单元或全是三角形单元的映射网格。
- 5) 如果用户想生成映射三角形网格，可以指定 ANSYS 所用模式生成三角形单元网格。

如果不指定一种模式，ANSYS 将为用户指定。图 4-26 所示为全用四边形单元划分网格的基本面和全用三角形单元划分网格的基本面。

如果一个面多于四条边，不能用映射网格划分。但是有些线可以合并或连接使总线数减少到四条。



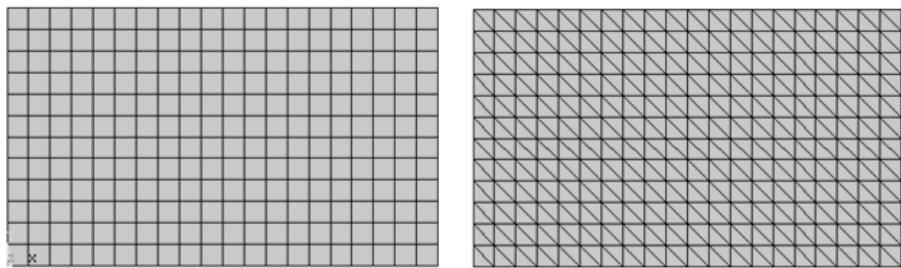


图 4-26 面映射网格

注意：映射三角形网格划分是指 ANSYS 接受一可用映射网格划分的面并用三角形单元划分网格的过程。这种类型的网格划分尤其适于刚性接触单元的网格划分。

(1) 将线分割进行映射网格划分

可以将面的对边指定为相同的单元数目以便生成映射网格。不必对所有线指定单元数量。

如图 4-27，设置 L1 的分割数为 15，L2 的分割数为 10，L3 的分割数为 10，L4 的分割数为 8，在进行映射网格划分时，程序会取对边较多的分割数，作为最终的分割数，即最终的有限元网格 L4 由 8 变为 10，L3 由 10 变为 15。

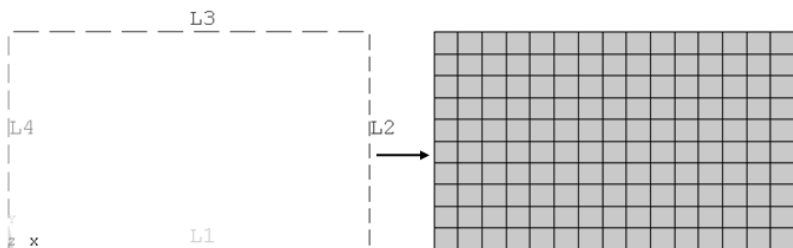


图 4-27 分割线进行映射网格划分

(2) 连接线

如果一个面的边数多于四条，可将部分线合并或连接起来以使总边数降为四。一般来说 LCOMB 命令优先于 LCCAT 命令。LCOMB 命令可用于相切或不相切的线，节点也不必产生在线的接头。

1) 连接线操作。

命令：LCCAT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | Concatenate | Lines

注意：LCCAT 命令不支持用 IGES 默认功能输入模型。但是，可用 LNMERGE 命令将从 CAD 文件导入的模型线进行连接。

2) 合并线操作。

命令：LCOMB

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

如图 4-28，该面共有六条线，通过连接线操作，把 L2 和 L3 相连接产生 L7，把 L5 和 L6 相连接产生 L8，这样就生成了四条边的面，以进行映射网格划分。



图 4-28 合并和连接线以进行映射网格划分

2. 体映射网格划分

要将体模型划分为六面体单元，必须满足以下条件。

- 1) 该体的外形应为块状、楔形、棱柱，或四面体；
- 2) 体的对边上必须划分相同的单元数，或分割符合过渡网格形式适于六面体网格划分。
- 3) 如果体是棱柱或四面体，三角形面上的单元分割数必须是偶数。

(1) 连接面

与线一样，当需要减少围成体的面数以进行映射网格划分时，可以对面进行加或连接。如果连接面有边界线，线也必须连接在一起，必须先连接面，再连接线。

注意：一般来说，布尔运算操作中的面相加的连接效果优于 ACCAT。另外须注意删除连接面并不会自动删除相关的连接线。

连接面可采用下列方法。

命令：ACCAT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | Concatenate | Areas

注意：ACCAT 命令不支持用 IGES 默认功能输入模型。

将面相加，可采用下列方法。

命令：AADD

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Areas

(2) 关于连接线和面的一些说明

连接仅是映射网格划分的辅助工具，并非布尔操作中的加运算。连接应是对实体进行映射网格划分前的最后一步，连接生成的图元不能进行任何实体建模操作。例如，由 LCCAT 操作生成的线不能在实体模型上加载，不能参与布尔运算，不能复制、拖拉、旋转等，也不能再用于另一个连接。

3. 映射网格划分的默认单元尺寸

DESIZE 命令可以改变的默认值有：未划分网格的线上最少和最多的单元数，每个单元的最大跨角，最小及最大边长。DESIZE 命令常用来控制映射网格划分的单元尺寸。但对于



自由网格划分建议使用 SmartSizing。

4.6.3 体扫掠生成网格

体扫掠可以从一边界面网格扫掠贯穿整个体将已有未划分网格的体生成单元。如果源面网格由四边形网格组成，体将生成六面体单元。如果源面由三角形网格组成，体将生成楔形单元。如果源面由三角形和四边形单元共同组成，则体将由楔形和六面体单元共同填充。扫掠的网格与体密切相关。

1. 体扫掠的优点

与其他拖拉已划分网格的面生成划分网格的体方法不同，体扫掠试图使用已有未划分网格的体。此方法尤其适用于下列情况。

- 1) 从其他程序建立的实体模型，导入后要在 ANSYS 中划分网格。
- 2) 对一不规则体生成六面体网格。现在仅需将体分裂为一系列离散的可扫掠区域。
- 3) 用户想生成与已有一种其他拉伸方法生成的网格不同的网格，或在操作时忘记生成网格了。

4) 如果在体扫掠之前未对源面划分网格，ANSYS 在激活体扫掠时会为用户对其进行网格划分。而其他拉伸方法要求在激活它们时由用户自己对面划分网格。如果不进行网格划分，将由其他延伸方法生成体，但不会生成面和体网格。

2. 体扫掠步骤

(1) 体扫掠的准备工作

1) 确定有多少个体需要由 VSWEPT 扫掠。VSWEPT 可对一个体、所有选择的体或部分体进行扫掠。

2) 确保已定义了合适的二维或三维单元类型。例如，如果对源面进行预网格划分，并想生成高阶六面体单元，应当用二次二维单元对源面划分网格。

(2) 设置体扫掠选项

命令：EXTOPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volume Sweep | Sweep Opts

操作后 弹出如图 4-29 所示的体扫掠设置对话框，该对话框包括五个控制选项，由上到下，其作用分别是体扫掠划分网格后是否清除面网格、在不能进行体扫掠的区域是否使用四面体网格、是否自动选择体扫掠的源面和目标面、设置体扫掠方向划分的份数、设置体扫掠方向的空间比例。

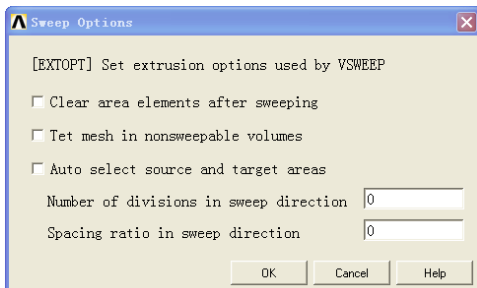


图 4-29 体扫掠设置对话框

如果源面和目标面是由用户定义的，体扫掠将自动确定哪一个边界面应当作为源面或目标面。如果体扫掠不能自动确定源面或目标面，体扫掠将终止。

(3) 开始体扫掠

GUI: Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volume Sweep | Sweep Opts。出现体扫掠拾取器，选择待扫掠的体并单击OK。

3. 避免体扫掠失败的方法

(1) 不能进行的情况

- 1) 体包含多于一个壳，即体内有内腔。
- 2) 体的拓扑中源面与目标面不是相对的面。
- 3) 体中有一个不穿过源和目标面的孔。

(2) 体扫掠失败后的对策

如果体扫掠操作因单元形状差而失败，可用下列中的一个或多个对策。建议用户按下列次序进行尝试。

- 1) 如果未指定源面和目标面，指定并重新激活体扫掠器。
- 2) 交换源面和目标面并重新激活体扫掠器。
- 3) 选择一组完全不同的源面和目标面并重新进行体扫掠。
- 4) 使用形状检查作为诊断模型中何处引起扫掠失败的工具。降低单元形状检查的尺度为警告模式，于是会出现严重错误的单元导致警告信息而不是单元失败。然后重新执行扫掠操作。最后，再用一个扫掠操作对体划分网格。

4. 体扫掠的注意事项

- 1) 源面和目标面不必是平面或平行面。
- 2) 如果源面和目标面的拓扑结构相同，尽管源面与目标面的形状不同，扫掠操作仍能成功。
- 3) 在体扫掠中，ANSYS 可以生成线性或二次单元。可将二次面单元扫掠成线性体单元，也可将线性面单元扫掠成二次体单元。
- 4) 体扫掠并不要求模型为等截面，但如果是变截面，只有从扫掠的一端到另一端为线性变化才有最好的结果。

4.7 修改网格

4.7.1 重新划分网格

可通过重新设置单元尺寸控制并开始网格划分，对已划分网格模型重新划分网格。这是最简便的改变网格的途径。不需要 accept/reject 提示，不必清除已有网格即可对其进行网格划分。

但是，应用这种方法有一些限制。可用 KESIZE、ESIZE、SMRTSIZE 和 DESIZE 控制命令改变单元尺寸定义。如果在网格划分前希望改变 LESIZE 设置功能，可以不用这种方法而采用网格 accept/reject 提示。只有通过 GUI 交互执行网格划分时才可用网格重新划分功能。如果用命令输入，必须在网格重新划分前清除网格。



4.7.2 清除网格

在重新划分网格时并不是每次都要求清除节点和单元。但在用 **LESIZE** 命令进行设置时必须清除网格。要从根本上改变实体模型也必须清除网格。

若要从关键点、线、面或体上清除网格，可以在 GUI 中选择 **Main Menu | Preprocessor | Meshing | Clear | entity type**。

4.7.3 细化局部网格

如果用户对网格划分基本满意，但希望在某个区域划分更多的单元，可在选定的节点、单元、关键点、线或面附近细化局部网格，这些选定图元附近的单元将被分裂，从而生成新的单元。可通过定义控制如下的细化过程。

- 1) 细化的程度。
- 2) 按照所选定图元以外单元的数量确定周围待重新划分网格的深度。
- 3) 在分裂原来的单元之后的后处理类型。
- 4) 在四边形网格细化中是否可以引入三角形网格。

第 5 章 耦合和约束方程



5.1 耦合的概念

常规的有限元模型中使用单元连接节点以建立不同自由度间的关系。这种连接方法不能描述特殊的细节，如刚性区域、结构的铰链连接、对称滑动边界、周期条件和其他特殊内节点连接等。因此，ANSYS 提供了耦合和约束方程功能，该功能能够实现单元连接做不到的自由度连接。

当需要使两个或多个自由度取得相同值时，就可以将这些自由度耦合在一起。耦合自由度集包含一个主自由度和一个或多个其他自由度。耦合自由度可应用于模型部分，包含对称、在两重复节点间形成销钉、铰链、万向节和滑动连接，使模型的一部分表现为刚体。

5.2 定义耦合自由度

5.2.1 在给定节点处定义并修改耦合自由度

可用下列方法定义耦合自由度。

命令：CP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Couple DOFs

在定义一个耦合节点集之后，通过执行一个另外的耦合操作将更多节点加到耦合集中。用户也可用选择逻辑来耦合所选节点的全部耦合。可用 CP 命令输入负的节点号来删除耦合集中的节点。要修改一耦合自由度集可用 CPNGEN 命令。

5.2.2 耦合重合节点

命令：CPINTF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Coincident Nodes

操作后弹出图 5-1 耦合重合节点对话框。

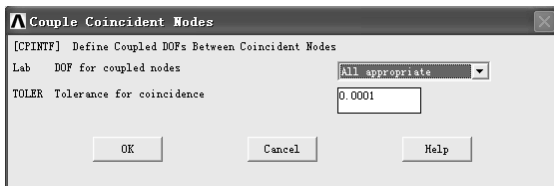


图 5-1 耦合重合节点对话框



该对话框包括两个控制项，用户可以选择所有可能的耦合节点自由度（All appropriate）和某一方向的耦合节点自由度；重合节点的容差，用户可以设置该项控制相邻距离为多少节点为重合节点，如容差等于 0.0001 时，说明只要相邻节点的距离小于或等于 0.0001，则程序判断这两个节点为重合节点。

除耦合重复节点外，还可使用下列替换方法迫使节点有相同的表现方式。

1) 如果对重复节点的所有自由度都要进行耦合，将这些节点合并起来更方便。

命令：NUMMRG

GUI: Main Menu | Preprocessor | NumberingCtrls | Merge Items

2) 通过在重复节点对之间生成两节点单元来连接它们。

命令：EINTF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | At Coincid Nd

3) 将两个有不相似网格模式的区域连接起来。这项操作使一个区域的选定节点与另一个区域的选定单元连接起来生成约束方程。

命令：CEINTF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling/Ceqn | Adjacent Regions

5.2.3 定义更多的耦合集

一旦定义一个或更多耦合集，可用这些方法生成另外的耦合集。

1) 使用下列方法以相同的节点号但与已有模式集不同的自由度标记定义新的耦合集。

命令：CPLGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Gen w/Same Nodes

2) 使用下列方法生成与已有耦合集不同节点编号但有相同的自由度标记的新的耦合集。

命令：CPSGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Gen w/Same DOF

5.2.4 列表和删除耦合集

1) 列表耦合自由度集。

命令：CPLIST

GUI: Utility Menu | List | Other | Coupled Sets | All CP nodes selected

2) 删除耦合自由度集。

命令：CPDELETE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Del Coupled Sets

这项操作删除全部的耦合集，可以用 CPNGEN 命令和 CP 命令或相应的 GUI 操作从耦合集中删除特定的节点。

5.2.5 耦合的注意事项

每个耦合的节点都在节点坐标系下进行耦合操作。通常应当保持节点坐标系的一致性。自由度是在一个集内耦合而不是集之间的耦合。不允许一个自由度出现在多于一个耦合集

中。在结构分析中，耦合自由度定义的刚体区域有时会引起明显的平衡破坏。不重复的或不与耦合位移方向一致的一个耦合节点集会产生外加力矩但不出现在反力中。

5.3 约束方程的定义

线性约束方程提供了一种比简单耦合更通用的联系自由度值的方法。约束方程必须有如下形式：

$$\text{Constant} = \sum_{i=1}^N (\text{Coefficient}(i) * U(i))$$

其中， $U(i)$ 是自由度项 (i)； N 是方程中项的编号。

5.4 定义约束方程

5.4.1 直接方法

可用下列方法直接生成约束方程。

命令：CE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Constraint Eqn

操作后弹出如图 5-2 所示的定义约束方程对话框。

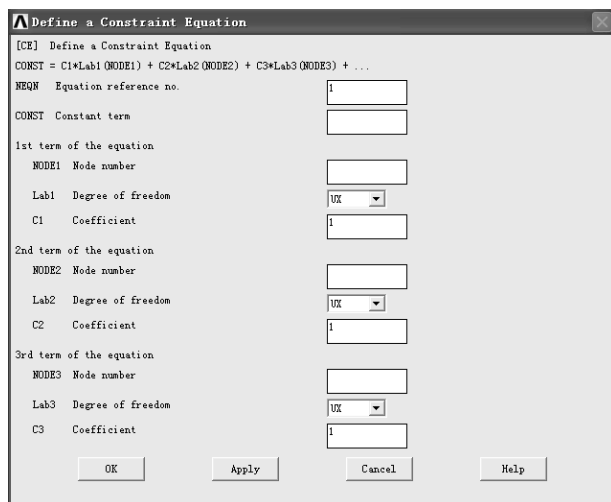


图 5-2 定义约束方程的对话框

该对话框包括 11 个控制选项，分别是约束方程参考号（NEQN）、方程常数（CONST）、约束方程表达式中第一项中的节点号（NODE1）、约束方程表达式中第一项中的约束自由度（Lab1）、约束方程表达式中第一项中的常数（C1）、约束方程表达式中第二项中的节点号（NODE2）、约束方程表达式中第二项中的约束自由度（Lab2）、约束方程表达式中第二项中的常数（C2）、约束方程表达式中第三项中的节点号（NODE3）、约束方程表达式中第三项中的约束自由度（Lab3）、约束方程表达式中第三项中的常数（C3）。



式中第三项中的约束自由度 (Lab3)，以及约束方程表达式中第三项中的常数 (C3)。

下面为一个典型的应用约束方程的例子，如图 5-3 所示，力矩的传递是由梁单元与平面单元的连接来完成的。

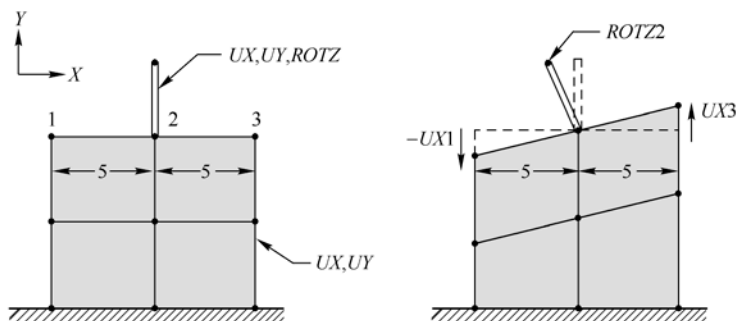


图 5-3 建立旋转和平移自由度的关系

在此例中，如果不用约束方程，则节点 2 表现为一个铰链。可用下列方法传递梁和平面应力单元之间的力矩。

$$ROTZ2 = (UY3 - UY1) / 10$$

此方程应当重写成要求的格式，并代入程序：

```
0 = UY3 - UY1 - 10 * ROTZ2  
CE,1,0,3,UY,1,1,UY,-1,2,ROTZ,-10
```

方程中第一个独特的自由度按方程中所有其他自由度的方式删除。一个独特的自由度是不在任何其他约束方程、耦合节点集、给定位移集或主自由度集中定义的自由度。应将方程的第一项作为自由度删除。尽管在理论上可在多于一个方程中指定相同的自由度，用户必须小心避免重定义。还必须小心以保证模型中每个节点和自由度的存在。

5.4.2 修改约束方程

可用下列方法修改约束方程中的常数项。

命令：CECMOD

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling/Ceqn | Modify ConstrEqn, 弹出如图 5-4 所示的修改约束方程对话框。

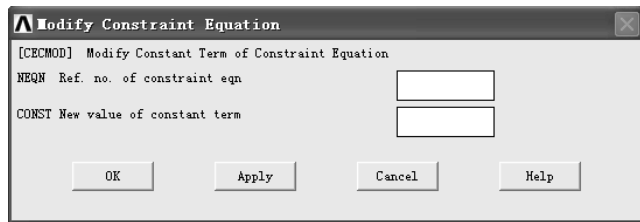


图 5-4 修改约束方程对话框

该对话框包括两个控制选项，即约束方程的参考号 (NEQN) 和新的约束方程常数项

(CONST)。如果要修改约束方程中的其他项,必须在求解前在 PREP7 中使用 CE 命令或相应 GUI 路径。

5.4.3 直接与自动定义约束方程的对比

本章前面提到一个例子说明如何用 CE 命令直接生成约束方程,每次只能生成一个。下面介绍三种自动生成多约束方程的操作。

1. 定义刚性区域

CERIG 命令通过写约束方程定义一个刚性区域。通过连接一保留的节点到许多待去掉节点定义刚性线。

命令: CERIG

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Rigid Region

操作后弹出如图 5-5 所示的使用约束方程定义刚性区域对话框。

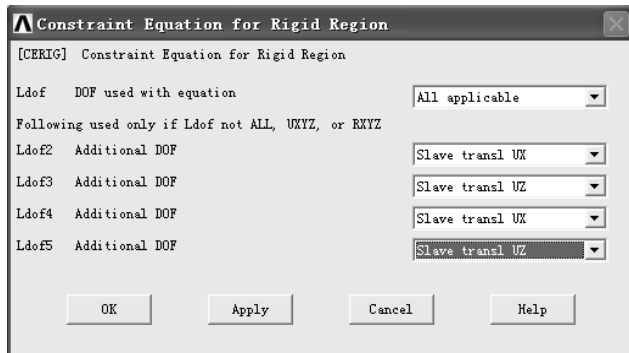


图 5-5 使用约束方程定义刚性区域对话框

将 CERIG 命令的 Ldof 设置为 ALL,此操作将为每对二维空间的约束节点生成三个方程。这三个方程在总体笛卡儿空间确定三个刚体运动 (UX、UY、ROTZ)。为在二维模型上生成一个刚性区域,必须保证 X-Y 平面为刚性平面,并且在每个约束节点有 UX、UY 和 ROTZ 三个自由度。类似地,此操作也可在三维空间为每对约束节点生成六个方程,在每个约束节点上必须有 UX、UY、UZ、ROTX、ROY 和 ROTZ 六个自由度。

输入其他标记的 Ldof 域将有不同的作用。如果此区域设置为 UXYZ,程序在二维 (X, Y) 空间将写两个约束方程,而在三维空间 (X、Y、Z) 将写三个约束方程。这些方程将写成从节点的平移自由度和主节点的平移和转动自由度。类似地, RXYZ 标记允许生成忽略从节点的平移自由度的部分方程。其他标记的 Ldof 将生成其他类型的约束方程。

总之,从节点只需要由 Ldof 标记的自由度,但主节点必须有所有的平移和转动自由度 (即二维的 UX、UY 和 ROTZ,三维的 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ)。对由没有转动自由度单元组成的模型,应当考虑增加一个虚拟的梁单元以在主节点上提供旋转自由度。

2. 将不相似的已划分网格区域连在一起

命令: CEINTF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Adjacent Regions。

连起来生成约束方程。这项操作将不相似网格形式的区域连接在一起。在两区域的交界



处，从网格稠密的区域选择节点 A，从网格稀疏区域选择单元 B，使用区域 B 单元的形函数，在相关的区域 A 和 B 界面的节点处写约束方程。ANSYS 允许这些节点位置使用两公差准则，节点在单元之外超过第一公差就认为节点不在界面上，节点贴近单元表面的距离小于第二公差则将节点移到表面上。

3. 从已有约束方程集定义约束方程集

可用 CESGEN 命令从已有约束方程集生成约束方程。已有约束方程集内的节点编号将增加以生成另外的约束方程集。另外约束方程集的标记和系数保持与原集的一致。

命令：CESGEN

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Gen w/same DOF

4. 列表和删除约束方程

列表约束方程的方法如下。

命令：CELIST

GUI: Utility Menu | List | Other | Constraint Eqns | All CE nodes selected

删除约束方程的方法如下。

命令：CEDELE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Coupling / Ceqn | Del Constr Eqn

第 6 章 加 载



6.1 载荷的概念

有限元分析的主要目的是检查结构或构件对一定载荷条件的响应。因此，在分析中施加合适的载荷条件是分析正确与否的关键一步。用户可以用各种方式对模型加载，并且借助于载荷步选项，可以控制在求解中载荷如何使用。

载荷分为六类：自由度约束、力、表面载荷、体积载荷、惯性载荷和耦合场载荷。

1) 自由度约束是指施加于模型的位移边界条件。例如，在结构分析中约束被指定为位移、对称边界条件或反对称边界；在热力分析中指定为温度和对流换热边界条件。

2) 力是指施加于模型节点的集中载荷。例如，在结构分析中被指定为力和力矩，在热力分析中为热流速率。

3) 表面载荷是指施加于某个表面上的分布载荷。例如，在结构分析中为压力，在热力分析中为对流和热通量。

4) 体积载荷是指体积的或场载荷。例如，在结构分析中为温度，在热力分析中为热生成速率。

5) 惯性载荷是指由物体惯性引起的载荷，如重力加速度、角速度和角加速度，主要在结构分析中使用。

6) 耦合场载荷是以上载荷的一种特殊情况，指将一种分析得到的结果作为另一种分析的载荷。例如，热分析中的温度场应用于结构分析。

6.2 载荷步、子步和平衡迭代

载荷步是为了成功求解模型的一种必要设置。在线性静态分析中，可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合（如在第一个载荷步中施加风载荷，在第二个载荷步中施加重力载荷，在第三个载荷步中施加风和重力载荷以及一个不同的支承条件等）。在瞬态分析中，多个载荷步加到载荷-时间曲线的不同区段。

ANSYS 程序把在第一个载荷步选择的单元组用于随后的所有载荷步，而不论用户为随后的载荷步指定哪个单元组。要选择一个单元组，可使用下列两种方法之一。

命令：ESEL

GUI：Utility Menu | Select | Entities

图 6-1 给出了一条三个载荷步的载荷-时间曲线：第一个载荷步是线性斜坡载荷；第二个载荷步是恒定载荷；第三个载荷步是突然卸载载荷。

子步是执行求解载荷步中的点。使用子步，有如下原因。



- 1) 在非线性静态或稳态分析中, 使用子步逐渐施加载荷以便能获得精确解。
- 2) 在线性或非线性瞬态分析中, 使用子步满足瞬态时间累积法则。
- 3) 在谐响应分析中, 使用子步获得谐波频率范围内多个频率处的解。

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而计算的附加解。仅用于收敛起着很重要的作用的非线性分析中的迭代修正。

例如, 在二维材料非线性分析中, 为获得精确解, 通常使用两个载荷步, 如图 6-2 所示。

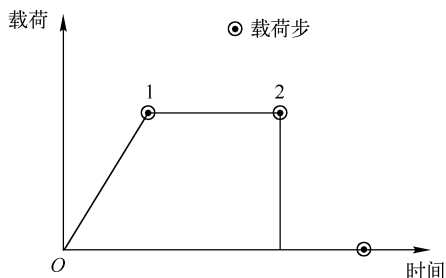


图 6-1 使用多个载荷步表示瞬态载荷历程

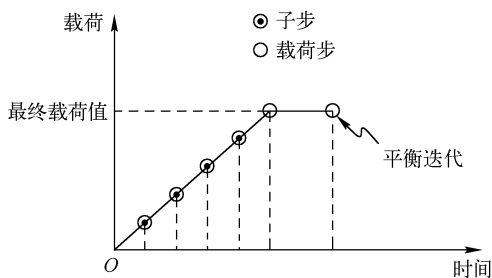


图 6-2 载荷步, 子步和平衡迭代

第一个载荷步, 将载荷逐渐加到 5~10 个子步上, 每个子步仅用一次平衡迭代。
第二个载荷步, 得到最终收敛解, 且仅有一个使用 15~25 次平衡迭代的子步。

6.3 时间的作用

在所有静态和瞬态分析中, 不论分析是否依赖于时间, ANSYS 都使用时间作为跟踪参数。其好处是: 在所有情况下可以使用一个不变的“计数器”或“跟踪器”。此外, 时间总是单调增加的, 且自然界中大多数事情的发生都经历一段时间, 而不论该时间多么短暂。

显然, 在瞬态分析或与速率有关的静态分析中, 时间代表实际的、按年月顺序的时间, 用秒、分钟或小时表示。在指定载荷历程曲线的时候, 在每个载荷步结束点赋时间值。可使用下列方法之一赋时间值。

命令: TIME

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

然而, 在不依赖于速率的分析中, 时间仅仅成为一个识别载荷步和子步的计数器。默认情况下, 程序自动地对 Time 赋值, 在载荷步 1 结束时, 赋 Time=1; 在载荷步 2 结束时, 赋 Time=2; 依此类推。载荷步中的任何子步将被赋给合适的、用线性插值得到的时间值。在这样的分析中, 通过赋给自定义的时间值, 就可建立自己的跟踪参数。例如, 若要将 100 个单位的载荷增加到一个载荷步上, 可以在该载荷步结束时将时间指定为 100, 以使载荷和时间值完全同步。

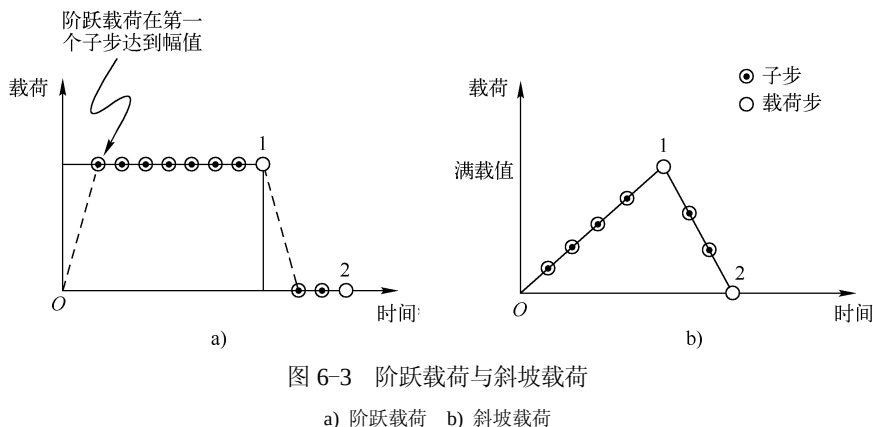
那么, 在后处理器中, 如果得到一个变形-时间关系图, 其含义与变形-载荷关系相同。当求解中使用弧长方法时, 时间等于载荷步开始时的时间值加上弧长载荷系数的数值。

6.4 阶跃载荷和斜坡载荷

当在一个载荷步中指定一个以上的子步时,就出现了载荷是阶跃载荷还是斜坡载荷的问题。

1) 如果载荷是阶跃的,那么,全部载荷施加于第一个载荷子步,并且在载荷步的其余部分,载荷保持不变,如图 6-3a 所示。

2) 如果载荷是斜坡逐渐递增的,那么,在每个载荷子步,载荷值逐渐增加,且全部载荷出现在载荷步结束时,如图 6-3b 所示。



命令: KBC

KBC 用于表示载荷为斜坡载荷还是阶跃载荷。KBC,0 表示载荷为斜坡载荷; KBC,1 表示载荷为阶跃载荷。

6.5 施加载荷的方法

可将大多数载荷施加于实体模型上或有限元模型上。例如,可以在关键点或节点处施加集中力。同样地,可以在线和面或在节点和单元面上施加对流。在开始求解时,程序自动将这些载荷转换到节点和单元上。

6.5.1 实体模型载荷

1. 优点

- 1) 有限元网格的变化不影响在实体模型上施加的载荷。
- 2) 通过图形操作拾取实体进行载荷施加方便快捷。

2. 缺点

- 1) ANSYS 网格划分命令生成的单元处于当前激活的单元坐标系中。网格划分命令生成的节点使用整体笛卡儿坐标系。因此,实体模型和有限元模型可能具有不同的坐标系和加载方向。



- 2) 在简化分析中, 实体模型不是很方便。
- 3) 施加关键点约束很棘手, 尤其是当约束扩展选项被使用时。

3. 注意事项

如前所述, 在开始求解时, 实体模型载荷将自动转换到有限元模型。如果用户将实体模型载荷与有限元模型载荷、耦合或约束方程混合起来使用, 应该预防以下冲突。

- 1) 转换过的实体模型载荷将取代现有的节点或单元载荷, 而不管这些载荷的输入顺序。
- 2) 删除实体模型载荷将删除所有对应的有限元载荷。
- 3) 线或面的对称或反对称条件经常引入节点旋转, 而属于被约束的线或面的节点的节点约束、节点力、连接或约束平衡将受到影响。

6.5.2 有限单元载荷

1. 优点

- 1) 在简化分析中不会产生问题, 因为可将载荷直接施加在主节点。
- 2) 不必担心约束扩展, 可简单地选择所有所需节点, 并指定适当的约束。

2. 缺点

- 1) 任何有限元网格的修改都使载荷无效。
- 2) 不便使用图形拾取施加载荷。

6.5.3 自由度约束

1. 设置自由度约束

默认情况下, 如在同一位移重复设置一个自由度约束, 则新自由度约束替代原先的自由度约束。利用下列方法可将该默认值改变为增加或忽略重复设置。

命令: DOFSEL/ DCUM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Replace vs Add | Constraints

操作后弹出如图 6-4 所示的设置自由度约束对话框, 在该对话框中包括两个命令, 即 DOFSEL 和 DCUM。DOFSEL 命令控制选项可以用来设置累加某一方向的自由度, 如 UX 或 UY。DCUM 命令包括三个控制子选项, Oper 用来设置载荷是取代存在的自由度 (Replace existing)、进行自由度约束的累加 (Add to existing), 还是忽略 (Be ignored); RFACT 用来设置比例因子 (Scale factor); TBASE 用来设置基础问题, 该子选项仅对温度自由度有效。

例如:

```
NSEL,...      !选择一组节点
D,ALL,VX,40!在所有节点设置 VX = 40
D,ALL,VX,50!将 VX 值改变为 50(替换)
DCUM,ADD!接着待加的自由度
D,ALL,VX,25!在所有节点 VX = 50+25 = 75
DCUM,IGNORE!接着待忽略的自由度
D,ALL,VX,1325!这些 VX 值被忽略!
DCUM          !将 DCUM 重新设置为默认(替换)
```

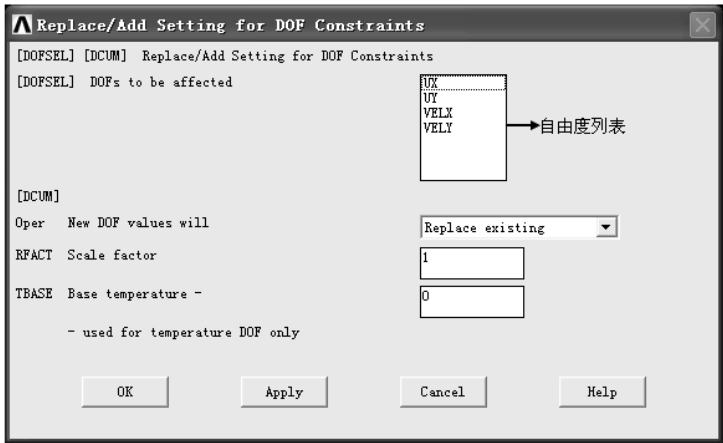


图 6-4 设置自由度约束对话框

2. 施加自由度约束

表 6-1 显示了每个学科中可被约束的自由度和相应的 ANSYS 标识符。标识符所指的方向基于节点坐标系。

表 6-1 每个学科中可用的 DOF 约束

学 科	自 由 度	ANSYS 标识符
结构分析	平移 旋转	UX, UY, UZ; ROTX, ROTY, ROTZ
热分析	温度	TEMP
流体分析	速度、压力、紊流动能、紊流扩散速率	VX, VY, VZ; PRES; ENKE; ENDS

对于结构分析用户，可以通过下列方法施加自由度的约束。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Displacement

操作后弹出如图 6-5 所示的下拉菜单，菜单中列出了施加结构位移约束的对象分别是线、面、关键点、节点和节点组件。

对于热分析用户可以通过下列方法施加自由度的约束。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Temperature

操作后弹出如图 6-6 所示的下拉菜单，菜单中列出了施加热分析中的温度约束对象，分别是线、面、体、关键点、节点和节点组件，从热分析文件中读取均匀温度、单元和单元组件。

On Lines
 On Areas
 On Keypoints
 On Nodes
 On Node Components

图 6-5 结构位移约束对象

On Lines
 On Areas
 On Volumes
 On Keypoints
 On Nodes
 On Node Components
 From Therm Analy
 Uniform Temp
 On Elements
 On Element Components

图 6-6 热分析中的温度约束对象



6.5.4 施加对称或反对称边界条件

1. 概念

在结构分析中,对称边界条件指把平面外移动和平面内旋转设置为 0,而反对称边界条件指把平面内移动和平面外旋转设置为 0,见图 6-7。对称和反对称边界条件的使用如图 6-8 所示。

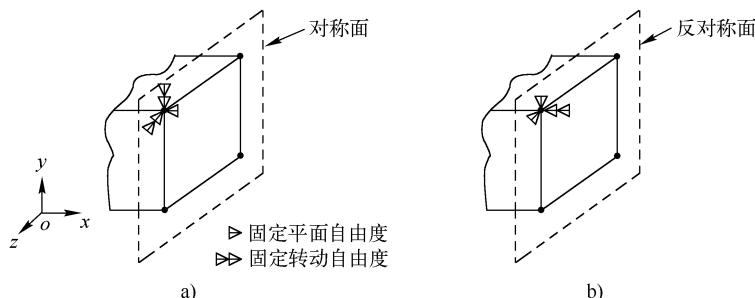


图 6-7 在结构分析中的对称和反对称边界条件

a) 对称边界条件 b) 反对称边界条件

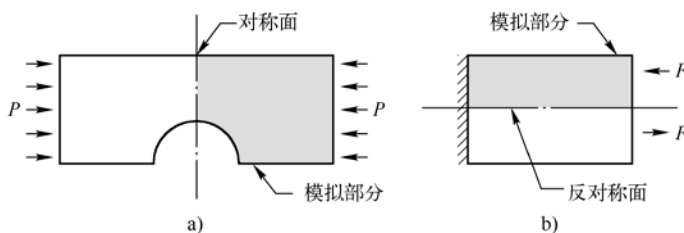


图 6-8 使用对称和反对称边界条件的实例

a) 使用对称面模拟二维平板 b) 使用反对称面模拟二维平板

2. 施加对称边界条件

1) 在节点处施加对称边界条件。

命令: DSYM, SYMM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes

2) 在线上施加对称边界条件。

命令: DL, LINE, , SYMM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Lines

3) 在与线相邻的面上施加对称边界条件。

命令: DL, , AREA, SYMM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | ...with Area

4) 在面上施加对称边界条件。

命令: DA, AREA, SYMM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Areas

3. 施加反对称边界条件

1) 在节点处施加反对称边界条件。

命令: DSYM, ASYM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Antisymm B.C. | On Nodes。

2) 在线上施加反对称边界条件。

命令: DL, LINE, , ASYM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Antisymm B.C. | On Lines

3) 在与线相邻的面上施加反对称边界条件。

命令: DL, , AREA, ASYM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Antisymm B.C. | ...with Area

4) 在面上施加反对称边界条件。

命令: DA, AREA, ASYM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Antisymm B.C. | On Areas

6.5.5 施加集中力载荷

1. 设置集中力载荷

默认情况下, 如果在同一自由度处重复设置一个集中载荷, 则新指定替代原先的指定。利用下列方法可将该默认设置改变为增加或忽略。

命令: DOFSEL/FCUM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Replace vs Add | Forces

操作后弹出如图 6-9 所示的设置集中力载荷对话框。在该对话框中包括两个命令, 即 DOFSEL 和 FCUM。DOFSEL 命令控制选项可以用来设置累加某一方向的集中力, 如 FX 或 FY。FCUM 命令包括两个控制子选项, Oper 用来设置载荷是取代存在的集中力 (Replace existing)、进行集中力的累加 (Add to existing) 还是忽略 (Be ignored); RFACT 用来设置比例因子 (Scale factor)。

例如:

F,447,FY,3000! 在节点 447 施加集中载荷 FY = 3000

F,447,FY,2500! 将 FY 值该为 2500 (替换)

FCUM,ADD! 接下来待加的集中力

F,447,FY,-1000! 在节点 447FY = 2500-1000 = 1500

FCUM,IGNORE! 接下来将忽略的集中力





F,25,FZ,350! 该载荷被忽略

FCUM! 重新设置 FCUM 为默认值(替换)

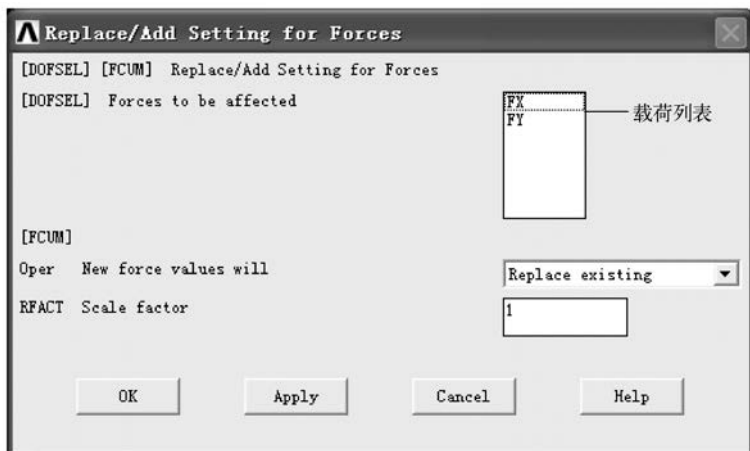


图 6-9 设置集中力载荷对话框

使用 FCUM 设置的任何集中载荷，保持设置不变直到发出另一个 FCUM 命令。要重置为默认设置，仅需发一个不带变元的 FCUM 命令。

2. 施加集中力/力矩

命令: F

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment

操作后 弹出如图 6-10 所示的下拉菜单，菜单中列出了施加结构位移约束的对象分别是关键点、节点和节点组件，以及从支反力文件中读取和从磁盘分析文件中读取。

用户选择使用关键点、节点或节点组都会弹出如图 6-11 所示的施加力/力矩对话框。该对话框包括两个控制选项，即控制施加力/力矩的方向和施加方法。用户可以设置 Direction of force/mom 来控制力/力矩方向，如 FX 表示施加 X 方向的节点力；设置 Apply as 来控制施加载荷的方法为施加常数值、使用已有表格施加和使用新表格施加。如果施加方式为施加常数值，则输入 VALUE 等于用户需要定义的载荷数值。

- On Keypoints
- On Nodes
- On Node Components
- From Reactions
- From Mag Analy

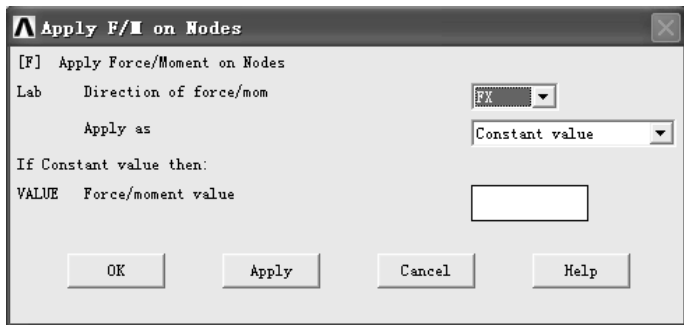


图 6-10 集中力施加对象

图 6-11 施加力/力矩对话框

6.5.6 施加压力载荷

1. 设置压力载荷

(1) 设置给定节点号与压力载荷的函数关系

当将压力施加于节点或单元上时，可以指定节点号与待施加压力的函数关系。

命令：SFFUN

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | For Surface Ld | Node Function

操作后弹出如图 6-12 所示的设置压力载荷与节点函数关系对话框，该对话框包括两个控制选项，即表面载荷类型和参数输入。选择表面载荷类型为压力（Pressure），并在参数（Par）中输入已定义节点号与压力关系的数组。

注意：使用 SFFUN 命令的设定对其后的所有 SF 和 SFE 命令都起作用，要消除该设定参数，仅需发一个不带变元的 SFFUN 命令。

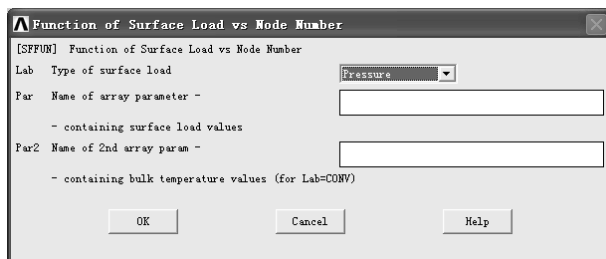


图 6-12 设置压力载荷与节点函数关系对话框

(2) 设置压力载荷斜率

可以使用下列方法设置压力斜率，用于随后施加的表面载荷。

命令：SFGRAD, Lab, SLKCN, Sldir, SLZER, SLOPE

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | For Surface Ld | Gradient

操作后弹出如图 6-13 所示的设置压力载荷斜率对话框。该对话框包括五个控制选项，即表面载荷类型（Lab）、表面载荷斜率值（单位长度上的载荷）（SLOPE）、表面载荷方向（Sldir）、表面载荷的初始值（SLZER）和使用斜率功能的坐标系（SLKCN）。

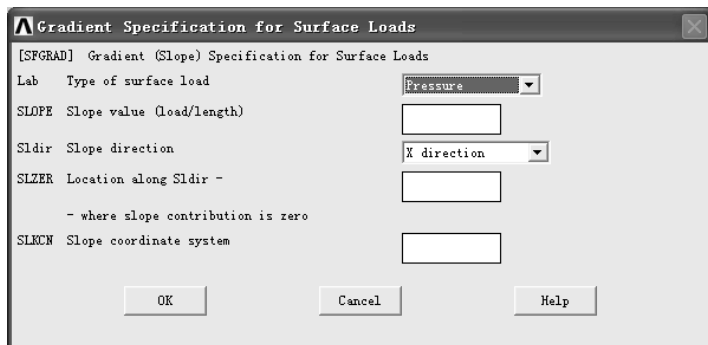


图 6-13 设置压力载荷斜率对话框



例如，要施加如图 6-14 所示的静液压力（Lab=PRES）可在整体笛卡儿坐标系（SLKCN=0）的 Y 方向（Sldir=Y）指定其斜率。在 Y=0（SLZER=0）处，压力（在其后的 SF 命令中将被指定为 500 后）的值为已知的被指定值（500），且沿 Y 的正方向（SLOPE=-25）每个单位长度下降 25。

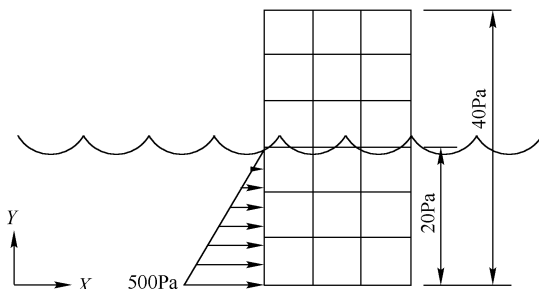


图 6-14 表面载荷斜率[SFGRAD]的示例

使用的命令如下：

SFGRAD,PRES,0,Y,0,-25 ! 全局笛卡儿坐标系中 Y 斜率为-25

NSEL,...! 选择压力施加的节点

SF,ALL,PRES,500! 所有被选择节点的压力:

!在 Y=0 处为 500, 在 Y=10 处为 250, 在 Y=20 处为 0

2. 施加压力载荷的方法

(1) 在线上施加压力

命令: SFL

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines

操作后弹出拾取对话框，用鼠标拾取要施加压力的线，单击 OK，弹出如图 6-15 所示的在线上施加压力设置对话框。

该对话框包括一个控制选项，即施加方法（Apply PRES on lines as a）。该控制选项包括三个子选项，即施加常数值（Constant value）、使用已有表格施加载荷（Existing table）和使用新表格施加载荷（New table）。如果用户选择施加常数值，则在 Load PRES value 输入压力值；如果用户想要施加的初始端和末端压力不等，则可以在 Load PRES value 输入初始端压力，在 Value 中输入末端压力来实现。

(2) 在面上施加压力

命令: SFA

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Areas

操作后弹出拾取对话框，用鼠标拾取要施加压力的面，单击 OK，弹出如图 6-16 所示的在面上施加压力设置对话框。

该对话框包括一个控制选项，即施加方法（Apply PRES on areas as a）。该控制选项包括三个子选项，即施加常数值（Constant value）、使用已有表格施加载荷（Existing table）和使用新表格施加载荷（New table）。如果用户选择施加常数值，则在 Load PRES value 输入压力值。如果模型由壳单元组成，则在施加常数值时除了在 Load PRES value 中输入压力值，还

需在 Load key 中输入施加压力的面号。

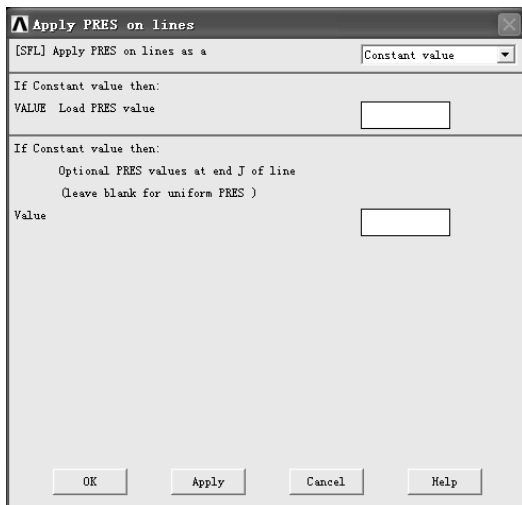


图 6-15 在线上施加压力设置对话框

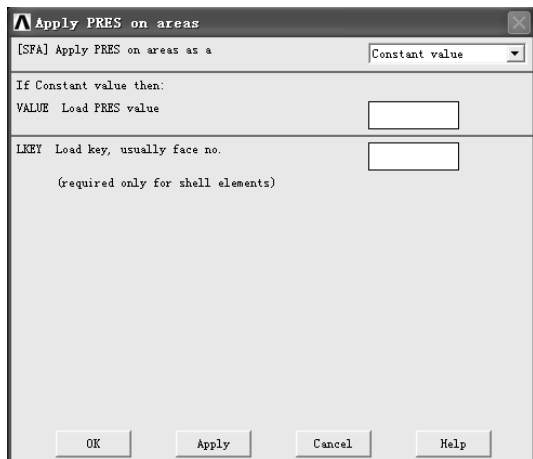


图 6-16 在面上施加压力设置对话框

(3) 在节点上施加压力

命令: SF

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes

操作后弹出拾取对话框,用鼠标至少拾取两个要施加压力的节点,单击 OK,弹出如图 6-17 所示的在节点上施加压力设置对话框。该对话框包括一个控制选项,即施加方法 (Apply PRES on nodes as a)。该控制选项包括三个子选项,即施加常数值 (Constant value)、使用已有表格施加载荷 (Existing table) 和使用新表格施加载荷 (New table)。如果用户选择施加常数值,则在 Load PRES value 中输入压力值。

(4) 在单元上施加压力

命令: SF

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes

操作后弹出拾取对话框,用鼠标至少拾取两个要施加压力的节点,单击 OK,弹出如图 6-18 所示的在单元上施加压力设置对话框。该对话框包括一个控制选项,即施加方法 (Apply PRES on nodes as a)。该控制选项包括三个子选项,即施加常数值 (Constant value)、使用已有表格施加载荷 (Existing table) 和使用新表格施加载荷 (New table)。如果用户选择施加常数值,则在 Load PRES value 中输入压力值。

(5) 在梁上施加压力

将压力载荷施加于梁单元的侧面和两端的方法如下。

命令: SFBEAM

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Beams

操作后弹出拾取对话框,用鼠标拾取要施加压力的梁,单击 OK,弹出如图 6-19 所示的在梁上施加压力的对话框。

该对话框包括六个控制选项,即载荷号 (LKEY)、在节点 I 处的载荷值 (VALI)、在节



点 J 处的载荷值 (VALJ)、在节点 I 处的偏移距离 (IOFFST)、在节点 J 处的偏移距离 (JOFFST) 和载荷偏移的依据 (LENRAT)。

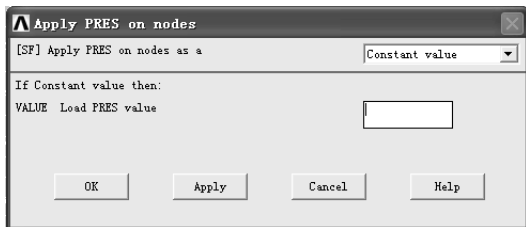


图 6-17 在节点上施加压力设置对话框

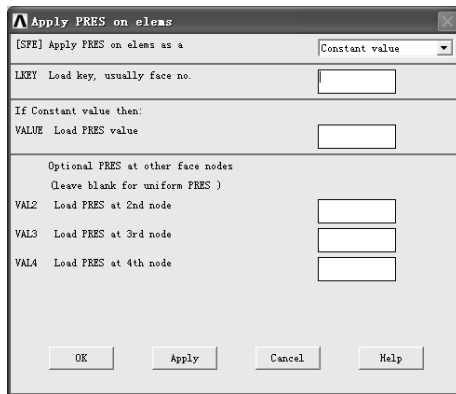


图 6-18 在单元上施加压力设置对话框

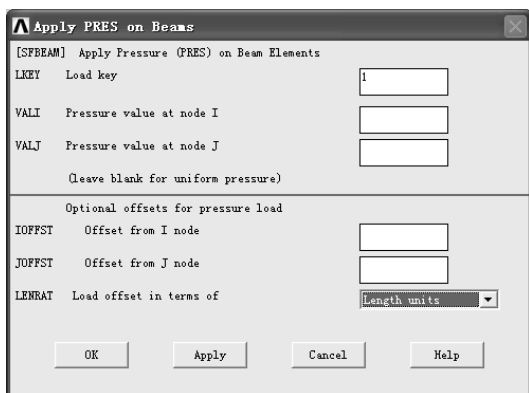


图 6-19 在梁上施加压力的对话框

可以施加侧向压力，其大小为每单位长度的力，分别沿法向和切向。压力可以沿单元长度线性变化，可指定在单元的部分区域，如图 6-20 所示。

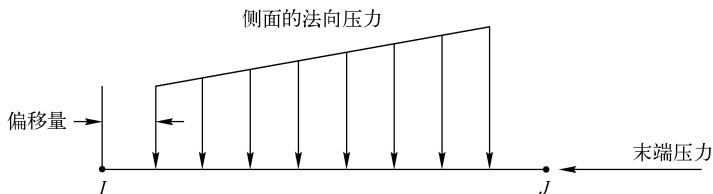


图 6-20 梁表面载荷的示例

6.5.7 施加结构体载荷——温度

1. 在点、线、面、体和节点上施加温度

命令: BFK、BFL、BFA、BFV、BF

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | Enty

操作后弹出拾取对话框,用鼠标拾取相应的实体,单击 OK。弹出如图 6-21 所示的在点、线、面、体和节点上施加温度的对话框。该对话框包括一个控制选项即温度载荷施加方式,该控制选项包括三个子选项,即施加常数值 (Constant value)、使用已有表格施加载荷 (Existing table) 和使用新表格施加载荷 (New table)。如果用户选择施加常数值,则在 Temperature 中输入温度。

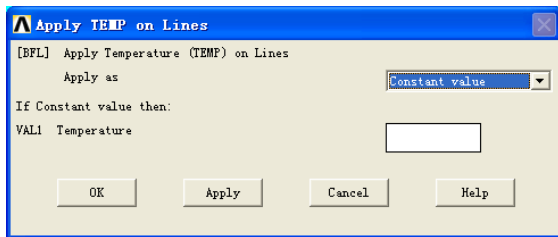


图 6-21 在点、线、面、体和节点上施加温度的对话框

施加在实体模型的线上的体积载荷被转换到对应的有限元模型的节点;施加在实体模型的面或体上的体积载荷被转换到对应的有限元模型的单元上。

2. 在单元上施加温度

(1) 施加方法

命令: BFE

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | On Elements

操作后弹出拾取对话框,用鼠标拾取要施加温度的单元,单击 OK,弹出如图 6-22 所示的在单元施加温度的对话框。该对话框包括两个控制选项,即施加温度开始位置 (STLOC) 和施加方式 (Apply as)。STLOC 默认值为 1, Apply as 包括施加常数值 (Constant value)、使用已有表格施加载荷 (Existing table) 和使用新表格施加载荷 (New table)。

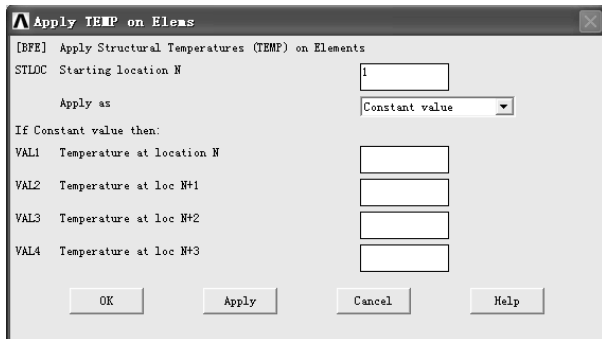


图 6-22 在单元施加温度的对话框

(2) 不同单元施加温度的差异

BFE 命令可以逐个对单元施加温度。然而,对应需要施加多个载荷值的单元,可以在一个单元上的多个位置指定体积载荷。所使用的位置随单元类型的不同而异。默认位置也随单



元类型的不同而异。

1) 对二维和三维实体单元，体积载荷的位置通常位于单元角点，如图 6-23 所示。

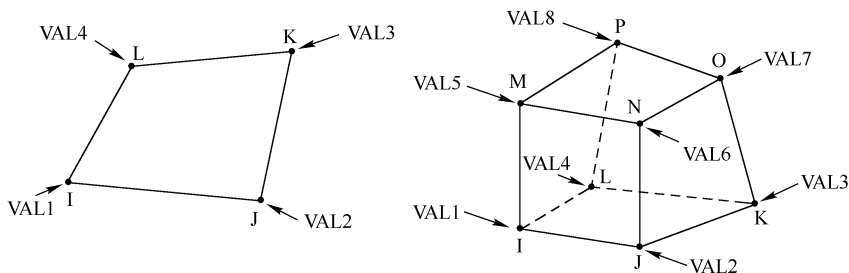


图 6-23 对二维和三维实体单元，BFE 命令施加的体积载荷位置

2) 对壳单元，体积载荷的位置通常位于顶面和底面的“伪节点”，如图 6-24 所示。

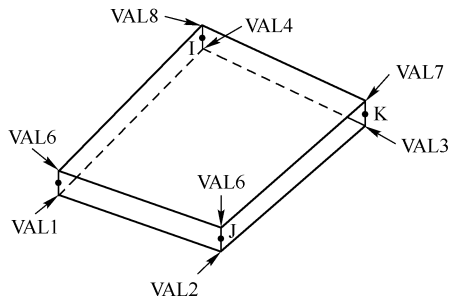


图 6-24 对壳单元，BFE 命令施加的体积载荷位置

3) 一维单元与壳单元相同，体积载荷的位置通常位于单元每端的“伪节点”，如图 6-25 所示。

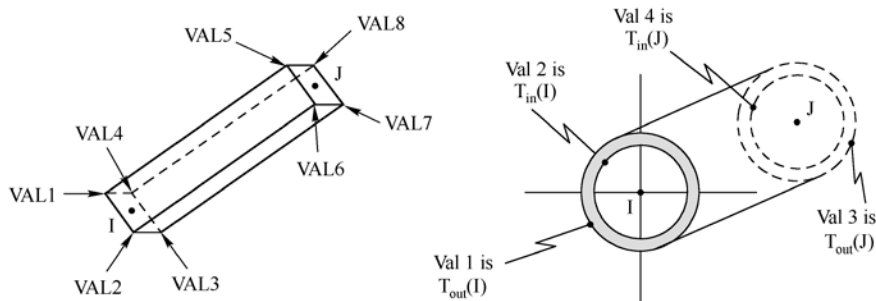


图 6-25 对于一维单元，BFE 命令施加的体积载荷位置

4) 在所有情况下，如果包含退化单元，必须在所有位置指定单元载荷，包括在重合节点处施加重复载荷值。

3. 施加均布温度

命令: TUNIF

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | Uniform Temp

操作后弹出如图 6-26 所示的施加均匀温度对话框，在对话框中输入施加的均匀温度值，单击 OK。



图 6-26 施加均匀温度对话框

6.5.8 惯性载荷

施加惯性载荷的命令组如下。

命令：ACEL

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Gravity

命令：CGLOC

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Other | Coriolis Effects

命令：CGOMGA

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Other | Coriolis Effects

命令：DCGOMG

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Other | Coriolis Effects

命令：DOMEGA

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Other | Angular Accel

命令：IRLF

GUI: Main Menu | Solution | Other | Inertia Relief

命令：OMEGA

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Other | Angular Velocity

注意：没有用于列表显示或删除惯性载荷的专门命令。

要列表显示惯性载荷，可使用如下方法。

命令：STAT, INRTIA

GUI: Utility Menu | List | Status | Solution | Inertia Loads

要去除惯性载荷，只要将载荷值设置为 0。可以将惯性载荷设置为 0，但不能删除惯性载荷。对逐渐上升的载荷步，惯性载荷的斜率为 0。（当施加惯性载荷时，其斜率也是 0）

ACEL, OMEGA 和 DOMEGA 命令分别用于指定在整体笛卡儿坐标系中的加速度、角速度和角加速度。

注意：ACEL 命令用于对物体施加一个加速度场。因此，要施加作用于负 Y 方向的重力，应指定一个正 Y 方向的加速度。

在静态分析中，可以使用 CGOMGA、DCGOMG 和 CGLOC 命令来考虑陀螺效应。



CGOMGA 和 DCGOMG 命令指定一旋转物体的角速度和角加速度,该物体本身正相对于另一个参考坐标系旋转。CGLOC 命令用于指定参照系相对于整体笛卡儿坐标系的位置。例如,在静态分析中,为考虑 Coriolis 效果,可以使用这些命令。

惯性载荷仅当模型具有质量时有效。惯性载荷通常是通过指定密度来施加的。对所有的其他数据,ANSYS 程序要求质量为恒定单位。

只有在下列情况下可使用重量密度代替质量密度。

- 模型仅用于静态分析。
- 未施加角速度或角加速度。
- 重力加速度为单位值 ($g=1.0$)。

为了能够以“方便的”重力密度形式或以“一致的”质量密度形式使用密度,指定密度的一种简便的方法是将重力加速度 g 定义为参数,如表 6-2 所示。

表 6-2 指定密度的方式

方便形式	一致形式	说明
$g=1.0$	$g=386.0$	参数定义
MP,DENS,1,0.283/g	MP,DENS,1,0.283/g	钢的密度
ACEL,,g	ACEL,,g	重力载荷

6.5.9 施加轴对称载荷

对约束、表面载荷、体积载荷和某一方向的加速度,施加方法与非轴对称模型没有区别。但是,对于集中载荷,施加轴对称载荷的过程有所不同。因为这些载荷大小、输入的力、力矩等数值是在 360° 范围内进行的,即根据沿周边的总载荷输入载荷值。例如,如果 $1\,500\text{lb/in}$ (磅每英寸, $1\text{lb/in}=17.8580\text{kg/m}$) 圆周的轴对称轴向载荷被施加到直径为 $10\text{ (in, } 1\text{in}=0.025\,4\text{m)}$ 的管上,如图 6-27 所示, $1\,500\times 2\pi\times 5=47\,124$ 的总载荷将按下列方法被施加到节点 N 上:

F,N,FY,47124

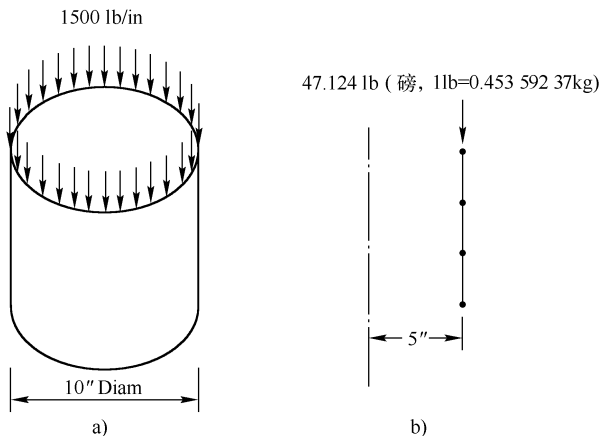


图 6-27 在 360° 范围内定义集中轴对称载荷

a) 三维模型 b) 二维模型

6.5.10 施加表格型载荷

1. 定义表格

命令: *DIM

GUI: Utility Menu | Parameters | Array Parameters | Define/Edit

操作后在弹出的对话框中单击 Add, 弹出如图 6-28 所示的定义数组参数对话框。该对话框包括三个控制选项, 即参数名 (Par)、参数类型 (Type)、参数类型对应的行、列和面的数量 (I,J,K)。为了定义表格, 用户在 Par 中输入表格的名字, 选择参数类型为 Table, 根据需要输入表格的行数、列数和面数, 并指定行变量 (Row Variable)、列变量 (Column Variable) 和面变量 (Plane Variable)。如用户想要指定表格参数的行变量为时间, 列变量为温度, 则输入 Var1 为 TIME, Var2 为 TEMP。

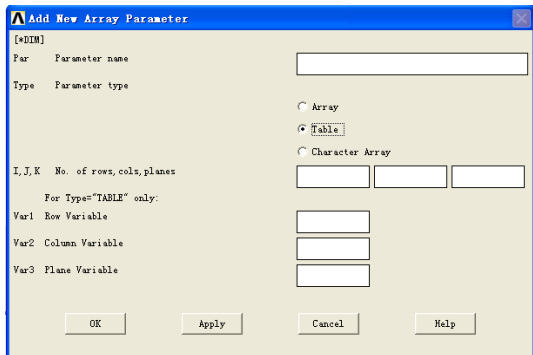


图 6-28 定义数组参数对话框

2. 施加表格型载荷

用命令定义载荷时, 必须把表格名装入 % symbols %。例如, 为了指定一个对流值表, 用户应该执行类似如下的命令:

```
SF,all,conv,%syncnv%,tbulk
```

如果用户使用 GUI 施加表格型载荷, 则只需在施加载荷时设置为使用已有表格 (Existing table) 施加载荷即可。

注意: 如果用户的数据不方便表达为表格形式, 用户会想使用函数边界条件, 可以参考使用函数边界条件施加载荷。

6.5.11 施加函数型载荷

1. 定义函数

GUI: Main Menu | Solution | Apply | Functions | Define/Edit

操作后弹出如图 6-29 所示的函数编辑器对话框, 该对话框包括四个区域, 即函数类型区、函数表达式区、数学函数区和变量列表区。

(1) 区域介绍

1) 函数类型区: 用户在该区域选择是定义单变量函数 (Single equation) 还是多变量函数 (Multivalued function based on regime variable)。

2) 函数表达式区: 在该区域用户可输入需要定义的函数表达式。

3) 变量列表区: 可以在变量列表区中选择一个基本变量。可选的基本变量如下。

Time: 时间。

X: 全局笛卡儿坐标系中 x 的位置。

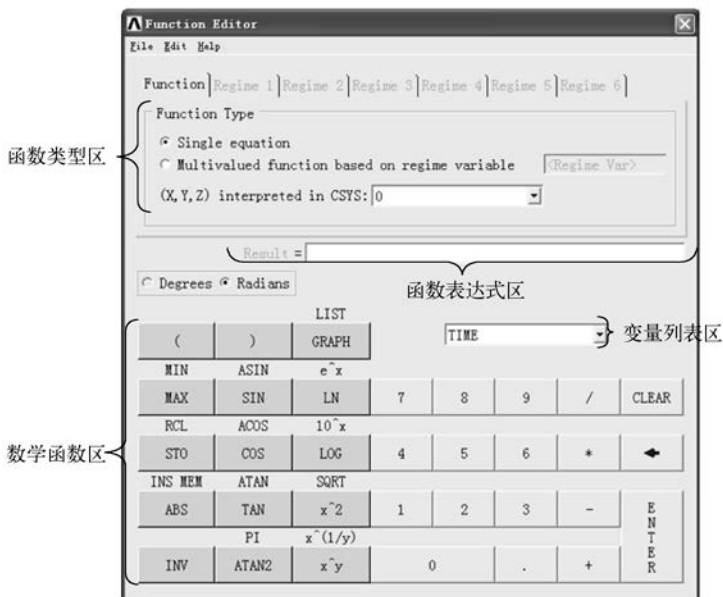


图 6-29 函数编辑器面板

Y: 全局笛卡儿坐标系中 y 的位置。

Z: 全局笛卡儿坐标系中 z 的位置。

TEMP: 温度。

VELOCITY: 速度自由度或单元中计算流速的大小。

PRES: 施加的表面压力。

TSURF: SURF151 或 SURF152 单元的单元表面温度。

DENS: 密度。

Kxx: 热导率。

Kyy: 热导率。

Kzz: 热导率。

Visc: 粘性。

Emmissivity: 熵。

Xr: 基准位置 (Xr) (仅用 ALE 公式表达)。

Yr: 基准位置 (Yr) (仅用 ALE 公式表达)。

Zr: 基准位置 (Zr) (仅用 ALE 公式表达)。

GAP: 接触间隙。

OMEGS: 转速 (OMEGS) (SURF151 或 SURF152 单元的转速)。

OMEGF: 转速 (FLUID116 单元的转速)。

SLIP: 滑动系数 (FLUID116 单元的滑动系数)。

4) 数学函数区: 该区域包括了常用的数学函数, 用户可以直接单击使用。

(2) 使用函数编辑器

1) 选择函数类型。选择单个方程或多值函数。如果选择后者, 必须键入用户的状态变

量名。也就是管理函数中方程的变量。当用户选择一个多值函数时，六个状态表格（Regime 1~Regime 6）将被激活。

2) 选择度或弧度，这一选择仅决定方程如何被运算，而不会影响*AFUN 设置。

3) 使用初始变量、方程变量和键区定义结果方程（单个方程）或描述状态变量的方程（多值函数）。如果用户定义单方程函数，跳到步骤 10）并保存方程。如果用户定义多值函数，继续看步骤 5）。

4) 单击状态表格 1（Regime 1），键入用户在函数表格下定义的状态变量的相应的最大最小值限制。

5) 定义这个状态的方程。

6) 单击状态表格 2（Regime 2），注意状态变量的最小值限制已被定义并且不可更改，这一特征确保状态保持连续而无间隙。定义这个状态的最高值限制。

7) 定义这个状态的方程。

8) 在六个状态中连续如上操作。在每个状态里，用户不必要储存或保存单个方程，除非用户想在另一状态中重用某个方程。

9) 选择 File | Comment，输入一个注释描述函数（可选）。

10) 保存函数。选择 File | Save 并定义文件名，文件名必须有.func 扩展名。

一旦函数被定义并保存，就可在一些适用的 ANSYS 分析中被应用或被一些有权使用文件的用户使用。

(3) 注意事项

1) 函数在表格型矩阵中以方程格式储存，而不是不连续的表格值。

2) 与表格型边界条件下不同，不可以使用函数边界条件覆盖边界条件及其相应基本变量的约束。例如，在结构分析中，压力载荷支持的基本变量是 TIME、X、Y、Z 和 TEMP，因此，在使用函数边界条件时，方程式中允许的基本变量仅有 TIME、X、Y、Z 和 TEMP。Using the Function Editor（使用函数编辑器）中的列表说明了对于每种形式的操作哪些基本变量可用。

2. 读入函数

1) 选择 Main Menu | Solution | Apply | Functions | Read File 打开函数载入器。

2) 找到用户保存函数的目录，选择相应文件并打开。

3) 在函数载入器对话框中输入表格型变量名。这时用户在指定这个函数为表格型边界条件时要用到的名字（%tablename%）。

4) 在对话框下半部，用户可看到为函数定义的每个状态的函数表和状态表。单击函数表，用户可看到每个用户指定的方程变量的数据输入区，如果用户使用需要材料 IDs 的变量，用户还可以看到材料 IDs 数据输入区。

注意：函数载入器对话框中的常量只支持数字数据，而不支持字符数据与表达式。

5) 在每个定义的状态中重复以上过程。

6) 单击 Save，直到用户为函数中所有状态的所有变量提供值，用户才能将它保存为表格型矩阵参数。

一旦用户用函数载入器将函数保存为表格型矩阵参数，就可以把它当做表格型边界条件



使用。

注意：函数作为一个编码方程载入表格，在其中计算引用表格时执行这些编码方程。函数加载的具体操作参看 14 章的视频实例操作。

6.6 设置载荷步选项

载荷步选项（Load Step Options）是用于表示控制载荷应用的各选项，如时间、子步数、时间步，以及载荷增长方式等。其他类型的载荷步选项包括收敛容差、结构分析中的阻尼设置，以及输出控制。

6.6.1 通用选项

通用选项包括：瞬态或静态分析中载荷步结束的时间、子步数或时间步大小、载荷增长方式以及热应力计算的参考温度。以下是对每个选项的简要说明。

1. 子步数和时间步大小

对非线性或瞬态分析，要指定一个载荷步中需用的子步数。指定子步的方法如下。

命令：DELTIM

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time-Time Step

命令：NSUBST

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

DELTIM 命令用于指定时间步的大小，NSUBST 命令用于指定子步数。在默认情况下，ANSYS 程序在每个载荷步中使用一个子步。

2. 时间选项

TIME 命令用于指定在瞬态或静态分析中载荷步结束的时间。在瞬态或其他与速率有关的分析中，TIME 命令指定实际的、按年月顺序的时间，且要求指定一时间值。在与非速率无关的分析中，时间作为跟踪参数。在 ANSYS 分析中，决不能将时间设置为 0。如果执行 TIME,0 或没有发出 TIME 命令，或者根本就没有发出 TIME 命令，ANSYS 使用默认时间值：第一个载荷步为 1.0，其他载荷步为 1.0 +前一个时间。要在 0 时间开始分析，如在瞬态分析中，应指定一个非常小的值，如 TIME, 1E-6。

3. 自动时间分步

激活时间步自动分步。

命令：AUTOTS

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

在时间步自动分步时，根据结构或构件对施加的载荷的响应，程序计算每个子步结束时最优的时间步。在非线性静态分析中使用时，AUTOTS 命令确定了子步之间载荷增量的大小。

4. 阶跃或递增载荷

在一个载荷步中指定多个子步时，需要指明载荷是逐渐递增还是阶跃形式的。KBC 命令用于此目的：KBC,0 指明载荷是逐渐递增；KBC,1 指明载荷是阶跃载荷。默认值取决于分

析的学科和分析类型。

关于阶跃载荷和逐渐递增载荷的几点说明如下。

(1) 指定阶跃载荷

程序按相同的方式处理所有载荷（约束、集中载荷、表面载荷、体积载荷和惯性载荷）。根据情况，阶跃施加、阶跃改变或阶跃移去这些载荷。

(2) 指定逐渐递增载荷

1) 在第一个载荷步施加的所有载荷，除了薄膜系数外，都是逐渐递增的，见表 6-3。薄膜系数是阶跃施加的。

表 6-3 不同条件下逐渐递增载荷（KBC=0）的处理

载 荷 类 型	施加于载荷步 1	输入随后的载荷步
自由度约束		
温度	从 TUNIF 逐渐变化[2]	从 TUNIF 逐渐变化[3]
其他	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
力	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
表面载荷		
TBULK	从 TUNIF 逐渐变化[2]	从 TUNIF 逐渐变化
HCOEF	阶跃	从 0 逐渐变化[4]
其他	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
体载荷		
T 温度	从 TUNIF 逐渐变化[2]	从前一个 TUNIF 逐渐变化[3]
其他	从 BFUNIF 逐渐变化[5]	从前一个 BFUNIF 逐渐变化[3]
惯性载荷[1]	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化

注：1. 对 OMEGA 载荷，应注意 OMEGA 本身为逐渐变化的，因此，产生的力在该载荷步上是二次变化。

2. TUNIF 命令在所有节点指定一均布温度。

3. 在这种情况下，使用的 TUNIF 或 BFUNIF 值是先前载荷步的，而不是当前值。

4. 总是以温度函数所确定的值大小施加温度相关的膜层散热系数，而不论 KBC 的设置如何。

5. BFUNIF 命令仅是 TUNIF 命令的一个同类形式。用于在所有节点指定一均布体积载荷。

2) 在随后的载荷步中，所有载荷的变化都是从先前的值开始逐渐变化的。注意，在全谐响应分析中，表面载荷和体积载荷的逐渐变化与在第一个载荷步中的变化相同，且不是从先前的值开始逐渐变化的。

3) 对于表格型边界条件，载荷不是逐渐变化的，而是在当前时间被计算的。如果在一个载荷步中指定使用表格形式载荷，而下一个载荷步却改为非表格型载荷，载荷将被当做新引进由 0 或由 BFUNIF 逐渐变化的载荷，但不是从先前的表格值变化的。

4) 在随后的载荷步中新引入的所有载荷是逐渐变化的（根据载荷的类型，从 0 或从 BFUNIF 命令所指定的值递增）。

5) 在随后的载荷步中被删除的所有载荷，除了体载荷和惯性载荷外，都是阶跃移去的。



体载荷逐渐递增至 BFUNIF，不能被删除而只能被设置为 0 的惯性载荷，则逐渐变化到 0。

6) 在相同的载荷步中，不应删除或重新指定载荷。在这种情况下，逐渐变化不会按用户所期望的方式作用。

5. 其他通用选项

1) 热应力计算的参考温度，其默认值为 0K。指定该温度的方法如下。

命令: TREF

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Reference Temp

2) 对每个解是否需要一个新的三角矩阵。仅在静态分析或瞬态分析中，使用下列方法之一，可用一个新的三角矩阵。

命令: KUSE

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Reuse LN22 Matrix

默认情况下，程序根据自由度约束的变化，温度相关材料的特性，以及牛顿-拉普森选项确定是否需要一个新的三角矩阵。如果 KUSE 设置为 1，程序再次使用先前的三角矩阵。在重新开始的过程中，该设置非常有用：对附加的载荷步，如果要重新进行分析，而且知道所存在的三角矩阵可再次使用，通过将 KUSE 设置为 1，可节省大量的计算时间。KUSE,-1 命令迫使在每个平衡迭代中三角矩阵再次用公式表示。在分析中很少使用它，主要用于调试中。

3) 模式数（沿周边谐波数）和谐波分量是关于全局 X 坐标轴对称还是反对称。当使用反对称协调单元（反对称单元采用非反对称加载）时，载荷被指定为一系列谐波分量（傅里叶级数）。要指定模式数，使用下列方法之一。

命令: MODE

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | For Harmonic Ele

6.6.2 动力学分析选项

这些是主要用于动态和其他瞬态分析的选项。

1) 激活或取消时间积分的方法如下。

命令: TIMINT

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration | Amplitude Decay

2) 在谐响应分析中指定载荷的频率范围的方法如下。

命令: HARFRQ

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Freq and Substps

3) 指定结构动态分析的阻尼的方法如下。

命令: ALPHAD/ BETAD/ DMPRAT/ MDAMP

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Damping

6.6.3 非线性选项

以下是主要用于非线性分析的选项。

1) 指定每个子步最大平衡迭代的次数（默认=25）的方法如下。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Equilibrium Iter

2) 指定收敛公差的方法如下。

命令: CNVTOL

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Convergence Crit

3) 为终止分析提供选项的方法如下。

命令: NCVN

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Criteria to Stop

6.6.4 输出控制

输出控制用于控制分析输出的数量和特性。有如下两个基本输出控制。

如下方法可控制 ANSYS 写入数据库和结果文件的内容以及写入的频率的方法如下。

命令: OUTRES

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

如下方法可控制打印（写入解输出文件 Jobname.OUT）的内容以及写入频率的方法如下。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout

下例说明 OUTRES 和 OUTPR 命令的使用。

OUTRES,ALL,5 !写入所有数据;每到第 5 子步写入数据

OUTPR,NSOL,LAST!仅打印最后子步的节点解

可以发出一系列 OUTPR 和 OUTRES 命令（达 50 个命令组合）以精确控制解的输出。但必须注意，命令发出的顺序很重要。

输出控制命令 ERESX 允许用户在后处理中观察单元积分点的值。

命令: ERESX

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Integration Pt

默认情况下，对材料非线性以外的所有单元，ANSYS 程序使用外推法根据积分点值计算在后处理中观察的节点结果。通过执行 ERESX, NO 命令，可以关闭外推法；相反，将积分点的值复制到节点，使这些值在后处理中可用。另一个选项 ERESX, YES，迫使所有单元都使用外推法，而不论单元是否具有材料非线性。

6.7 创建多载荷步文件

所有载荷和载荷步选项一起构成一个载荷步，程序用其计算该载荷步的解。如果有多个载荷步，可将每个载荷步存入一个文件，调入该载荷步文件，并从文件中读取数据求解。

LSWRITE 命令用于写载荷步文件（每个载荷步一个文件，以 Jobname.S01, Jobname.S02, Jobname.S03，等识别）。可以使用以下方法之一。

命令: LSWRITE



GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

所有载荷步文件写入后，可以使用命令在文件中顺序读取数据，并求得每个载荷步的解。

下例命令组可以定义多个载荷步。

```
/SOLU! 输入 SOLUTION
!载荷步 1
D,...! 载荷
SF,...
NSUBST,...! 载荷步选项
KBC,...
LSWRITE, 1! 写载荷步文件 Jobname.S01
!载荷步 2:
D,...! 载荷
SF,...
NSUBST,...! 载荷步选项
KBC,...
LSWRITE, 2! 写载荷步文件 Jobname.S02
```

关于载荷步文件的几点说明：

- 1) 载荷步数据根据 ANSYS 命令被写入文件。
- 2) LSWRITE 命令不捕捉实常数 (R) 或材料特性 (MP) 的变化。
- 3) LSWRITE 命令自动地将实体模型载荷转换到有限元模型，因此所有载荷按有限元载荷命令的形式被写入文件。特别地，表面载荷总是按 SFE (或 SFBEAM) 命令的形式被写入文件，而不论载荷是如何施加的。
- 4) 要修改载荷步文件序号为 n 的数据，执行命令 LSREAD,n 在文件中读取数据，作所需的修改，然后执行 LSWRITE,n 命令 (将覆盖序号为 n 的旧文件)。与 LSREAD 命令等价的 GUI 菜单路径如下。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Read LS File

6.8 定义接头固定处预拉伸

在螺栓和其他结构零件上预加应力常常会给变形和应力带来很大影响。两个 ANSYS 特征，PRETS179 预拉伸单元和 PSMESH 预拉伸网格命令可以用于这种类型的分析。如果固定件被网格划分为两个独立的部分，使用 EINTF 命令可以把预拉伸单元插入两块之间。

预拉伸载荷是用来模拟接头固定处的预装配载荷。固定件可以由任何二维和三维结构 (梁、壳、管，或联单元) 构成。使用 PSMESH 命令时，施加了预拉伸载荷的预拉伸部分必须定义在固定件内部。

6.8.1 使用PSMESH命令

最方便的在固定件上使用预拉伸单元的方法是通过 PSMESH 命令。只有固定件没被网

格分为独立部分时这个命令才可以使用，如图 6-30 所示。这个命令将在定义预拉伸部分并生成预拉伸单元。它自动把网格化固定件分割为两部分并插入拉伸单元。如果用户决定要删除拉伸单元，删除拉伸部分就会自动删除拉伸单元（Main Menu | Preprocessor | Sections | Delete Section）。

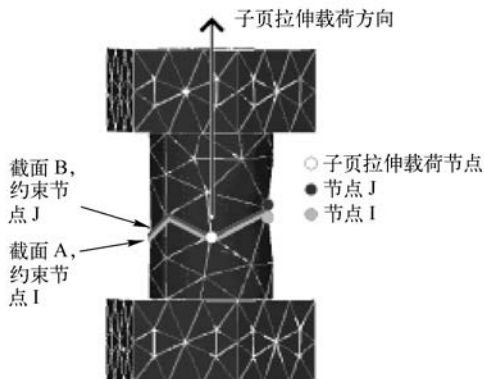


图 6-30 预拉伸的定义

正常的方向是由 PSMESH 命令指定的，它是拉伸部分数据的一部分。这里和早先的方法（PTSMESH 命令）有些差异，后者用实常值指定正常方向。

网格化拉伸部分不一定是平面，拉伸部分的下面几乎可以是任何形状，如线、三角形、四边形、四面体、楔形或六面体。可是，在拉伸部分的两面（A 和 B）必须有一致的节点。拉伸部分的面和面由一个或多个拉伸单元联接，每个单元对应一对节点。

一个拉伸节点（K）用来控制和监控总的应力载荷。当拉伸部分是由 PSMESH 命令生成时，拉伸部分的拉伸载荷方向可以相对于面 A 指定。在一个指定拉伸部分上的所有拉伸单元必须使用同一平面并且有相同的拉伸节点 K。节点 K 是拉伸单元定义的第三步。

6.8.2 使用EINTF命令

如果固定物已被网格分为两个独立部分，可以将拉伸单元（PRETS179）插入两部分之间。如果 K 没定义，ANSYS 将自动生成。在使用 EINTF 命令前，单元型 ID 和实常值设定必须已完全定义。相连的表面（A 和 B）必须有匹配的网格模式和一致的节点。如果一些两面间的节点对与拉伸单元不相连，将会导致后继分析不准确。

命令：EINTF,TOLER,K

GUI: Main Menu | Preprocessor | Create | elements | pretension | At Coincident Nodes

6.8.3 执行拉伸分析的典型过程

1) 网格化螺栓联接，然后分割网格并插入拉伸单元以形成拉伸部分。例如，通过分割网格并在体 1 中插入部分以生成名为“example”的拉伸部分。

注意：零件生成最好有助于绘制和选择拉伸的单元，例如：

Psmesh,,example,,volu,1,0,z,0.5,,,npts



2) 在第一载荷步中, 对节点 K 施加一个力或位移。这样, 载荷被当做一个力施加。力“锁定”在第二载荷步, 允许用户添加另外的力。初始载荷的效果在载荷“锁定”后作为位移保存。例如:

```
Sload,1,9,tiny,forc,100,1,2
```

3) 使用 SLOAD 命令施加所需的其它外部载荷。第 22 章视频操作给出了定义预拉伸的方法。

第 7 章 求 解



7.1 选择求解器

ANSYS 程序中有几种求解联立代数方程组的方法：稀疏矩阵直接解法、直接解法、雅可比共轭梯度法（JCG）、不完全乔累斯基共轭梯度法（ICCG）、预条件共轭梯度法（PCG）、自动迭代法（ITER），以及默认为稀疏矩阵直接解法。

可用以下方法选择求解器。

命令：EQSLV

GUI：Main Menu | Solution | Analysis Options

表 7-1 提供了一般的准则，可能有助于针对给定的问题选择合适的求解器。

表 7-1 求解器选择准则

解 法	典型应用场合	模型尺寸	内存使用	硬盘使用
正向直接解法（直接消除法）	要求稳定性（非线性分析）或内存受限制时	低于 50 000 自由度	低	高
稀疏矩阵直接解法	要求稳定性和求解速度（非线性分析）；线性分析时迭代法收敛很慢时（尤其对病态矩阵，如形状不好的单元）	自由度为 10 000～500 000（多用于板壳和梁模型）	中	高
雅可比共轭梯度法	在单场问题（如热、磁、声、多物理问题）中求解速度很重要时	自由度为 50 000～1 000 000 以上	中	低
不完全乔累斯基共轭梯度法	在多物理模型应用中求解速度很重要时，处理其他迭代法很难收敛的模型（几乎是无穷矩阵）	自由度为 50 000～1 000 000 以上	高	低
预条件共轭梯度法	当求解速度很重要时（大型模型的线性分析）尤其适合实体单元的大型模型	自由度为 50 000～1 000 000 以上	高	低
代数多栅求解器	与预条件共轭梯度法相同。此外，可以在共享存储器的并行机上升级到 8 处理器	自由度为 50 000～1 000 000 以上	高	低
分布式求解器	这个解答器在网络上的多重系统中可升级到数打处理器	自由度 100 000～1 000 000 以上	高	低

7.2 求解器的类型

7.2.1 波前求解器

ANSYS 正向直接法不组合整体矩阵，而是在求解器处理每个单元时，同时执行整体矩阵的组集和求解。

在正向直接法中经常提到“波前（wavefront）”这一术语，它是在三角化过程中因不能



从求解器消去而保留的自由度数。随着求解器处理每个单元及其自由度，波前就会膨胀或收缩，最后，当所有的自由度都处理过以后，波前变为零。波前的最高值称为最大波前，而平均的、均方根值称为 RMS 波前。一个模型的 RMS 波前值直接影响求解时间：其值越小，CPU 所用的时间越少，因此在求解前可能希望能重新排列单元号以获得最小的波前值。

7.2.2 稀疏矩阵直接解法求解器

稀疏矩阵直接解法求解器是建立在与迭代法相对应的直接消元法基础上的。迭代法通过间接的方法（也就是通过迭代）获得方程的解。既然稀疏矩阵直接解法是以直接消元为基础的，不良矩阵不会构成求解困难。

7.2.3 雅可比共轭梯度法求解器

雅可比共轭梯度法求解器也是从单元矩阵公式出发，最适合于包含大型的稀疏矩阵三维标量场的分析，如三维磁场分析。有些情况，如 $1.0E-8$ 的公差默认值（通过命令 EQSLV, JCG 设置）可能太严格，会增加不必要的运算时间，大多数场合 $1.0E-5$ 的值就可满足要求。雅可比共轭梯度法求解器只适用于静态分析、全谐波分析或全瞬态分析。

7.2.4 不完全乔累斯基共轭梯度法求解器

不完全乔累斯基共轭梯度法与雅可比共轭梯度法求解器在操作上相似，比雅可比共轭梯度法使用更复杂的先决条件，使用不完全乔累斯基共轭梯度法需要大约两倍于雅可比共轭梯度法的内存。

不完全乔累斯基共轭梯度法只适用于静态分析、全谐波分析（HROPE, FULL）或全瞬态分析。不完全乔累斯基共轭梯度法比直接解法速度要快。

7.2.5 预条件共轭梯度法求解器

除以下几个不同的地方外，预条件共轭梯度法与雅可比共轭梯度法在操作上相似。

- 1) 预条件共轭梯度法求解实体单元模型比雅可比共轭梯度法大约快 4~10 倍，对壳体构件模型大约快 10 倍，储存量随问题规模的增大而增大。
- 2) 预条件共轭梯度法使用 EMAT 文件，而不是 FULL 文件。
- 3) 雅可比共轭梯度法使用整体装配矩阵的对角线作为先决条件，预条件共轭梯度法使用更复杂的先决条件。
- 4) 预条件共轭梯度法通常需要大约两倍于雅可比共轭梯度法的内存，因为在内存中保留了两个矩阵。

预条件共轭梯度法通常只需少于直接求解法所需空间的四分之一，存储量随问题规模大小而增减。运算大模型时，预条件共轭梯度法总是比直接求解法要快。

预条件共轭梯度法最适用于结构分析。它对具有对称、稀疏、有界和无界矩阵的单元有效，适用于静态分析、稳态分析、瞬态分析和子空间特征值分析。预条件共轭梯度法主要解决位移、转动、温度等问题，其他导出变量的精度取决于原变量的预测精度。

直接求解法可获得非常精确的解向量，间接迭代法主要依赖于用户指定的收敛准则，因此放松默认公差将对精度产生重要影响，尤其对导出量的精度。

在使用所有的共轭梯度法时，用户必须非常仔细地检查模型的约束是否合理，如果有任何刚体移动，将计算不出最小主元，求解器会不断迭代。

7.2.6 代数多栅求解器

代数多栅求解器（AMG）是基于多级方法的迭代求解器，可以在单处理器或多处理器环境下工作。要使用这个求解器，用户必须有 ANSYS 高级任务并行认证。

7.2.7 分布式求解器

分布式求解器（DDS）将大模型分解为小域，然后将这些小域送到多处理器中求解。要使用这个求解器，用户必须有 ANSYS 高级任务并行认证。

分布式求解器是个面向大型静态分析与全瞬态分析（包括对称矩阵但不含预应力、惯性消解、联结、约束方程与使用概率设计系统的问题）的求解器，是一个可以升级的求解器。对于纯梁/壳问题，不推荐使用这一求法，因其会导致收敛困难。

7.2.8 自动迭代（快速）求解器选项

选择自动迭代解法选项（EQSLV, ITER）将选择一种合适的迭代法（PCG, JCG 等），它基于正在求解器问题的物理特性。使用自动迭代法时，必须输入精度水平，该精度必须是 1~5 之间的整数，用于选择迭代法的公差供检验收敛情况。精度水平 1 对应最快的设置，而精度水平 5 对应最慢的设置，ANSYS 选择公差是以选择精度水平为基础的。例如：

- 1) 线性静态或线性全瞬态结构分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-4，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-8。
- 2) 稳态线性或非线性热分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-5，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-9。
- 3) 瞬态线性或非线性热分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-6，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-10。

该求解器选项只适用于线性静态或线性全瞬态的瞬态结构分析和稳态/瞬态线性或非线性热分析。

7.3 在某些类型结构分析时使用特殊求解工具

当你进行特定类型结构分析时，可以利用以下特殊求解工具。

- 1) 简化求解菜单（Abridged Solution Menus），适合静态、瞬态、模态与屈曲分析。
- 2) 求解控制对话框，适用于静态和瞬态分析。

7.3.1 使用简化求解菜单

如果你用图形用户界面执行静态、瞬态、模态与屈曲结构分析，可以选择使用简化菜单或非简化菜单。

- 1) 非简化菜单列出所有求解选项，而不考虑是否是当前分析的推荐选项或是可用选项。如果某选项在当前分析中不可用，则在列表中以灰色显示。



2) 简化菜单非常简洁, 仅仅列出应用于进行的分析的选项。例如: 如果进行静态分析, 模式循环选项将不会出现在简化菜单中。只有那些当前分析可用或被推荐的选项才会显示。如果进行结构分析, 当进入求解处理器时, 简化菜单显示如下默认状态。

如果分析既不是静态又不是全瞬态的话, 可以使用上面显示菜单中的选项完成分析中求解阶段。可是, 如果选择了另外的分析类型。上面看到的默认简化求解菜单将被另外的求解菜单替换新的菜单适用于选择的分析类型。各种简化求解菜单都包含了非简化菜单选项, 如果用户喜欢非简化求解菜单, 这一选项一直可用。

如果在做一个分析时选择开始一个新的分析, ANSYS 将会显示前一分析所用的求解菜单。例如, 如果选择使用非简化求解菜单进行静态分析并且选择了一个新的屈曲分析。ANSYS 将显示非简化求解菜单以供屈曲分析使用。然而, 在分析求解阶段的任何时候, 可以选择相应菜单选项在简化与非简化求解菜单中切换。

7.3.2 使用求解控制对话框

如果在进行静态与全瞬态分析, 可以使用改进的求解界面(称为求解控制对话框)设置许多分析选项。求解控制对话框由五个标签页组成, 每个标签页都包含了相关的求解控制。在指定多载荷步分析中每个载荷步的设置时, 对话框非常有效。进入求解控制对话框的 GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls。

弹出如图 7-1 所示的对话框。

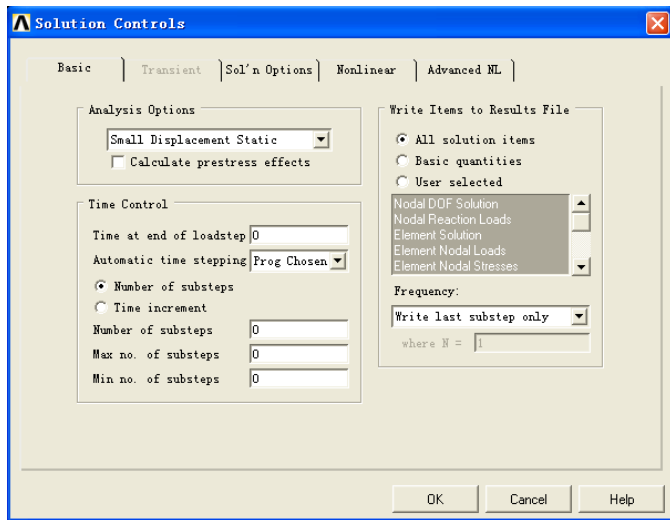


图 7-1 求解控制对话框

当进入对话框时上面所示的基本标签页将被激活。完整的标签页列表, 按从左到右的顺序如下所列: Basic 基本; Transient 瞬态; Sol'n Options 求解选项; Nonlinear 非线性; Advanced NL 非线性高级控制。

每个控制都被逻辑分类于标签页, 最基本的控制在第一个标签页。后面的标签页将提供逐渐高级的控制。瞬态标签页包含瞬态分析控制, 仅当选择瞬态分析时可用, 如果选择静态分析, 它将保持灰色。求解控制对话框上每个控制对应一个 ANSYS 命令, 表 7-2 解释了标

签与功能命令之间的关系，两种方式都可使用。

表 7-2 求解控制对话框标签页与命令之间的关系

求解控制对话框标签	标签的功能	与该标签对应的命令
Basic	指定想执行的分析类型	ANTYPE,NLGEOM,TIME, AUTOTS,NSUBST,DELTIM, OUTRES
	控制不同的时间设定	
	指定你希望 ANSYS 写入数据库的求解数据	
Transient	制定瞬态选项，例如对阶跃载荷的瞬时效应与渐变	TIMINT, KBC, ALPHAD, BETAD, TRNOPT, TINTP
	指定阻尼选项	
	选择时间积分方法	
	指定积分参数	
Sol'n Options	指定想用的方程求解器类型	EQLSV, RESCONTROL
	指定多架构重启的参数	
Nonlinear	控制非线性选项，例如线搜索与求解预测	LNSRCH, PRED, NEQIT, RATE, CUTCONTROL, CNVTOL
	指定每个子步允许的最大迭代数目	
	显示你是否想在分析中包括蠕变计算	
	控制弧长法的平分	
	设定收敛标准	
Advanced NL	指定分析终止标准	NCNV, ARCLEN, ARCTRM
	控制弧长法的激活与终止	

一旦对基本标签页上的设定满意，不需要改变其他标签页，除非要改变一些高级控制。只要在对话框任一标签上单击 OK，设置将被应用到 ANSYS 数据库，对话框也将关闭。

注意：如果改变了一个或多个标签设置，仅当单击 OK，关闭对话框时改变才会应用到 ANSYS 数据库。

7.4 获得解答

进行以下操作开始求解。

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

因为求解阶段与其他阶段相比，一般需要更多的计算机资源，所以批处理模式要比交互模式更适宜。求解器将输出写入到输出文件（Jobname.OUT）和结果文件中，如果你以交互模式运行求解，则输出文件就是屏幕。执行 SOLVE 命令前使用下述操作，可以将输出送入一个文件而不是屏幕。

命令：/OUTPUT

GUI: Utility Menu | File | Switch Output to | File or Output Window

在交互模式中，大多数输出是被压缩的，结果文件（RST，RTH，RMG，或 RFL）包含



以二进制方式的所有数据，可在后处理程序中进行浏览。在求解过程中产生的另一有用文件是 Jobname.STAT 文件，它给出了解答情况。程序运行时可用该文件来监视分析过程，对非线性和瞬态分析的迭代分析尤其有用。

7.5 求解多载荷步

7.5.1 使用多步求解法

这种方法是最直接的，它包括在每个载荷步定义好后执行 SOLVE 命令。主要的缺点是，在交互使用时必须等到每一步求解结束后才能定义下一载荷步，典型的多重求解法命令流为：

```
/SOLU
!载荷步 1:
D,...
SF,...
SOLVE,!求解载荷步 1
!载荷步 2
F,...
SF,...
SOLVE! 求解载荷步 2
```

7.5.2 使用载荷步文件法

当想求解问题而又远离终端或 PC 时（如整个晚上），可以很方便地使用载荷步文件法。该方法包括写入每一载荷步到载荷步文件中（通过 LSWRITE 命令或相应的 GUI 方式），通过一条命令就可以读入每个文件并获得解答。

要求解多载荷步，可使用如下方法。

命令：LSSOLVE

GUI：Main Menu | Solution | From Ls Files

LSSOLVE 命令其实是一条宏指令，它按顺序读取载荷步文件，并开始每一载荷步的求解。载荷步文件法的命令输入示例为：

```
/SOLU!进入 SOLUTION 模块
! 载荷步 1
D,...!载荷
SF,...
NSUBST,...! 载荷步选项
KBC,...
OUTRES,...
OUTPR,...
LSWRITE !写载荷步文件:Jobname.SO1
!Load step 2:
```

D,...!载荷
SF,...
NSUBST,...! 载荷步选项
KBC,...
OUTRES,...
OUTPR,..
LSWRITE! 写载荷步文件 :Jobname.S02
LSSOLVE,1,2!开始求解载荷步文件 1 和 2



7.6 奇异解

奇异解出现于可能产生不定解或非唯一解的分析中，求解方程的主元为负或零会产生这样的奇异解。有些情况下，尽管遇到主元为负或零，仍需继续进行分析。出现这种情况时，可用 PIVCHECK 命令指定是否要停止分析。

PIVCHECK 命令的默认值为 ON。当 PIVCHECK 命令为 ON 时，遇到主元为负或零，线性静态分析将会停止。会出现“Negative Pivot Value”或“Pivots Set to Zero”信息。如果 PIVCHECK 命令设置为 OFF，将不检查主元。如果希望批处理模式下线性静态分析在遇到主元为负或零时继续运行，可以将 PIVCHECK 命令设置为 OFF。PIVCHECK 命令的设置对非线性分析不起作用，因为在有效分析过程中会出现主元为负或零。当 PIVCHECK 命令被设置为 OFF 时，ANSYS 会自动以比机器“零”值小 10~100 倍的值增加主元值。机器“零”值是一个很小的值，用于在某一公差范围内定义“零”。该值因计算机不同而异。

下述条件会引起求解过程出现奇异性。

- 1) 约束条件不足。
- 2) 模型中有非线性单元，如间隙元、滑动元、铰链元等。结构的一部分可能已经塌陷或分散了。
- 3) 材料特性为负，如在瞬态热分析中规定的密度或温度。
- 4) 连接点无约束，单元排列可能会引起奇异性。例如，两个水平梁单元在连接点的垂直方向存在无约束自由度，在线性分析中，将会忽略加载在该连接点的垂直载荷。另外，考虑一个与梁单元或管单元垂直相连的无板面内的旋转刚度的壳单元，在连接点处不存在板面内的旋转刚度。在线性分析中，将会忽略加载在该点处的板面内力矩。
- 5) 屈曲。当应力刚化效果为负时，结构受载后变弱。若结构变弱到刚度减小为零或负值，就会出现奇异解，且结构已经屈曲。会打印出“主元值为负”的消息。
- 6) 零刚度矩阵。如果刚度的确为零，线性或非线性分析都会忽略所加载的载荷。



第 8 章 后处理技术

8.1 后处理的基本概念

建立有限元模型并获得解后，用户想要得到一些关键问题的答案。例如，该设计投入使用后是否可行？某个区域的应力有多大？零件的温度随时间如何变化？通过模型表面的热损失有多少？ANSYS 软件的后处理会帮助回答这些问题。

后处理是指查看分析的结果。这可能是分析中最重要的一环，因为用户总是试图弄清楚作用载荷如何影响设计、单元划分的好坏等。

用户可以使用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 两个后处理器查看分析结果。POST1 允许用户查看整个模型在某一载荷步和子步或对某一特定时间点或频率的结果。例如，在结构静力学分析中，可显示载荷步 3 的应力分布，或在瞬态热力分析中，可显示 time =10 秒时的温度分布。图 8-1 所示是一种典型的 POST1 等值线图云图。

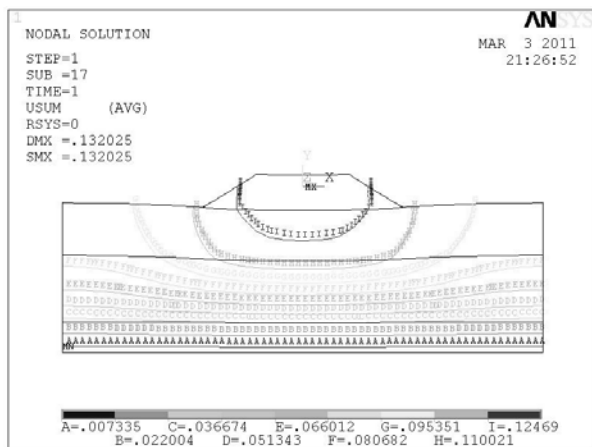


图 8-1 一种典型的 POST1 云图

POST26 允许用户查看模型指定点的特定结果相对于与时间、频率或其他结果项的变化。例如，在瞬态磁场分析中，可以用图形表示某一特定单元的涡流与时间的关系，或在非线性结构分析中，可以用图形表示某一特定节点的受力与其变形的关系。

注意：ANSYS 的后处理器仅是用于检查分析结果的工具，仍然需要用户的工程判断能力来分析、解释结果。例如，一等值线显示可能表明模型的最高应力为 300MPa，必须由用户确定这一应力水平对用户的设计是否允许。

8.2 结果文件

在求解中，可使用 OUTRES 命令按指定时间间隔将选择的分析结果写入结果文件中，结果文件的名称取决于分析类型。

- Jobname.RST：结构分析。
- Jobname.RTH：热力分析。
- Jobname.RMG：电磁场分析。
- Jobname.RFL：FLOTRAN 分析。

8.3 后处理可用的数据类型

求解阶段可以计算如下两种类型的结果数据。

- 基本数据：包含每个节点计算自由度解，如结构分析的位移、热力分析的温度、磁场分析的磁势等，这些被称为节点解数据。
- 派生数据：是由基本数据计算得到的数据，如结构分析中的应力和应变，热力分析中的热梯度和热流量，磁场分析中的磁通量等。对每个单元，通常计算这些数据，可以是下列位置的数据：

不同分析的基本数据和派生数据见表 8-1。

表 8-1 不同分析的基本数据和派生数据

学 科	基 本 数 据	派 生 数 据
结构分析	位移	应力、应变、反作用力等
热力分析	温度	热流量、热梯度等
磁场分析	磁势	磁通量、磁流密度等
电场分析	标量电势	电场、电流密度等
流体分析	速度、压力	压力梯度、热流量等

8.4 通用后处理器POST1

8.4.1 POST1 概述

使用通用后处理器 POST1 可观察整个模型或模型的一部分在某一时间点或频率上针对指定载荷组合时的结果。POST1 有许多功能，包括从简单的图像显示到针对更为复杂数据操作的列表，如载荷工况的组合。

进入 ANSYS 通用后处理器的方法如下。

- 命令： /POST1
- GUI： Main Menu | General Postproc



8.4.2 将数据结果读入数据库

POST1 中第一步是将数据从结果文件读入数据库。要这样做，数据库中首先要有模型数据。若数据库中无模型数据，需读入文件。

命令：RESUME

GUI: Utility Menu | File | Resume Jobname.db

操作后读入数据文件 Jobname.db。数据库包含的模型数据应该与计算模型相同，包括单元类型、节点、单元、单元实常数、材料特性和节点坐标系。一旦模型数据存在于数据库中，输入 SET、SUBSET 或 APPEND 命令均可从结果文件中读入结果数据。

1. 读入结果数据

命令：SET

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

操作后弹出如图 8-2 所示的拾取结果对话框，用鼠标选择 Set 下面的序号，如 1，单击 Read，即完成数据的读入。

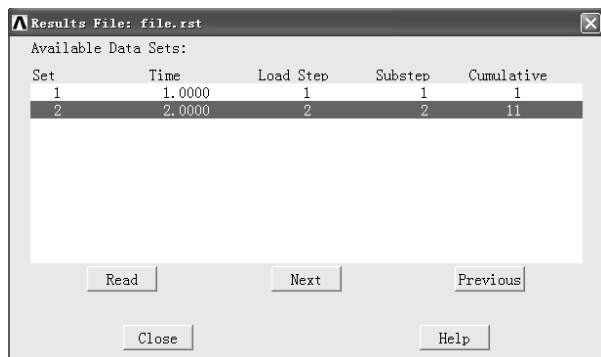


图 8-2 拾取结果对话框

结果文件（Jobname.RST）中默认的最大子步数为 1 000，超出该界限时，需要输入 SET, Lstep, LAST 引入第 1 000 个载荷步，可使用 /CONFIG 增加界限。

注意：对于非线性分析，在时间点间进行插值常常会降低精度。因此，要使解答可用，务必在可求时间值处进行后处理。

对于 SET 命令有如下一些简洁标号。

- SET, FIRST: 读入第一子步，等价的 GUI 方式为 First Set。
- SET, NEXT: 读入下一子步，等价的 GUI 方式为 Next Set。
- SET, LAST: 读入最后一子步，等价的 GUI 方式为 Last Set。

2. 创建单元表

ANSYS 程序中单元表有两个功能：第一，它是在结果数据中进行数学运算的工具。第二，它能够访问其他方法无法直接访问的单元结果。将单元表作为扩展表，每行代表一个单元，每列则代表单元的特定数据项。例如，一列可能包含单元的平均应力 SX，而另一列则代表单元的体积，第三列则包含各单元质心的 Y 坐标。

可使用下列任一命令创建或删除单元表。

命令: ETABLE

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

(1) 填上按名称来识别变量的单元表

为识别单元表的每列，在 GUI 方式下使用 Lab 字段或在 ETABLE 命令中使用 Lab 变元给每列分配一个标识，该标识将作为所有以后包括该变量的 POST1 命令的识别器。进入列中的数据依靠 Item 名和 Comp 名以及 ETABLE 命令中的其他两个变元来识别。例如：对上面提及的 SX 应力，SX 是标识，S 将是 Item 变元，X 将是 Comp 变元。

有些项（如单元的体积）不需 Comp。这种情况下，Item 为 VOLU，而 Comp 为空白。按 Item 和 Comp 识别数据项的方法称为填写单元表的“元件名”法。使用“元件名”法访问的数据通常是那些针对大多数单元类型和单元类型组而经过计算的数据。

ETABLE 命令的文档通常列出了所有的 Item 和 Comp 的组合情况。表 8-2 是一个对于 BEAM188 的列表示例，可在表中的名称列中的冒号后面使用任意名称作为名字，通过“Component Name”法将单元表填满。冒号前面的名字部分应输入作为 ETABLE 命令的 Item 变元，冒号后的部分（如果有的话）应输入作为 ETABLE 命令的 Comp 变元，O 列与 R 列表示在 Jobname.OUT 文件（O）中或结果文件（R）中该项是否可用：Y 表示该项总可用，数字则表示表的脚标，用于描述何时该项在一定条件下可用。

表 8-2 三维 BEAM188 单元输出定义

名 称	定 义	O	R
EL	单元号	Y	Y
Area	横截面积	2	Y
SF:y, z	截面剪切力	2	Y
EPEL:xx, xy, xz	弹性应变	3	Y
TQ	扭矩	Y	Y

(2) 填充按序号识别变量的单元表

可对每个单元加上不平均的或非单值载荷，将其填入单元表中。该数据类型包括积分点的数据、从结构一维单元和接触单元派生的数据、从一维温度单元派生的数据、从层状单元中派生的数据等。这些数据将列在“Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands”表中。表 8-3 是 BEAM188 的示例。

表 8-3 BEAM188 的 ETABLE 和 ESOL 命令中的项目及序号

标 号	项 目	I	J
Fx	SMISC	1	14
My	SMISC	2	15
EPELDIR	SMISC	41	46
SFz	SMISC	5	18
EPELByT	SMISC	42	47
EPELByB	SMISC	43	48
SDIR	SMISC	31	26



表中的数据分成项目组（如 LEPEL, NMISC 等），项目组中每一项有一个用于识别的序号。将项目组（如 LEPEL, NMISC 等）作为 ETABLE 命令的 Item 变元，将序列号作为 Comp 变元，将数据装入单元列表中，称之为填写单元表的“序列号”法。

（3）定义单元表的注释

1) ETABLE 命令仅对选中的单元起作用，即只将所选单元的数据送入单元表中。在 ETABLE 命令中改变所选单元，可以有选择地填写单元表的行。

2) 相同序号的组合表示对不同单元类型有不同数据。例如，组合 SMISC,1 对梁单元表示 MFOR(X)（单元 X 向的力），对 SOLID185 单元表示 P1（面 1 上的压力），对 CONTACT48 单元表示 FNTOT（总的法向力）。因此，若模型中有几种单元类型的组合，务必在使用 ETABLE 命令前选择一种类型的单元（用 ESEL 命令或 Utility Menu | Select | Entities）。

4) 可将单元表当做一个“工作表”，对结果数据进行计算。

8.4.3 在POST1 中观察结果

1. 图像显示结果

（1）云图显示

云图显示表现了结果项（如应力、温度、磁场磁通密度等）在模型上的变化。云图显示中有如下四个可用命令。

命令：PLNSOL

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Nodal Solu

命令：PLESOL

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Element Solu

命令：PLETAB

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Elem Table

命令：PLLS

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Line Elem Res

PLNSOL 命令生成连续的过整个模型的云图。该命令或 GUI 方式可用于原始解或派生解。对典型的单元间不连续的派生解，在节点处进行平均，以便可显示连续的云图。

若有 PowerGraphics（性能优化的增强型的图形显示），可用如下命令控制派生数据的平均。

命令：AVRES

GUI: Main Menu | General Postproc | Options for Outp

上述命令可确定在材料及（或）实常数不连续的单元边界上是否对结果进行平均。

平均算法则不管连接单元的节点属性如何，均会在所选单元上的所有节点处进行平均操作。这对材料和几何形状不连续处是不合适的。当对派生数据进行云图显示时，这些数据在节点处已做过平均，务必选择相同材料、相同厚度、相同坐标系等条件下的单元。

PLNSOL,TG,X! 派生数据：温度梯度函数 TGX

PLESOL 命令在单元边界上生成不连续的云图，该显示主要用于派生的解数据。如：

PLESOL, TG,X

PLETAB 命令用于云图显示单元表中的数据。在 PLETAB 命令中的 AVGLAB 字段, 提供了是否对节点处数据进行平均的选项 (对连续云图, 平均; 默认状态, 对不连续云图, 不平均)。

PLLS 命令可以用云图的形式显示一维单元的结果。该命令也要求数据存储在单元表中。该形式的显示常用于梁分析中对剪力和力矩图进行表示。

PLLS 命令只会在单元的 I、J 节点处的数值间画一直线, 不管结果沿单元长度如何变化。可用负的比例因子将图形倒过来。

(2) 变形后的形状显示

在结构分析中可用这些显示命令观察结构在施加的载荷下的变形情况。用下列方法之一可产生变形形状显示。

命令: PLDISP

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape

PLDISP, 1! 变形后的形状与原始形状叠加在一起。

可用命令/DSCALE 来改变位移比例因子。

在用户进入 POST1 时, 当心所有载荷符号被自动关闭。以后再次进入 PREP7 或 SOLUTION 处理器时仍不会见到这些载荷符号。若在 POST1 中打开所有载荷符号, 结果会在变形形状图上显示载荷。

(3) 矢量显示

矢量显示可以用箭头显示模型中某个矢量大小和方向的变化。平移 (U)、转动 (ROT)、磁力矢量势 (A)、磁通密度 (B)、热通量 (TF)、温度梯度 (TG)、液流速度 (V)、主应力 (S) 等都是矢量的例子。

用下列方法可产生矢量显示。

命令: PLVECT

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Vector Plot | Predefined

可用下列方法改变矢量箭头长度比例。

命令: /VSCALE

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Style | Vector Arrow Scaling

PLVECT,B! 磁通密度 (B) 的矢量显示

(4) 反作用力显示

与边界条件显示相同, 用命令/PBC 下的 RFOR 或 RMOM 来激活。以后的任何显示由 NPLOT、EPlot 或 PLDISP 命令生成。将在定义了 DOF 约束的点处显示反作用力符号。约束方程中某一自由度节点力之和不应包含过该方程的力。

同反作用力一样, 也可用命令/PBC(Utility Menu | PlotCtrls | Symbols) 中的 NFOR 或 NMOM 项显示节点力, 这是单元在其节点上施加的力。每一节点处这些力之和通常为 0, 约束点处或加载点除外。

默认情况下, 打印出的或显示出的力 (或力矩的) 的数值代表合力 (静力、阻尼力和惯性力的总和)。FORCE 命令 (Main Menu | General Postproc | Options For Outp) 可将合力分解成各分力。

(5) 破碎图



若在模型中有 SOLID65 单元，可以使用下列命令确定哪些单元断裂或碎开。

命令：PLCRACK

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | ConcPlot | Crack/Crush

以小圆圈标出已断裂，以小八边形表示混凝土已压碎，如图 8-3 所示。

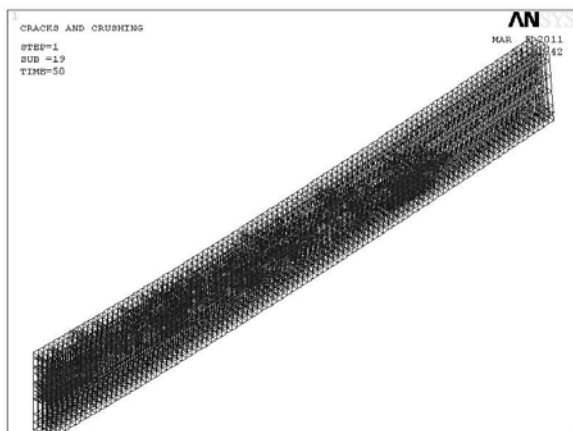


图 8-3 具有裂缝的混凝土梁

在使用不隐藏矢量显示的模式下，可见断裂和压碎的符号。

命令：/DEVICE,VECTOR,ON

GUI: Utility Menu | Plotctrls | Device Options

2. 用表格形式列出结果

将结果存档的有效方法是在 POST1 中制表。列表选项对节点、单元、反作用力等求解数据可用。

(1) 列出节点、单元求解数据

用下列方式可以列出指定的节点求解数据。

命令：PRNSOL

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution

用下列方式可以列出所选单元的指定结果。

命令：PRNSEL

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Element Solution

要获得一维单元的求解输出，在 PRNSOL 命令中指定 ELEM 选项，程序将列出所选单元的所有可行的单元结果。

(2) 列出反作用载荷及作用载荷

在 POST1 中有几个选项用于列出反作用载荷及作用载荷。

下列方式可列出选择设置中约束节点处的反作用力。

命令：PRRSOL

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu

下列方式可列出所选节点处的总的单元节点力，值为零的除外。

命令：PRNLD

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Loads

列出反作用载荷及作用载荷是检查平衡的一种好方法。在求解后检查模型的平衡状况总是好的做法。也就是说,在给定方向上所加的作用力应总等于该方向上的反力。

出现耦合分析或约束方程会诱发实际上的或明显的失去平衡。由于指定的耦合不好或约束方程会造成载荷平衡的实际丧失。由 CPINTF 生成的耦合组和由 CEINTF 或 CERIG 生成的约束方程在几乎所有情况下都能保持实际的平衡。

约束方程也能造成明显的平衡丧失。因如前所述,属于约束方程约束 DOF 处的反力不包括过该方程的力。这将影响单个反力和总反力。所以最好不要约束属于约束方程的 DOF。同样,对属于某个约束方程的节点力之和也不应包括过该方程的节点力,这将影响单个反力和总反力。

可用下列方式对所选的节点进行力、力矩求和运算和列表显示。

命令: FSUM

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Total Force Sum

可用下列方式在除了总体求和外,还对每一个所选的节点进行力、力矩求和。

命令: NFORCE

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Sum@Each Node

可用下列方式定义在哪些点(除原点外)求力矩和

命令: SPOINT

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Summation Pt | At Node

(3) 列出单元表数据

用下列命令之一可列出储存在单元表中的指定数据。

命令: PRETAB

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | List Elem Table

可用下列方式列出单元表中每一列的和。

命令: SSUM

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Sum of Each Item

(4) 其他列表

可用下列方式列出所有被选单元指定的矢量大小及其方向余弦。

命令: PRVECT

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Vector Data

可用下列方式计算在模型中沿预先定义的几何路径上列出指定的数据。

命令: PRPATH

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Path Items

可用下列方式计算然后列出沿预定的路径线性变化的应力。

命令: PRSECT

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Linearized Strs

可用下列方式列出所选单元在能量级的百分比误差。

命令: PRERR

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Percent Error





3. 映射结果

(1) 定义路径

要定义路径，首先要定义路径环境然后定义单个路径点。通过在工作平面上拾取节点、位置或填写特定坐标位置表来决定是否定义路径，然后通过拾取可生成路径。

命令：PATH, PPATH

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | By Nodes

关于 PATH 命令有下列信息。

- 路径名：不多于 8 个字符。
- 映射到该路径上的数据组数：最小为 4，默认值为 30，无最大值。
- 相临点的子分数：默认值=20，无最大值。

PATH 和 PPATH 命令在激活的坐标系中定义了路径的几何形状。若路径是直线或圆弧，只需两个端点，除非想进行高精度插值，那将需要更多的路径点或子分点。

显示已定义的路径，需首先沿路径插值数据，然后用命令/PBC,PATH,,1 (Utility Menu | PlotCtrls | Symbols)，接着用 EPLOT 或 NPLOT 命令 (Utility Menu | Plot | Elements 或 Utility Menu | Plot | Nodes)。ANSYS 将路径用一系列直线段显示。

(2) 使用多路径

一个模型中并不限制路径数目。但是，一次只有一个路径为当前路径。选择 PATH, NAME 命令改变当前路径。在 PATH 命令中不用定义其他变元。已命名的路径将成为新的当前路径。

(3) 沿路径插值数据

用下列命令可达到该目的。

命令：PDEF

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Map onto Path

命令：PVECT

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Unit Vector

这些命令要求路径被预先定义好。

用 PDEF 命令，可在一激活的结果坐标系中沿着路径虚拟插值任何结果数据：原始数据、派生数据、单元表数据、FLOTTRAN 节点结果数据等。例如，沿着 X 路径方向插值热通量，命令如下：

```
PDEF,XFLUX,TF,X
```

XFLUX 值是用户定义的分配给路径项的任意名字，TF 和 X 放在一起识别该项为 X 方向的热通量。

(4) 映射路径数据

POST1 用 {nDiv (nPts-1) +1} 个插值点将数据映射到路径上 (这里，nPts 是路径上的点数，nDiv 是所在点间的子分数 [PATH])。创建第一路径项时，程序自动地插值下列几何项：XG, YG, ZG 和 S。开头三个是插值点的三个整体坐标值，S 是距起始节点的路径长度。在用路径项执行数学运算时这些项是有用的。要在材料不连续处精确映射数据，在 PMAP 命令 (Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | Path Options) 中

使用 DISCON=MAT 选项。

要从路径上删除路径项，可用 PDEF,CLEAR。例如：用 PCALC 命令(Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | Path Options)可从一个路径存储路径项、定义一平行路径及计算两路径间路径项之差。

PVECT 命令定义了沿路径的法矢量、切矢量或正向矢量。对该命令，笛卡儿坐标系应被激活。例如，下列命令定义了在每个插值点处与路径相切的单位矢量。

PVECT,TANG,TTX,TTY,TTZ

(5) 观察路径项

要得到指定路径项与路径距离的关系图可用如下方式。

命令：PLPATH

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | On Graph

要得到指定路径项的列表可用如下方式。

命令：PRPATH

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | List Path Items

要控制路径距离范围可用如下方式。

命令：PLPATH/PRPATH/ PRANGE

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | Path Range

在路径显示的横坐标项中路径定义变量也能用来取代路径距离。

可沿路径几何形状用一彩色云图显示路径数据项。从路径上的云图中显示不均匀可控清晰度量。要产生这样的显示，可使用下列方式

命令：PLPAGM

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | On Geometry

(6) 在路径项中执行算术运算

下列三个命令可用于在路径项中执行算术运算。

1) 允许对路径项进行加、乘、除、求幂、微分、积分的方法如下。

命令：PCALC

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations

2) 计算两路径矢量的点积的方法如下。

命令：PDOT

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Dot Product

3) 计算两路径矢量的叉积的方法如下。

命令：PCROSS

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Cross Product

(7) 删除路径

删除一个或多个路径时，可用下列方式之一。

命令：PADELE, DELOPT

GUI: Main Menu | General Postproc | Path Operations | Delete Path





4. 分析计算误差

有限元分析中的主要考虑之一是有限元网格数量是否足够。用 ANSYS 误差分析技术可以解决该问题，该技术用于估计由于网格离散化产生的计算误差量。该技术只对使用二维、三维实体单元或板壳单元的线性结构和线性、非线性温度场可用。

在后处理器中，程序为模型中每个单元计算能量误差。能量误差在概念上与应变能相似。结构能量误差（SERR）是单元到单元应力场跃变的度量。热能误差（TERP）是单元到单元热能跃变的度量。用 SERR 和 TERP，ANSYS 可计算能量级的百分误差。

注意：误差估计是基于参考温度（TREF）下被评价的刚度及传导模型之上的。因此，如果单元在与参考温度 TREF 相差很大的温度下，误差估计对于与温度有关的材料特性的单元有可能不正确。

在很多情况下，通过抑制误差估计可以大大提高程序运算速度。在热分析中关闭误差估计时，性能改善尤为显著。因此，用户可只在需要时才用误差分析。例如在用户想确定网格是否易于得到良好的结果时。

使用下列命令可以关闭误差估计。

命令：ERNORM, OFF

GUI: Main Menu | General Postproc | Options For Outp

在默认情况下，误差估计是激活的。由于 ERNONM 命令所设置的值未存储在 Jobname.DB 文件中，重新进行分析后，如果要再次关闭误差估计，需要再次执行 ERNORM, OFF 命令。

显示所有被选单元的 SEPC 和 TEPC

命令：PRERR

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Percent Error

SEPC 和 TEPC 的值表示由于特定的网格离散化而引起的相对误差。要发现应在何处细化网格，只须生成 SERR 和 TERR 的云图显示，并寻找高误差区域即可。使用该种误差分析技术，可建立一自动程序，利用该程序在高误差区对网格进行自动细化。

8.4.4 POST1 的其他后处理内容

1. 将计算结果旋转到不同坐标系中

在求解计算中，计算结果数据包括位移、梯度、应力、应变等。这些数据以节点坐标系或任意单元坐标系坐标存入数据库和结果文件中。然而，结果数据通常变换到激活的结果坐标系（默认情况下为整体直角坐标系）中，用于显示、列表和单元表格数据存储。

命令：RSYS

GUI: Main Menu | General Postproc | Options For Outp

操作后弹出如图 8-4 所示的设置输出结果坐标系对话框，该对话框包括一个控制项，即输出结果对话框。用户可以将结果坐标系转换成整体柱坐标系（RSYS, 1）、整体球坐标系（RSYS, 2）、任何存在的局部坐标系（RSYS, N 这里 N 是局部坐标系序号）或求解中所使用的节点和单元坐标系（RSYS, SOLU）。

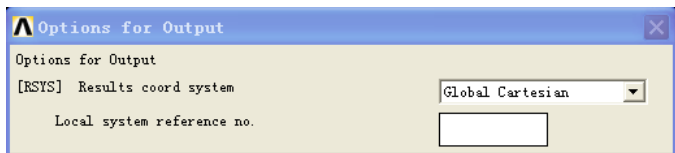


图 8-4 设置输出结果坐标系对话框

在大变形分析中的原始解（例如位移）并不包括刚体转动效果，因为节点坐标系不会按刚体转动量旋转。

2. 在结果数据中进行数学运算

前述对在路径项中运算的讨论局限于沿路径映射的项。从 POST1 CALC 模块中使用命令，可对数据库中的任何结果数据进行运算，唯一的要求是要用单元表。单元作为“工作表”，允许在其列间进行数学运算。

(1) 对结果进行运算的简单步骤

1) 将一个或多个结果项引入单元列表或“工作表”。

命令：ETABLE

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

2) 从 CALC 模块（SADD, SMULT, SEXP 等）中使用命令执行所要的算术运算。

3) 查看运算结果。

命令：PRETAB

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | List Elem Table

(2) 适用于使用单元表计算的 CALC 模块命令

使用如下方法可在后续的单元表操作中使用绝对值。

命令：SABS

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Abs Value Option

使用如下方法可在单元表中加入两个指定列。

命令：SADD

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Add Items

使用如下方法可对安全系数计算定义许用应力值。

命令：SALLOW

GUI: Main Menu | General Postproc | Safety Factor | Factor Type

使用如下方法可对单元表中两列进行幂运算及乘法运算。

命令：SEXP

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Exponentiate

使用如下方法可定义在后续的显示、选择或排序操作中执行何种安全系数的计算。

命令：SFACT

GUI: Main Menu | General Postproc | Safety Factor | Restore Nodestr

使用如下方法可计算安全系数（用于 ETABLE 项）。

命令：SFCALC

GUI: Main Menu | General Postproc | Safety Factor | Sf For Elemtable



使用如下方法可比较并存储两列中的最大值。

命令: SMAX

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Find Maximum

使用如下方法可比较并存储两列中的最小值。

命令: SMIN

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Find Minimum

使用如下方法可对单元表中指定的两列进行乘法运算

命令: SMULT

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Multiply

使用如下方法可计算并打印每单元表列之和

命令: SSUM

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Sum Of Each Item

3. 产生及组合载荷工况

在典型的后处理中,在读入一组数据到数据库并进行处理时,每次存入一组新数据,POST1 清除数据库中结果部分的内容并装入新的结果数据到数据库。若想在两组完整的结果数据中执行运算,必须创建载荷工况。

载荷工况是一组赋以任意参考号的结果数据。例如,可以将载荷步 2,子步 5 的一组结果数据定义为载荷工况号 1,将时间为 9.32s 时的一组结果数据定义为载荷工况号 2,以此类推。最多可定义达 99 个载荷工况,但在数据库中一次只能存储一个载荷工况。

载荷工况组合是载荷工况之间的运算,典型情况为当前在数据库中的载荷工况和在另外一结果文件中的载荷工况间的运算。运算结果将改写数据库中的结果数据部分,可以显示及列出载荷工况组合。

(1) 典型的载荷工况组合

1) 定义载荷工况的方法如下。

命令: LCDEF

GUI: Main Menu | General Postproc | Load Case | Create Load Case

2) 将载荷工况之一读入数据库的方法如下。

命令: LCASE

GUI: Main Menu | General Postproc | Load Case | Read Load Case

3) 执行所需的运算的方法如下。

命令: LCOOPER

GUI: Main Menu | General Postproc | Load Case | Operation

作为例子,假设结果文件包括针对几个载荷步的结果,若想比较载荷步 5 和载荷步 7,并将最大值存入内存,做法如下:

LCDEF,1,5! 将载荷工况 1 指向载荷步 5

LCDEF,2,7! 将载荷工况 2 指向载荷步 7

LCASE,1! 将载荷工况 1 读入内存

LCOOPER,MAX,2!与载荷工况 2 比较数据库并将最大值存入内存

数据库现在包含两载荷工况的最大值，可执行任何所需的后处理函数。

清楚载荷工况运算如何执行很重要。许多载荷工况运算（例如 `mode combinations`），涉及到平方，使得计算结果不适于向结果坐标系转换，也不适于对节点、单元结果进行平均运算。典型的后处理函数（如打印或显示平均节点应力）既涉及到某一坐标系向结果坐标系的转换又涉及到对节点进行平均。而且，除非 `SUMTYPE`、`PRIN` 命令已被请求处理，否则，当用应力分量的平方来计算主应力或当量应力时，其结果就毫无意义。因此，无论何时做平方运算（如谱分析时），建议只用没有经过转换和平均的结果。

（2）存储组合载荷工况

默认情况下，载荷工况组合的结果保存在内存中，并改写数据库中的结果部分。要保存这些结果，作为以后浏览或与以后的载荷工况组合，可用下列方法。

将数据追加到结果文件中，把当前内存中的载荷工况写到载荷工况文件中。文件名为 `Jobname.Lnn`。这里 `nn` 为分配的载荷工况号。在后续的载荷工况组合中用 `nn` 表示存入载荷工况文件的载荷工况。

命令 `LCWRITE`

GUI: Main Menu | General Postproc | Load Case | Write Load Case。

下例表述了 `LCWRITE` 命令的用法：

```
LCDEF,1,5! 载荷工况 1 指向载荷步 5
LCDEF,2,7! 载荷工况 2 指向载荷步 7
LCDEF,3,10! 载荷工况 3 指向载荷步 10
LCASE,1!将载荷工况 1 读入内存
LCOPER,MAX,2! 比较载荷工况 1 与载荷工况 2 的数据库，并将最大值存入内存
LCWRITE,12!写当前载荷工况到文件 Jobname.L12
LCASE,3! 将载荷工况 3 读入内存
LCOPER,ADD,12!在 Jobname.L12 文件中将数据库加到载荷工况中
```

8.5 时间历程后处理器（POST26）

时间历程后处理器 `POST26` 可用于检查模型中指定点的分析结果与时间、频率等的函数关系。它有许多分析能力——从简单的图形显示和列表到诸如微分和响应频谱生成的复杂操作。`POST26` 的一个典型用途是在瞬态分析中以图形表示产生结果项与时间的关系或在非线性分析中以图形表示作用力与变形的关系。

8.5.1 时间历程变量观察器

打开时间历程变量观察器的方法如下。

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro

操作后将打开时间历程变量观察器，如图 8-5 所示。

1. 工具条

利用工具条可控制大多数时间历程处理操作。用户可关掉两个扩展的工具栏以保持一个具有如下项目的紧凑工具栏。

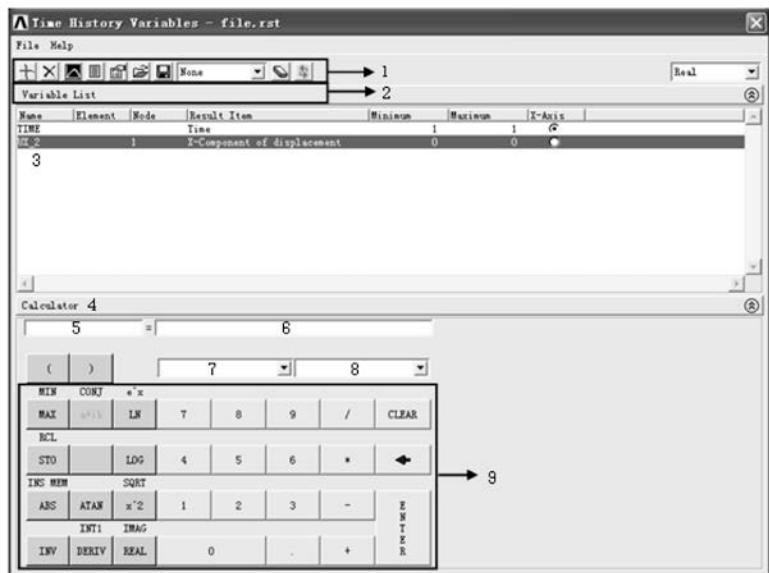


图 8-5 时间历程变量观察器

Add Data: 打开 Add Time-History Variable 对话框。

Delete Data: 从变量列表中删除选定的变量。

Graph Data: 由预先定义的属性拟合有 10 个变量的曲线。

List Data: 生成数据列表，最多可包括 6 个变量。

Properties: 定义选定的变量和全局的某些属性。

Import Data: 打开对话框，以将信息输入变量空间。

Export Data: 打开对话框，将数据输出到文件和 APDL 数据数组。

Overlay Data: 在下拉菜单中选择用于图形覆盖的数据。

Results to View: 在下拉菜单中选择复杂数据的输出格式。

2. 显示/隐藏变量列表

为了暂时缩减观察器的尺寸大小，可单击该工具栏的任何位置以隐藏变量列表。

3. 变量列表

该区域显示预定义的时间历程变量，用户可以从该列表中选择数据来进行处理。

4. 显示/隐藏计算器

为了暂时缩减观察器的尺寸大小，可单击该工具栏的任何位置以隐藏计算器。

5. 变量名输入区域

用户想创建的派生变量命名。

6. 表达式输入区域

输入定义派生变量的表达式。

7. APDL变量下拉菜单

在输入表达式时，使用该菜单选择预定义的 APDL 变量。

8. 时间-历程变量下拉菜单

输入表达式时，使用该菜单选择已存储的变量。

9. 计算器区域

使用计算器，用户可以在输入表达式时，加入标准的数学操作符和函数调用，用户只需单击按钮，就可把函数加入表达式中。单击 INV 按钮，可轮流改变一些按钮的函数表示。使用圆括号就像用户在一般的代数计算中一样，可改变表达式中的运算顺序。许多函数调用在需要时，会自动加上括号。

MAX/MIN：变量中最大值的封装或变量中最小值的封装。COMPLEX/：形成一个复变量。CONJUGATE：对一个变量做复数变量操作。LN/e^X：求一个变量的自然对数或求变量的 e 次幂。STO/RCL：将表达式区域信息存储在内存中或读内存重复调用表达式。LOG：求一个变量的普通对数。ABS/INS MEM：求实变量的绝对值，复变量的模或将内存区域的内容插入到表达式中。ATAN：求复变量的反正切值。X^2/SQRT：求变量的平方值或求变量的平方根值。

INV：转换函数键盘上的函数表示。DERIV/INT：求变量的导数或对变量取整。REAL/IMAG：取复变量的实部或取复变量的虚部。CLEAR：清除表达式区域中所有的数据和变量。BACKSPACE：回退光标，并删除前一个字符。ENTER：完成在表达式区域中的表达式输入，并将之存储为在变量输入区域输入的变量名。

8.5.2 进入时间历程处理器

进入时间历程处理器可以解决时间和频率相关的结果数据。一旦用户已完成了分析，ANSYS 利用结果数据来生成一个结果文件。在用户进入处理器时，当前激活的结果文件自动载入(*.RST,*.RFL,*.RTH,*.RMG)。若当前的分析中没有任何结果文件，用户可以请求装载一个文件。用户也可以利用文件命令选项来装载任何一个结果文件进入处理器。

1. 交互式

选择 Main Menu | TimeHist PostPro 启动时间历程处理器。

2. 命令流方式

使用/POST26 命令在批处理方式或命令行中打开时间历程处理器。

8.5.3 定义变量

POST26 的所有操作都是对变量而言的，是结果项与时间（或频率）的简表。结果项可以是节点处的 UX 位移、单元的热流量、节点处产生的力、单元的应力、单元的磁通量等。用户对每个 POST26 变量任意指定大于或等于 2 的参考号，参考号 1 用于时间（或频率）。因此，POST26 的第一步是定义所需的变量，第二步是存储变量，这些内容将在下面描述。

1. 交互式

使用变量观察器，采用如下步骤进入时间历程处理数据。

1) 单击 Add Data 按钮，单击后将弹出添加时间历程变量的对话框，利用其中的结果项目框所提供的树状结构的结果项目，来选择用户要添加的结果类型。结果项目以一种树形结构来表示，从该结构中用户可选择所想要的标准类型。利用“favorites”功能，用户可以方便地访问用户以前所定义的数据集。该功能可以存储最后 50 个条目。

2) 对选定的结果选项指定一个名字，并可附加有用的信息。在结果选项区域的变量名段内显示有 ANSYS 的命名，当然用户可用任何喜欢的名字来代替。如果用户所用的名



字不唯一，将会询问用户是否覆盖以前存储的数据。根据用户在结果项目的区域中所选择的类型，用户可提供更多的关于该项目的信息，如适当的壳表面、载荷组成以及层标号信息等。

3) 单击 OK 按钮：如果需要一个实体信息，则将出现一个拾取窗口，以便用户可选择模型中适当的节点或单元。然后，添加时间历程变量的对话框将关闭，并将会结果观察器变量列表显示区域显示适当的变量列表。

如果用户需要输入更多的变量定义，单击 APPLY 按钮，这时结果数据将会被定义，并被放入变量列表区域，但此时添加时间历程变量的对话框将保持打开状态。

4) 增加或改变属性信息：根据用户所选择的结果变量类型，用户也许希望定义更多的时间历程属性。时间历程信息包括特定的变量信息、X 轴向数据定义和数据定义列表。通过 properties(5)按钮，用户可在任意时刻编辑以上信息。

注意：

在变量列表区域，用户可见到所有变量定义的数据，包括相关的指定单元和节点，以及变量的取值范围。

变量名 TIME,FREQ 为保留字。

在交互模式下，使用 NUMVAR 命令将自动设置 200 个变量，其中变量观察器在对数据的操作中将使用 200 个变量的最后 10 个，对于用户而言，只有剩下的 190 个可用。

2. 命令流方式

在交互模式下，变量在定义时将被自动存储。而在命令行模式下，完成该过程需两个独立的步骤——定义，然后存储。

定义变量时依据结果文件中的结果项，这意味着对结果项建立相应的指针，并创建标签来表示存储该数据的区域。例如，以下命令定义了时间历程变量 2, 3, 4:

```
NSOL,2,358,U,X,UX_at_node_358
ESOL,3,219,47,EPEL,X,Elastic_Strain
ANSOL,4,101,S,X,Avtg_Stress_101
```

变量 2 为节点 358 的 UX 位移，变量 3 为 219 单元的节点 47 的弹性约束的 X 分力。变量 4 为 101 节点的 X 方向的平均应变。其后为了对这些结果项进行引用，将分配给它们参考号和标签。

第二步是存储数据（使用 STORE 命令）。存储数据意味着从结果文件中读取数据并将它写入数据库中。除了 STORE 命令外，当使用显示命令（PLVAR、PRVAR）或时间历程数据操作命令（ADD、QUOT 等），程序将自动存储数据。一个使用 STORE 命令的例子如下：

```
/POST26
NSOL,2,23,U,Y !变量 2=节点 23 处的 UY
SHELL,TOP !指定壳的顶面结果
ESOL,3,20,23,S,X!变量 3=单元 20 的节点 23 的顶部 SX
PRVAR,2,3 !存储并打印变量 2 和 3
SHELL,BOT !指定壳的底面为结果
ESOL,4,20,23,S,X!变量 4=单元 20 的节点 23 的底部 SX
```

STORE !使用命令默认,将变量 4 和变量 2、3 置于内存
PLESOL,2,3,4 !打印变量 2,3,4

在某些场合, 需要使用 STORE 命令(Main Menu | TimeHist Postpro | Store Data)直接请求变量存储。

8.5.4 处理变量并进行计算

通常, 通过对从结果文件得到的指定分析数据进行处理, 可产生能提供更有价值的附加变量集。例如, 在一个瞬态分析中定义一个位移变量, 可通过求它对时间的导数来得到速度和加速度, 这样做, 将产生一个全新的变量, 我们在以后的分析中可结合其他数据来使用该变量。

1. 交互式

变量观察器提供了一个直观的计算器用来进行计算, 所有的命令功能均可通过在该区域的操作来访问, 并且通过单击该区域上面的工具条可显示或隐藏该区域。

可按如下步骤使用变量观察器来进行时间历程数据的处理。

1) 在变量名输入区域命名一个变量, 命名必须唯一, 否则将提示用户是否覆盖先前命名过的变量。

2) 单击适当的按钮, 或从下拉菜单中选择时间历程变量或 APDL 参数。操作后, 表达式输入区域将显示输入的操作符、变量名、APDL 参数。

3) 单击变量观察器计算器区域中的 Enter 按钮。完成计算, 得到的计算数据使结果变量名出现在变量列表区域, 而且直到观察器关闭, 表达式一直可用观察器使用结果变量名来访问。

2. 命令流方式

在批处理模式下, 可使用命令的联合, 某些用来标识变量名和输出格式, 某些用来标识创建新变量的变量数据。计算器命令由它们相应的自身命令来执行。

1) 表示一个变量 UYBLOCK 对一个变量的求导:

```
NSOL,2,100,u,y,UYBLOCK
DERIV, 3,2,1,,VYBLOCK
```

2) 对一个时间历程复变量 PRES MID 取模:

```
NSOL,2,123,PRES,,PRESMID
ABS, 3,2,,,AMPL_MID
```

3) 求一个复变量 UYFANTIP 的相位角:

```
Pi = acos(-1)
ATAN,4,2,,,PHAS_MID,,,180/pi
```

4) 求一个复变量 PRES MID 和一个因子(2+3i)的积:

```
CFACT,2,3!Scale factor of 2+3i
ADD,5,2,,,SCAL_MID
```



以下的命令被用来对变量数据进行计算，生成可计算的表达式，或存储数据。

8.5.5 变量的评价

1. 图形显示结果

(1) 交互式

在变量观察器中利用 **Graph Data** 按钮可将用户选定的变量以图表显示。在一个图表中最多可显示 10 个变量。默认下，图表中 X 轴在静态或瞬态分析中为时间变量，而在谐分析中为频率变量。用户也可利用 X-AXIS 列下的单选按钮来改变 X 轴坐标为用户在变量列表中选择的一个变量。

当需要绘制复变量的图形时（如在一个谐分析中）用户可利用变量观察器右上角的 **results to view** 下拉列表来选择是绘制振幅，还是相位角、实部或虚部。

变量观察器中存储了结果文件中可用的所有时间点。用户可通过选择 X 坐标的范围，来仅显示结果中的一部分。这对用户仅对某一时间点附近的响应特别感兴趣时比较有用，或是在一个衰减试验分析中的某一范围的碰撞力矩。该设置在 **Data Properties** 对话框中的 **X-AXIS** 标签下。注意，该项为全局设置，将影响后面所有的图形绘制。

(2) 命令流方式

图框中显示变量的图形。

命令：PLVAR 命令

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables

可在一个图框中显示 9 个显示变量的图形。默认的横坐标（X 轴）为变量 1：静态或瞬态分析表示时间；谐波分析表示频率。

可指定不同的变量号（表示应力、变形等）作为横坐标。

命令：XVAR

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | Settings | Graph

当对复变量进行图形绘制时，默认情况下，PLVAR 命令显示为幅值。可以通过下面的方法改变复变量的显示方式。

命令：PLCPLX

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | Settings | Graph

2. 列表显示结果

(1) 交互式

变量观察器中的 **List Button** 按钮可对 6 个观察器中的变量进行列表显示。当需要显示复变量的列表时（如在一个谐分析中）用户可利用变量观察器的右上角的 **results to view** 下拉列表来选择是显示振幅，还是相位角、实部或虚部。

用户可限制显示的数据为一定范围的时间或频率。通过 **Data Properties** 对话框中的 **Lists** 选项卡的选择可控制本次列表显示及随后的列表。除了设置时间或频率范围外，用户还可进行选择如下选择。

- 1) 在重复输出列表头前指定显示的行的数目。
- 2) 显示输出变量的极值。
- 3) 指定显示第几个数据点。

(2) 命令流方式

在表格中列出变量。

命令: PRVAR

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | List Variables

可在表格中列出 6 个变量。

对列表输出的格式做微量调整。

命令: LINES

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | Settings | List)

对于由实部和虚部组成的复变量, PRVAR 命令的默认列表是实部和虚部。可通过命令 PRCPLX 命令选择实部、虚部、幅值、相位中的任何一个。

打印设定的 X 和 Y 范围内 Y 变量的最大和最小值。

命令: EXTREM

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | List Extremes

8.5.6 POST26 后处理器的其他功能

1. 产生响应谱

该方法允许在给定的时间历程中生成位移、速度、加速度响应谱, 频谱分析中的响应谱可用于计算结构的整个响应。

命令: RESP

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro | Generate Spectrm

RESP 命令需要先定义两个变量: 一个含有响应谱的频率值, LFTAB 字段; 另一个含有位移的时间历程, LDTAB 字段。LFTAB 的频率值不仅代表响应谱曲线的横坐标, 而且也是用于产生响应谱的单自由度激励的频率。可通过 FILLDATA 或 DATA 命令产生 LFTAB 变量。

LDTAB 中的位移时间历程值常产生单自由度系统的瞬态动态分析。通过 DATA 命令(位移时间历程在文件中时)和 NSOL 命令(Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables)创建 LDTAB 变量。系统采用数据时间集分法计算响应谱。

2. 数据的平滑

若用户进行一个会产生很多噪声数据的分析(如动态分析)则我们通常会平滑处理响应的数据。通过消除一些局部的波动, 而保持响应的整体特征来使我们更好的理解和观察响应。时间历程中的 smooth 操作通过一个 n 阶的多项式来对实际的响应进行平滑。该操作仅适合静态或瞬态分析的结果数据。

(1) 交互式

该功能通过变量观察器中计算器部分的函数 smooth(x1,x2,n)来实现, 其中 x1 为受约束的变量(如某点的响应), x2 为独立的变量(如时间变量), n 为平滑函数的阶数。该函数只能通过计算器中的表达式区域输入来实现。如用一个二阶的平滑函数来对某结构中点的 UY 响应来平滑:

```
smoothed_response=SMOOTH ({UY_AT_MIDPOINT}, {TIME},2)
```

(2) 批处理方式





如果产生了一些噪音数据，用户将平滑数据来得到一个更有代表性的曲线。可利用 4 个数组来平滑数据，前两个数组分别保存独立变量和受约束的变量，后两个保存平滑后的独立变量和约束变量。在进行数据的平滑前必须首先用 ***DIM** 命令来创建前两个数组，然后用 **VGET** 命令来填充这两个数组。当在交互模式下，**ANSYS** 将自动产生后两个数组，但若在批处理方式下，在平滑数据前，用户必须自己来创建后两个数组（**ANSYS** 将用平滑后的数据对其填充）。

当四个数组被建立后，便可对数据进行平滑处理。

命令：SMOOTH

GUI: Main | Menu | TimeHsit PostPro | Smooth Data

用户可在 **datap** 域中选择是平滑部分数据还是全部数据，在 **fitpt** 域中选择平滑函数的最高阶数（默认是对所有点），通常，默认的阶数为数据点数目的一半。在对结果进行绘制时，可选择绘制对数据平滑前或平滑后的曲线，或者是将两者都绘制出来。

第9章 设计ANSYS分析方案



9.1 设计分析方案的重要性

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

9.2 确定分析目标

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

9.3 确定模型类型

有限元模型可分为二维和三维两种，可以由点单元、线单元、面单元或实体单元组成，当然，也可以将不同类型的单元混合使用。例如，带筋的薄壳结构可用三维壳单元离散蒙皮，用三维梁单元来离散蒙皮下的筋。对模型的尺寸和单元类型的选择也就决定生成模型的方法。线模型代表二维和三维的梁或管结构，以及三维轴对称壳结构的二维模型。实体建模通常不便于生成线模型，而通常由直接生成法创建。

二维实体模型在薄平板结构、等截面的“无限长”结构或轴对称实体结构上应用广泛。尽管许多二维分析模型用直接生成法并不困难，但通常用实体建模更容易。

三维壳模型用于描述三维空间中的薄壁结构，尽管某些三维壳模型用直接生成方法创建并不困难，但用实体建模方法通常会更容易。三维实体分析模型用于描述三维空间中截面积不等，也不是轴对称的厚结构。用直接生成法创立三维实体模型较复杂，实体建模会使其变得容易些。

9.4 确定模型单元

ANSYS 程序的单元库包括两种基本类型的面和体单元——线性单元（有或无特殊形状的）和二次单元。这些基本单元类型如图 9-1 所示，下面来探讨这两种基本类型单元的选择。

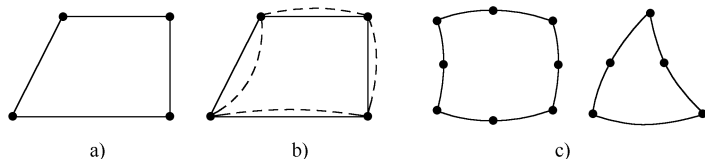


图 9-1 面和体类型

a) 线性单元 b) 特殊形状的线性单元 c) 二次单元

9.4.1 线性插值单元

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

当对弯曲壳体建模时，必须选用弯曲的二次的或平面线性的壳单元，每种选择都有其优缺点，对于多数的实际情况，主要问题利用平面单元以很少的计算时间，即可获得很高精度的结果。但是，必须保证使用足够多的平面单元来创建曲面。明显地，单元越小，准确性越好。推荐三维平面壳单元延伸不要超过 15° 的弧，圆锥壳（轴对称线）单元应限制在 10° 的弧以内或离 Y 轴 5° 。对多数非结构分析（热、电磁等），线性单元几乎与高次单元有同样好的结果，而且求解费用较低。退化单元（三角形和四面体）通常在非结构分析中产生准确结果。

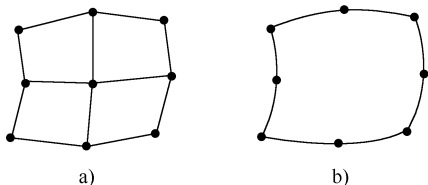


图 9-2 网格的比较

a) 线性单元 b) 二次单元

9.4.2 二次插值单元

对于用退化的单元形式进行的结构分析（即二维三角形单元以及楔形或三维四面体单元），二次单元通常会以比线性单元的求解费用更低且产生良好的结果。可是，为正确地使用这些单元，需要注意它们的如下特性。

- 1) 对于分布载荷和面压力，不像线性单元按一般意义上分配到单元节点上（见图 9-3），单元的中间节点对反力也表现出相同的非直观的解释。
- 2) 三维带中间节点的热流单元在承受对流载荷时按固定模式分配热流，在中间节点沿一个方向流动，而在角点又沿另外的方向流动。
- 3) 对于结构单元，中间节点的温度如果在两相邻角点温度范围之外，则要重新定义为这两角点的平均温度。
- 4) 由于中间节点的质量也大于角节点的质点，所以通常将中间节点选为主自由度（对于减缩自由度分析）。
- 5) 由于质量分配不均匀，在动力分析中不推荐使用带中间节点的单元。

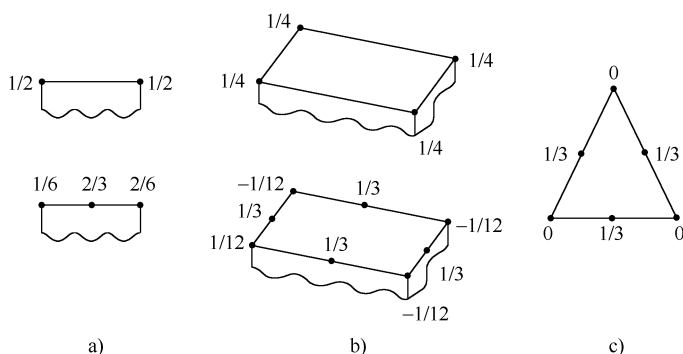


图 9-3 节点分配的平衡

a) 二维单元 b) 三维单元 c) 三维三角形单元

6) 如图 9-4 所示, 不要在有中间节点 (CONTAC12, COMBIN40, CONTAC48, CONTAC49 和 CONTAC52) 的边定义节点为基础的接触单元, 也不要将间隙单元与带中间节点的边连接。类似地, 对热问题, 不要应用辐射连接或非线性对流表面到带有中间节点的边。节点为基础的接触要同有中间节点的表面接触, 中间节点应该去掉。对于面对面接触单元不用担心程序会在定义接触对时自动去掉中间节点。划分实体模型时提供了一些方法忽略某些中间节点。

7) 当约束一个单元 (或表面) 的边缘自由度时, 包括中间节点在内的边缘上所有的节点都要约束。

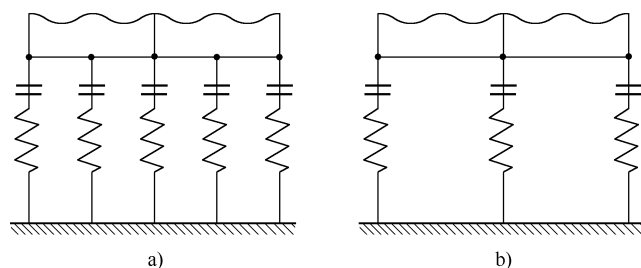


图 9-4 在间隙或接触表面处避免中间节点

a) 不推荐使用 b) 推荐使用

8) 单元的角点只能与单元的角点相连, 而不能与相邻单元的中间节点相连。相邻的单元应该有相连 (或共同的) 中间节点, 如图 9-5 所示。

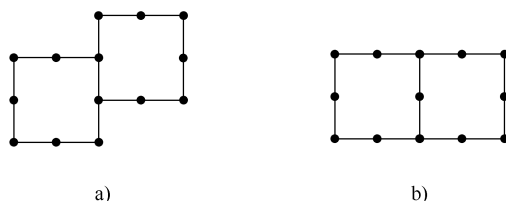


图 9-5 避免单元间中间节点与角点相连

a) 不推荐使用 b) 推荐使用



9) 对于有中间节点的单元, 通常希望每一个这样的中间节点在相应角点之间连线的中点位置, 可是, 有时却希望出现在其他地方:

- 节点沿着弯曲的几何边界通常可产生更准确的分析结果—所有的 ANSYS 网格划分器默认地将它们放在那里。
- 有的内边界也不得不弯曲以防止单元倒置或过于扭曲, ANSYS 网格划分器有时也产生这种弯曲。
- 用带有故意将中间节点偏离中心四分之一点可以模拟裂纹尖端的奇异性, 利用下列可以产生这种特殊的面网格。

命令: KSCON

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | Concentrat KPs | Create。

- 中间节点位置可由下面描述的单元形状测试进行检查。
- 除三节点三角形和四节点四面体外的所有实体和壳单元都要进行实三维空间与单元本身的自然坐标空间一致性映射的测试。雅可比比值过大表明单元过于扭曲, 可能是由中间节点的位置设置不当引起的。

10) 如果不给中间节点指定位置, 程序会自动按线性笛卡儿坐标插值将中间节点放在两角点的中间, 按此法放置的节点坐标系旋转角度也将按线性插值得到。

11) 在相连单元的公共边应有相同的节点数, 当混合单元类型时有必要从一个单元去除中间节点。例如, 图 9-6 中的 8 节点单元与一个 4 节点单元相连时应把 8 节点单元的 N 节点去掉 (或在生成这个单元时给它一个 0 节点号)。

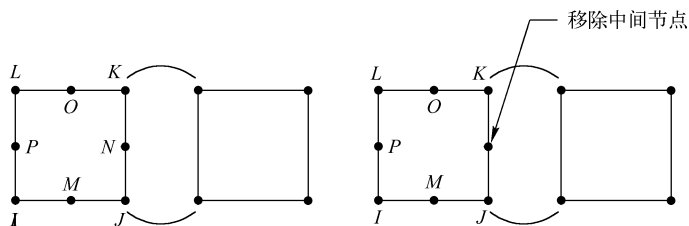


图 9-6 避免单元相交时中间节点不匹配

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

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

命令: EMID

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Elements | Add Mid Nodes

命令: EMODIF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Elements | Modify Nodes

- 13) 二次单元并不比线性单元的积分点多。因此, 在非线形分析中优先使用线性单元。
- 14) 诸如平面 PLANE82 和 SHELL93 的高阶四边形单元的一种网格可能由于零变形而产生奇异。
- 15) 对后处理程序只用截面的角点和隐藏线显示, 类似地, 节点应力结果的输出和后处理只能对角节点进行。
- 16) 在图形显示时, 曲边形的中间节点单元显示为直线段模型因此看起来比实际的要粗糙些。



9.5 不同单元之间的连接

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

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

下面考查三个应用了不协调单元的例子。

1) 单元有不同个数的自由度是不协调的, SHELL181 单元每个节点有三个平动和三个转动自由度。SOLID185 单元每个节点有三个平动自由度, 但缺少转动自由度。如果 SOLID185 单元与 SHELL181 单元相连, 相应平动自由度的节点力会传到实体块单元上。但是, 相应 SHELL181 单元的转动自由度的节点位移则不会传递给 SOLID185 单元。

2) 单元有相同个数的自由度也不总是协调的。例如梁单元和壳单元每个节点都各有三个自由度。可是, 壳单元有三个平动自由度 (UX、UY 和 UZ), 而梁单元只有两个平动自由度 (UX 和 UY), 因为只有 UZ 的结果能反映壳单元的刚度, 而且壳单元没有转动自由度 (ROTZ) 而梁单元有。与梁单元转动自由度对应的节点位移将不会传递给壳单元, 界面表现为梁像是被钉住了。

3) 三维梁单元与三维壳单元每个节点都有 6 个自由度, 可是, 壳单元的 ROTZ 自由度是与平面内旋转刚度相联系的, 这是一个虚构的刚度, 即它不是数学计算的真实刚度, 因此壳的 ROTZ 自由度不是真实的自由度。因此对三维梁单元仅有一个节点与三维壳单元相连导致梁单元的转动自由度与壳单元的 ROTZ 自由度对应是不协调的, 不应该将梁单元与壳单元按此方式连接起来。类似的不协调也可在不同数目和 (或) 类型自由度的单元之间存在。这些问题并不会使分析无效, 但至少应该注意到两个不同类型单元交界的条件。

9.6 分析中使用对称性

许多物体都有某种对称, 重复对称 (如一个长管道上平均分布的散热片)、反对称 (如塑料容器的模子) 或轴对称 (如灯泡)。当一个物体在所有方面都是对称的几何、载荷、约束和材料属性 (如图 9-7 所示), 可以利用模型的对称性减少模型的大小和范围。

任何表现为对一中心轴几何对称的结构 (如旋转壳或实体) 都是轴对称。例如直管、圆锥、圆盘、圆盖等。三维轴对称结构的模型可用二维形式等效。可以想象二维轴对称分析较



相应的三维分析的结果更精确。

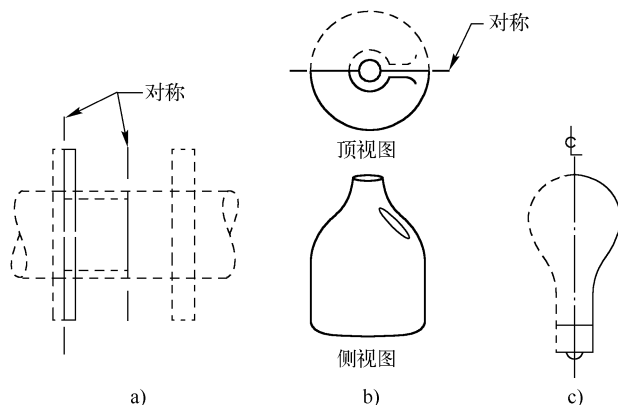


图 9-7 对称的例子

a) 重复对称 (散热等) b) 镜像对称 (模铸容器) c) 轴对称 (灯泡)

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

对轴对称结构模型的特殊要求有如下几点。

1) 对称轴必须与总体笛卡儿坐标系的 Y 轴重合。

2) 不允许出现负的 X 方向节点坐标。

3) 总体笛卡儿坐标系的 Y 方向代表轴向，X 方向代表径向，Z 方向代表周向。

4) 模型应当用适当的单元类型组合在一起：

- 对于轴对称模型，可用二维实体（且 KEYOPT(3)=1）和轴对称壳体。而且，可用不同的连接、接触、组合及表面单元并可将轴对称实体和壳单元容纳在一个模型里。

- 对于轴对称谐波模型，只能使用轴对称谐波单元。

5) SHELL61 单元不应位于总体 Y 轴上。

6) 对包含二维实体单元模型剪切影响是重要的，在厚度方向上至少要使用两个单元。

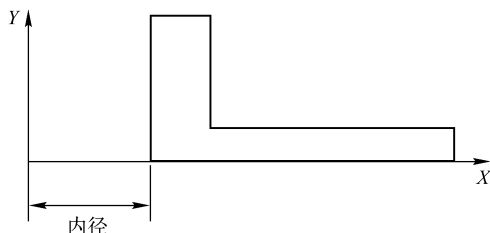


图 9-8 X 方向的偏移表示一个轴对称孔

如果结构沿对称轴包含有孔，不要忘记在 Y 轴和二维轴对称模型间保留适当的距离（见图 9-8，X 方向的偏移表示一个轴对称孔。）

9.7 确定模型细节

一些小的细节对分析来说不重要，不必在模型中体现，因为它只会使用户模型过于复杂。可是对有些结构，小的细节（如倒角或孔）可能是最大应力位置之所在，可能非常重要，这取决于用户的分析目的。必须对结构的预期行为有足够的理解，以对模型应包含多少细节做出适当的决定。

有些情况下，仅有一点微不足道的细节破坏了结构的对称，那么，可以忽略这些细节或将它们视为对称的，以利于用更小的对称模型，必须权衡模型简化带来的好处与精度降低的代价，来确定是否对一个非（拟）对称结构故意忽略其非对称细节。

9.8 确定模型的网格密度

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

1) 利用自适应网格划分产生可满足能量误差估计准则的网格（此技术只适用于线性结构静力或稳态热问题，对什么样的误差水平可接受的判断依赖于用户的分析要求）。自适应网格划分需要实体建模。

2) 与先前独立得出的实验分析结果或已知解析解进行对比。对已知和算得结果偏差过大的地方进行网格细化。

对所有的由四面体组成的面或体网格可用下列方法进行局部网格细化。

GUI: NREFINE、EREFINE、KREFINE、LREFINE 和 AREFINE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Modify Mesh | Refine At | entity type

3) 执行一个用户认为是合理的网格划分的初始分析，再在危险区域利用两倍多的网格重新分析并比较两者的结果。如果这两者给出的结果几乎相同，则网格是足够的。如果产生了明显不同的结果，应该继续细化用户网格，直到随后的划分获得了近似相等的结果。

4) 如果细化网格测试显示只有模型的一部分需要更细的网格，可以对模型使用子模型以放大危险区域。网格划分密度很重要，如果网格过于粗糙，那么结果可能包含严重的错误，如果网格过于细致，将花费过多的计算时间，浪费计算机资源，而且模型可能过大，以致于不能在用户的计算机系统上运行，为避免这类问题的出现，在生成模型前应当考虑网格密度问题。





第 10 章 结构线性静力分析

10.1 静力分析概述

静力分析用于计算在固定不变载荷作用下结构的响应，计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定，即假定载荷和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力分析也可以计算那些固定不变的惯性载荷（如重力和离心力）对结构的影响，以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化的载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷）的作用。

静力分析可以是线性的，也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有类型的非线性：大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触单元、超弹性单元等。本章主要讨论线性静力分析。

10.2 静力分析的求解步骤

10.2.1 建模

首先用户应指定作业名和分析标题，然后通过 PREP7 前处理程序定义单元类型、实常数、材料特性以及模型的几何元素。

在进行静力分析时，要注意如下几点。

- 可以采用线性或非线性结构单元。
- 材料特性可以是线性或非线性的、各向同性或正交各向异性的、常数或与温度相关的，并必须按某种形式定义刚度（如弹性模量 EX）。对于惯性载荷（如重力等），必须定义质量计算所需的数据（如密度 DENS）。对于温度载荷，必须定义热膨胀系数 ALPX。
- 对于网格密度，要注意，应力或应变急剧变化的区域通常是用户感兴趣的区域，需要较密的网格。在考虑非线性的影响时，要用足够的网格来得到非线性效应。如塑性分析需要相当的积分点密度，因而高塑性变形梯度区需要较密的网格。

10.2.2 设置求解控制

求解控制对话框中包括定义分析类型、设置一般分析选项、指定载荷步选项等。当进行结构静力分析时，可以通过“求解控制对话框”来设置这些选项。该对话框对于大多数结构静力分析都已设置有合适的默认值，用户只需做很少的设置就可以了。推荐采用该对话框进行设置。

1. 进入求解控制对话框

用户可通过下列路径进入求解控制对话框。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Control

下面简要论述该对话框中各选项卡的选项。

2. Basic选项卡

在求解控制对话框中共有五个选项卡，这些选项卡按从基本到高级的顺序排列。根据这种排列方式，可使求解设置较为平滑。在进入求解控制对话框时，默认激活的是 Basic 选项卡如图 10-1 所示。Basic 选项卡中的设置，提供了分析中所需的最少数据。一旦在 Basic 选项卡中的设置满足以后，就不需要设置其他选项卡中的选项，除非因为要进行高级控制而修改其他默认设置。单击 OK 按钮以后，设置存储到 ANSYS 数据库，并关闭对话框。

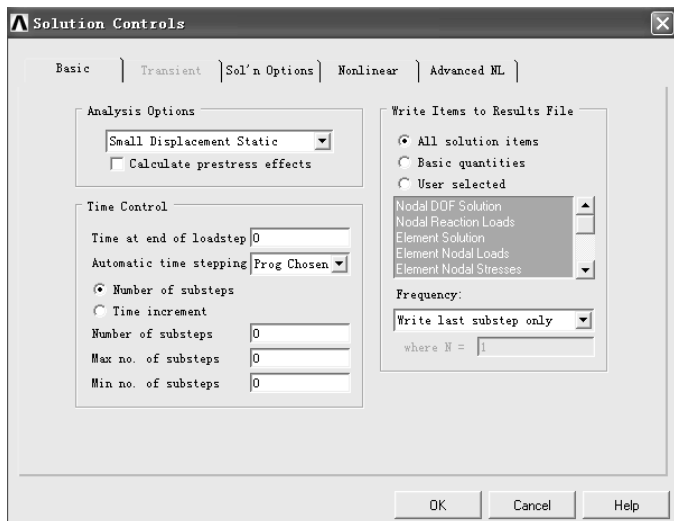


图 10-1 静力学 Basic 选项卡

在静力分析中需要特别注意的选项主要有。

- 在设置 ANTYPE 和 NLGEOM 时，如进行一个新的分析并忽略大变形效应（如大挠度、大转角、大应变）时，请选择“Small Displacement Static”项。如预期有大挠度（如弯曲的长细杆）或大应变（如金属成形问题），则选择“Large Displacement Static”。如想重新启动一个失败的非线性分析，或者用户已进行了完整的静力分析，而想指定其他载荷，则选择“Restart Current Analysis”项。
- 在设置 TIME 时，记住这个载荷步选项指定该载荷步结束的时间，默认值为 1。对于后续的载荷步，默认为 1 加上前一个载荷步指定的时间。虽然在静力分析中，除蠕变、粘塑性或其他的问题相关外，时间没有物理意义，但可以用于追踪时间步和子步。
- 在设置 OUTRES 时，请记住，默认时只有 1 000 个结果集记录到结果文件（Jobname.RST）中，如果超过这一数目（基于用户的 OUTRES 设置），程序将出错停机。可以通过/CONFIG,NRES 命令来增大这一上限值。

3. Sol'n Options选项卡

在静力分析中设置 EQSLV 时，可选择下列求解器之一。



程序选择求解器：ANSYS 将根据问题的领域自动选择一个求解器。

稀疏矩阵求解器：对线性和非线性、静力和完全瞬态分析，为默认项。

PCG 求解器：对于大模型/高波前、巨型结构推荐使用。

AMG 的求解器：其应用与 PCG 求解器相同，但提供并行算法，在用于多处理器环境时，转向更快。

DDS 求解器，通过网络在多处理器系统中提供并行算法。

迭代求解器：自动选择，只适用于线性静力或完全瞬态结构分析，以及稳态温度分析。

波前直接求解器。

静力学 Sol'n Options 选项卡（即求解设置选项卡）如图 10-2 所示。在静力分析中设置 EQSLV 时，选择下列求解器之一。

程序选择求解器：ANSYS 将根据问题的领域自动选择一个求解器。

稀疏矩阵求解器：对线性和非线性、静力和完全瞬态分析，为默认项。

PCG 求解器：对于大模型/高波前、巨型结构推荐使用。

AMG 的求解器：其应用与 PCG 求解器相同，但提供并行算法；在用于多处理器环境时，转向更快。

DDS 求解器：通过网络在多处理器系统中提供并行算法。

迭代求解器：自动选择；只适用于线性静力/完全瞬态结构分析或稳态温度分析。

波前求解器：在求解器处理每个单元时，同时执行整体矩阵的组集和求解。

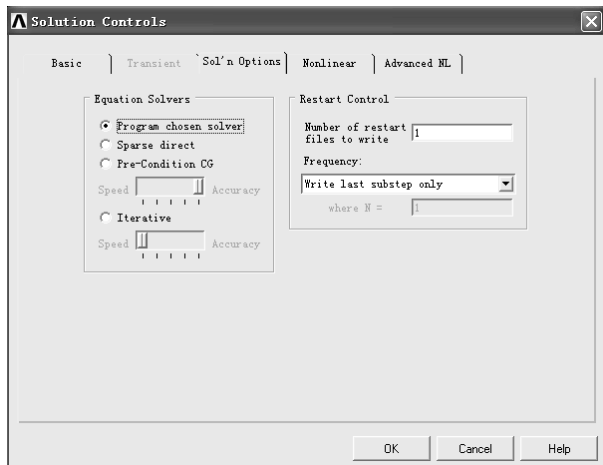


图 10-2 静力学 Sol'n Options 选项卡

10.2.3 设置其他求解选项

本节讨论求解的其他选项的设置。由于很少用到这些选项，并且一般都采用其默认设置，因此这些选项没有出现在求解控制对话框中。

1. 应力刚度效应

一些单元，不论 SSTIF 如何，都包括了应力刚度效应。在默认时，如果 NLGEOM 为 ON 的话，应力刚度效应为 ON。在下面的这些特殊情况下，用户可能会关闭应力刚度效应：

应力刚度仅与非线性分析相关。如果进行线性分析 (NLGEOM, OFF), 则可以关闭应力刚度。在分析之前, 用户知道结构不会因屈曲分叉或跳跃屈曲而破坏。通常, 包括应力刚度效应时, 可以加速非线性分析收敛。请记住上面所述的各点, 用户可能对一些看起来收敛困难的特殊问题, 选择关闭应力刚度效应, 如局部破坏。

命令: SSTIF

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

2. 牛顿-拉普森选项

这一选项只能用于非线性分析中, 它说明在求解时如何修正切线刚度矩阵。用户可以选择下列选项之一: 程序选择 (Program-chosen) (默认); 完全 (Full); 修正 (Modified); 初始刚度 (Modified); 完全并且非对称矩阵 (Full N-R unsymm)。

命令: NROPT

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

3. 预应力效应计算

通过这一选项在同一模型中执行预应力分析, 如预应力模态的分析, 默认值为 OFF。

注意: 应力刚度效应和预应力效应计算都用于控制应力刚度矩阵的生成, 因此在一个分析中不能同时采用。如二者都指定, 则最后选项将覆盖前者。

命令: PSTRESS

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

注意: 应力刚度效应和预应力效应计算都控制应力刚度矩阵的生成, 因此在一个分析中不能同时采用。如二者都指定, 则最后选项将覆盖前者。

命令: PSTRESS

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

4. 质量矩阵公式

通过该选项在结构中施加惯性载荷 (如重力或旋转载荷)。可以指定下列选项之一: 默认 (与单元类型有关); 集中质量近似。

注意: 对于静力分析, 用户所用的质量矩阵并不明显影响求解精度 (假设网格密度足够)。然而, 如果想在同一模型上作预应力动力分析, 选择质量矩阵公式就很重要。

命令: LUMPM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

5. 参考温度

这个载荷步选项适用于温度应变计算, 可用 [MP, REFT] 命令来设置材料相关的参考温度。

命令: TREF

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Reference Temp

6. 模态数

这个载荷步选项用于轴对称简谐单元。

命令: MODE





GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | For Harmonic Ele

7. 蠕变准则

这个非线性载荷步选项为自动时间步指定蠕变准则。

命令: CRPLIM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Creep

Criterion

8. 输出选项

这个载荷步选项用于指定在输出文件 (Jobname.out) 中包括任意结果数据。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | OutputCtrls | Solu

Printout

注意: 应用多个 OUTPR 命令时, 有时可能会有一些冲突。

9. 外插

应用这个载荷步选项, 可以通过把单元积分点结果复制到节点上, 该选项为求解材料非线性默认设置。

命令: ERESX

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | OutputCtrls |

Integration Pt

10.2.4 施加载荷

1. 载荷类型

下面列出的所有载荷类型, 都可应用于静力分析中。

(1) 位移 (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)

这些自由度约束常施加到模型边界上, 用以定义刚性支承点。它们也可以用于指定对称边界条件以及已知运动的点。由标号指定的方向是按照节点坐标系定义的。

(2) 力 (FX, FY, FZ) 和力矩 (MX, MY, MZ)

这些集中力通常在模型的外边界上指定。其方向是按节点坐标系定义的。

(3) 压力 (PRES)

这是表面载荷, 通常作用于模型的外部。为指向单元面的力, 正压力起到压缩的效果。

(4) 温度 (TEMP)

温度用于研究热膨胀或热收缩, 即温度应力。如果要计算热应变的话, 必须定义热膨胀系数。用户可以从热分析[LDREAD]中读入温度, 或者直接指定温度。

(5) 流 (FLUE)

流用于研究膨胀或蠕变的效应。只在输入膨胀或蠕变方程时才能使用。

(6) 重力、旋转等

整个结构的惯性载荷。如果要计算惯性效应, 必须定义密度或某种形式的质量。

2. 在模型上施加载荷

除了与模型无关的惯性载荷以外, 用户可以在模型的几何实体或在有限元模型上定义载

荷。用户还可以通过 TABLE 类型的数组参数，施加边界条件或作为函数的边界条件。表 10-1 给出了静力分析可以使用的载荷。

表 10-1 汇总了静力分析可以使用的载荷

载 荷 类 型	分 类
位移 (UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ)	约束
力、力矩 (FX、FY、FZ、MX、MY、MZ)	力
压力 (PRES)	面载荷
温度 (TEMP)、流 (FLUE)	体载荷
重力、旋转等	惯性载荷

3. 计算惯性解除

用户可以通过静力分析来执行惯性解除计算，即计算与施加载荷反向平衡的加速度。用户可以把惯性解除想象成一个等价自由体分析。要在 SOLVE 命令之前应用这一命令作为惯性载荷命令的一部分。

模型应当满足如下几点要求。

- 模型不应当包括轴对称单元、子结构或非线性问题。不推荐使用混合二维和三维单元的模式。
- 对于梁单元以及分层单元，忽略偏置和楔形效应，也忽略层状单元的不对称分层效应。把楔形变截面单元分解成数个单元将得出更精确的结果。
- 必须提供质量计算所需的数据（如密度）。
- 提供所需的最少位移约束，保证不发生刚体运动即可。对于二维单元需要三个约束，对于三维单元只需要 6 个约束。附加的约束（如对称边界条件）也是允许的，但必须对所有约束检查反作用力是否为 0，以确保在惯性解除分析中不出现过约束。

应当指定对于惯性解除计算合适的载荷。

命令：IRLE,1

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Inertia Relief

(1) 惯性解除的输出

通过 IRLIST 命令来打印惯性解除计算的输出。该输出包括平衡施加载荷所需要的平移和转动加速度，而且可用于其他程序来进行运动学研究。质量和惯性矩列表汇总是精确解（求解时产生），而不是近似解。约束反力将为 0，因为所计算的惯性力与外力平衡。

惯性解除输出存储于数据库，而不是结果文件，在用户执行 IRLIST 命令时，ANSYS 从数据库中提取相关信息，输出数据库中最新保存求解（SOLVE 或 PSOLVE）的惯性解除。

命令：IRLIST

GUI: 无

(2) 部分惯性解除计算

用户还可以通过部分求解方法（PSOLVE）做部分惯性解除计算。

10.2.5 求解

- 1) 把数据库保存为一个文件作为备份。在以后需要时，可重新进入 ANSYS 并用



RESUME 命令恢复模型。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

2) 开始计算。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

3) 如果分析中包括其他载荷条件 (即多个载荷步), 则应重新施加载荷, 指定载荷步选项, 保存并求解每一个载荷步。

10.2.6 检查分析结果

静力分析结果保存于结构分析结果文件 (Jobname.RST) 中, 包括基本解和导出解, 基本解包括节点的位移 (UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ)。导出解包括节点和单元应力、节点和单元应变、单元力以及节点反力。

1. 后处理

可以用一般后处理器 POST1 和时程后处理器 POST26 来进行后处理并查看结果。

- POST1 用于对整个模型在某一子步上的结果进行检查。
- POST26 用于非线性静力分析中跟踪整个载荷作用历程上的特定结果。

2. 注意事项

为了用 POST1 和 POST26 检查结果, 在数据库中必须包括与求解时相同的模型。

3. 检查结果数据

1) 从数据库文件中读入数据的方法如下。

命令: RESUME

GUI: Utility Menu | File | Resume from

2) 读入适当的结果集。用载荷步、子步或时间来区分结果数据库集。如果用户所指定的时间值不存在相应的结果, 则 ANSYS 将根据全部数据通过线性插值得到该时间点上的结果。

命令: SET

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step

4. 典型的后处理操作

1) 显示变形图的方法如下。

命令: PLDISP

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape, PLDISP 命令的 KUND 参数给用户可以在原始图上迭加变形图。

2) 列出反力和反力矩的方法如下。

命令: PRESOL

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu

为了显示反力, 执行/PBC,RFOR,1, 然后显示所需的节点或单元。如要显示反力矩, 则用 RMOM 代替 RFOR。

3) 列出节点力和力矩的方法如下。

命令: PRESOL, F (或 M)

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Element Solution

也可以列出所选择的节点集的所有节点的力和力矩。

4) 列出作用于这些节点上的所有力的方法如下。

命令: FSUM

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Total Force Sum

5) 用户也可以在每个已选择的节点上检查所有力和力矩。对于处于平衡状态的实体，除载荷作用点和存在反力的节点以外的所有节点上，其总载荷为 0。

命令: NFORCE

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Sum @ Each Node

对于处于平衡状态的实体，除载荷作用点或存在反力载荷的节点外，其他所有节点的总载荷为 0。

6) 线单元结果的方法如下。

命令: ETABLE

GUI: Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

可通过该方法来取得导出数据，如应力、应变等。结果数据用一个标号和一个序列号的组合，或用元件名来区别。

10.3 实例：阶梯轴施加扭矩和弯矩

10.3.1 工程背景

在实际工程问题中，力矩无处不在。例如管道的弯曲分析、机床主轴的扭矩分析等。但是 ANSYS 软件美中不足之处就是其扭矩分析没有公式化，没有像加载拉力和压力这样的直接命令来操作，给使用者带来了很大的麻烦，本书使用 MPC184 单元，是在构件中心部位建立一个节点并于其他受力节点生成多根刚性梁，实现传递载荷。这种方法适用多种情况，不仅支持大应变，还支持非线性情况。

10.3.2 问题的描述

1. 模型几何尺寸

本实例模型为阶梯轴，第一段长度为 1m，直径 0.4m；第二段长度为 0.5m，直径 0.6m；第三段长度为 0.8m，直径为 0.5m。

2. 材料数据

本实例使用 SOLID185 单元，阶梯轴材料为 Q215，材料的本构关系为线弹性材料，其中弹性模量为 $2.12 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比为 0.288。

3. 边界条件

阶梯轴的底端约束所有自由度，另一端首先施加 $1 \text{E}3 \text{N} \cdot \text{m}$ 的扭矩，计算完后，删除载荷再施加 $5 \text{E}3 \text{N} \cdot \text{m}$ 。





10.3.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“The Torque and bending moment Analysis in ANSYS”，单击 OK。

2. 定义单元和属性

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Brick 8node 185 单元，单击 Apply；继续在其左边选择 Constraint，在右边选择 MPC184。

(2) 定义单元属性

在单元类型对话框中选择 MPC184。然后单击 Options 选项，在弹出的对话框中选择 Rigid Beam（刚性梁），单击 OK 会弹出一个新对话框，保持默认设置，再单击 OK；返回单元类型界面，然后单击 Close 关闭对话框。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

操作后弹出一个对话框，双击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 EX=2.12E11，PRXY=0.288，单击 OK，关闭对话框。

3. 建立模型

(1) 建立第一段轴

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions。在弹出的对话框中输入 RAD1=0.2，含义为轴外半径为 0.2m；RAD2=0，含义为轴内半径为 0；Z2=1，含义为轴长为 1m；THETA1 和 THETA2 保持默认值，含义为建立完整的轴，数据输入完毕后单击 Apply。

(2) 建立第二段轴

在弹出的对话框中继续输入 RAD1=0.3，RAD2=0，Z1=1，Z2=1.5，HETA1 和 THETA2 保持默认值，单击 Apply。

(3) 建立第三段轴

在弹出的对话框中继续输入 RAD1= 0.25，RAD2=0，Z1=1.5，Z2=2.3，HETA1 和 THETA2 保持默认值，单击 OK。

(4) 布尔操作加运算

使用布尔操作中的加运算，把分离的三段轴合为一根阶梯轴。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Add | Volumes

操作后，在弹出的拾取对话框中单击 Pick All，即可完成模型的建立，阶梯轴的三维实体模型，如图 10-3 所示。

4. 网格划分

(1) 显示线号

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Numbering

在弹出的对话框中，勾选 Line，单击 OK，关闭对话框。

GUI: Utility Menu | Plot | Line

操作后将在屏幕上看到模型中各线的编号。

(2) 打开网格划分工具

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(3) 设置单元尺寸

单击网格划分工具 Lines 中的 Set 按钮会弹出拾取对话框，单击鼠标选取编号 35, 36, 37, 38 的线，选择完毕后单击拾取对话框的 Ok。在弹出的单元尺寸设置对话框的 NDIV 选项中输入 8，含义为刚才选中的每条线将划分为 8 份，单击 OK。

(4) 对阶梯轴进行网格划分

勾选网格划分工具面板上的 Smart Size，并设置为 4；设置 Mesh 为 Volumes；设置 Shape 为 Tet，网格划分类型为 Free，单击 Mesh，单击弹出拾取对话框中的 Pick All，完成网格划分。

5. 创建刚性梁单元

(1) 生成一个节点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS

操作后在弹出的对话框中输入 X=0, Y=0, Z=2.4，单击 OK。

(2) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

操作后在弹出的单元属性对话框的TYPE选项中，选择MPC184。

(3) 创建刚性梁单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

操作后弹出拾取对话框，用鼠标单击选择刚创建的节点和阶梯轴外缘的节点，单击 Apply 则会创建出一个刚性梁，按照此方法继续选择，直到把阶梯轴外缘上的节点都选择完。选择完成后的所有刚性梁单元如图 10-4 所示。

6. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

操作后在弹出的对话框中选中 Static，含义为进行静态问题求解。

7. 设置边界条件

(1) 约束底面的所有自由度

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Areas

操作后弹出拾取对话框，拾取阶梯轴的底面，单击 OK，在弹出的对话框中选择 ALL DOF（即约束底面的所有自由度），单击 OK。

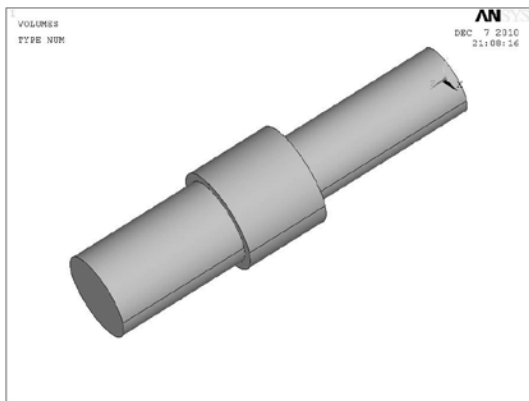


图 10-3 阶梯轴的三维实体模型

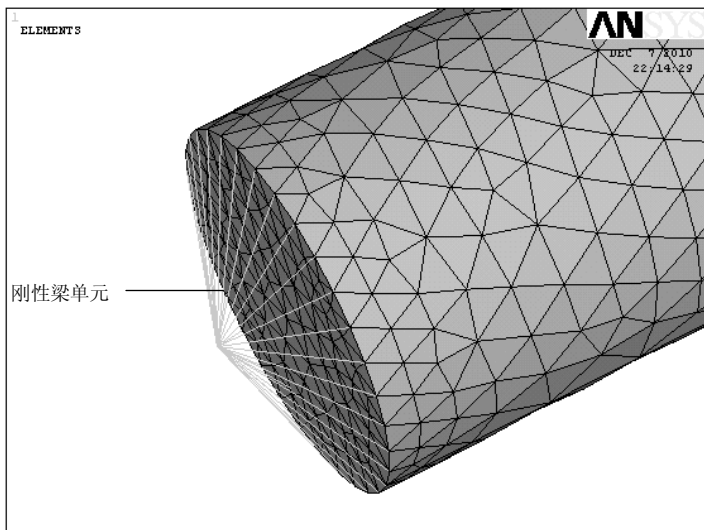


图 10-4 阶梯轴的刚性梁单元

(2) 施加扭矩

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes

操作后弹出拾取对话框, 选择阶梯轴外面的节点, 单击OK, 设置弹出对话框Lab选项为MZ, 即施加载荷为绕Z轴的力矩(扭矩), 在VALUE选项中输入 1000, 即设定扭矩大小为1000N.m, 单击OK。

8. 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

操作后弹出求解对话框, 单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。

9. 后处理

(1) 查看节点总体位移云图

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Nodal Solu

操作后弹出节点求解数据云图对话框, 选择 DOF Solution | Displacement vector sum, 单击 OK, 总体位移云图如图 10-5 所示。

由图可知, 阶梯轴的轴心和底端的总体位移为 0, 这符合实际情况, 说明本方法施加扭矩是可行的。

(2) 查看节点 Mises 等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Nodal Solu

操作后弹出节点求解数据云图对话框, 选择 Stress | von Mises stress, 单击 OK, 总体等效应力云图如图 10-6 所示。由图 10-6 可知, 应力的最大处发生阶梯轴的几何突变处, 因此在实际工程设计处阶梯中都会加工圆角, 就是为了减小应力集中。

说明: 施加弯矩和施加扭矩的方法是一样的, 在施加载荷是把选项改为 MX 或 MY 即可, 在本章的视频操作中有详细的讲解。

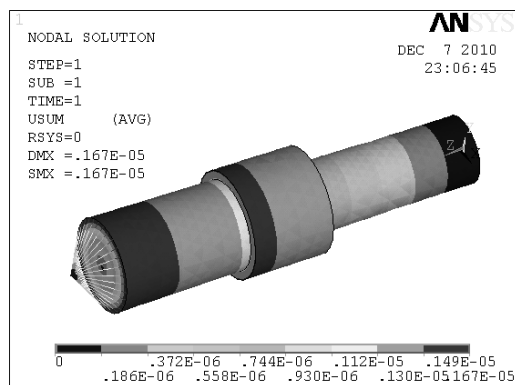


图 10-5 阶梯轴的总位移云图

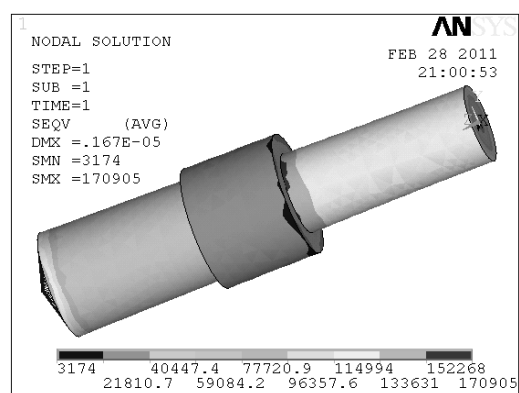


图 10-6 阶梯轴的总等效应力云图



第 11 章 模 态 分 析

11.1 模态分析的定义及应用

模态分析用于确定设计结构或机器部件的振动特性，即结构的固有频率和振型，它们是承受动态载荷结构设计中的重要参数。同时，也可以作为其他动力学分析问题的起点，例如瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析，其中模态分析也是进行谱分析或模态叠加法谐响应分析或瞬态动力学分析所必需的前期分析过程。ANSYS 的模态分析可以对有预应力的结构和循环对称结构进行模态分析。前者有旋转的涡轮叶片等的模态分析，后者则允许在建立一部分循环对称结构的模型来完成对整个结构的模态分析。

11.2 模态分析的方法

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值问题：

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2[M]\{\phi_i\}$$

其中：

$[K]$ 为刚度矩阵； $\{\phi_i\}$ 为第 i 阶模态的振型向量（特征向量）； ω_i 为第 i 阶模态的固有频率（ ω_i^2 特征值）； $[M]$ 为质量矩阵。

11.2.1 分块 Lanczos 法

分块 Lanczos 法特征值求解器是默认求解器，这种方法和子空间法一样精确，但速度更快。无论 EQSLV 命令指定过何种求解器进行求解，分块 Lanczos 法都将自动采用稀疏矩阵方程求解器。计算某系统特征值谱所包含一定范围的固有频率时，采用分块 Lanczos 法提取模态特别有效。

11.2.2 子空间法（Subspace）

子空间法使用子空间迭代技术，它内部使用广义雅可比迭代算法。由于该方法采用完整的 $[K]$ 和 $[M]$ 矩阵，因此精度很高，但是计算速度比缩减法慢。这种方法经常用于对计算精度要求高，但无法选择主自由度（DOF）的情形。

11.2.3 Power Dynamics 法

Power Dynamics 法内部采用子空间迭代计算，但采用 PCG 迭代求解器。这种方法明显地比子空间法和分块 Lanczos 法快。但是，Power Dynamics 法不进行 Sturm 序列检查（即不

检查模态遗漏问题), 这可能影响有多个重复频率问题的解。此法总是采用集中质量近似算法, 即自动采用集中质量矩阵 (LUMPM, ON)。

11.2.4 缩减法 (Reduced/Householder)

缩减法采用 HBI 算法 (Householder-二分-迭代) 来计算特征值和特征向量。由于该方法采用一个较小的自由度子集 (即主自由度) 来计算, 因此计算速度更快。主自由度导致计算过程中会形成精确的 $[K]$ 矩阵和近似的 $[M]$ 矩阵。因此, 计算结果的精度将取决于质量阵 $[M]$ 的近似程度, 近似程度又取决于主自由度的数目和位置。

11.2.5 非对称法 (Unsymmetric)

非对称法也采用完整的 $[K]$ 和 $[M]$ 矩阵, 适用于刚度和质量矩阵为非对称的问题。此法采用 Lanczos 算法, 如果系统是非保守的 (例如轴安装在轴承上), 这种算法将解得复数特征值和特征向量。特征值的实部表示固有频率, 虚部是系统稳定性的量度—负值表示系统是稳定的, 而正值表示系统是不稳定的。该方法不进行 Sturm 序列检查, 因此有可能遗漏一些高频端模态。

11.2.6 阻尼法 (Damp)

阻尼法用于阻尼不能被忽略的问题, 如转子动力学研究。该法使用完整矩阵 ($[K]$ 、 $[M]$ 及阻尼阵 $[C]$)。阻尼法采用 Lanczos 算法并计算得到复数特征值和特征向量 (如下所述)。此法不能用 Sturm 序列检查。因此, 有可能遗漏所提取频率的一些高频端模态。

特征值的虚部 ω 代表系统的稳态角频率。特征值的实部 σ 代表系统的稳定性。如果 σ 小于零, 系统的位移幅度将按 $\exp(\sigma)$ 指数规律递减。如果 σ 大于零, 位移幅度将按指数规律递增。如果不存在阻尼, 特征值的实部将为零。ANSYS 报告的特征值结果实际上是被 2π 除过的。这样给出的频率是以 Hz 为单位的。即: 报告的特征值虚部为 $\omega/2\pi$; 报告的特征值实部为 $\sigma/2\pi$ 。

11.2.7 QR 阻尼法

QR 阻尼法能够很好地求解大阻尼系统模态解, 阻尼可以是任意阻尼类型, 即无论是比例阻尼或非比例阻尼。由于该方法的计算精度取决于提取的模态数目, 所以建议提取足够多的基频模态, 特别是阻尼较大的系统更应当如此, 这样才能保证得到好的计算结果。该方法不建议用于提取临界阻尼或过阻尼系统的模态。该方法输出实部和虚部特征值 (频率), 但仅仅输出实特征向量 (模态振型)。

11.3 矩阵缩减技术和主自由度的选择准则

11.3.1 矩阵缩减

矩阵缩减是通过缩减模型矩阵的大小以实现快速、简便的分析过程的方法。它主要用于动力学分析, 如模态分析、谐响应分析和瞬态动力学分析。矩阵缩减也用于子结构分析中以



生成超单元。

矩阵缩减允许按照静力学分析那样建立一个详细的模型，而仅将“有动力学特征”的部分用于动力学分析。可以通过辨识定义为主自由度的关键自由度来选择模型的“有动力学特征”部分，但必须注意，主自由度应足以描述系统的动力学行为。ANSYS 程序根据主自由度来计算缩减矩阵和缩减自由度解，然后通过执行扩展处理将解扩展到完整的自由度集上。矩阵缩减的主要优点是，计算缩减解可以大大节省 CPU 时间，在大模型的动力学分析时更是如此。ANSYS 程序采用的矩阵缩减基础理论是 Guyan 缩减法计算缩减矩阵。此法的一个关键假设是：对于较低的频率，从自由度上的惯性力和从主自由度传递过来的弹性力相比是可以忽略的。因此，结构的总质量只分配到主自由度上。最终结果是缩减的刚度矩阵，是精确的，而缩减的质量和阻尼矩阵是近似的。

11.3.2 人工选择主自由度的准则

选择主自由度是缩减法分析中很重要的一步。缩减质量矩阵的精度将取决于主自由度的位置和数目。对于给定的问题，可以选择多种不同的主自由度集，在多种情形下都可以得到能够接受的结果。可以用命令 **M** 和 **MGEN** 来选择主自由度，也可用 **TOTAL** 命令让程序在求解过程中选择主自由度。建议两种方式兼用：自己选择少量主自由度，同时让 ANSYS 程序选择一些自由度。这样，程序将弥补那些可能被遗漏的模式。

选择主自由度的基本准则如下。

- 1) 主自由度的总数至少应是感兴趣的模态数的两倍。
- 2) 把预计结构或部件要振动的方向选为主自由度。

例如对于平板问题，应至少在法向上选择几个主自由度（见图 11-1a）。如果在一个方向上的运动会引起另一个方向上的大运动，应在两个方向上都选择主自由度（见图 11-1b）。

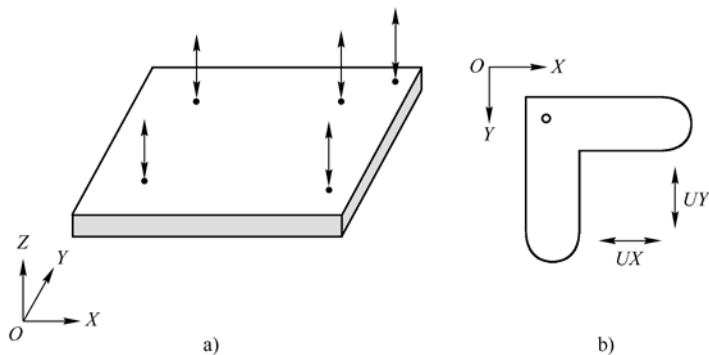


图 11-1

a) 平板可能的法向主自由度 b) X 方向运动引起 Y 方向运动

3) 在相对较大的质量或较大转动惯量但相对较低刚度的位置选择主自由度（见图 11-2），凸肩或“松散”连接的结构是这种位置的实例。相反地，不要选择质量相对较小或有较高刚度（如靠近约束处的自由度）的位置作为主自由度。

- 4) 如果最关注的是弯曲模态，则可以忽略转动和“拉伸”自由度。
- 5) 如果要选的自由度属于一个耦合约束集，则只需选中耦合集中第一个自由度。
- 6) 在施加力或非零位移的位置选择主自由度。

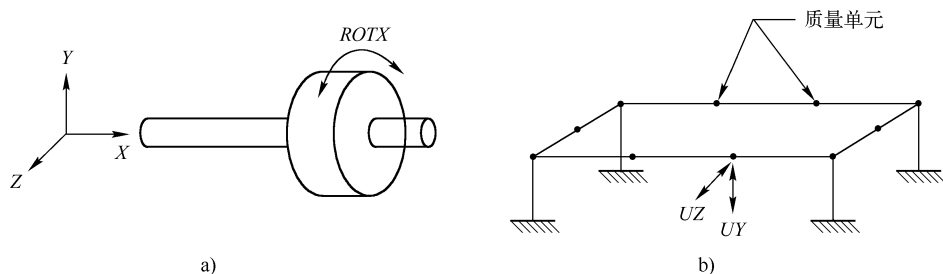


图 11-2 应选择主自由度的位置

a) 大转动惯量 b) 大质量

7) 对于轴对称壳模型, 选择模型中的平行于或接近平行于中心线部分的所有节点的全局 UX 自由度为主自由度, 这样就可以避免主自由度间的振荡运动。如果运动基本上是平行于中心线的, 这条建议可以放宽。对于 $\text{MODE} \geq 2$ 的轴对称周期单元, 应将其 UX、UZ 自由度都选择为主自由度。

11.4 模态分析过程

11.4.1 建模

建模主要完成下列工作: 首先指定工作名和分析标题, 然后在前处理器 (PREP7) 中定义单元类型、单元实常数、材料性质以及几何模型。在建模时要注意如下两点。

- 在模态分析中只有线性行为是有效的。如果指定了非线性单元, 它们将被当做是线性的。例如, 如果分析中包含了接触单元, 则系统取其初始状态的刚度值并且不再改变此刚度值。
- 材料性质可以是线性的, 各向同性的或正交各向异性的, 恒定的或和温度相关的。在模态分析中必须指定杨氏模量 (EX) 或某种形式的刚度和密度 (DENS) 或某种形式的质量。而非线性特性将被忽略。

11.4.2 加载及求解

加载及求解主要完成下列工作: 首先定义分析类型、指定分析设置、定义载荷和边界条件和指定加载过程设置, 然后进行固有频率的有限元求解。在得到初始解后, 再对模态进行扩展, 以供查看。扩展模态将在 11.5 节“扩展模态”中进行详细说明。

1. 进入ANSYS求解器

命令: /SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 指定分析类型和分析选项

指定分析类型的方法如下。

命令: ANTYPE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | New Analysis

设置分析选项的方法如下。



命令: MODOPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

注意: 在单点响应谱分析和动力学设计分析方法中, 模态扩展可以放在谱分析之后按 MXPAND 命令设置的重要性因子 SIGNIF 值有选择地进行。如果准备在谱分析之后进行模态扩展, 请在模态分析选项对话框中的设置模态扩展的选项 (MXPAND) 处选 NO。图 11-3 给出了模态分析设置对话框。

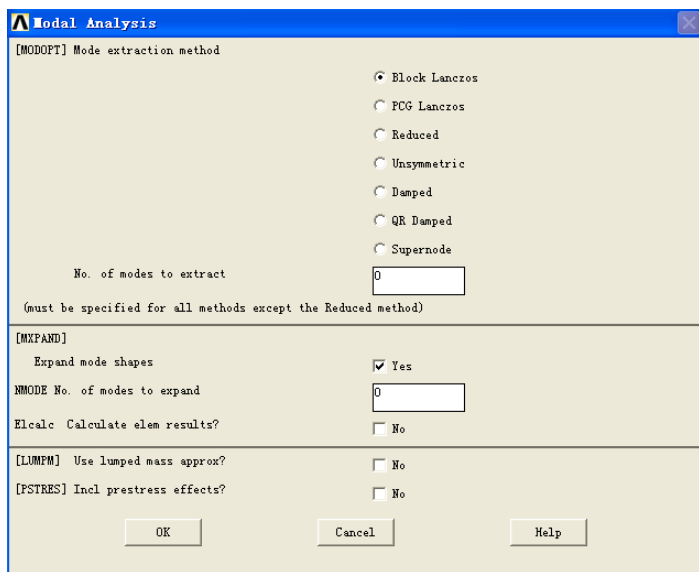


图 11-3 模态分析设置对话框

(1) Modal Extraction Method[MODOPT]选项

该选项用于决定模态提取方法。指定提取模态的方法, 选择 7 种提取方法中的一种。对于大多数应用, 选用分块 Lanczos 法、子空间法、PowerDynamics 法或缩减法。非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法适于特殊应用。一旦选用某种模态提取方法, ANSYS 程序将自动选择对应的求解器。

(2) Number of Modes to Extract [MODOPT]选项

该选项用于决定模态的提取阶数。对于除缩减法以外的其他模态提取方法该选项都是必须设置的。对于非对称法和阻尼法, 应当提取比必要的阶数更多的模态以降低丢失模态的可能性, 但需要花费更长的求解时间。

(3) Number of Modes to Expand[MXPAND]选项

该选项用于决定是否扩展模态。该选项只在采用缩减法、非对称法和阻尼法时要求设置。如果想得到单元求解结果, 则不论采用何种模态提取方法都需要打开“Calculate elem results”项。

(4) Use lumped mass approx? [LUMPM]选项

该选项用于指定质量矩阵计算方式, 默认的质量矩阵和单元类型有关, 也称为一致质量矩阵和集中质量阵。建议在大多数应用中采用默认一致质量矩阵。但对有些包含“薄膜”结

构的问题，如细长梁或非常薄的壳，采用集中质量矩阵近似经常可产生较好的结果。另外，用集中质量阵时求解时间短，需要的内存少。

(5) Incl prestress effects? [PSTRES]选项

该选项用于确定是否考虑预应力对结构振型的影响。默认分析过程不包括预应力效应，即结构是处于无应力状态的。在分析中希望包含预应力的影响，则必须首先进行静力学或瞬态分析，生成单元文件，参见“有预应力模态分析”。如果预应力效果选项是打开的，同时要求当前及随后的求解过程中质量矩阵[LUMPM]的设置应和静力分析中质量矩阵的设置保持一致。

(6) 其他模态分析选项

完成了模态分析选项（Modal Analysis Option）对话框中的选择后，单击 OK，接着弹出一个对应于指定的模态提取方法的选项对话框，如图所示为 Block Lanczos 求解方法对话框。

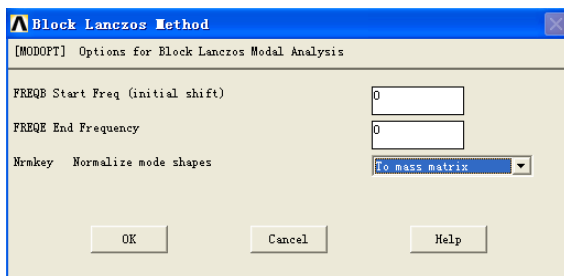


图 11-4 Block Lanczos 求解方法对话框

1) 域：FREQB、FREQE，指定感兴趣的模态频率范围。FREQB 域指定第一频移点（低频）——特征值收敛最快的点。在大多数情况下不需要设置这个域，其默认值为 0。

2) 域：Nrmkey，用于关于振型归一化的设置。有两种选择：相对于质量矩阵[M]和单位化[I]。如果在模态分析后进行谱分析或模态叠加法分析，则应该选择相对于质量阵[M]进行归一化处理。为了在随后得到各阶模态的最大响应，须用模态系数去乘振型。实现的方法是用*GET 命令查到模态系数并在 SET 命令中将模态系数用做比例因子。

3. 定义主自由度

在模态分析中，有时需要指定主自由度，并且只适用于缩减法。主自由度指能描述结构动力学特性的“重要的”自由度。主自由度选取的规则是选择至少是感兴趣的模态阶数的一倍数目主自由度。建议用命令[M, MGEN]根据对结构的动力学特性的了解定义尽可能多的主自由度，并用命令[TOTAL]让程序按照刚度与质量之比选取一些附加的主自由度。用命令[MLIST]可以列出已定义的主自由度，用命令[MDELE]可以删除无关的主自由度。

命令：M

GUI：Main Menu | Solution | Master DOFs | User Selected | Define

4. 在模型上加载载荷

在典型的模态分析中唯一有效的“载荷”是零位移约束。如果在某个自由度处指定了一个非零位移约束，程序将以零位移约束替代在该自由度处的设置。可以施加除位移约束之外的其他载荷，但它们将被忽略。在未加约束的方向上，程序将解算刚体运动零频以及高阶非



零频自由体模态。

5. 指定载荷步选项

模态分析中唯一可用的载荷步选项是阻尼选项，如下表 11-1 所示。

表 11-1 载荷步选项

阻尼动力学选项	命 令
Alpha (质量) 阻尼	ALPHAD
Beta (刚度) 阻尼	BETAD
与材料相关的阻尼比	MP,DAMP
单元阻尼 (同单元实常数或材料数据表施加)	R, TB

阻尼只在有阻尼的模态提取法中使用，在其他模态提取法中阻尼将被忽略。如果模态分析存在阻尼并指定阻尼模态提取方法，那么计算出的特征值将是复数解。

注意：如果在模态分析后将进行单点响应谱分析，则在这样的无阻尼模态分析中可以指定阻尼。虽然阻尼并不影响特征值解，但它将被用于计算每个模态的有效阻尼比，此阻尼比将用于计算谱产生的响应。

6. 参与系数表输出

参与系数表列表显示提取的每个模态的参与系数、模态系数和质量分布百分数。程序通过在总体笛卡儿坐标系三个轴向和转动方向上，均施加单位位移谱激励，来计算出参与系数和模态系数。同时，列表显示缩减质量分布。当使用实特征值模取方法（如子空间法、分块 Lanczos 法或 QR 阻尼法）进行模态分析时，将计算转动参与系数。

注意：用户可以执行*GET 命令获取一个参与系数或模态系数。参与系数或模态系数适用于在最后应用的坐标系（三维分析绕 Z 轴旋转）方向上定义的激励（假定为单位位移谱）。为了获取其他方向上的参与系数或模态系数，在指定方向上（SED）定义激励谱，执行谱分析，然后执行*GET 命令获取一个参与系数或模态系数。

7. 求解

将数据库备份到文件中。这样便可在重新进入 ANSYS 后用 RESUME 命令来恢复以前建立的模型。然后使用如下方法开始求解计算。

命令：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

11.5 扩展模态

从严格意义上讲，“扩展”这个词意味着将缩减解扩展到完整的自由度集上。“缩减解”常用主自由度表达。而在模态分析中，用“扩展”这个词指将振型写入结果文件。也就是说，“扩展模态”不仅适用于缩减模态提取方法得到的缩减振型，而且也适用于其他模态提取方法得到的完整振型。因此，如果想在后处理器中察看振型，必须先将其扩展。

谱分析中同样要求进行模态扩展。在单点响应谱分析和动力学设计分析方法中，模态扩展可以放在谱分析之后按命令 MXPAND 中设置的阈值 SIGNIF 有选择地进行。如要将模态扩展放在谱分析之后进行，请在 Mode analysis options（模态分析选项）（MODOPT）对话框中的 mode expansion（模态扩展）栏（MXPAND）选 NO。模态叠加法不需要扩展模态。

11.5.1 注意要点

- 模态扩展要求振型文件 Jobname.MODE、文件 Jobname.EMAT、Jobname.ESAV 及 Jobname.TRI（如果采用缩减法）必须存在。
- 数据库中必须包含和解算模态时所用模型相同的分析模型。

11.5.2 扩展模态

1. 重新进入ANSYS求解器

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

注意：在扩展处理前必须（用命令 FINISH）明确地离开求解器并重新进入求解器。

2. 激活扩展处理及相关选项

ANSYS 提供如下扩展处理选项。

(1) 指定扩展路径

命令：EXPAS

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | ExpansionPass

(2) 指定模态扩展阶数

命令：MXPAND

GUI: Main Menu | Solution | Load Step
Opts | ExpansionPass | Single Expand | Expand
Modes

操作后弹出图 11-5 扩展模态设置对话框。

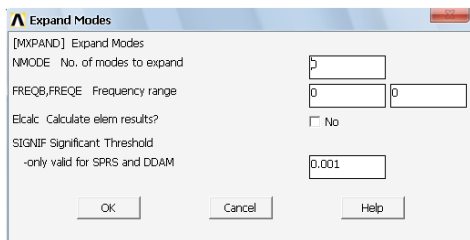


图 11-5 扩展模态设置对话框

1) No. of Modes to Expand [MXPAND, NMODE] 选项用于指定要扩展的模态数。记

住，只有经过扩展的模态可在后处理器中进行观察。默认为不进行模态扩展。

2) Frequency Range[MXPAND,FREQB,FREQE]选项是另一种控制要扩展的模态数的方法。如果指定了一个频率范围，那么只有该频率范围内的模态会被扩展。

3) 如果准备在模态分析后进行谱分析并对产生谱的应力和力感兴趣则打开（ON）Calculate elem results? [MXPAND, Elcalc] 选项。模态分析中的“应力”并不代表结构中的实际应力，而只是给出一个各阶模态之间相对的应力分布的概念。默认为不计算应力。

3. 指定载荷步选项

模态扩展处理中唯一有效的选项是输出控制。

命令：OUTPR

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout



此选项用来控制结果文件 Jobname.RST 中包含的数据。OUTRES 中的 FREQ 域只可为 ALL 或 NONE，即要么输出所有模态要么不输出任何模态的数据。比如，不可能输出每隔一阶的模态信息。

命令: OUTRES

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

4. 开始扩展处理

扩展处理的输出包括已扩展的振型，而且还可以要求包含各阶模态的相对应力分布。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

5. 如须扩展另外的模态（如不同频率范围的模态）请重复步骤 2、3 和 4

每一次扩展处理在结果文件中存储为单独的载荷步。谱分析要求所有的扩展模态保存在一个载荷步中。在单点响应谱分析和动力学设计分析方法中，模态扩展可以放在谱分析之后按命令 MXPAND 中设置的重要性因子 SIGNIF 值进行。如要将模态扩展放在谱分析之后进行，请在 Mode analysis options（模态分析选项）(MODOPT) 对话框中的 mode expansion（模态扩展）栏 (MXPAND) 选 NO。

6. 离开SOLUTION

现在可以在后处理器中观察结果了。

命令: FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单

注意：扩展处理在这里是作为一个单独的阶段。但如果在模态求解阶段即包含了 MXPAND 命令，程序就将不仅解出特征值和特征向量，而且扩展指定的振型。

11.6 观察结果

模态分析的结果（即模态扩展处理的结果）被写入到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。分析结果包括如下几种。

- 固有频率
- 扩展振型
- 相对应力和力分布（如要求输出了）。

可以在 POST1 [/POST1]（即普通后处理器）中观察模态分析的结果。模态分析的一些常用后处理操作将在下面予以描述。

11.6.1 观察结果数据的过程

读入合适子步的结果数据。每阶模态在结果文件中被存为一个单独的子步。比如扩展了 6 阶模态，结果文件中将有由 6 个子步组成的一个载荷步。

命令: SET, SBSTEP

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | substep

11.6.2 选项：列表显示所有频率

列表显示所有频率选项用于列出所有已扩展模态对应的频率。下面是一个该命令输出结果的例子：

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	22.973	1	1	1
2	40.476	1	2	2
3	78.082	1	3	3
4	188.34	1	4	4

命令：SET,LIST

GUI：Main Menu | General Postproc | List Results | Results Summary

11.6.3 选项：图形显示变形

命令：PLDISP

GUI：Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape

用 PLDISP 命令的 KUND 域可设置将未变形形状叠加在显示结果中。

11.6.4 选项：列表显示主自由度

命令：MLIST,ALL

GUI：Main Menu | Solution | Master DOFs | List ALL

注意：如要用图形方式显示主自由度，请选择绘制出模型中的节点（GUI：Utility Menu Plot Nodes 或命令 NLIST）。

11.6.5 选项：线单元结果

命令：ETABLE

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

对线单元（如梁、桁条和管子），可以用 ETABLE 命令获得导出数据（应力、应变等）。结果数据通过一个标识字和一个 ETABLE 命令中的顺序号或部件名组合起来加以区分。

11.7 有预应力的模态分析

有预应力的模态分析用于计算有预应力结构的固有频率和模态，如旋转的涡轮叶片的模态分析。除了首先要通过进行静力分析把预应力加到结构上外，有预应力模态分析的过程和常规模态分析基本上一致。

1) 建模并获取打开预应力效应（PSTRES,ON）的静力分析解。静力分析中的集中质量矩阵的设置（LUMPM）必须与随后的有预应力模态分析中的集中质量矩阵设置一致。“静力学分析”中描述了如何进行静力学分析。

2) 重新进入求解器并获取模态分析解，注意打开预应力效应选项（再用一次命令



PRSTES,ON)。另外，在静力学分析中生成的文件 Jobname.EMAT 和 Jobname.ESAV 必须都存在。

3) 扩展模态并在后处理器中观察它们。

步骤 1) 也可以是一个瞬态分析，但应当记住在需要的时间点保存.EMAT 和.ESAV 文件。

11.8 大变形预应力的模态分析

可以在大变形静力学分析后进行预应力模态分析，以便计算高度变形结构的固有频率和振型。除用 PSOLVE 命令而不是 SOLVE 命令执行模态分析求解外，其他过程与有预应力模态分析过程一致。另外，必须用 UPCOORD 命令修正坐标以得到正确的应力，使用 EMATWRITE 命令指定写出 File.EMAT 文件。

注意：该过程需要单元材料和上一次静力分析得到的单元载荷矢量，如压力、温度和加速度载荷等。如果（利用命令 LVSCALE）指定，这些载荷将传递给后续的模式叠加分析。

11.9 实例：印刷机滚筒的模态分析

11.9.1 工程背景

滚筒是印刷机的核心部件，其运动是旋转运动，印刷机高速运转时，其运转平稳性在很大程度上影响着印刷品质量，印刷时产生的重影、墨杠、网点扩大、墨色不均等故障都与滚筒的动态性能有关。造成印刷滚筒不平衡的原因很多，如滚筒质量分布不均、滚筒在长度方向上发生挠曲变形、压印力沿滚筒轴向分布不均匀，滚筒两端压印力大，中间部位压印力小等所产生的振动等，因此对滚筒进行动态特性分析对提高印刷品质量有着重要的意义。本实例以某四开胶印机压印滚筒为研究对象，建立有限元分析模型，运用有限元分析软件 ANSYS 对其进行模态分析，研究其振动特性。

11.9.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

图 11-6 给出了印刷机滚筒的结构简图，由图可知印刷机滚筒主要由滚筒和中心轴组成。表 11-2 给出了各部件的几何尺寸。

表 11-2 几何尺寸

结构参数	滚筒直径	中心轴直径	小孔直径	连接轴直径	侧面壁厚
代号	D_1	D_2	D_3	D_4	B_1
数值	0.4m	0.12m	0.07m	0.08m	0.012m
结构参数	滚筒壁厚	滚筒长度	中心轴外段	连接轴长度	小孔距离中心
代号	B_2	L	L_1	L_2	L_3
数值	0.015	2.4m	0.1m	0.08m	0.1m

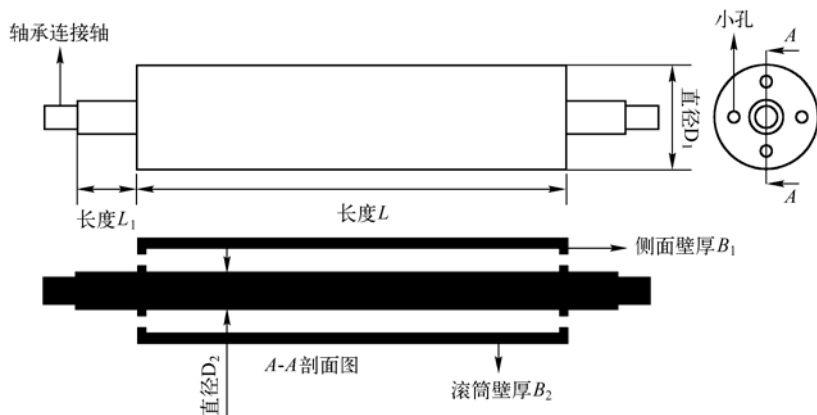


图 11-6 印刷机滚筒的结构简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用三维八节点SOLID185单元来模拟整个印刷机滚筒。滚筒的材料为45号钢，弹性模量为 $2.1\text{E}11\text{Pa}$ ，泊松比为0.3，密度为 $7\,850\text{kg/m}^3$ 。

3. 边界条件

压印滚筒所受外力包括重力、齿轮扭矩、印刷压力等。其中齿轮扭矩对滚筒挠曲变形产生的影响很小，可忽略不计，只考虑滚筒自身重力的作用。压印滚筒通过滑动轴承安装在墙板孔中，因此可以将滚筒看成两端约束的简支梁进行完全约束。

11.9.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“Printing Machine Cylinder”，单击OK。

2. 定义单元和属性

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击Add，在弹出对话框的左边选择Solid，然后在右边选择Brick 8node 45单元，单击OK。

(2) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

操作后弹出一个对话框，单击Structural | Linear | Elastic | Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入EX=2.1E11，PRXY=0.288，单击OK，关闭对话框。单击Density，输入DENS=7850。

3. 建立模型

(1) 定义参数

在命令输入窗口中输入D1=0.4; D2=0.12; D3=0.07; D4=0.08; B1=0.012; B2= 0.015; L=2.4; L1=0.1; L2=0.08; L3=0.1。

(2) 建立滚筒



1) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions
操作后在弹出的对话框中输入 $RAD1= D1/2$, $RAD2=0$, $Z2= L$, 其他选项保持默认值, 单击 Apply。

2) 在对话框中继续输入 $RAD1= D1/2-B2$, $RAD2=0$, $Z1= B1$, $Z2=L-B1$ 其他选项保持默认值, 单击 OK。

3) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes
操作后弹出拾取对话框, 用鼠标拾取大圆柱体, 单击 Apply, 然后拾取小圆柱体, 单击 OK。

(3) 建立中心轴

1) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions
操作后在弹出的对话框中输入 $RAD1= D1/2$, $RAD2=0$, $Z1= -L1$, $Z2=L+L1$, 其他选项保持默认值, 单击 OK。

2) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes
操作后弹出拾取对话框, 用鼠标拾取体 3, 单击 Apply, 然后拾取体 1, 单击 OK。

3) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions
操作后在弹出的对话框中输入 $RAD1= D1/2$, $RAD2=0$, $Z1= -L1$, $Z2=L+L1$, 其他选项保持默认值, 单击 OK。

(4) 建立轴承连接端

1) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions
操作后在弹出的对话框中输入 $RAD1= D4/2$, $RAD2=0$, $Z1=L1+L$, $Z2= L1+L+L2$, 其他选项保持默认值, 单击 Apply。

2) 在对话框中继续输入 $RAD1= D4/2$, $RAD2=0$, $Z1= -L1$, $Z2=-L1-L2$, 其他选项保持默认值, 单击 OK。

(5) 使用布尔的粘结操作把所有体粘结成一个整体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Volumes
操作后弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

(6) 建立滚筒上的共八个圆孔, 每端四个。

使用 By Dimensions 方法建立圆柱体, 它的圆柱体中心与工作平面的中心是一致的, 因此可通过移动工作平面来实现在任意位置建立圆柱体。

1) 移动工作平面。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

在弹出的对话框中的 Snaps X, Y, Z Offsets 选项中输入 0, L3, 0, 含义为把工作平面中心沿工作平面的 Y 轴移动 L3 的距离。

2) GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions
在弹出的对话框中输入 $RAD1= D3/2$, $RAD2=0$, $Z1=-L1$, $Z2= L+L1$, 其他选项保持默认值, 单击 OK。

3) 使用复制功能, 建立剩余三个轴。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取刚建立的小圆柱体编号为 1, 单击 OK。弹出复制体对话框, 输

入 $DY=-2*L3$ ，单击 Apply；弹出拾取对话框，继续拾取体 1，单击 OK，弹出复制体对话框，输入 $DX=L3$ ， $DY=-L3$ ，单击 Apply；弹出拾取对话框，继续拾取体 1，单击 OK，弹出复制体对话框，输入 $DX=-L3$ ， $DY=-L3$ ，单击 OK。

4) 使用布尔操作的减运算，把这四个小圆柱体从滚筒中减去，即可建立完成整个印刷机滚筒模型。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes

弹出拾取对话框，拾取滚筒，单击 Apply，拾取四个小圆柱体，单击 OK。完整的印刷机滚筒的实体模型如图 11-7 所示。

4. 网格划分

(1) 打开网格划分工具

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool。

(2) 采用智能网格划分方法，设置划分级别

勾选网格划分工具面板上的 Smart Size，并设置为 5。其他保持默认设置。单击 Mesh，弹出拾取对话框，单击 Pick All。图 11-8 给出了印刷机滚筒的有限元模型。

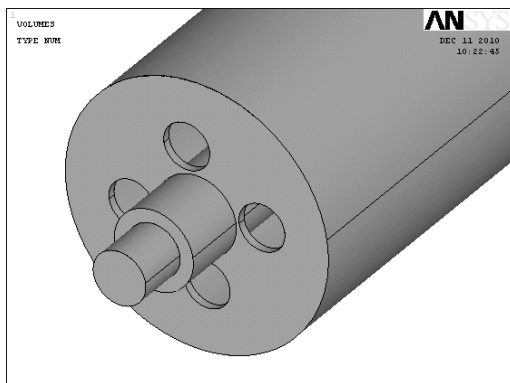


图 11-7 印刷机滚筒的实体模型

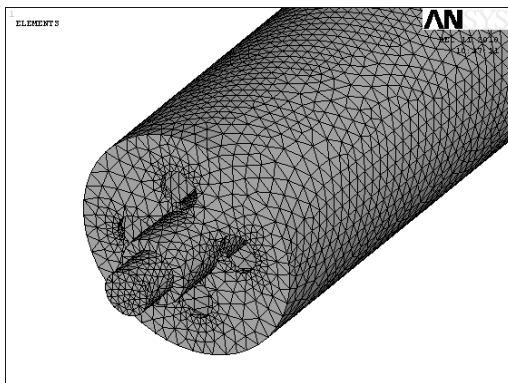


图 11-8 印刷机滚筒的有限元模型

5. 进行静力求解

(1) 设置分析类型

1) 设置求解类型为静态求解。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static，含义为进行静态问题求解。

2) 设置预应力力选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出求解分析选项对话框，拖动滚动条，找到 PSTRES，设置为 Prestress ON。

(2) 定义边界条件

1) 约束轴承连接段表面的 UX，UY 和 UZ 自由度。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Areas

弹出拾取对话框，两个轴承连接段的上下表面单击 Apply，弹出自由度选择对话框，选择 UX，单击 Apply；重复以上操作方法继续约束 UX，UY 和 UZ。



2) 施加重力载荷, 通过施加自由度来考虑其自身重力载荷。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Gravity | Global
在弹出的对话框中输入ACELY=9.8。

(3) 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。

6. 进行模态求解

(1) 设置求解条件

1) 设置求解类型为模态分析。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Modal。

2) 设置 模态分析 选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出模态分析 (Model Analysis) 对话框, 设置模态提取方法为Block Lanczos; 在No.of modes to extract选项中设置模态提取阶数为 5, 在NMODE No.of modes to expand选项中设置模态提取阶数为 5; 勾选PSTRES选项, 设置为预应力模态, 单击OK, 保持弹出Block Lanczos方法对话框的默认设置, 单击OK。

(2) 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS, 弹出求解对话框, 单击 OK, 然后单击 Yes。

7. 后处理

(1) 查看提取的固有频率

GUI: Main Menu | General Postproc | Results Summary

可以观察到提取固有频率的大小。

(2) 观察第 3 阶固有频率的振型。

1) 读取对应的频率, 从观察第 3 阶频率为例。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

弹出频率选择对话框, 选择序列号为 3 的频率, 单击 Read, 然后单击 Close。

2) 观察位移振型。

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Nodal Solu

弹出节点求解数据云图对话框, 选择 DOF Solution | Displacement vector sum, 单击 OK, 3 阶频率对应的位移振型云图如图 11-9 所示。

(3) 观察第 4 阶固有频率的振型

1) 读取对应的频率, 现在以观察第 4 阶频率为例。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

弹出频率选择对话框, 选择序列号为 4 的频率, 单击 Read, 然后单击 “Close”。

2) 观察位移振型。

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Nodal Solu

弹出节点求解数据云图对话框, 选择 DOF Solution | Displacement vector sum, 单击 OK, 4 阶频率对应的位移振型云图如图 11-10 所示。

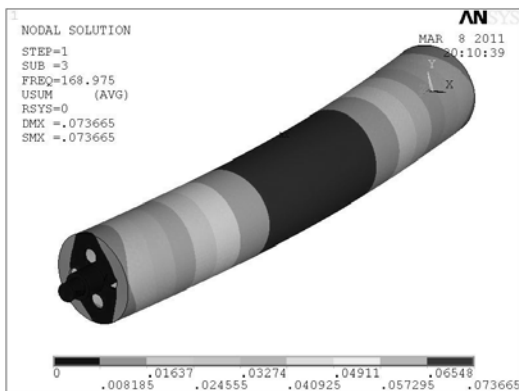


图 11-9 印刷机滚筒第 3 阶模态振型

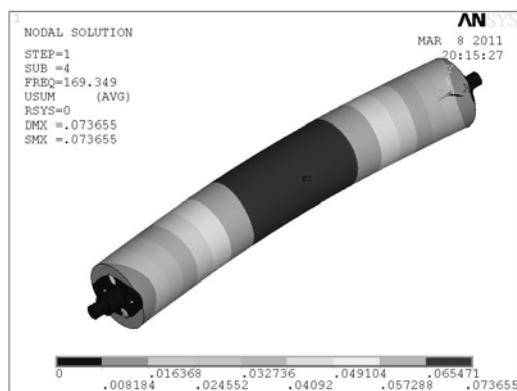


图 11-10 印刷机滚筒第 4 阶模态振型



第 12 章 谐响应分析

12.1 谐响应分析的定义与应用

任何持续的周期载荷将在结构系统中产生持续的周期响应。谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时的稳态响应的一种技术。分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值，响应值通常是位移对频率的曲线。从这些曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。该技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激励开始时的瞬态振动。谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而使设计人员能够验证其设计能否成功地克服共振、疲劳，以及其他受迫振动引起的有害效果。ANSYS 提供了三种求解谐响应问题的方法，下面将为读者一一介绍。

12.2 三种求解方法

12.2.1 完全法

完全法是三种方法中最易使用的方法。它采用完整的系统矩阵计算谐响应。矩阵可以是对称的或非对称的。

1. 完全法的优点

- 1) 容易使用，因为不必关心如何选取主自由度或振型。
- 2) 使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似。
- 3) 允许有非对称矩阵，这种矩阵在声学或轴承问题中很典型。
- 4) 用单一处理过程计算出所有的位移和应力。
- 5) 允许定义各种类型的载荷：节点力、外加的位移、单元载荷。
- 6) 允许在实体模型上定义载荷。

2. 完全法的缺点

- 1) 预应力选项不可用。
- 2) 当采用 Frontal 方程求解器时这种方法通常比其他方法都开销大。但在采用 JCG 求解器或 ICCG 求解器时，完全法的效率很高。

12.2.2 缩减法

缩减法通过采用主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处的位移被计算出来后，解可以被扩展到初始的完整 DOF 集上

1. 缩减法的优点

- 1) 在采用 Frontal 方程求解器时比完全法更快且开销较小。
- 2) 可以考虑预应力效果。

2. 缩减法的缺点

- 1) 初始解只可计算出主自由度处的位移。要得到完整的位移、应力和力的解则需执行扩展过程。
- 2) 不能施加单元载荷，如压力、温度等。
- 3) 所有载荷必须施加在用户定义的主自由度上。

12.2.3 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（即特征向量乘上因子）并求和来计算出结构的响应。

1. 优点

- 1) 对于许多问题，此法比 Reduced 或完全法更快且开销较小。
- 2) 模态分析中施加的载荷可以通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析中。
- 3) 可以使解按结构的固有频率聚集，便可得到更平滑、更精确的响应曲线图。
- 4) 可以包含预应力效果。
- 5) 允许考虑振型阻尼，阻尼系数为频率的函数。

2. 缺点

- 1) 不能施加非零位移。
- 2) 在模态分析中使用 Power Dynamics 法时，初始条件中不能有预加的载荷。

12.2.4 三种方法均存在的局限性

谐响应分析的三种方法均存在如下几点的局限性。

- 所有载荷必须随时间按正弦规律变化。
- 所有载荷必须有相同的频率。
- 不允许有非线性特性。
- 不计算瞬态效应。

可以通过进行瞬态动力学分析来克服这些限制，这时应将简谐载荷表示为有时间历程的载荷函数。

12.3 完全法谐响应分析

12.3.1 建模

建模阶段需要指定文件名和标题，然后进入前处理器 PREP7 定义单元类型、单元实常数、材料特性以及几何模型。该过程与其他分析基本相同，但必须注意如下两个要点。

- 在谐响应分析中，只有线性行为是有效的。如果有非线性单元，它们将按线性单元处理。例如，如果分析中包含接触单元，则它们的刚度取初始状态值并在计算过程



中不再发生变化。

- 必须指定杨氏模量 EX 或某种形式的刚度和密度 DENS 或某种形式的质量。材料特性可以是线性的、各向同性的或各向异性的、恒温的或和温度相关的。非线性材料特将被忽略。

12.3.2 加载并求解

该过程将指定分析类型及其相关选项、定义模型载荷以及指定载荷步选项，然后开始有限元求解，下面详细介绍每个步骤。

注意：峰值响应发生在力的频率和结构的固有频率相等时。在得到谐响应分析解之前，应该首先进行模态分析以确定结构的固有频率。

1. 进入ANSYS求解器

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 定义分析类型和分析选项

(1) 开始新分析

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在谐响应分析中，Restart 不可用；如果需要施加其他简谐载荷，可以另进行一次新分析。

(2) 设置分析类型为谐响应分析

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis | Harmonic

(3) 求解方法

命令：HROPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

共有三种求解方法可供选择：完全法；缩减法；模态叠加法。

(4) 求解输出格式

命令：HROUT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

此选项用于确定在输出文件 Jobname.Out 中谐响应分析的位移解如何列出。可选的方式有“real and imaginary (实部与虚部)”（默认）形式和“amplitudes and phase angles (幅值与相位角)”形式。

(5) 质量矩阵形式

命令：LUMPM

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

此选项用于指定是采用默认的分布质量矩阵（取决于单元类型）还是集中质量矩阵。建议在大多数应用中采用默认的分布质量矩阵。但对于某些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁或非常薄的壳，集中质量近似矩阵经常能产生较好的结果。另外，集中质量近似矩阵可以

减少运行时间并降低内存要求。

在设置完 Harmonic Analysis Option 对话框的 Mass Matrix Formulation 项后，单击 OK 则弹出一个名为 Harmonic Analysis 的对话框，用于选择方程求解器

(6) 设置方程求解器

命令：EQSLV

GUI：Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

可选的求解器有：Frontal 求解器（默认）、Jacobi Conjugate Gradient (JCG) 求解器及 Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (ICCG) 求解器。建议对大多数结构模型用 Frontal 求解器。

3. 在模型上施加载荷

(1) 谐响应分析的载荷描述方式

根据定义，谐响应分析假定所施加的所有载荷随时间按简谐（正弦）规律变化。指定一个完整的简谐载荷需要输入三条信息：幅值（Amplitude）、相位角（phase angle）和强制频率范围（forcing frequency range）（见图 12-1）。

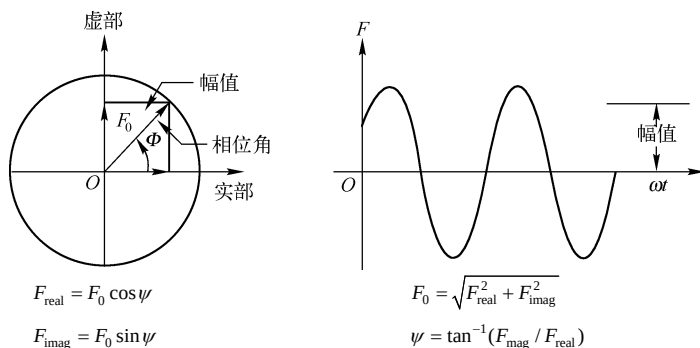


图 12-1 实部/虚部分量和幅值/相位角间的关系

幅值（Amplitude）指载荷的最大值，可用表 12-1 中所示的命令指定。相位角（Phase angle）指载荷滞后（或领先）于参考时间的量度。在复平面上（见图 12-1）、相位角以实轴为起始的角度。当同时要定义多个相互间存在相位差的简谐载荷时，必须分别指定相位角。相位角不能直接指定，而应该用加载命令的 VALUE 和 VALUE2 域来指定有相位角载荷的实部和虚部。压力、分布载荷和体载荷只能指定 0° 相位角（即不能定义载荷的虚部）。图 12-1 显示了计算实部和虚部的公式。强制频率范围（Forcing frequency range）指简谐载荷（以周/单位时间为单位）的频率范围。在后面讲解载荷步选项命令 HARFRQ 时将提到它。

注意：谐响应分析不能计算频率不同的多个强制载荷同时作用时的响应。这种情形的实例是两个具有不同转速的机器同时运转时的情形。但在 POST1 中可以对两种载荷状况进行叠加，以得到总体响应。

(2) 载荷类型

表 12-1 概括了谐响应分析中可施加的载荷。除惯性载荷外，可以在实体模型或有限元模型上定义载荷。在分析过程中，可以施加、删除载荷或对载荷进行操作及列表。



(3) 利用 GUI 施加载荷

所有的载荷操作都可通过一系列等效的下拉菜单实现。从求解器菜单中可选择菜单载荷操作（施加、删除等），然后选择载荷类型（位移、力等），然后再选择施加载荷的对象。例如，要在一条线上施加位移载荷，可用如下 GUI 操作。

GUI: Main Menu | Solution | Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

表 12-1 谐响应分析中可施加的载荷

载 荷 形 式	类 型	命 令	GUI 路 径
位移 (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)	约束 (Constraints)	D	Main Menu Solution Define Loads Apply Structural Displacement
力, 力矩 (FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)	力 (Forces)	F	Main Menu Solution Define Loads Apply Structural Force/Moment
压力(PRES)	表面载荷 (Surface Loads)	SF	Main Menu Solution Define Loads Apply Structural Pressure
温度(TEMP), 流体(FLUE)	体载荷 (Body Loads)	BF	Main Menu Solution Define Loads Apply Structural Temperature
重力, 转动等	惯性载荷 (Inertia Loads)	-	Main Menu Solution Define Loads Apply Structural Other

4. 指定载荷步选项

(1) 普通选项

命令: HARFRQ

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Freq and Substps

操作后弹出如下图 12-2 谐响应频率和载荷步对话框。

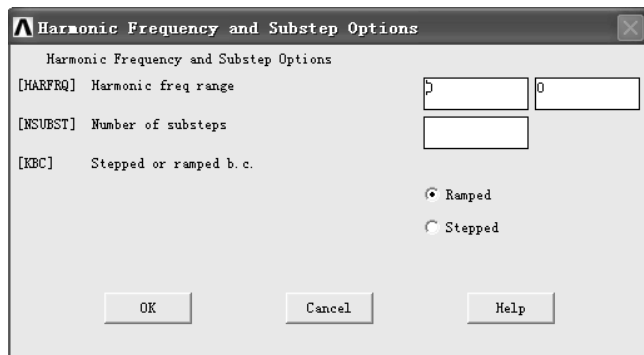


图 12-2 谐响应频率和载荷步对话框

1) Harmonic freq range[HA], 谐响应频率范围

在谐响应分析中必须指定强制频率范围（以周/单位时间为单位）。然后要指定在此频率范围内要计算出的解的数目

2) Number of substeps[NSUBST], 在指定频率范围内的子步

可用此选项请求计算任何数目的谐响应解。解（或子步）将均布在指定的频率范围内 [HARFRQ]。例如，如果在 30Hz~40Hz 范围内要求出 10 个解，程序将计算出在频率为 31Hz, 32Hz, 33Hz, ..., 39Hz 和 40Hz 处的响应，而不计算频率范围低端处（30Hz）的响应。

3) Stepped or Ramped b.c [KBC]

载荷可以是 Stepped 或 Ramped 方式变化的。默认时方式为 Ramped。即载荷的幅值随各子步逐渐增长。而如果用命令[KBC,1]设置了 Stepped 载荷,则在频率范围内的所有子步中载荷将保持恒定的幅值。

(2) 动力学选项

命令: ALPHAD,BETAD,DMPRAT

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Damping

操作后弹出阻尼设置对话框,如图 12-3 所示。

必须指定某种形式的阻尼,否则在共振频率处的响应将无限大。ALPHAD 和 BETAD 指定的是和频率相关的阻尼系数,而 DMPRAT 指定的是对所有频率为恒定值的阻尼比。

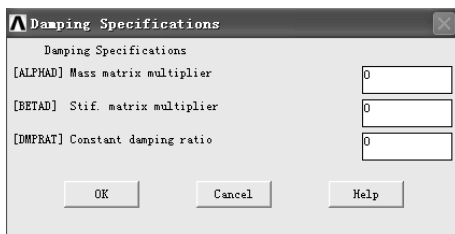


图 12-3 阻尼设置对话框

注意: 在直接积分谐响应分析(用完全法或缩减法)中如果没有指定阻尼,程序将默认采用零阻尼。

5. 将数据库保存到一个命名的备份文件中

将数据库保存到一个命名的备份文件中,这样在重新进入 ANSYS 程序后用 RESUME 命令便可恢复以前所建立的模型。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

6. 开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve Current Ls

7. 重复执行加载求解得到其他载荷步

重复以上过程,计算其他载荷和频率范围(即另外的载荷步)的结果。如果希望进行时间历程后处理(在 POST26 中),载荷步之间的频率范围不能存在重叠。处理多步载荷还有一种方法:将载荷步保存到文件中,然后用一个宏进行一次性求解。

12.3.3 观察结果

谐响应分析的结果被保存到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。文件中包含下述数据,所有数据在解所对应的强制频率处按简谐规律变化。

1. 基本数据

节点位移 (UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ)

2. 派生数据

派生数据包括:节点和单元应力、节点和单元应变、单元力、节点反作用力。

如果在结构中定义了阻尼,结构响应与激励载荷之间不同步,所有结果将以复数形式(即实部和虚部)进行存储。如果施加的载荷之间不同步(存在初始相差),同样也会产生复数结果。



3. 后处理器

可以用 POST26 或 POST1 观察结果。后处理的一般顺序是，首先用 POST26 找到临界强制频率模型中所关注的点中产生最大位移（或应力）时的频率，然后用 POST1 在这些临界强制频率处处理整个模型，具体的操作可参见第 8 章。

- 1) POST1 用于观察整个模型在指定频率点的结果。
- 2) POST26 用于观察模型中指定点在整个频率范围内的结果。

4. 注意要点

- 1) 数据库中必须包含和求解所用模型相同的模型。
- 2) 结果文件 Jobname.RST 必须存在。

12.4 缩减法谐响应分析

Reduced（缩减）法正如其名所示，是用缩减矩阵来计算出谐响应解。缩减法谐响应分析过程由五个主要步骤组成：① 建模；② 加载并求得缩减解；③ 观察缩减解结果；④ 扩展解（扩展过程）；⑤ 观察已扩展的解结果。

在这些步骤中，第 1 步的工作与完全法的相同，下面解释其他步骤的细节。

12.4.1 加载并求得缩减解

缩减解是指在主 DOF 处计算出的自由度解。得到缩减解需做的工作如下。

1. 进入ANSYS求解器

命令：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

2. 指定分析类型和分析选项

除下面的差异外，用于缩减解的选项和完全法求解的选项基本相同。

- 1) 选择 Reduced 求解方法。
- 2) 可以包括预应力效应[PSTRES]。这要求在先前的静力学（或瞬态）分析中同样包含预应力效应，并得到相应的单元文件。详情参见“有预应力谐响应分析”。

3. 定义主自由度

主自由度是表征结构动力学特性的基本自由度或动力学自由度。在缩减法谐响应动力学分析中，要求在施加了力或非零位移的位置处也要设置主自由度。在“模态分析”的“矩阵缩减技术”部分已经指出了选择主自由度应遵循的准则。

4. 在模型上加载

要加载的简谐载荷和在完全法中所述的一样，但有以下几个限制。

- 1) 只可加位移和力。不可施加单元载荷（如压力、温度和加速度）。
- 2) 力和非零位移只能施加在主自由度上。

5. 指定载荷步选项

除 OUTRES 和 ERESX 命令不可用外，其余选项和完全法中描述的相同。OUTPR 命令用于控制主自由度处节点解的输出情况[OUTPR,NSOL,ALL（或 NONE）]。

6. 保存数据库的备份

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

7. 开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

8. 如有其他载荷和频率范围, 重复第 4 步到第 7 步

如果希望进行时间历程后处理 (在 POST26 中), 则一个载荷步和另一个载荷步的频率范围之间不能有重叠。还有一种处理多步载荷的方法, 它允许将载荷步保存到文件中然后用一个宏进行一次性求解。

12.4.2 观察缩减法求解的结果

缩减法谐响应分析求解结果保存在缩减法响应位移文件 Jobname.RFRQ 中。解是由主自由度处的位移组成的, 位移解在各求解中按所用强制频率规律变化。与完全法一样, 如果指定了阻尼或施加了异步 (存在相差) 载荷, 位移将为复数形式。可以在 POST26 中把主自由度上的位移定义为频率的函数并进行观察。(现在还不能用 POST1, 因为完整自由度上的解至此还未得到。)

使用 POST26 的步骤与完全法描述的基本一样, 但存在以下差别:

- 在定义 POST26 变量前, 用 FILE 命令指定从 Jobname.RFRQ 中读取结果数据。比如, 若分析项目名为 HARMONIC, FILE 命令将为:

FILE, HARMONIC, RFRQ

默认时 POST26 寻找的结果文件不是缩减法求解过程保存的结果文件。

- 可处理的只有节点自由度数据 (在主自由度上), 因此只能用 NSOL 命令定义变量。

12.4.3 扩展解

扩展解是根据缩减解计算出在所有自由度上的位移、应力和力的解。这些计算只能按指定的频率和相位角进行。因此, 在开始扩展过程前, 应当先观察缩减解的结果 (用 POST26) 并找到临界频率和相位角。

扩展过程并不是必须的。例如, 如果主要关心的是结构上给定点的位移, 那么缩减解就可以满足要求。而如果想确定非主自由度处的位移或者对应力解感兴趣, 那么就必须进行扩展。应注意以下两点:

- 缩减法求解过程中产生的.RFRQ, TRI, EMAT 和 ESAV 文件都必须存在。
- 数据库中应包含和缩减法求解过程所用模型一致的模型。

1. 重新进入ANSYS求解器

命令: /SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 激活扩展过程及其选项

(1) 激活扩展

命令: EXPASS





GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | ExpansionPass

在弹出的对话框中选择。

(2) 指定扩展的解的数目

命令: NUMEXP, HREXP

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | ExpansionPass | Singe Expand | Range of Solu's

弹出如图 12-4 所示的设置扩展求解对话框。

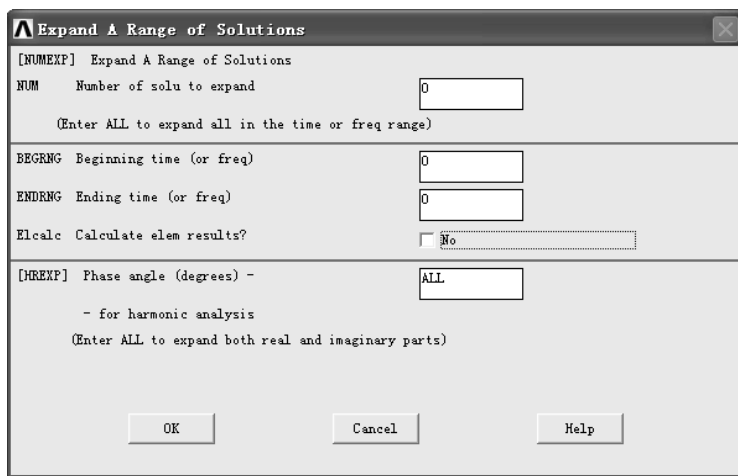


图 12-4 扩展求解对话框

1) Number of solu to expand[**NUMEXP**,**NUM**]选项: 指定要扩展的解的数目。此数是指在一个频率范围(下一选项指定)内均布的要扩展出的解的数目。如 **NUMEXP,4,1000,2000** 指定在频率范围 1 000Hz~2 000Hz 间扩展出 4 个解(即扩展在频率为 1 250Hz、1 500Hz、1 750Hz 和 2 000Hz 处的解)。

2) Beginning time /Endding time [**NUMEXP**,**BEGRNG**,**ENDRNG**]选项: 指定扩展频率范围。如果不需要扩展出多个解, 可以用 **EXPSOL** 指定要扩展的单一解(指定解对应的载荷步、子步号或对应的频率值)。

3) Calculate elem results? [**NUMEXP**,**Elcaci**]选项: 如果对应力和力的计算不感兴趣可以关闭这一选项。默认情形下计算应力和力。

4) Phase Angle [**HREXP**]选项: 如果在一个频率范围内要扩展多个解, 建议对实部和虚部都进行扩展。这样, 便可以很容易地在 **POST26** 中合并实部和虚部, 以便观察位移、应力及其他结果的峰值。另外, 如果扩展的是单一解, 则可以用 **HREXP,angle** 指定峰值位移发生时的相位角。

(3) 设置输出格式

命令: HROUT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

该操作用于确定谐响应位移解如何在输出文件 **Jobname.OUT** 中列出。可以选择实部/虚部方式(默认)或振幅/相位角方式。

3. 指定载荷步选项

在谐响应扩展过程中唯一可用的载荷步选项是输出控制。

(1) Printed Output

设置在输出文件 Jobname.OUT 中要包含的结果数据。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout

(2) Database and Result File Output

控制结果文件 Jobname.RST 中包含的数据。

命令: OUTRES

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Result File

(3) Extrapolation of Results

此选项设置采用复制结果到节点方式而非外插值方式（默认）来观察单元积分点结果。

命令: ERESX

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Integration Pt

注意: OUTPR 和 OUTRES 命令的 FREQ 域只可以为 ALL 或 NONE。

4. 执行扩展过程

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Currents LS

5. 对其他需要扩展的解, 分别重复步骤 2、3 和 4

每一次扩展过程在结果文件中被保存为一个单独的载荷步。谱分析要求所有已扩展模态保存在一个载荷步中。

6. 离开SOLUTION

现在可以在后处理器中观察结果了。

命令: FINSH

GUI: 关闭 Solution 菜单。

12.4.4 观察扩展解的结果

扩展过程的结果保存在结构分析结果文件 Jobname.RST 中。解是由下面的解扩展所用频率对应的数据组成的。

1. 基本数据

节点位移 (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)

2. 派生数据

派生数据包括: 节点和单元应力、节点和单元应变、单元力、节点反作用力。

可以用 POST1 观察这些结果数据。如果已在几个频率处扩展了解, 那么可以用 POST26 得到应力对频率、应变对频率的关系等的曲线图。

用 POST1 (或 POST26) 的步骤和在完全法中描述的基本相同, 只有一点不同: 如果指定了在某个相位角处扩展解 (HREXP,angle), 则在每个频率处只生成一个解。可用 SET 命令从结果文件中读取。



12.5 模态叠加法谐响应分析

模态叠加法通过对振型乘以因子并求和的方法来计算谐响应。它是 ANSYS/Professional 产品中唯一可用的谐响应分析方法。模态叠加法的分析过程由五个主要步骤组成：① 建模；② 获取模态分析解；③ 获取模态叠加法谐响应分析解；④ 扩展模态叠加解；⑤ 观察结果。

这些步骤中，第 1 步的工作与完全法相同，下面详细讲述其余各步骤。

12.5.1 获取模态分析解

“模态分析”中已经描述了如何得到模态分析解。对于模态叠加法，还应注意以下几点。

- 模态提取法应采用分块 Lanczos 法（默认）、子空间法、缩减法、PowerDynamics 法或 QR 阻尼法中的一种。其他方法，如非对称法和阻尼法在模态叠加法中不能采用。
- 确保提取出所有对谐响应有贡献的模态。
- 如果采用 PowerDynamic 模态提取法，则不能施加非零载荷或位移（即只有 $u=0$ 是可加的初始条件）。PowerDynamic 模态提取法不生成载荷矢量。
- 对 Reduced 模态提取法，必须包括施加简谐载荷的主自由度。
- 如果使用 QR 阻尼法提取模态，必须在前处理或模态分析阶段指定任何希望包含的阻尼。可以指定的阻尼有 ALPHAD、BETAD、MP、DAMP 或单元阻尼；QR 阻尼法不支持 DMPRAT 和 MDAMP。
- 如果需要施加简谐变化的单元载荷，必须在模态分析中进行施加。在模态分析中，这些载荷被求解忽略，但程序将计算出相应的载荷向量，并将其写入振型文件（Jobname.MODE）。这样，在谐响应分析求解时就可以使用这些载荷向量了。
- 模态叠加法不需要扩展模态，但如果想观察一下振型，就应当扩展模态。
- 在模态分析与谐响应分析过程之间，不能改变模型数据。

12.5.2 获取模态叠加法谐响应解

在这一步中，程序将根据模态分析所得到的振型来计算谐响应。振型文件（Jobname.MODE）必须存在且有效，在数据库中必须包含与模态分析相同的模型。下面是要做的具体工作：如果使用子空间法或分块 Lanczos 法按默认质量矩阵计算得到模态解，完整矩阵文件（Jobname.FULL）也必须存在且有效。基本说明步骤如下。

1. 进入 SOLUTION

命令：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

2. 指定分析类型及分析选项

操作过程与完全法描述的基本相同，差别如下。

1) 选择模态叠加法。

2) 指定求解的模态数。此数将决定谐响应分析解的精度。一般地，指定的模态数应当覆盖简谐载荷频率范围的百分之五十以上；

3) 可以将解按结构的固有频率进行聚集[HROUT], 以得到更光滑、更精确的响应曲线。

4) 可以选择在各频率处输出一个包含了各阶模态对总响应的贡献的表格[HROUT]。

3. 在模型上施加载荷

除下列限制外, 谐响应分析中的载荷与完全法中所述的载荷相似。

1) 只可施加力、加速度和模态分析中生成的载荷向量。可用 LVSCALE 命令来施加在模态分析中生成的载荷向量。

2) 如果采用的是由缩减法模态分析得到的振型, 力只能加在主自由度上。

4. 指定载荷步选项

除了可以指定振型阻尼外, 这一步和缩减法中相应步骤基本一样。参见“瞬态动力学分析”中关于阻尼的详细论述。(记住, 正如在模态分析中所述, 如果使用 QR 阻尼法提取模态, 那么在模态叠加法谐响应分析中定义的任何阻尼都将被忽略)。如果选择了 clustering (聚集) 选项[HROUT], 就可用命令 NSUBST 指定分布在固有频率两侧的解的数目。默认情形下计算出四个解, 但是可以指定 2~10 个解。

5. 选择求解方法

如果使用分块 Lanczos 法或子空间法进行模态分析 (MODEOPT、LANB 或 SUBSP), 可以利用节点项配合 OUTRES,NSOL 命令限制位移数据写进缩减位移文件 Jobname.RFRQ。扩展过程只能处理那些写入.RFRQ 文件的单元及它们的节点上的结果。为了使用该选项, 首先执行 OUTRES,NSOL,NONE 命令禁止写入所有项, 然后执行 OUTRES,NSOL,ALL, COMPONENT 命令指定写入感兴趣的项。重复执行 OUTRES 命令处理其他希望写入.RFRQ 文件的节点项。

6. 保存数据库备份

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

7. 开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

8. 如有其他载荷和频率范围 (即其他载荷步), 重复第 3 步至第 7 步

如果希望进行时间历程后处理 (在 POST26 中), 则任何两个载荷步之间的频率范围不能发生重叠。

无论采用的模态提取法是子空间法、分块 Lanczos 法、缩减法、PowerDynamics 法还是 QR 阻尼法, 模态叠加法谐响应分析的解都被保存到缩减位移文件 Jobname.RFRQ 中。因此, 如果对应力结果感兴趣, 就需要对解进行扩展。

12.5.3 扩展模态叠加解

扩展过程的步骤和在缩减法中描述的相同。在采用 Reduced 特征值提取法时需要模态分析中生成的 Jobname.TRI 文件。扩展过程的输出包括结构分析结果文件 Jobname.RST, 其中包含经过扩展的结果。





12.5.4 观察结果

结果由在每个求解所用强制频率处的简谐变化的位移、应力和反作用力组成。可以用 POST26 或 POST1 观察这些结果，与缩减法中所述一样。

12.6 有预应力的完全法谐响应分析

有预应力的谐响应分析用于计算有预应力结构的动力学响应，如小提琴的弦。它假设简谐变化的应力比预应力本身小得多。

12.6.1 有预应力的完全法谐响应分析

有预应力的完全法谐响应分析除首先需要进行预应力结构静力分析之外，其他过程基本上与无预应力完全法谐响应分析相同。

- 1) 创建模型，获取打开预应力效应 (PSTRES,ON) 的静力学分析解。
- 2) 重新进入求解器，获取打开预应力效应 (PSTRES,ON) 的完全法谐响应的解。在静力学分析中生成的文件 Jobname.EMAT 和 Jobname.ESAV 必须存在且有效。

12.6.2 有预应力的缩减法谐响应分析

有预应力的缩减法谐响应分析除首先需要进行预应力结构静力分析之外，其他过程基本上与无预应力缩减法法谐响应分析相同。

- 1) 建模并在打开预应力效果 (PSTRES,ON) 的前提下获取静力学分析解。
- 2) 重新进入求解器，获取打开预应力效应 (PSTRES,ON) 的缩减法谐响应分析解。在静力学分析中生成的文件 Jobname.EMAT 和 Jobname.ESAV 必须存在且有效。

12.6.3 有预应力的模态叠加法谐响应分析

为了在模态叠加法谐响应分析中包含预应力效果，应当首先进行有预应力的模态分析。参见“模态分析”中的详细说明。在完成了有预应力的模态分析后，就可以像一般的模态叠加法分析那样继续进行分析了。

12.7 实例：汽车悬架系统的谐响应分析

12.7.1 工程背景

悬架是车架与车桥之间的一切传力连接装置的总称。它的功用是把路面作用于车轮上的力和力矩都通过悬架传递到车架上，以保证汽车的正常行驶。汽车在行驶的过程中，由于路面不会绝对的平坦，路面作用于车轮的垂直反力往往是冲击性的，这种冲击力如果达到很大的值，就会影响驾驶员与乘客的乘坐舒适性，同时车身的姿态会受影响，操纵稳定性也会直接受到影响，甚至使行驶速度受到影响。本实例运用 ANSYS 谐响应分析的功能研究路面在汽车悬架激励的特性。

12.7.2 问题的描述

1. 模型的基本参数

如图 12-5 所示, 本实例所选用的为 1/4 悬架模型。选用的悬架模型参数如下: 簧载质量 m_1 为 500kg, 非簧载质量 m_2 为 60kg, 悬架减振器弹簧刚度 k_1 为 30 000N/m, 阻尼系数 c_1 为 2 000N·s/m, 轮胎等效刚度 k_2 为 300 000N/m, H_1 为 0.18m, H_2 为 0.22m。

2. 单元的选择及材料常数

本实例使用 MASS21 单元模拟簧载质量和非簧载质量; 使用弹簧阻尼单元 COMBINE14 模拟悬架和轮胎。

3. 边界条件

悬架的唯一载荷为路面的不平度激励, 本实例假设路面不平度激励为正弦载荷幅值 0.006m, 初始相位角为 0, 计算频率从 0Hz~50Hz。悬架系统只有一个竖直方向的自由度, 通过设置单元关键字来保证这一点。

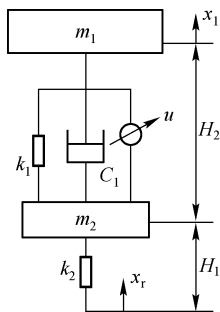


图 12-5 汽车 1/4 悬架模型简图

12.7.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框, 在输入栏中输入 Suspensionr, 单击 OK。

2. 定义单元和属性

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 MASS, 然后在右边选择三维 mass 21 单元, 单击 Apply; 继续在对话框左边选择 Combination, 然后在右边选择 Sping-damper12 单元, 单击 OK。

(2) 定义单元属性

在单元类型对话框中选择 MASS21, 单击 Options 选项, 在弹出的对话框中设置关键字 K3 为二维 w/o rot iner (含义是质量单元 21 为二维平面单元且不包含转动自由度) 单击 OK; 在单元类型对话框中选择 COMBIN14, 单击 Options 选项, 在弹出的对话框中设置关键字 K2 为 Longitude UY DOF (含义为弹簧阻尼单元 14 为一维单元且只有 UY 一个自由度), 单击 OK, 然后单击 Close。

(3) 定义实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete

在弹出的对话框中选择 Add, 在弹出的对话框中选择 MASS21, 单击 OK, 在对话框中输入 MASS=500, 单击 OK; 继续单击 Add, 在弹出对话框中选择 MASS21, 单击 OK, 在对话框中输入 MASS=60, 单击 OK; 继续单击 Add, 在弹出对话框中选择 COMBIN14, 单击 OK, 在对话框中输入 K=30000, CV1=2000, 单击 OK; 继续单击 Add, 在弹出对话框中选择 COMBIN14, 单击 OK, 在对话框中输入 K=300000, 单击



OK, 然后单击 Close。

3. 建立有限元模型

(1) 定义节点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NODE=1, X=0, Y=0, 单击 Apply; 继续输入 NODE= 2, X=0, Y=0.18, 单击 Apply; 继续输入 NODE=3, X=0, Y=0.4, 单击 OK。

(2) 建立轮胎单元

1) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的单元属性对话框的TYPE选项中, 选择COMBIN14, 在REAL选项中, 选择 4, 其他保持默认值, 单击OK。

2) 建立轮胎单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

操作后弹出拾取对话框, 拾取节点 1 和节点 2, 单击 OK。

(2) 建立非簧载质量单元

1) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的单元属性对话框的TYPE选项中, 选择MASS21, 在REAL选项中, 选择 2, 其他保持默认值, 单击OK。

2) 建立非簧载质量单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

操作后弹出拾取对话框, 拾取节点 2, 单击 OK。

(3) 建立悬架单元

1) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的单元属性对话框TYPE选项中, 选择COMBIN14, 在REAL选项中, 选择 3, 其他保持默认值, 单击OK。

2) 建立悬架单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

操作后弹出拾取对话框, 拾取节点 2 和节点 3, 单击 OK。

(4) 建立簧载质量单元

1) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的单元属性对话框中的TYPE选项中, 选择MASS21, 在REAL选项中, 选择 1, 其他保持默认值, 单击OK。

2) 建立非簧载质量单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

操作后弹出拾取对话框, 拾取节点 3, 单击 OK。

4. 设置求解条件

(1) 展开求解菜单

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu

(2) 定义求解类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Harmonic, 含义为进行谐响应问题求解。

(3) 设置 谐响应分析 选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

操作后弹出谐响应分析 (Harmonic Analysis) 对话框, 在 HROPT 选项中设置求解方法为完全法 Full, 其他选项保持默认设置, 单击 OK, 保持弹出对话框的默认设置, 单击 OK。

5. 定义边界条件

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

操作后弹出拾取对话框, 拾取节点 1, 单击 OK; 在弹出的对话框中设置 Labs2 为 UY, 即约束竖直方向的自由度, 设置 VALUE 为 0.006, 含义为载荷的实部为 0.006, 设置 VALUE2 为 0, 含义载荷的虚部为 0, 这样可以保证载荷的初始相位角为 0。

6. 定义载荷步选项

(1) 定义输出每一个子步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

在弹出的对话框中的 FREQ 选项设置 Every substep, 单击 OK。

(2) 定义求解频率范围

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Freq and Substps

在弹出对话框中的 HARFQR 选项中输入 0 和 50, 在 NSUBST 选项中输入 500, 含义为求解频率从 0Hz 到 50Hz 每隔 0.1Hz 求解一次, KBC 选项中选择 Ramped, 单击 OK。

7. 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

操作后弹出求解对话框, 单击 OK, 然后单击 Yes。

8. 后处理

(1) 进入时间历程后处理器, 并打开时间历程变量观察器

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro

(2) 观察节点 2 的 UY 随频率的变化规律

1) 设置图的输出格式。

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes

在弹出对话框中的 X-axis label 选项中输入 Frequency, 在 Y-axis label 选项中输入 Amplitude, 在 Axis number size face 中输入 1.9 来设置图中坐标轴的字体, 单击 OK。





2) 单击时间历程变量观察器中的 , 在弹出的对话框 Result Item 选项中选择 DOF Solution | Y-Component of displacement, 在 Result Item Properties 选项中的 Variable Name 中输入 NODE2, 单击 OK, 弹出拾取对话框, 拾取节点 2, 单击 OK。

3) 选择时间历程变量观察器中变量列表中的 NODE2, 然后单击 , 则可观察到其幅值和频率的关系, 如图 12-6 所示。

(3) 观察节点 3 的 UY 随频率的变化规律

1) 单击时间历程变量观察器中的 , 在弹出的对话框 Result Item 选项中选择 DOF Solution | Y-Component of displacement, 在 Result Item Properties 选项的 Variable Name 中输入 NODE3, 单击 OK, 弹出拾取对话框, 拾取节点 3, 单击 OK。

2) 选择时间历程变量观察器中变量列表中的 NODE3, 然后单击 , 则可观察到其幅值和频率的关系, 如图 12-7 所示。

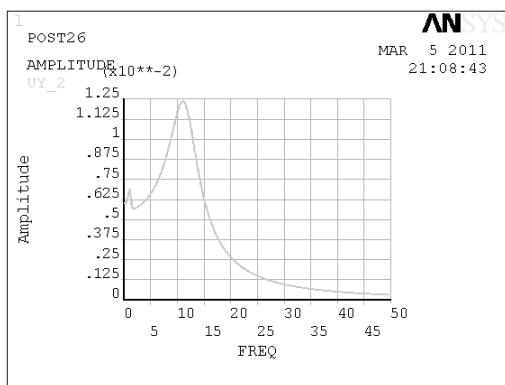


图 12-6 节点 2 的 Y 方向位移与频率关系

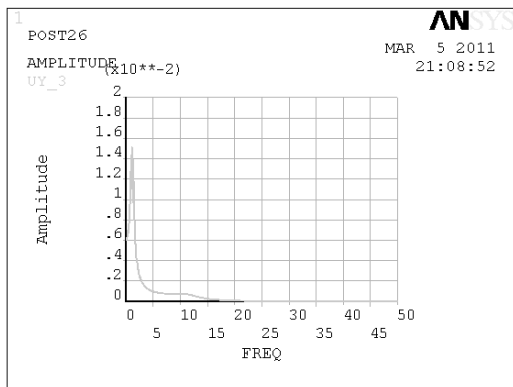


图 12-7 节点 3 的 Y 方向位移与频率关系

第 13 章 谱 分 析

13.1 谱分析的定义

谱分析是一种将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算模型的位移和应力的分析技术。谱分析替代时间历程分析，主要用于确定结构对随机载荷或随时间变化载荷（如地震、风载、海洋波浪、喷气发动机推力、火箭发动机振动等）的动力响应情况。

13.2 谱的基本概念

谱是谱值与频率的关系曲线，它反映了时间历程载荷的强度和频率信息。ANSYS 的谱分析有三种类型：响应谱分析；动力设计分析方法和功率谱密度（PSD）。

13.2.1 响应谱分析

一个响应谱代表单自由度系统对一个时间历程载荷函数的响应，它是响应与频率的关系曲线，其中响应可以是位移、速度、加速度、力等。响应谱又分为如下两种形式。

1. 单点响应谱

在模型的一个点集上定义一条（或一族）响应谱曲线，例如在所有支撑处，如图 13-1a 所示。

2. 多点响应谱

在模型的不同点集上定义不同的响应谱曲线，图 13-1 所示。

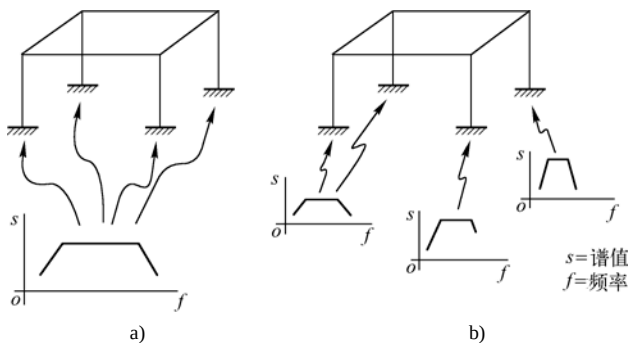


图 13-1 单点响应谱和多点响应谱

a) 单点响应谱 b) 多点响应谱

13.2.2 动力设计分析方法

该法是一种用于分析船用装备抗振性的技术，它所使用的谱是从美国海军研究实验室报



告 (NRL-1396) 的一系列经验公式和振动设计表中得来的。

13.2.3 功率谱密度

功率谱密度是一种概率统计方法, 是对随机变量均方值的量度, 一般用于随机振动分析。连续瞬态响应只能通过概率分布函数进行描述, 即出现某水平响应所对应的概率。功率谱密度是结构在随机动态载荷激励下响应的统计结果, 是一条功率谱密度值与频率值的关系曲线, 其中功率谱密度可以是位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式。数学上, 功率谱密度值与频率值的关系曲线下的面积就是方差, 即响应标准偏差的平方值。与响应谱分析相似, 随机振动分析也可以是单点的或多点的。在单点随机振动分析时, 要求在结构的一个点集上指定一个功率谱密度谱; 在多点随机振动分析时, 则要求在模型的不同点集上指定不同的功率谱密度。

13.2.4 确定性分析与概率分析

响应谱和动力设计分析方法都是定量分析技术, 因为分析的输入输出数据都是实际的最大值。但是, 随机振动分析是一种定性分析技术, 分析的输入输出数据都只代表它们在确定概率下的可能性发生水平。

13.3 单点响应谱 (SPRS) 分析步骤

单点响应谱分析有如下五个步骤。①建造模型; ②获得模态解; ③获得谱解; ④扩展模态; ⑤合并模态; ⑥观察结果。

结构的振型和固有频率是谱分析所必须的数据, 因此要先进行模态分析。另外, 在扩展模态时, 只需扩展到对最后进行谱分析有影响的模态就可以。

13.3.1 建立模型

该步与其他分析类型建立模型的过程相似, 即定义工作名、分析的标题、单元类型、单元实常数、材料性质、模型几何形状等。应注意以下两点。

- 只有线性行为在谱分析中才是有效的。任何非线性单元均作为线性处理。如果含有接触单元, 那么它们的刚度始终是初始刚度, 不再改变。
- 必须定义材料弹性模量 EX 或其他形式的刚度和密度 DENS。材料的任何非线性将被忽略, 但允许材料特性是线性的、各向同性或各向异性的以及随温度变化或不随温度变化的。

13.3.2 获得模态解

结构的模态解, 即固有频率和振型, 是计算谱解所必须的。模态分析的具体过程在第十章中已经阐述过, 这里还需注意以下几点。

- 使用 Block Lanczos 法 (默认)、子空间法或缩减法提取模态。非对称法、阻尼法、QR 阻尼法以及 PowerDynamics 法对下一步谱分析是无效的。
- 所提取的模态数目应足以表征在感兴趣的频率范围内结构所具有的响应。

- 如果使用 GUI 交互式方法进行分析，模态分析设置[MODOPT]对话框的扩展模态选项置为 NO 状态，那么模态计算时将不进行模态扩展，但是可以有选择地扩展模态。否则，将扩展模态选项置为 YES 状态。
- 材料相关阻尼必须在模态分析中进行指定。
- 必须在施加激励谱的位置添加自由度约束。
- 求解结束后退出 SOLUTION 处理器。

13.3.3 获得谱解

1. 进入求解器

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 定义分析类型及分析选项

(1) 定义谱分析

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis | Spectrum

(2) 定义单点谱分析类型

命令：SPOPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

在弹出的对话框中选择 Single，单击 OK。

(3) 定义求解所需的扩展模态数

命令：SPOPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

选择足够的扩展模态数，使其足以覆盖单点响应谱所决定的频率范围，并足够表征结构的响应特性。求解的精度取决于所使用的模态数：数值越大，精度越高。如果要计算单元应力，SPOPT 命令选项必须置为“YES”状态。

3. 定义载荷步选项

对单点响应谱分析而言，如表 13-1 所示的选项是有效的。

表 13-1 载荷步选项

选 项	命 令	GUI 路径
谱选项		
响应谱类型	SVTYP	Main Menu Solution LoadStep Opts Spectrum Single Point Settings
激励方向	SED	Main Menu Solution LoadStep Opts Spectrum Single Point Settings
谱值-频率曲线	FREQ,SV	Main Menu Solution LoadStep Opts Spectrum Single Point Freq Table or Spectr Values
阻尼（动力选项）		
（刚度）阻尼	BETAD	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Damping
恒定阻尼比	DMPRAT	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Damping
模态阻尼	MDAMP	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Damping



(1) 响应谱的类型[SVTYPE]

谱的类型可以是位移、速度、加速度、力或 PSD（功率谱密度）。除了力谱以外，所有谱都是地震谱，亦即它们都是假定作用于结构的基础上。力谱用 F 或 FK 命令定义于非基础节点上，方向通过 FX、FY 和 FZ 方向指定。PSD 谱（SVTYPE,4）在内部被转换成位移响应谱，并被限定为平面窄带谱。

(2) 激励方向[SED]

指定谱分析的载荷激励方向。

(3) 谱值与频率的关系曲线[FREQ,SV]

SV 和 FREQ 命令用于定义谱曲线，可定义一系列不同阻尼比的谱曲线。用 STAT 命令列表显示当前谱曲线的对应值。还可以用 ROCK 命令定义摆动谱。

(4) 阻尼选项（动力分析选项）

如果指定多种阻尼，ANSYS 程序将计算出对应每个频率的有效阻尼比。接着，对谱曲线取对数计算出与该有效阻尼比对应的谱值。如果不指定任何阻尼，程序将自动选用阻尼最低的谱曲线。

可以选用的阻尼有如下几种：

- 1) (刚度) 阻尼[BETAD]：定义频率相关阻尼比。
- 2) 恒定阻尼比[DMPRAT]：指定在所有频率上具有。恒定的阻尼比。
- 3) 模态阻尼[MDAMP]：指定数值计算中的模态阻尼。

注意：材料相关阻尼比（MP，DAMP 命令）可以选用，但只局限于模态分析。MP, DAMP 命令还可以指定材料相关的恒定阻尼比（不是其他分析中选用的材料相关刚度阻尼）。

4. 开始求解计算

命令：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

求解的输出结果包括参与系数表。作为打印输出的一部分，参与系数表列出了参与系数、（基于最低阻尼比的）模态系数以及每阶模态的质量分布。模态系数乘以振型就是每阶模态的最大响应。用*GET 命令提取模态系数后，将其作为 SET 命令中的一个比例系数来完成这个过程。若要获得更多的响应谱解，只要重复 3、4 步即可。注意：这时的求解结果不要写进原来的结果文件。

5. 退出求解器

命令：FINISH

GUI：退出求解器

13.3.4 扩展模态

将“Expansion Pass dialog box”对话框中的扩展模态选项（expansion pass option）设置为 YES。

命令：EXPAND

GUI：Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis | Modal

Main Menu | Solution | Analysis Type | Expansion Pass

无论使用 Block Lanczos 法、子空间法还是缩减法，都必须进行模态扩展。另外，还需注意以下几点：

- 只选择重要的模态进行扩展。如果使用 GUI 交互方法进行模态扩展操作，那么在模态分析阶段应将“modal analysis options”对话框[MODOPT]中的“mode expansion”选项设置为“NO”，以便把模态扩展作为一个独立的求解过程，并放在谱分析完成之后进行。
- 只有扩展模态才能在以后的模态合并过程中进行模态合并操作。
- 如果对谱所产生的应力感兴趣，这时必须进行应力计算。在默认情况下，模态扩展过程是不包含应力计算的，同时意味着谱分析将不包含应力结果数据。
- 如果需要扩展所有模态，只要在模态求解过程中执行 MXPAND 命令，就可同时进行模态扩展过程。如果使用 GUI 交互方法，并想扩展所有模态，那么在模态分析阶段应将 modal analysis options 对话框（MODOPT 命令）中的 mode expansion 选项设置为 YES。如果只想扩展有明显意义的模态，就必须将模态扩展作为一个独立求解过程放在谱分析之后进行。

注意：即使进行模态扩展分析，模态分析解也将写进结果文件（Jobname.RST）

13.3.5 合并模态

合并模态作为一个独立的求解阶段，包括以下步骤。

1. 进入求解器

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 指定分析类型

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu | Solution | New Analysis

New Analysis 选项（ANTYPE 命令）：选择新分析。

Analysis Type: Spectrum 选项（ANTYPE 命令）：选择谱分析。

3. 选择模态合并方法

对于单点响应谱分析，ANSYS 提供了五种模态合并方法：

SRSS 法（Square Root of Sum of Squares）

CQC 法（Complete Quadratic Combination）

DSUM 法（Double Sum）

GRP 法（Grouping）

NRLSUM 法（Navam Research Laboratory Sum, NRLSUM）

其中，NRLSUM 法是 DDAM 谱分析中的典型方法。

下列是选用不同模态合并方法的命令。

命令：SRSS\CQC\DSUM\GRP\NRLSUM

GUI: Main Menu | Load Step Opts | Spectrum | Spectrum-Single Point-Mode Combine



这些命令允许下面三种类型的响应计算。

- 位移 (displacement, Label=DISP): 位移、应力和载荷等。
- 速度 (Velocity, Label=VELO): 速度、应力速度和力速度。
- 加速度 (Acceleration, Label=ACEL): 加速度、应力加速度和力加速度等。

DSUM 法也允许输入地震谱或冲击谱的延续时间。

注意: CQC 法必须定义阻尼。另外, 使用了材料相关阻尼 (MP, DAMP), 在模态扩展时就必须计算单元结果 (将 MXPAND 命令中 Elcalc 选项设置为 YES)。

4. 开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

模态合并时将建立一个 POST1 命令文件 (Jobname.MCOM)。读入这个文件, POST1 命令文件将利用模态扩展的结果文件 (Jobname.RST) 进行模态合并。

文件 Jobname.MCOM 包含有 POST1 命令, 它们将按指定模态合并方法计算出结构的总响应, 获得最大的模态响应。

模态合并方法决定了结构模态响应的合并方式。

- 对于位移响应 (Label=DISP), 将合并每阶模态的位移和应力。
- 对于速度响应 (Label=VELO), 将合并每阶模态的速度和应力速度。
- 对于加速度响应 (Label=ACEL), 将合并每阶模态的加速度和应力加速度。

5. 退出求解器

命令: FINISH

GUI: 退出求解器。

注意: 只要打开模态合并命令 (SRSS、CQC、GRP、DSUM 和 NRLSUM) 的 VELO 或 ACCEL 选项, 对位移求解结果进行后处理, 再重复模态合并过程, 就可以得到除了位移结果之外的速度或加速度计算结果。

13.3.6 观察结果

单点响应谱分析的结果是以 POST1 命令的形式写入模态合并文件 (Jobname.MCOM) 中的, 这些命令依据模态合并方法指定的某种方式合并最大模态响应, 最终计算出结构的总响应。总响应包括总的位移、总速度或总加速度, 在模态扩展过程中得到结果总应力、总应力速度或总应力加速度, 以及总应变、总的反作用力。

使用 POST1 后处理器观察结果。

注意: 如果要利用结果文件直接合并衍生应力 (S1、S2、S3、SEQV 和 SI), 先读入文件 Jobname.MCOM, 再执行 SUMTYPE, PRIN 命令。SUMTYPE, COMP 命令是默认命令, 只能直接处理单元非平均组合应力, 以及计算这些应力的衍生数据。

1. 读入 Jobname.MCOM 文件 (/INPUT 命令)

命令: /INPUT

GUI: Utility Menu | File | Read From

2. 显示结果

(1) 显示变形形状 (PLDISP 命令)

命令: PLDISP

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shaped

(2) 等值线显示

命令: PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

使用 PLNSOL 或 PLESOL 命令以等值线形式几乎能够显示任意结果项, 如应力 (SX、SY、SZ)、应变 (EPELX、EPELY 和 EPELZ) 和位移 (UX、UY、UZ)。如果在此之前执行过 SUMTYPE 命令, PLNSOL 或 PLESOL 命令的显示结果将受到 SUMTYPE 命令设置的影响 (SUMTYPE, COMP 或 SUMTYPE, PRIN)。

使用 PLETAB 命令能以等值线形式显示单元表数据, 用 PLLS 命令能显示线单元数据。

注意: 使用 PLNSOL 命令将衍生数据, 如应力和应变进行节点平均化处理, 导致不同材料、不同壳厚度或其他不连续性单元共有的节点平均解意义十分模糊。为了避免这种问题, 在执行 PLNSOL 命令前先使用 SELECTING 选择工具将具有相同材料、相同壳体厚度等单元选择出来, 再分别执行 PLNSOL 命令进行节点平均化处理。

(3) 向量显示 (PLVECT 命令)

命令: PLVECT

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Vector Plot | Predefined

(4) 列表显示

命令: PRNSOL (节点结果)

PRESOL (单元结果)

PRRSOL (支反力结果)

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution

Main Menu | General Postproc | List Results | Element Solution

Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solution

(5) 其他后处理功能

在 POST1 后处理器中, 还有诸如提取指定路径上的应力分布、将结果转化到不同的坐标系以及对载荷工况进行组合等功能可以使用。

以上六个步骤系统描述了进行单点响应谱分析的具体过程。

如果采用批处理方式进行单点响应谱分析, 还应注意以下两点。

- 补上谱载荷的定义命令 (SV、SVTYPE、SED 和 FREQ 命令) 后, 上面的第二步和第三步 (即模态求解和求得谱解过程) 可以合并到模态分析求解 (ANTYPE, MODAL) 过程中去。
- 补上模态合并命令后, 上面的第四步和第五步 (即模态扩展和模态合并求解过程) 可以合并到模态分析求解 (ANTYPE, MODAL 且 EXPASS, ON) 过程中去。





13.4 随机振动（PSD）分析步骤

PSD 分析包括如下六个步骤：①建造模型；②求得模态解；③扩展模态；④获得谱解；⑤合并模态；⑥观察结果。以上六步中，前两步跟单点响应谱分析一样，后四步将在下面做详细讲解。

如果选用 GUI 交互方法进行分析，模态分析选择对话框（`MODOPT` 命令）中包含有是否进行模态扩展选项（`MXPAND` 命令），将其设置为 `YES` 就可以进行下面的扩展模态。这样，第二步（求得模态解）和第三步（扩展模态）就合并到一个步骤中进行计算。

13.4.1 扩展模态

无论选用子空间法、Block Lanczos 法还是缩减法，都必须进行模态扩展。关于模态扩展在 13.3.4 节有详细讲述。另外还需注意以下几点：

- 只有扩展后的模态才能在以后的模态合并过程中进行模态合并操作。
- 如果对谱所产生的应力感兴趣，这时必须进行应力计算。在默认情况下，模态扩展过程是不包含应力计算的，这同时意味着谱分析将不包含应力结果数据。
- 模态扩展可以作为一个独立的求解过程，也可以放在模态分析阶段。
- 在模态扩展结束之后，应执行 `FINISH` 命令退出求解器（`SOLUTION`）。

13.4.2 获得谱解

功率谱密度求解时，系统数据库必须包含模态分析结果数据，以及模态求解获得的下列文件：`Jobname.MODE`、`Jobname.ESAV`、`Jobname.EMAT`、`Jobname.FULL`（仅子空间法和 Block Lanczos 法有效）和 `Jobname.RST`。

1. 进入求解器（`/SOLU`命令）

命令：`/SOLU`

GUI: Main Menu | Solution

2. 定义分析类型和分析选项

1) 对于谱分析类型（`SPOPT` 命令），选择功率谱密度（PSD）。

2) 若对应力结果感兴趣，则打开应力计算开关（`SPOPT` 命令设置为 `ON`）。只有在扩展模态过程中要求过计算应力，这时才能计算由谱引起的应力。

3. 定义载荷步选项

下面的选项适用于随机振动。

(1) 谱数据

1) 功率谱密度（PSD）类型。

命令：`PSDUNIT`

GUI: Main Menu | Solution | Spectrum | PSD | Settings

功率谱密度类型可以是位移、速度、力、压力或加速度。在后面的第 4 步和第 5 步中将指定是基础激励还是节点激励。如果施加压力功率谱密度，则应在模态分析时就施加压力。

2) 定义功率谱密度-频率二维表。

命令: PSDFREQ, PSDVAL

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | PSD vs Freq

PSDFEQ 和 PSDVAL 命令用于定义功率谱密度-频率二维表。第 6 步将描述其他功率谱密度激励的施加方法。执行 STAT 命令可以显示功率谱密度表。

(2) 阻尼 (动力特性选项)

这里可以指定下列种类的阻尼: α 阻尼 (ALPHD 命令)、 β 阻尼 (BETAD 命令)、恒定阻尼比 (DMPRAT 命令) 和频率相关阻尼比 (MDAMP 命令)。注意, 恒定阻尼比是利用 DMPRAT 命令指定给所有频率的。如果定义了多种阻尼, ANSYS 将计算出对应每一频率的有效阻尼比。

注意: 若在 PSD 分析中没有定义阻尼, 即默认时将使用 1 % 的 DMPRAT。

1) Alpha (质量) 阻尼

命令: ALPHD

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequency | Damping

2) Beta (刚度) 阻尼

命令: BETAD

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequency | Damping

3) 恒定阻尼比

命令: DMPRAT

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequency | Damping

4) 频率相关阻尼比

命令: MDAMP

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequency | Damping

4. 在节点上施加功率谱密度 (PSD) 激励

当指定值为 1.0 时, 该节点就施加功率谱密度激励。反之, 指定值为 0 时, 该节点的功率谱密度激励将被删除。激励的方向由 D 命令 (施加基础激励) 中 UX、UY、UZ 的符号或者 F 命令中 FX、FY、FZ 的符号来决定。对于节点激励, 非 1.0 的值充当激励缩放系数。对于压力功率谱密度, 引入模态分析中生成的载荷向量, 也可以使用缩放系数。

注意, 基础激励只能施加在模态分析中施加有约束的节点上。

命令: D、DK、DL 或 DA (施加基础激励); F 或 FK (施加节点激励); LVSCALE (施加压力 PSD)

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Spectrum | Base PSD Excit | On Nodes

5. 开始计算上述 PSD 激励缩放系数

在 PFACT 命令的 TBLNO 区域指定选用哪一个 PSD 表, Excit 区域指定是对基础激励还是节点激励的计算。

命令: PFACT

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Calculate PF



6. 定义其他PSD激励

如果同一模型上有多个 PSD 激励，就按每一个功率谱密度表重复上面第 3、4 和 5 步的过程。然后根据实际情况确定各激励间的相关程度，恰当地选用下列命令。

命令：COVAL（共谱值）；QDVAL（二次谱值）；PSDSPL（空间关系）；PSDWAV（波传播关系）

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Correlation

在使用 PSDSPL 或 PSDWAV 命令时，PFACT 命令的 Parcor 区域分别设置为 SPATIAL 或 WAVE。对于多点基础激励，由于 PSDSPL 和 PSDWAV 间的关系可能会大大增加 CPU 的计算量，所以在使用 PSDSPL 和 PSDWAV 命令时，节点激励和基础激励输入必须是一致的。例如，FY 不能施加到一个节点而 FZ 施加到另外一个节点时，节点激励和基础激励输入必须是一致的。PSDSPL 和 PSDWAV 命令不能用于压力 PSD 分析。

7. 设置输出控制项

该分析只有一条输出控制命令 PSDRES，它定义写入结果文件的输出数据的数量和格式。可以计算出三种结果数据：位移解、速度解、加速度解，每一种解都可以是绝对值或对于基准值的相对值。

命令：PSDRES

GUI: MainMenu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | CalcControls

表 13-2 列出了所有可以获得的分析结果。为了限制输入到结果文件的数据量，在模态扩展过程中执行 OUTRES 命令进行控制。执行命令 OUTPR, NSOL, ALL 将显示重要的模态协方差项的总列表。

表 13-2 PSD 分析结果数据列表

求解类别	项 目	类 型
位移求解（PSDRES 命令中 LABEL 项为 DISP）	位移、应力、应变和力	相对、绝对或都不是
速度求解（PSDRES 命令中 LABEL 项为 VELO）	速度、应力速度和力速度等	相对、绝对或都不是
加速度求解（PSDRES 命令中 LABEL 项为 ACEL）	加速度、应力加速度和力加速度等	相对、绝对或都不是

8. 开始求解计算（SOLVE命令）

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

13.4.3 合并模态

在求解过程中，模态合并可以作为独立步骤，其基本过程如下。

1. 进入求解器

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 指定分析类型

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu | Solution | New Analysis

(1) New Analysis 选项 (ANTYPE 命令)

选择新的分析。

(2) Analysis Type: Spectrum 选项 (ANTYPE 命令)

选择谱分析。

3. 选择模态合并方法

在随机振动中, 只有 PSD 模态合并方法。该方法将计算结构中的 1s 位移、应力等。如果没有执行 PSDCOM 命令, 程序将不计算结构的 1s 响应。

命令: PSDCOM

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Mode Combin

PSD 模态合并方法 (PSDCOM 命令) 中的 SIGNIF 和 COMODE 选项指定参加模态合并的数目 (PSDCOM 命令)。如果检验这两个选项, 记住打印第四步 (获得谱解) 中模态协方差矩阵, 研究趋向于最终结果的模态的相对分布。

4. 开始求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

5. 退出求解器

Command: FINISH

GUI: 退出求解器

13.4.4 观察结果

随机振动分析的结果都将写入结果文件 Jobname.RST, 它包括如下信息。

模态分析结果中的扩展模态形状。

基础激励静力解 (PFACT, ,BASE 命令)。

如果要求进行模态合并 (PSDCOM 命令), 并且是利用 PSDRES 命令设置的, 那么就有下列输出信息。

- 1σ 位移解 (位移、应力、应变、力)。
- 1σ 速度解 (速度、应力速度、应变速度、力速度)。
- 1σ 加速度解 (加速度、应力加速度、应变加速度、力加速度)。

1σ 为截取高斯分布的 1 倍方差。

先在 POST1 后处理器中观察上述信息, 然后在 POST26 处理器中计算响应 PSD。

1. 在 POST1 后处理器中观察结果

在观察结果之前, 先要了解结果文件中结果数据的结构, 如下表 13-3 所示。

表 13-3 PSD 分析结果数据组织结构

载 荷 步	子 步	内 容
1	1	第 1 阶模态的扩展了的模态解
	2	第 2 阶模态的扩展了的模态解
	3	第 3 阶模态的扩展了的模态解
	...	...



(续)

载 荷 步	子 步	内 容
2 (Base excit. only)	1	第 1 个 PSD 表的单位静态解
	2	第 2 个 PSD 表的单位静态解
	...	...
3	1	1 σ 位移解
4	1	1 σ 速度解 (如果要求了的话)
5	1	1 σ 加速度解 (如果要求了的话)

注意：如果只定义了节点 PSD 激励，第 2 载荷步的结果将是空的。同样，如果用 PSDRES 命令放弃了位移、速度或加速度的求解，对应的载荷步也将是空的。在功率谱密度分析时，将不生成载荷步 3、4 或 5 中超单元位移文件 (DSUM)。

在 POST1 后处理器中观察结果的步骤如下。

1) 用 SET 命令将想要观察的结果数据读入数据库。例如，要读入 1 σ 位移解，执行如下操作。

命令：SET

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | First Set

2) 显示结果。使用 SPRS 分析中相同的选项来显示结果。

注意：在随机振动分析中，“应力”并不是实际的应力而是应力的统计值，由 PLNSOL 命令显示的节点平均应力可能是不合理的。

2. 在POST26 中计算响应PSD

已有了 Jobname.RST 和 Jobname.PSD 文件，用户就可以计算并显示响应 PSD 结果文件中的任何信息（位移、速度和加速度）。

计算响应 PSD 的步骤如下。

1) 进入时间-历程后处理器。

命令：/POST26

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro

2) 存储频率向量。NPTS 是加在固有频率两边以使得频率向量变得“平滑”的频率点的数目（默认值是 5）。频率向量保存为 1。

命令：STORE, PSD, NPTS

GUI: Main Menu | TimeHistPostPro | Store Data

3) 定义保存感兴趣结果的变量。

命令：NSOL, ESOL 和/或 RFORCE

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro | Define Variables

4) 计算响应 PSD 并将其保存到一个指定变量，然后可用 PLVAR 命令来显示响应 PSD。

命令：RPSD

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro | Calc Resp PSD

3. 在POST26 中计算协方差

用户可以通过如下方法计算结果文件中任意两个量之间的协方差。

1) 进入时间—历程后处理器。

命令: /POST26

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro

2) 定义保存感兴趣结果的变量。

命令: NSOL, ESOL 和 RFORCE

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro | Define Variables

3) 计算每一个响应分量（相对或绝对响应）的大小，并保存到指定的对应变量的中。然后，可以利用 PLVAR 命令来绘制件（相对的）模态分布图，同时包含准静态和对总体协方差响应混合部分的分布。

命令: CVAR

GUI: Main Menu | TimeHistPostPro | Calc Covariance

4) 获得协方差。

命令: *GET,NameVARI,n,EXTREM,CVAR

GUI: Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data

13.5 随机振动分析结果的应用

13.5.1 随机振动结果与失效计算

随机振动的计算结果是各种失效计算的基础。这里仅仅就如何利用随机振动分析结果作出一些讨论，并不代表所有。假定所有随机过程为正态（高斯）平稳随机过程，确定失效的重要统计参数是均值（mean）、均方根（rms）和平均频率（average frequency）。在 ANSYS 中，PSD 分析均假定均值为零。

失效一般分成两类：一类是可逆的，如真空管、激光瞄准器和水晶激发器；第二类是不可逆的，如结构件的断裂和机器零部件的疲劳破坏。一般情况下，振动越厉害，失效发生的可能性就越大。

在随机工作状态下，至少存在三种失效方式：①一次失效，即研究对象的某物理量在工作时的数值第一次达到确定水平时就会出现失效。例如，当应力达到一定水平时，结构可能发生延展失效。②时间失效，即研究对象的某物理量在工作时的数值超过预定水平的一定寿命时间百分比之后就会出现失效。这种方法通常用在电器元件，是一种不可逆的行为。③累积损伤失效，即每次数值达到某一水平产生微小但可以定义的损伤，所有次损伤累积起来直至发生失效。这就叫疲劳破坏，是随机振动分析最常用的方法。下面仅就随机疲劳失效进行讨论。

13.5.2 随机疲劳失效

每次随机振动循环都对累积损伤具有贡献，当总的累积损伤达到 100%时就表示发生了失效，并且随机疲劳和确定性疲劳分析在理论上是相同的。对于恒定应力幅的周期载荷作用





下的应力历程，波动应力的每次循环都会在材料中产生小的变化，从而产生微小裂缝并不断发展。应力幅值越大，每经过一次循环裂缝增长得就越快越多。随着应力循环次数的不断增加，累积损伤不断增多，直至发生失效。对于恒定应力幅，疲劳失效允许的循环次数是按材料的疲劳（S-N）曲线进行确定的。一般工程材料的 S-N 曲线是对数 S-N 曲线，在坐标图上近似为一条直线，近似的数学公式为：

$$NS^b = c \quad (13-1)$$

其中， N 为应力幅对应的最大循环次数； S 为应力幅； b 为对于大多数材料，取值范围在 5~20 之间的常数； c 为常数，其值取决于材料的性质。

当应力历程是随机过程而不是固定幅值时，疲劳计算相对比较复杂困难，但已经有许多种处理方法可以解决这个问题，这里介绍其中的两种方法：①Steinberg 提出的比较简化方法，即三区间法，它广泛用于航天电子工业中；②Crandall 和 Mark 提出的更精确的方法，即基于随机振动结果的 Miner 方法。像 Miner 定律的线性累积损伤假设一样，这两种方法都是基于固定振幅的，假定应力幅循环了 n 次时，消耗了材料疲劳寿命的 n/N 部分，而其他应力水平的循环也以相同方式对材料产生部分损伤。如果应力幅 S_i 的循环次数 n_i 没有达到对应的许可次数 N_i ，那么产生的累积损伤为：

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (13-2)$$

当 $D=1$ 时，表示疲劳寿命已经耗尽，预测发生了疲劳破坏。考虑到该假设的不精确性和缺点，有时也假设累积损伤 D 为小于 1 的常数时也会发生疲劳破坏。

Crandall 和 Mark 提出的基于随机振动结果的 Miner 方法的假设前提是一个典型的窄带随机过程。随机过程中应力幅在每次循环下的大小不一致，从而对总体累积损伤的贡献也就大小不一致。假定随机过程的时刻 T 对应的总体累积损伤为 $D(T)$ ，当 $T=T_F$ 时总体损伤达到 1 并预测疲劳发生。

假定 ν_0^+ 表示单位时间内正交零点的平均数目（即频率），那么在时间 T 内循环的数目为 $\nu_0^+ T$ ，对应的总体损伤期望值为：

$$E[D(T)] = \nu_0^+ T \int_0^\infty \frac{p(a)}{N(a)} da \quad (13-3)$$

其中， $p(a)da$ 表示幅值在 a 和 $a+da$ 间的循环部分次数； $p(a)$ 为应力幅值的峰值概率密度； $N(a)$ 为幅值 a 所对应的允许循环次数。

期望的损伤是基于峰值的分布 $p(a)$ 。对于正态分布数据，峰值满足瑞利（Rayleigh）分布，这样将上式中 $p(a)$ 换成瑞利密度函数，利用 S-N 关系式替换 $N(a)$ ，那么总体损伤期望值变成：

$$E[D(T)] = \frac{\nu_0^+ T}{c} (\sqrt{2}\sigma_y)^b \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right) \quad (13-4)$$

其中， $\Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right)$ 为 χ （gamma）函数； b 与 c 为前面讲述的疲劳曲线公式中的常数。

另外，Steinberg 提出了更加简单的基于高斯分布的三区间法，它表示：

68.3% 的时间应力值在 $-1\sigma \sim +1\sigma$ 之间；

95.4%的时间应力值在 $-2\sigma \sim +2\sigma$ 之间;

99.73%的时间应力值在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间。

因而, 在利用 Miner 定律进行疲劳计算时, 可以将应力可以处理成 3 个区间:

应力区间 发生的时间

$-1\sigma \sim +1\sigma$ 68.3%的时间;

$-2\sigma \sim +2\sigma$ 27.1%的时间;

$-3\sigma \sim +3\sigma$ 4.33% 的时间;

该方法的前提是, 大于 3σ 的应力仅仅发生在 $(100-99.73) 0.27\%$ 的时间内, 假定它们不造成任何损伤。这样, 利用 Miner 定律进行疲劳计算, 总体损伤的计算公式是:

$$D = \frac{n_{1\sigma}}{N_{1\sigma}} + \frac{n_{2\sigma}}{N_{2\sigma}} + \frac{n_{3\sigma}}{N_{3\sigma}} \quad (13-5)$$

其中, $n_{1\sigma}$ 为等于或低于 1σ 水平的实际循环数目 ($0.6831 \nu_0^+ T$); $n_{2\sigma}$ 为等于或低于 2σ 水平的实际循环数目 ($0.271 \nu_0^+ T$); $n_{3\sigma}$ 为等于或低于 3σ 水平的实际循环数目 ($0.0433 \nu_0^+ T$); $N_{1\sigma}$ 、 $N_{2\sigma}$ 、 $N_{3\sigma}$ 为根据疲劳曲线查得的 1σ 、 2σ 和 3σ 应力水平分别对应许可循环的次数。

利用 1σ 、 2σ 和 3σ 应力和统计平均频率计算随机疲劳是一个有效的过程。注意, 统计平均频率等于载荷步 4 除以载荷步 3 结果的商。这样随机疲劳计算的一般过程是:

- 1) 计算感兴趣应力分量的统计平均频率 (应力速度/应力)。
- 2) 假定 68% 的时间处于 1σ 水平, $(95.73-68) 27.45\%$ 的时间处于 2σ 水平, $(99.73-95.45) 4.33\%$ 的时间处于 3σ 水平。
- 3) 基于期望 (工作) 寿命和统计平均频率, 计算 1σ , 2σ 和 3σ 水平下的循环次数。
- 4) 基于 S-N 曲线计算疲劳寿命使用系数。

注意: 上面所述只是为了说明如何利用 ANSYS 随机振动结果进行随机疲劳计算, 仅仅介绍了部分应用途径, 用户还可以根据其他随机振动疲劳计算理论进行计算, 这里不一一罗列。在 ANSYS 中不能直接实现上述计算过程。

13.6 DDAM (动力设计分析方法) 谱分析

除了以下五点外, DDAM 谱分析与单点响应谱分析是一样的。

- 所有的输入数据 (即几何尺寸、材料性质、单元实常数等) 必须采用英制单位。
- 选择 DDAM 而不是 SPRS 作为谱分析类型 (SPOPT 命令)。
- 使用 ADDAM 和 VDDAM 命令, 而不是使用 SVTYPE、SV 和 FREQ 等命令来定义谱值及其类型。使用 SED 命令指定激励的总方向。使用 ADDAM 和 VDDAM 命令定义计算系数。
- NRL 求和法 (NRLSUM 命令) 是最适用的模态合并法。模态合并处理方法与处理单点响应谱分析时是一样的。模态合并要求指定阻尼。
- 执行 ADDAM 和 VDDAM 命令时已经指定阻尼, 在求解中也就不需再定义阻尼。如果定义阻尼, 只将其用于模态合并中, 在求解过程中将被忽略。



同单点响应谱分析一样，DDAM 谱分析也是按照六大步骤进行系统地分析的。如果采用批处理方法分析，需要注意以下两点。

- 模态求解和求得 DDAM 谱解的过程可以合并到模态分析求解 (ANTYPE,MODAL) 过程中。
- 模态合并命令后，上面的第四步和第五步（即模态扩展和模态合并求解过程）可以合并到模态分析求解 (ANTYPE,MODAL 且 EXPASS, ON) 过程中去。

13.7 多点响应谱 (MPRS) 分析

除了以下六点外，多点响应谱分析与随机振动 (PSD) 分析（包括文件要求）的过程是相同的。

- 选用 MPRS 而不是 PSD 作为谱分析类型 (SPOPT 命令)。
- 此时，“PSD-频率”关系表对应谱值-频率关系。
- 各谱之间不能定义任何程度的相关性（即假定各谱之间是不相关的）。
- 只计算（相对于基础激励的）相对结果，不计算绝对结果。
- 除了 PSDCOM 的模态合并方法以外，其他所有模态合并方法都可以选用。
- 多点响应谱分析的结果是以 POST1 的命令格式写入到模态合并文件 (Jobname.MCOM) 中的。这些命令依据（求解器中模态合并命令指定的）某种方式合并最大的模态响应，最终计算出结构的总响应。总响应包括总位移，如果在模态扩展过程中要求有这些结果，那么还包括总应力、总应变和总的反作用力。在求解器中，执行模态合并命令（即 SRSS、CQC、GRP、DSUM 和 NRLSUM 命令）时 Label 项如果设置成 VELO 或 ACEL，对应的速度和加速度响应也将写入到模态合并文件中。

13.8 实例：钢架结构厂房的随机振动分析

13.8.1 工程背景

近年来，由于工程建设的快速发展，大大促进了工程力学分析和结构计算理论的发展，继而带动新型工程结构不断涌现，并随着计算机技术的突飞猛进，矩阵分析、有限单元法等新的计算方法在工程结构计算中的应用也不断成熟。同时，轻型钢结构和薄壁钢结构的出现大大减轻了结构自重和用钢量，为在中小型项目的建设利用钢架结构开辟了新的途径。现在的钢架结构都要求具有良好的抗振能力，因此，用 ANSYS 有限元分析软件对典型钢结构的随机振动特性进行分析，对于工程设计也是很有实践意义的。

13.8.2 问题的描述

1. 模型的基本参数

图 13-2 给出了钢架结构简图，钢结构厂房的立柱为工字钢 $110\text{mm} \times 70\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，立柱高度为 2.5m ；横梁为槽钢 $55\text{mm} \times 40\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，长度为 5m ；所有斜肋为角钢 L45 X 5；拱肋为截面 $55\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的梁；垂直弦长 $H=0.5\text{m}$ ；屋顶板壳厚度 $Aa=0.005\text{m}$ 。

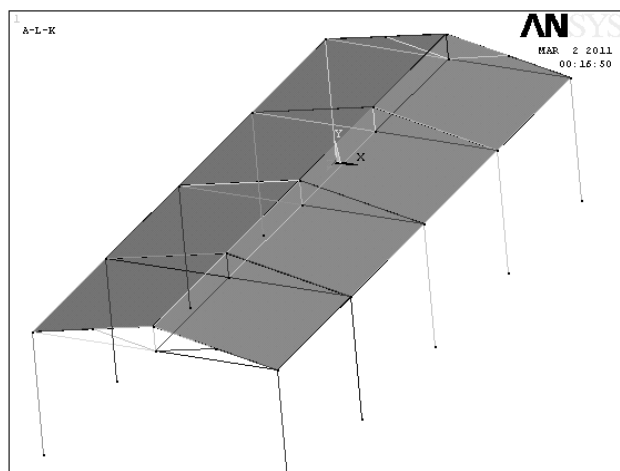


图 13-2 钢架结构简图

2. 单元选择及材料数据

对于本模型用 2 节点 Beam188 单元实现对各种型钢的建模；屋顶板壳用 Shell181 单元。所有的材料都为 Q235A 钢，杨氏模量为 $2E11\text{Pa}$ ，泊松比为 0.3，密度为 7800kg/m^3 。

3. 边界条件

立柱的底端约束使得所有自由度同时承受地震位移激励，表 13-4 给出了地震频率与激励位移对应的关系。频率单位为 Hz，位移单位为 m。

表 13-4 钢结构承受的地震谱表

频率	1.5	2.5	3.8	4.9	5.6	5.9	6.3	6.9	7.4
位移	0.01	0.016	0.029	0.021	0.006	0.02	0.015	0.013	0.003

13.8.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“steel structure”单击 OK。

2. 定义单元和属性

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Beam，然后在右边选择 2node 188 单元，单击 Apply；继续在左边选择 Beam，然后在右边选择三维 elastic 4，单击 Apply；继续在左边选择 Shell，然后在右边选择 Elastic 4node 181，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为考虑厚度（Full w/incompatible），设置关键字 K8 为输出所有层的计算结果（All layers），单击 OK。

(3) 定义实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete



在弹出的对话框中选择 Add, 在弹出的对话框中选择 Shell181, 单击 OK, 在弹出的对话框的 Shell thickness at

node I TK (I) 选项中输入 0.005。

(4) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 EX=2E11, PRXY=0.3, 单击 OK, 关闭对话框。单击 Density, 输入 DENS=7800。

3. 定义梁截面形状

(1) 定义工型梁截面形状

GUI: Main Menu | Preprocessor | Sections | Beam | Common Sections, 在弹出的 Beam Tool 面板中的输入 ID=1, 在 Sub-Type 选项中选择工型, 输入 W1=0.11m, W2=0.11m, W3=0.07, t1=t2=t3=0.005, 设置 Coarse-Fine 为 1, 单击 Apply。

(2) 定义[型梁截面形状

继续输入 ID=2, 在 Sub-Type 选项中选择[型, 输入 W1=W2=0.055, W3=0.04, t1=t2=t3=0.005, 在 Coarse-Fine 中设置 1, 单击 Apply;

(3) 定义 L 型梁截面形状

继续输入 ID=3, 在 Sub-Type 选项中选择 L 型, 输入 W1=W2=0.05, t1=t2=0.005, 设置 Coarse-Fine 为 1, 单击 Apply。

(4) 定义巨型梁界面

继续输入 ID=4, 在 Sub-Type 选项中选择矩型, 输入 B=0.055, H=0.015, Nb=5, Nh=5, 单击 OK。

4. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=Y=Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=2, X=0, Y=2.5, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=3, X=2.5, Y=3, Z=0, 单击 Apply; 按照同样的方法定义关键点 4 到 16, 每个关键点对应的坐标为 3: X=1.25, Y=2.75, Z=0; 4: X=2.5, Y=3, Z=0; 5: X=3.75, Y=2.75, Z=0; 6: X=5, Y=2.5, Z=0; 7: X=2.5, Y=2.5, Z=0; 8: X=5, Y=0, Z=0; 9: X=0, Y=0, Z=12; 10: X=0, Y=2.5, Z=12; 11: X=1.25, Y=2.75, Z=12; 12: X=2.5, Y=3, Z=12; 13: X=3.75, Y=2.75, Z=12; 14: X=5, Y=2.5, Z=12; 15: X=2.5, Y=2.5, Z=12; 16: X=5, Y=0, Z=12。

(2) 打开关键点和线编号

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Numbering

在弹出的对话框中, 勾选 Line 和 KP, 单击 OK, 关闭对话框。

(3) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line

弹出拾取对话框, 拾取关键点 1 和 2, 生成线 1, 按照同样的方法拾取关键点 2 和 3, 3 和 4, 4 和 5, 5 和 6, 6 和 8, 2 和 7, 7 和 6, 3 和 7, 4 和 7, 5 和 7, 6 和 14, 4 和 12, 2 和 10, 9 和 10, 10 和 11, 11 和 12, 12 和 13, 13 和 14, 10 和 14, 11 和 15, 12 和 15, 13

和 15, 14 和 16, 7 和 15。

(4) 定义面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L4, L5, L13, L18, L19, L12, 单击 Apply; 继续拾取线 L3, L2, L14, L16, L17, L13, 单击 OK。

(5) 在关键点之间定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP between KPs

弹出拾取对话框, 拾取关键点 16 和 8, 单击 Apply, 在弹出对话框的 Value Type 选项中选择 RATI, 在 Value 中输入 0.25, 单击 Apply; 拾取关键点 16 和 8, 单击 Apply, Value 设置为 0.5, 单击 Apply; 拾取关键点 16 和 8, 单击 Apply, Value 设置为 0.75, 单击 Apply; 使用同样的操作方法在关键点 1 和 9 之间定义三个关键点, Value 值分别为 0.25, 0.5 和 0.75。

(6) 分割面和线

1) 移动工作平面。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

在弹出对话框的 Snaps X, Y, Z Offsets 选项中输入 0, 3, 0, 单击 Apply。

2) 分割面。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by WrkPlane

弹出拾取对话框, 拾取面 A1 和 A2, 单击 OK。

3) 分割线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line by WrkPlane

弹出拾取对话框, 拾取线 L26, 单击 OK。

4) 移动工作平面

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

在弹出的对话框中的 Snaps X, Y, Z Offsets 选项中输入 0, 3, 0, 单击 Apply。

5) 分割面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by WrkPlane

弹出拾取对话框, 拾取面 A4 和 A5, 单击 OK。

6) 分割线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line by WrkPlane

弹出拾取对话框, 拾取线 L33, 单击 OK。

7) 移动工作平面

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

在弹出的对话框中的 Snaps X, Y, Z Offsets 选项中输入 0, 3, 0, 单击 Apply。

8) 分割面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by WrkPlane





弹出拾取对话框，拾取面 A6 和 A7，单击 OK。

9) 分割线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line by WrkPlane

弹出拾取对话框，拾取线 L32，单击 OK。

(7) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line

弹出拾取对话框，拾取关键点 33 和 34，生成线，单击 Apply，按照同样的操作方法拾取关键点 31 和 34，34 和 32，29 和 30，30 和 28，27 和 30，25 和 26，24 和 26，23 和 26，19 和 32，18 和 28，17 和 24，22 和 33，21 和 29，20 和 25。

5. 网格划分

(1) 显示线

GUI: Utility Menu | Plot | Lines

(2) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool。

(3) 设定网格划分尺寸

选择网格划分工具中的 Lines | Set，弹出拾取对话框，拾取线 15，25，54，55，56，6，1，59，58，57，单击 Apply，在弹出对话框的 NDIV 中输入 10，含义为每条线划分 10 个单元，单击 Apply；返回拾取对话框，继续拾取线，20，21，43，41，47，37，32，44，42，38，40，33，45，36，35，48，49，31，40，34，26，39，30，29，52，13，51，28，14，27，12，8，7，单击 Apply，在弹出对话框的 NDIV 中输入 12，单击 Apply；返回拾取对话框，继续拾取线，16，17，22，23，24，18，19，46，50，53，10，2，3，9，4，11，5，在弹出对话框的 NDIV 中输入 12，单击 OK。

(4) 划分屋顶网格

1) 设置单元属性

单击网格划分工具面板上单元属性 (Element Attributes) 中的 Set 选项，弹出网格属性对话框，选择对话框中的 TYPE 即单元属性为 3 Shell，MAT=1，REAL=1，SECNUM=No Section，单击 OK。

2) 划分网格

单击网格划分工具中的 Mesh 选项，弹出拾取对话框，单击 Pick All。

(5) 划分立柱网格

1) 设置单元属性

单击网格划分工具面板上单元属性 (Element Attributes) 中的 Set 选项，弹出网格属性对话框，选择对话框中的 TYPE 即单元属性为 Beam188，MAT=1，SECNUM=1，单击 OK。

2) 设置划分网格类型

设置网格划分工具面板中的 Mesh 选项为 Lines。

3) 划分网格

单击网格划分工具中的 Mesh 选项，弹出拾取对话框，拾取线 15，25，54，55，56，6，1，59，58，57，单击 OK。

(6) 划分横梁网格

1) 设置单元属性

单击网格划分工具面板上单元属性 (Element Attributes) 中的 Set 选项, 弹出网格属性对话框, 选择对话框中的 TYPE, 即单元属性为 Beam188, MAT=1, SECNUM=2, 单击 OK。

2) 划分网格

单击网格划分工具中的 Mesh 选项, 弹出拾取对话框, 拾取线 20, 21, 38, 32, 47, 45, 49, 48, 39, 52, 51, 14, 7, 8, 单击 OK。

(7) 划分斜肋网格

1) 设置单元属性

单击网格划分工具面板上单元属性 (Element Attributes) 中的 Set 选项, 弹出网格属性对话框, 选择对话框中的 TYPE 即单元属性为 Beam188, MAT=1, SECNUM=3, 单击 OK。

2) 划分网格

单击网格划分工具中的 Mesh 选项, 弹出拾取对话框, 拾取线 22, 24, 9, 11, 单击 OK。

(8) 划分拱肋网格

1) 设置单元属性

单击网格划分工具面板上单元属性 (Element Attributes) 中的 Set 选项, 弹出网格属性对话框, 选择对话框中的 TYPE, 即单元属性为 Beam4, MAT=1, SECNUM=4, 单击 OK。

2) 划分网格

单击网格划分工具中的 Mesh 选项, 弹出拾取对话框, 拾取 16, 17, 18, 19, 23, 42, 37, 41, 46, 33, 31, 35, 50, 26, 13, 29, 53, 27, 2, 3, 4, 5, 10, 单击 OK。

6. 模态求解

(1) 设置求解条件

1) 设置求解类型为模态分析。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Modal。

2) 设置模态分析选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出模态分析 (Model Analysis) 对话框, 设置模态提取方法为 Block Lanczos; 在 No. of modes to extract 选项中设置模态提取阶数为 15, 在 NMODE No. of modes to expand 选项中设置模态提取阶数为 15, 勾选 Calculate elem results, 单击 OK, 保持弹出 Block Lanczos 方法对话框的默认设置, 单击 OK。

(2) 设置边界条件

约束立柱底端的所有自由度。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取立柱的 10 个底端节点, 单击 OK。

(3) 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。





7. 扩展模态

(1) 设置求解类型为模态分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Modal。

(2) 扩展模态

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | ExpansionPass | Single Expand | Expand Modes

在弹出对话框的 NMODE 选项中输入 15, 含义为扩展 15 阶模态, 勾选 Calculate elem results, 其他保持默认值, 单击 OK。

(3) 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。

8. 进行谱解

(1) 设置求解条件

1) 设置求解类型为谱分析。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Spectrum, 单击 OK。

2) 设置谱分析选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出谱分析对话框, 设置谱分析类型为 PSD, 在选项 No of modes for solu 中输入 15, 勾选 Calculate elem stresses, 单击 OK。

(2) 施加地震激励谱

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Spectrum | BasePSD | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取立柱底端的 10 个节点, 单击 OK, 在弹出的对话框中设置 Excitation direction 选项为 Nodal X, 单击 OK。

(3) 设置谱载荷步

1) 设置 PSD。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Settings

在弹出对话框中设置 Type of response spct 为 Displacement, 单击 OK。

2) 定义激励频率与位移幅值关系

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | PSD vs Freq

保持弹出对话框的默认值单击 OK, 依次输入 FREQ1 到 FREQ9 的值为 1.5、2.5、3.8、4.9、5.6、5.9、6.3、6.9、7.4; 依次输入 PSD1 到 PSD9 的值为 0.01、0.016、0.029、0.021、0.006、0.02、0.015、0.013、0.003 单击 OK。

3) 计算参与系数

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Calculate PF

保持弹出对话框的设置, 单击 OK。

4) 设置 PSD 计算控制

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Calc Controls

设置弹出对话框中 DISP, VELO 和 ACEL 选项都为 Absolute, 单击 OK。

(4) 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。

9. 合并模态

(1) 设置求解类型为谱分析。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Spectrum, 单击 OK。

(2) 模态合并

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | PSD | Mode Combin

在弹出的对话框的 SIGNIF 选项中输入 0.002, COMODE 选项输入 15, 单击 OK。

(3) 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。忽略警告, 单击 Yes。

10. 后处理

(1) 进入时间历程后处理器

GUI: Main Menu | TimeHist PostPro

选择弹出对话框中的 Create response power spectral density 选项, 单击 OK。

(2) 观察指定节点的位移与频率的关系图

1) 单击时间历程变量观察器中的 , 在弹出的对话框 Result Item 选项中选择 DOF Solution | Y-Component of displacement, 单击 OK, 弹出拾取线号为 15 立柱的顶端, 单击 OK。

2) 选择时间历程变量观察器变量列表中的 UX_2, 然后单击 , 则可观察到其位移幅值和频率的关系如图 13-3 所示。

(3) 观察 PSD 响应

1) 选择变量列表中的 UX_2, 单击时间历程变量观察器中的 RPSD 按钮, 在弹出的对话框中的左边下拉选项中选择 UX_2, 选择 Type of response PSD to be calculated 选项中的 Displacement, 选择 Calculate response PSD with respect to 选项中的 Absolute, 单击 OK。在 Calculator 下方输入 PSD 的名字为 Dis, 单击 enter。

2) 选择时间历程变量观察器中变量列表中的 UX_2, 然后单击 , 则可观察到其位移 PSD 和频率的关系如图 13-4 所示。

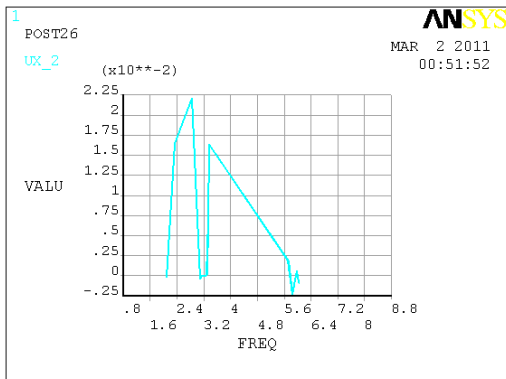


图 13-3 立柱顶点的位移与频率的关系

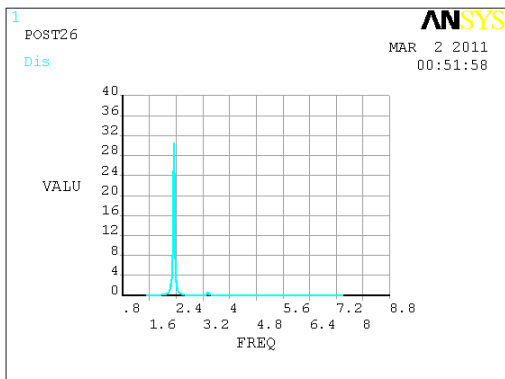


图 13-4 立柱顶点的位移 PSD 与频率的关系



第 14 章 瞬态动力学分析

14.1 瞬态动力学分析的概念

瞬态动力学分析是用于确定承受任意的随时间变化载荷结构的动力学响应的一种方法。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的随时间变化的位移、应变、应力及力。载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较重要。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态动力学分析。

14.2 瞬态动力学分析前的准备工作

瞬态动力学分析比静力学分析更复杂，因为按工程“时间”计算，瞬态动力学分析通常要占用更多的计算机资源。可以先做如下一些预备工作以理解问题的物理意义，从而节省大量资源。

首先分析一个较简单模型。例如创建梁、质量体和弹簧组成的模型，以最小的代价深入地理解动力学认识，简单模型更有利于全面了解所有的动力学响应所需要的。

如果分析包括非线性特性，建议首先利用静力学分析掌握非线性特性对结构响应的影响规律。在某些场合，动力学分析中是没必要包括非线性特性的。

掌握结构动力学特性。通过模态分析，计算结构的固有频率和振型，了解这些模态被激活时结构的响应状态。同时，固有频率对计算正确的积分时间步长十分有用。

14.3 瞬态动力学分析的理论基础

瞬态动力学平衡方程：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (14-1)$$

其中， $[M]$ 为质量矩阵； $[C]$ 为阻尼矩阵； $[K]$ 为刚度矩阵； $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量； $\{\dot{u}\}$ 为节点速度向量； $\{u\}$ 为节点位移向量。

在任意给定的时间 t ，这些方程可以看做是一系列考虑了惯性力 $[M]\{\ddot{u}\}$ 和阻尼力 $[C]\{\dot{u}\}$ 的静力学平衡方程。ANSYS 里使用两种方法求解方程 (14-1)：向前差分时间积分和 Newmark 积分（包括将之改进后的 HHT 算法）。向前差分方法适用于求解显式的瞬态分析。Newmark 和 HHT 方法使用隐式方法来求解瞬态问题。

Newmark 求解方法的无条件稳定必须满足：

$$\alpha \dots \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + \delta \right)^2, \quad \delta \dots \frac{1}{2}, \quad \frac{1}{2} + \delta + \alpha > 0 \quad (14-2)$$

Newmark 参数根据下式输入:

$$\alpha = \frac{1}{4}(1+\gamma)^2, \quad \delta = \frac{1}{2} + \gamma \quad (14-3)$$

其中, γ 为振幅衰减因子。

无条件稳定也可以表述为 $\delta = \frac{1}{2} + \gamma$, $\alpha \dots \frac{1}{4}(1+\gamma)^2$ 并且 $\gamma \dots 0$ 。因此只要 $\gamma \dots 0$, 则求解就是稳定的。对于压电分析将参数设置为 $\alpha = 0.25$, $\delta = 0.5$ 并且 $\theta = 0.5$ 。通常情况下衰减因子 $\gamma = 0.005$ 。当 $\gamma = 0$ 时 (即 $\alpha = \frac{1}{4}$, $\delta = \frac{1}{2}$ 时) Newmark 方法为平均加速度法。由于平均加速度法在位移幅值误差方面不产生任何数值阻尼。如果其他方面也没有阻尼, 缺乏数值阻尼在高频结构计算中会产生不可接受的数值噪声。因此需要有一定水平的数值阻尼并且期望通过设置 $\gamma > 0$ 来实现。

因此, ANSYS 提供了 HHT 方法, 该方法具备以下特征: 在高频下引进数值阻尼不会降低求解精度, 在低频下不会产生过多的数值阻尼。从而达到瞬态动力学计算的需要。

在 HHT 方法中通过两个连续步长的线性组合来实现瞬态动力学的平衡方程。 α_m 和 α_f 是两个额外的参数, 在给定幅值衰减因子 γ 时, 其余四个参数为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{4}(1+\gamma)^2 \\ \delta = \frac{1}{2} + \gamma \\ \alpha_f = 0 \\ \alpha_m = -\gamma \end{cases} \quad (14-4)$$

ANSYS 中提供了三种方法求解 (14-1) 式, 下面将为读者详细加以介绍。

14.4 三种求解方法

瞬态动力学分析可采用三种方法: 完全 (Full) 法、缩减 (Reduced) 法及模态叠加法 (也叫振型叠加法)。

14.4.1 完全法

完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应。它是三种方法中功能最强的, 允许包括各类非线性特性 (如塑性、大变形、大应变等)。

注意: 如果并不想包括任何非线性, 应当考虑使用另外两种方法中的一种。这是因为完全法是三种方法中开销最大的一种。

1. 优点

- 1) 容易使用, 不必关心选择主自由度或振型。
- 2) 允许各种类型的非线性特性。



- 3) 采用完整矩阵, 不涉及质量矩阵近似。
 - 4) 一次分析就能得到所有的位移和应力。
 - 5) 允许施加所有类型的载荷: 节点力、外加的 (非零) 位移 (不建议采用) 和单元载荷 (压力和温度), 还允许通过 TABLE 数组参数指定表边界条件。
 - 6) 允许在实体模型上施加的载荷。
2. 缺点
- 它比其他方法开销大。

14.4.2 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型 (特征值) 乘上因子并求和来计算结构的响应。此法是 ANSYS/Professional 程序中唯一可用的瞬态动力学分析法。

1. 优点

- 1) 对于许多问题, 它比缩减法或完全法更快, 开销更小。
- 2) 只要模态分析不采用 PowerDynamics 方法, 通过 LVSCALE 命令将模态分析中施加的单元载荷引入到瞬态分析中。
- 3) 允许考虑模态阻尼 (阻尼比作为振型号的函数)。

2. 缺点

- 1) 整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定, 不允许采用自动时间步长。
- 2) 唯一允许的非线性是简单的点点接触 (即间隙条件)。
- 3) 不能施加强制位移。

14.4.3 缩减法

缩减法通过采用主自由度及缩减矩阵压缩问题规模。在主自由度处的位移被计算出来后, ANSYS 可将解扩展到原有的完整自由度集上。

1. 优点

比完全法快且开销小。

2. 缺点

- 1) 初始解只计算主自由度的位移, 第二步进行扩展计算, 得到完整空间上的位移、应力和力。
- 2) 不能施加单元载荷, 但允许施加加速度。
- 3) 所有载荷必须加在用户定义的主自由度上。
- 4) 整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定, 不允许用自动时间步长。
- 5) 唯一允许的非线性是简单的点-点接触。

14.5 完全法瞬态动力学分析

14.5.1 建造模型

在这一步中, 首先要指定文件名和分析标题, 然后用 PREP7 定义单元类型、单元实常

数、材料性质及几何模型等。这些工作在大多数分析中是相似的。

1. 对于完全法瞬态动力学分析，注意以下两点：

- 1) 可以用线性和非线性单元。
- 2) 必须指定杨氏模量 EX、某种形式的刚度和密度 DENS 或某种形式的质量。材料特性可以是线性的或非线性的、各向同性的或各向异性的、恒定的或和温度有关的。

2. 划分合理的网格密度

- 1) 网格密度应当密到足以确定感兴趣的最高阶振型。
- 2) 对应力或应变感兴趣的区域比只考察位移的区域的网格密度要细一些。
- 3) 如果要包含非线性特性，网格密度应当密到足以捕捉到非线性效应。例如，塑性分析要求在较大塑性变形梯度的区域有合理的积分点密度（即要求有较密的网格）。
- 4) 如果对波传播效果感兴趣，例如，一根棒的末端准确落地，网格密度应当达到足以计算出波动的程度。基本准则是沿波的传播方向每一波长至少有 20 个单元。

14.5.2 建立初始条件

在执行完全法瞬态动力学分析之前，用户需要正确理解如何建立初始条件和正确使用载荷步。

瞬态动力学分析顾名思义是包含时间函数的载荷的分析。为了定义这样的载荷，用户需要将载荷-时间关系曲线划分成合适的载荷步。载荷-时间曲线上的每个“拐角”对应一个载荷步，如图 14-1 所示。

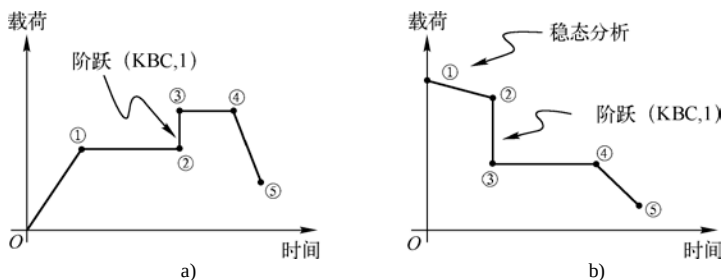


图 14-1 载荷-时间关系曲线

第一个载荷步通常被用来建立初始条件，然后为第二和后继瞬态载荷步施加载荷并设置载荷步选项。对于每个载荷步，都要指定载荷值和时间值，同时指定其他的载荷步选项（如采用阶梯加载还是斜坡加载方式施加载荷，以及是否使用自动时间步长等），然后，将每个载荷步写入载荷步文件，最后一次性求解所有载荷步。

施加瞬态载荷的第一步是建立初始条件（即零时刻时的情况）。瞬态动力学分析要求给定两种初始条件，因为要求解的方程是两阶的：初始位移（ u_0 ）和初始速度（ $\dot{u}_0$ ）。如果没有进行特意设置， u_0 和 $\dot{u}_0$ 都被假定为 0。初始加速度（ $\ddot{u}_0$ ）一般假定为 0，但可以通过在一个小的时间间隔内施加合适的加速度载荷来指定非零的初始加速度。



1. 零初始位移和零初始速度

零初始位移和零初始速度是默认的初始条件，即如果 $u_0 = \dot{u}_0 = 0$ ，则不需要指定任何件。在第一个载荷步中可以加上对应于载荷-时间关系曲线的第一个拐角处的载荷。

2. 非零初始位移及/或非零初始速度

可以用 IC 命令设置这些初始条件。

命令：IC

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define

注意：不要定义矛盾的初始条件。例如，在某单一自由度处定义了初始速度，则在所有其他自由度处的初始速度将为 0.0，潜在地会产生冲突的初始条件。在大多数情形下要在模型的每个未约束自由度处定义初始条件。如果这些条件对各自由度是不同的，那么就可以较容易地明确指定初始条件。

3. 零初始位移和非零初始速度

非零速度是通过在结构上需指定速度的部分加上小时间间隔上的小位移来实现的。例如 $u_0 = 0.25$ ，可以通过在时间间隔 0.004 内加上 0.001 的位移来实现，命令流如下：

TIMINT,OFF	!关闭时间积分效应
D,ALL,UY,.001	!在 Y 方向施加一个小位移 0.001
TIME,.004	!Y 方向初始速度=0.001/0.004=0.25
LSWRITE	!写入载荷步文件 (Jobname.S01)
DDEL,ALL,UY	!删除刚才的强制施加位移
TIMINT,ON	!打开时间积分效应按钮

4. 非零初始位移和非零初始速度

和上面的情形相似，不过施加的位移是真实数值而非“小”数值。比如，若 $u_0 = 1.0$ 且 $u_0 = 2.5$ ，则应当在时间间隔 0.4 内施加一个值为 1.0 的位移：

TIMINT,OFF	!关闭施加积分效应
D,ALL,UY,1.0	!定义 Y 方向初始位移 1.0
TIME,.4	!初始速度=1.0/0.4 = 2.5
LSWRITE	!写入载荷步文件 (Jobname.S01)
DDELE,ALL,UY	!删除强制施加位移
TIMINT,ON	!打开时间积分效应

5. 非零初始位移和零初始速度

需要用两个子步 (NSUBST,2) 来实现，所加位移在两个子步间是阶跃变化的[KBC,1]。如果位移不是阶跃变化的或只用一个子步，所加位移将随时间变化，从而产生非零初速度。下面的例子演示了如何施加初始条件 $u_0 = 1.0$ ， $\dot{u}_0 = 0$ ：

TIMINT,OFF	!关闭时间积分效应
D,ALL,UY,1.0	!初始位移= 1.0
TIME,.001	!定义一个小的时间间隔
NSUBST,2	!定义两个子步
KBC,1	!定义载荷类型为阶跃载荷

LSWRITE	!写入载荷步文件(Jobname.S01)
!进入瞬态求解	
TIMINT,ON	!打开时间积分效应
TIME,...	! Realistic time interval
DDELE,ALL,UY	!删除强制施加载荷
KBC,0	!定义载荷类型为斜坡载荷

6. 非零初始加速度

可以近似地通过在小的时间间隔内指定要加的加速度[ACEL]实现。例如，施加初始加速度为 9.81 的命令如下：

ACEL,,9.81	!定义初始 Y 方向加速度
TIME,,.001	!定义小时间间隔
NSUBST,2	!定义两个子步
KBC,1	!定义载荷类型为阶跃载荷
LSWRITE	!写入载荷步文件 (Jobname.S01)
!进入瞬态求解	
TIME,...!	
DDELE,...	!删除强制施加载荷
KBC,0	!定义载荷类型为斜坡载荷

14.5.3 设置求解控制

设置求解控制涉及定义分析类型、分析选项以及载荷步设置。执行完全法瞬态动力学分析，可以使用求解控制对话框进行这些选项的设置。求解控制对话框提供大多数结构完全法瞬态动力分析所需要的默认设置，即用户只需要设置少量的必要选项。完全法瞬态动力分析建议采用求解控制对话框，本节将详细进行介绍。

如果完全瞬态动力分析需要初始条件，必须在分析的第一个载荷步进行，然后反复利用求解控制对话框为后续荷步设置载载荷步选项。

如果不喜欢使用求解控制对话框（Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Control），仍然可以沿用标准 ANSYS 求解命令及其对应的菜单路径（Main Menu | Solution | Unabridged Menu | option）。

1. 使用求解控制对话框

选择菜单路径 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Control，就可弹出求解控制对话框。下面将详细讲述求解控制对话框各页片夹中的选项。

2. 使用基本页片夹

求解控制对话框包含 5 个页片夹，各页片夹中可以分组设置控制选项，并将大多数基本控制选项设置在第一个页片夹中，其他页片夹用来提供更高级的控制选项。通过各页片夹，可以轻松控制求解的过程。图 14-2 给出了瞬态求解的 Basic 选项卡。

打开求解控制对话框，基本页片夹总是处于激活状态的，只包含了 ANSYS 分析所需要设置的最少选项。如果基本页片夹已经满足控制要求，其他高级选项只有默认状态不符合求解控制要求时才需要进一步进行调整。一旦单击任何页片夹中的 OK 按钮，所有求解控制对话框中的选项设置都将定义到 ANSYS 数据库中，同时关闭求解控制对话框。

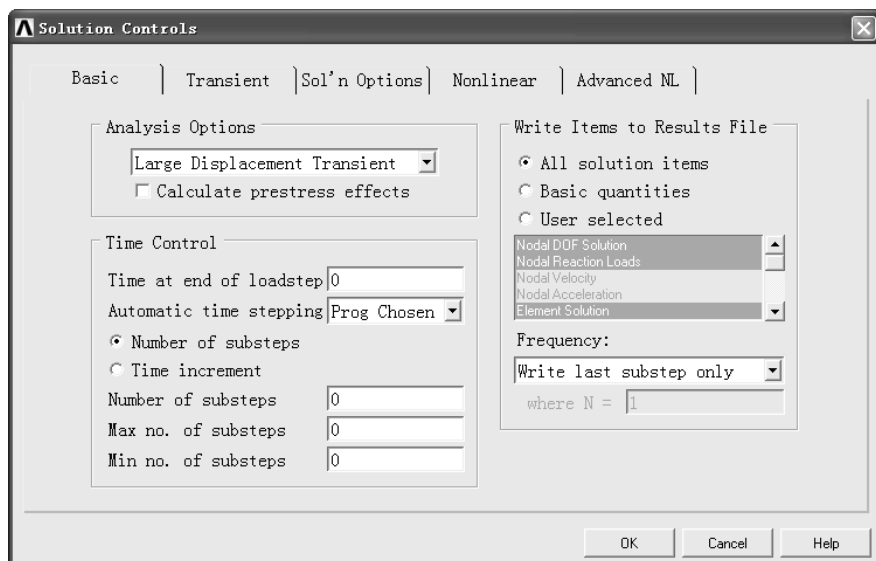


图 14-2 瞬态求解 Basic 面板

在瞬态动力学中，这些选项的特殊考虑有如下几点。

1) 当设置分析选项 (Analysis Options) 时，如果执行一个新分析时希望忽略大位移效应 (如大变形、大转角和大应变)，就应选择小位移瞬态 (Small Displacement Transient)。如果希望考虑大变形或大应变，就应选择大位移瞬态 (Large Displacement Transient)。如果希望重新启动一个失败的非线性分析，再如前面完成了一个静态预应力分析或完全法瞬态动力分析，然后希望继续下面的时间历程计算，就可以选择重新启动当前分析 (Restart Current Analysis)。

2) 当设置时间控制 (Time Control) 时，记住该载荷步选项可以基于结构的响应增大或减小积分时间步长。使用 Time at end of loadstep 设置载荷步计算的时间结束，使用 Auto time stepping 设置自动时间步类型，对于多数问题，建议打开自动时间步长与积分时间步长的上下限。通过时间增量 (Time increment) 和计算子步数量 (Number of substeps) 指定积分步长上下限，有助于限制时间步长的波动范围，默认值为不打开自动时间步长。Number of substeps 和 Time increment 是载荷步选项，用于指定瞬态分析积分时间步长。积分时间步长是运动方程时间积分中的时间增量。时间积分增量可以直接或间接指定 (即通过子步数指定)。时间步长的大小决定求解的精度：它的值越小，精度就越高。使用时应当考虑多种因素，以便计算出一个好的积分时间步长，详情参见积分时间步长章节。

3) 当设置文件输出 (Write Items to Results File) 时，应记住下面的注意事项。

在完全法瞬态动力分析时，默认状态下只有最后子步 (时间点) 写入结果文件 (Jobname.RST)，为了将所有子步写入，需要设置所有子步的写入频率 (Write every substep)。同时，默认时只有 1 000 个结果序列能够写入结果文件。如果超过这个数目，程序将认为出错终止。使用命令 /CONFIG ,NRES 可以增大限制数。

3. 使用瞬态页片夹

利用瞬态页片夹可以设置其中的瞬态动力选项。有关设置这些选项的具体信息，可以打开求解控制对话框，选择瞬态页片夹，在其中查看，如图 14-3 所示。

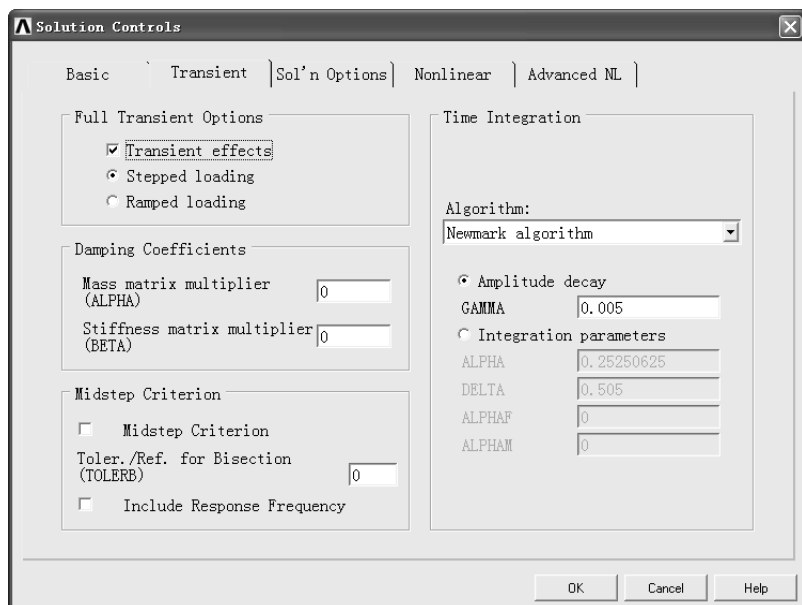


图 14-3 瞬态求解的 Transient 面板

(1) 设置瞬态分析完全法选项 (Full Transient Options)

1) 设置瞬态效应或时间积分效应 (Transient effects)，勾选后表示考虑瞬态效应，不勾选表示关闭瞬态效应。

2) 设置载荷类型

阶跃载荷 (Stepped loading) 和斜坡载荷 (Ramped loading)

(2) 设置阻尼系数 (Damping Coefficients)

质量阻尼 (ALPHAD) 和刚度阻尼 (BETAD) 是动力载荷步选项，用于指定阻尼。大多数结构中都存在某种形式的阻尼，必须在分析中进行考虑。

(3) 设置时间积分 (Time Integration) 方法

求解方法为 Newmark 方法和 HHT 方法，通过设置振幅阻尼因子 (Amplitude decay) 或积分参数来控制算法。默认值为采用恒定的平均值加速度积分算法。

4. 使用求解选项页片夹

求解选项页片夹用于完全法瞬态分析的具体设置中一致。

5. 使用非线性页片夹

非线性页片夹选项用于完全法瞬态分析的具体设置。

6. 使用高级非线性页片夹

除弧长法选项外，其他高级非线性页片夹选项均可以用于完全法瞬态分析，设置方法与静力分析完全一致。

14.5.4 设置其他求解选项

还有一些选项并不出现在求解控制对话框中，因为他们很少被使用，而且默认值很少需要调整。ANSYS 提供有相应的菜单路径用于设置它们。



1. 应力刚化效应

利用 SSTIF 命令可以使包括 18X 家族单元在内的一些单元包含应力刚化效应。默认时, 如果几何大变形 (NLGEOM) 设置为 ON, 则应力刚化效应为打开。在一些特殊条件下, 应当关闭应力刚化效应。

1) 应力刚化仅仅用于非线性分析。如果执行线性分析 (NLGEOM ,OFF), 应当关闭应力刚化效应。

2) 在分析之前, 应当预计机构不会因为屈曲 (分岔, 突然穿过) 而破坏。

一般情况下, 包含应力刚化效应能够加速非线性收敛特性。记住上述要点, 在某些特殊计算中出现收敛困难时, 可以关闭应力刚化效应, 例如局部失效。

命令: SSTIF

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

2. 牛顿-拉普森选项

该选项只用于非线性分析, 指定求解过程中切线矩阵修正的频率, 允许的取值有: 程序选择 Program-chosen (默认)、完全法 Full、修正法 Modified、初始刚度法 (Initial stiffness) 和完全非对称求解法 (Full with unsymmetric matrix)。

命令: NROPT

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Options

3. 预应力效应

在分析中可以包含预应力效应, 需要上一次静力或瞬态分析的单元文件。

命令: PSTRES

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Type | Analysis Options

4. 阻尼选项

可以使用该载荷步选项定义阻尼。大多数结构中都存在某种形式的阻尼, 必须在分析中考虑进去。除在求解控制对话框中设置 ALPHAD 和 BETAD 阻尼外, 还可以用瞬态完全法瞬态动力分析设置以下阻尼。

1) 材料相关 beta 阻尼 (MP, DAMP)。

2) 单元阻尼 (COMBIN7 等)。

可以利用下面方法定义 MP 阻尼。

命令: MP,DAMP

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Change Mat Props | Material Models | Structural | Damping

5. 质量矩阵模式

该分析选项用于指定集中质量矩阵模式。对于大多数应用, 建议采用默认模式。但是, 对于某些薄壁结构 (如纤细梁或薄壳等), 集中质量近似模式能够提供更好的结果。并且, 集中质量近似模式消耗计算机时间最少, 内存要求最小, 使用方法如下。

命令: LUMPM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Type | Analysis Options

6. 蠕变准则

该非线性载荷步选项用于对自动时间步长指定蠕变准则。

命令: CRPLIM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Creep Criterion

14.5.5 施加载荷

现在用户可以施加载荷了,瞬态求解的载荷和静力学施加载荷类型一样。除此之外,在瞬态求解中,用户可以施加惯性载荷。除惯性载荷外,速度载荷和加速度载荷以及其他载荷也可以施加载荷到实体模型或有限元模型上。用户还可以施加与时间相关的载荷。

14.5.6 存储当前载荷步的载荷配置

如建立初始条件中所述,需要针对载荷-时间曲线的每个拐点进行施加载荷并存储载荷配置到各自的载荷步文件。可能需要有一个额外的延伸到载荷曲线上最后一个时间点之外的载荷步,以考察在瞬态载荷施加后结构的响应。

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

14.5.7 针对每个载荷步重复

定义完全法瞬态动力分析的其他载荷步,只要重复 14.5.3 节的步骤 6,重新设置必须的求解控制和选项、施加载荷和将载荷配置写进文件即可。

载荷步文件举例如下:

TIME,...	!第一个瞬态求解结束时间
Loads...	!在该时间内时间施加载荷
KBC,...	!定义载荷增长方式
LSWRITE	!写入载荷步文件
TIME,...	!第二个瞬态求解结束时间
Loads...	!在该时间内时间施加载荷
KBC,...	!定义载荷增长方式
LSWRITE	!写入载荷步文件

14.5.8 存储数据库备份文件

将数据库保存到备份文件,这样在重新进入 ANSYS 程序后用命令 RESUME 便可恢复以前的模型。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

14.5.9 开始瞬态求解

可使用下列方法中的一种进行求解:

命令: LSSOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | From LS Files



其他生成和求解多步载荷的方法（array parameter 法和 multiple SOLVE 法）。

14.5.10 退出求解器

可使用下列方法中的一种退出求解器：

命令：FINISH

GUI：关闭 Solution 菜单

14.5.11 观察结果

瞬态动力学分析生成的结果保存在结构分析结果文件 Jobname.RST 中，所有数据都是时间的函数，其中包含下列数据。

1. 基本数据

节点位移（UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ）。

2. 派生数据

1) 节点和单元应力。

2) 节点和单元应变。

3) 单元力。

4) 节点反力。

3. 后处理器

可以使用时间历程后处理器 POST26 或通用后处理器 POST1 来观察这些结果。

1) POST26 用于观察模型中指定点处随时间变化的结果。

2) POST1 用于观察指定时间点整个模型的结果。

4. 注意要点

1) 用 POST1 或 POST26 观察结果时，数据库中必须包含与求解模型相同的模型（必要时用 RESUME 命令）。

2) 必须存在有效的结果文件 Jobname.RST。

注意：如果指定的时刻没有可用结果，得到的结果将是和该时刻相距最近的两个时间点对应结果之间的线性插值。

14.6 模态叠加法瞬态动力分析

模态叠加法通过乘以放大系数后的振型叠加求和来计算结构的动力学响应。使用这种方法的过程由五个主要步骤组成：①建造模型；②获取模态解；③获取模态叠加法瞬态分析解；④扩展模态叠加解；⑤观察结果。

14.6.1 建造模型

模态叠加法瞬态动力分析的建立模型与完全法一致。

14.6.2 获取模态解

模态分析中已经介绍过模态分析的方法，这里必须注意以下几点。

- 模态提取法应为子空间法，即分块 Lanczos 法（默认）、缩减法、子空间法、PowerDynamics 法或 QR 法（非对称法或阻尼法不能用于模态叠加法）。另外，PowerDynamics 法无法创建载荷矢量。
- 务必提取出可能对动力学响应有贡献的所有模态。
- 如果采用缩减法提取模态，则一定要在那些定义了力和间隙条件的节点处指定主自由度。
- 如果使用 QR 法提取模态，必须在前处理或模态分析过程中指定所需阻尼（在模态叠加法瞬态动力学分析中指定的阻尼将被忽略）。此时，可以指定 ALPHAD、BETAD、MP、DAMP 或单元阻尼；不能指定 DMPRAT 和 MDAMP。
- 如果有位移约束，应将其指定。如果约束是在模态叠加法的瞬态分析求解过程中指定的而不是在模态分析求解中指定，这些约束将被忽略。
- 如果在瞬态动力学分析中需要单元载荷，则必须在模态分析中施加它们。这些载荷在模态分析中将被忽略，但程序会计算出一个载荷向量并将其写入振型文件（Jobname.MODE），然后可以在瞬态分析中应用这个载荷向量。
- 模态叠加法不要求扩展模态。
- 在模态分析与瞬态分析之间不能改变模型数据。

14.6.3 获取模态叠加法瞬态分析解

在这一步中，程序利用从模态分析得到的振型来计算瞬态响应。

1. 注意要点

- 1) 振型文件（Jobname.MODE）必须存在。
- 2) 数据库中必须包含和模态分析所用模型相同的模型。

2. 获取模态叠加法瞬态分析解

获取模态叠加法瞬态动力学分析解的步骤如下：

(1) 进入 SOLUTION

命令：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

(2) 定义分析类型和分析选项

除以下差别外，该步骤与完全法中的分析选项基本相同。

1) 不能使用求解控制对话框定义模态叠加法瞬态分析类型和分析设置。不能使用求解控制对话框定义模态叠加法瞬态分析的分析类型和分析设置，而应当利用标准序列的 ANSYS 求解命令和相应菜单进行设置。

2) 不能使用重启动。

3) 选择模态叠加法。



4) 一旦指定模态叠加法瞬态分析, 对应的求解菜单就会出现。求解菜单可能处于压缩或展开状态, 这完全取决于上次 ANSYS 求解的菜单状态。压缩菜单仅仅包含模态叠加法瞬态分析的有效选项和(或)建议选项。如果处于压缩菜单状态, 当希望访问其他求解选项时, 可以选择求解器中的“Unabridged Menu”(展开)菜单。

5) 指定准备用于求解的模态数 (TRNOPT)。这个数目决定了瞬态分析解的精度。至少应当包含预计将对动力学响应有影响的所有模态。例如, 如果希望激活较高阶频率, 指定的模态数应当包括较高阶模态。默认情形下采用在模态分析中计算出的所有模态。

6) 如果不需要使用刚体(零频率)模态, 可以使用 TRNOPT 命令的 MINMODE 强制跳过它们。

7) 不可使用非线性选项: 大变形、应力刚化等。

(3) 如果有间隙条件, 就定义间隙

间隙条件只可以指定在两个主节点之间或主节点与基础之间。在使用非缩减法时, 一个主自由度就是一个非约束的激活自由度。关于间隙条件在缩减法中有详细介绍。

命令: GP

GUI: Main Menu | Solution | Dynamic Gap Cond | Define

(4) 在模型上施加载荷

在模态叠加法瞬态动力学分析中有下列加载限制。

1) 可施加的载荷有力、平移加速度和模态分析中生成的载荷向量等, 外加的非零位移将被忽略。可以用 LVSCALE 命令 (GUI 操作: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Load Vector | For Mode Super) 来施加在模态分析中生成的载荷向量。

2) 如果使用缩减法提取的模态振型, 则力只能加载在主自由度上。

如果在瞬态分析中要用多载荷步来定义加载历程, 那么第一个载荷步用于建立初始条件, 第二个和后继的载荷步用于瞬态加载。

(5) 建立初始条件

唯一要明确地建立的初始条件是初始位移。一般总要以一次使用给定载荷的静力学求解作为初始求解。对于伪静态分析, 模态叠加方法在 0 时刻产生较差的结果。表 14-1 列出的是在第一个载荷步中可用的载荷步选项。

表 14-1 用于第一个载荷步的选项

选项	命令	GUI 路径
动力学选项(Dynamics Options)		
Transient Integration Parameters	TINTP	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time Integration
Damping	ALPHAD, BETAD	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Damping
	DMPRAT, MDAMP	Main Menu Solution Load Step Opts Other Change Mat Props Material Models Structural Damping
通用选项(General Options)		
Integration Time Step	DELTIM	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time-Time Step
输出控制选项(Output Control Options)		
Printed Output	OUTPR	Main Menu Solution Load Step Opts Output Ctrl Solu Printout

1) 瞬态积分参数 (Transient Integration Parameters)

该选项用于控制 Newmark 时间积分方法的特性。默认时采用恒定的平均加速度方案。

2) 阻尼参数 (Damping)

在大多数结构中存在某种形式的阻尼，这些阻尼在分析中应当予以考虑。可以使用的几种阻尼形式有：① Alpha (质量) 阻尼 (ALPHAD)；② Beta (刚度) 阻尼 (BETAD)；③ 恒定阻尼比 (DMPART)；④ 和材料相关的 Beta 阻尼 (MP,DAMP)；⑤ 模态阻尼 (MDAMP)。

注意：如果使用QR 模态提取法，那么模态叠加法中定义的阻尼均将被忽略。

3) 积分时间步 (Integration Time Step)

对第一个载荷步唯一有效的选项是积分时间步长，它被假定为在整个瞬态分析过程中保持恒定值。默认情况下，积分时间步长为 $1/(20 f)$ ，其中 f 是求解得到的最高频率。DELTIM 命令只在第一载荷步中有效，在后续的载荷步中将被忽略。

注意：如果在第一载荷步中使用了TIME命令，其设置将被忽略。因为第一步求解总是TIME为 0 时刻的静力学求解。

4) Printed Output[OUTPR]

使用此选项可控制在主自由度处位移解的输出情况

(6) 执行命令 LSWRITE 将第一个载荷步写入载荷步文件 (Jobname.S01)

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Write LS File

(7) 指定瞬态载荷部分的载荷和载荷步选项

将每一个载荷步写入一个载荷步文件[LSWRITE]。下面是对瞬态载荷有效的载荷步选项。

1) 通用选项。

Time Option[TIME]

此选项用于指定载荷步的终止时间。

Load Vector[LVSCALE]

此选项用于施加在模态分析中生成的载荷向量。

Stepped or Ramped Loads[KBC]

此选项用于设置在载荷步[KBC]范围内载荷大小是以直线上升方式 (Ramped) 还是阶跃方式 (Stepped) 变化[KBC,1]的。默认时是直线上升方式的。

2) 输出控制选项。

Printed Output[OUTPR]

此选项用于控制输出内容。

Database and Results File Output[OUTRES]

此选项用于控制在缩减位移文件中要包含的数据。





唯一可用于这些命令的标识字是节点解 (NSOL)。OUTRES 命令的默认设置是每隔四个时间点将解写入缩减位移文件一次。

(8) 模态分析阶段

在模态分析阶段, 如果选用分块 Laczos 法 (默认) 和子空间法 (MODOPT, LANB 或 MODOPT,SUBSP), 可以通过命令 OUTRES,NSOL 用节点分量来限制写进缩减位移文件 Jobname.RDSP 的位移数据。这样, 扩展过程将仅仅生成写进.RDSP 文件的单元和它们所有节点的结果。为了使用这个选项, 首先执行命令 OUTRES,NSOL,NONE 禁止写出所有结果项, 然后执行命令 OUTRES,NSOL,FREQ,COMP 指定输出感兴趣的项。重复执行 OUTRES 命令, 指定希望写入.RDSP 文件的其他节点分量。只允许输出一个频率—ANSYS 只能使用 OUTRES 命令指定的最后一个频率。

(9) 保存数据库到备份文件

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

(10) 开始瞬态分析求解

命令: LSSOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | From LS Files

(11) 离开 SOLUTION

命令: FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单

不论在模态分析中采用的是子空间法、分块 Laczos 法、缩减法、PowerDynamic 还是 QR 法, 模态叠加法瞬态分析解都会被写到缩减位移文件 Jobname.RDSP 中。因此如果对应力结果感兴趣, 则需要扩展解。

14.6.4 扩展模态叠加解

扩展处理的步骤与缩减法相同。如果模态分析中用了缩减法, 则扩展处理需要 Jobname.TRI 文件。扩展处理的输出中包含结构分析结果文件 Jobname.RST, 其中含有已扩展的结果。

14.6.5 观察结果

结果由用于扩展解的每一个时间点处的位移、应力和反作用力组成。可以用 POST26 或 POST1 观察这些结果, 正如在完全法中所述的那样。

注意: 在缩减法或模态叠加法中, FORCE 命令只能选择静应力。

14.7 缩减法瞬态动力学分析过程

缩减法 (Reduced) 采用缩减矩阵来计算动力学响应。如果在分析中不准备包含非线性特性 (除了简单的节点对节点接触), 就可以考虑使用这种方法。

缩减法瞬态动力学分析的过程由五个主要步骤组成：①建造模型；②获取缩减解；③观察缩减法求解结果；④扩展解（扩展处理）；⑤观察已扩展解的结果。

在这些步骤中，第一步和完全法中的相同，不过不允许有非线性特性，简单的节点对节点接触除外，它是指定为间隙条件而非单元类型的。其他步骤的细节将在下面解释。

14.7.1 获取缩减解

缩减解指在主自由度处计算出的自由度解。求缩减解需要做的工作如下：

1. 进入SOLUTION

命令：/SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2. 指定分析类型和选项

除了下面的差别外，用于缩减法的分析类型及选项与用于完全法的类型及选项基本相同。

1) 不能使用求解控制对话框定义缩减法瞬态分析类型和分析设置，而应当利用标准序列的 ANSYS 求解命令和对应菜单进行设置。

2) 不能使用重启动。

3) 选择 Reduced 求解方法。

4) 一旦指定缩减法瞬态分析，对应的求解菜单就会出现。求解菜单可能处于压缩或展开状态，完全取决于上次 ANSYS 求解的菜单状态。压缩菜单包仅仅含模态叠加法瞬态分析的有效选项和/或建议选项。如果处于压缩菜单状态，希望访问其他求解选项，就选择求解器中的“Unabridged Menu（展开）”菜单。

5) 非线性选项，如大变形、应力刚化等均不可采用。

3. 定义主自由度

主自由度是描述结构动力学行为特性的基本自由度。缩减法瞬态动力学分析要求在定义了间隙条件、力或非零位移的位置处定义主自由度。

命令：M

GUI: Main Menu | Solution | Master DOFs | User Selected | Define

4. 定义间隙条件

可以使用如下方法定义任何间隙条件。

命令：GP

GUI: Main Menu | Solution | Dynamic Gap Cond | Define

使用如下方法可以列出或删除已定义的间隙。

命令：GPLIST/GPDELE

GUI: Main Menu | Solutions | Dynamic Gap Cond | List All

间隙条件类似于间隙单元，被指定在瞬态分析过程中预期会发生接触（碰撞）的表面之间。ANSYS 程序通过使用一个等效的节点载荷向量表示在间隙关闭时会产生的间隙力。间隙条件只可指定在两个主节点之间或主节点和基础之间，如图 14-4 所示。



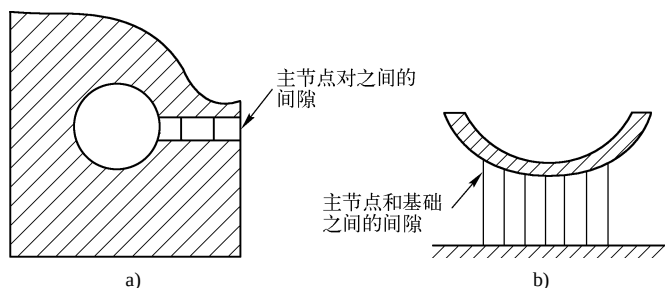


图 14-4 间隙条件实例

a) 实例 1 b) 实例 2

定义间隙条件的一些准则如下。

- 使用足够的间隙条件以在接触表面间得到平滑的接触应力分布。
- 定义合理的间隙刚度。如果刚度太低，接触表面可能重合太多。如果刚度太高，在碰撞期间要求一个非常小的时间步长。通常建议指定一个比相邻单元刚度高一或二个数量级大小的间隙刚度。可以用公式 AE/L 估算相邻单元的刚度，这里 A 是间隙条件周围的有贡献的面积， E 是交界面上较软材料的弹性模量， L 是交界面上第一层单元的深度。
- 利用 GP 命令的 DAMP 域可以输入非线性间隙阻尼，此时运行速度比使用间隙单元 COMBIN40 的完全瞬态分析法要快。仅当 TRNOPT=MSUP 允许非线性间隙阻尼功能时，缩减法瞬态分析将忽略阻尼条件。

5. 在模型上施加初始条件

(1) 在缩减法瞬态动力学分析中有下列加载限制。

1) 只能施加位移、力和平移加速度载荷。如果模型包含旋转过节点坐标系的节点，并在它们上定义有主自由度，那么不允许施加加速度载荷。

2) 只能在主自由度上施加力和非零位移载荷。

与完全法中提到的一样，在瞬态分析中要用多载荷步加载来定义加载历程。第一个载荷步用于建立初始条件，第二个和后继的载荷步用于施加瞬态载荷。

3) 建立初始条件。唯一需要明确设置的初始条件是初始位移 (u_0)；也就是说，初始速度和加速度必须为零 ($\dot{u}_0 = 0$, $\ddot{u}_0 = 0$)。由于在后继的载荷步中不能删除位移，因此它们不能用于指定初始速度。在瞬态动力学分析中，总是首先进行静力学分析做为初始求解的，目的是用给定的载荷确定 u_0 。

(2) 在第一个载荷步中指定载荷步选项

表 14-2 给出了用于第一载荷步的选项。

1) 瞬态积分参数 (Transient Integration Parameters)。瞬态积分参数控制 Newmark 时间积分法的特性。默认时是使用恒定的平均加速度方案。

2) 阻尼参数 (Damping)。大多数结构中存在某种形式的阻尼，并且在分析中不可忽略。可指定的阻尼形式有以下 4 种：Alpha (质量) 阻尼[ALPHAD]、Beta (刚度) 阻尼[BETAD]、和材料相关的 Beta 阻尼[MP,DAMP]以及单元阻尼 (Combin7 等)。

3) 积分时间步 (Integration Time Step)。积分时间步是唯一有效的通用选项，在整个瞬

态过程中假定为恒定不变。

注意：如果在第一个载荷步中使用了TIME 命令，它将被忽略。第一步求解总是TIME 为 0 的静态求解。

4) 打印输出 (Printed Output)。用此选项可设置输出主自由度处的位移解。

表 14-2 用于第一载荷步的选项

选 项	命 令	GUI 路径
动力学选项(Dynamics Options)		
Transient Integration Parameters	TINTP	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time Integration
Damping	ALPHAD,BETAD	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Damping
	MP,DAMP	Main Menu Solution Load Step Opts Other Change Mat Props Material Models Structural Damping
通用选项(General Options)		
Integration Time Step	DELTIM	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time- Time Step
输出控制选项(Output Control Options)		
Printed Output	OUTPR	Main Menu Solution Load Step Opts Output Ctrl's Solu Printout

6. 将第一个载荷步写入载荷步文件

将第一个载荷步写入载荷步文件(Jobname.S01)。

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Write LS File

7. 指定载荷步和载荷步选项

指定瞬态载荷部分对应的载荷和载荷步选项，并将每一个载荷步写入一个载荷步文件 [LSWRITE]。下面是可用于瞬态载荷步的选项。

(1) 通用选项

1) Time (指定载荷步结束时的时间) [TIME]。

2) Stepped[KBC,1]或 Ramped 载荷施加方式[KBC]。

(2) 输出控制

1) Printed Output[OUTPR]，打印输出。

2) Reduced displacement file[OUTRES]缩减位移文件。

这些命令中唯一有效的标识字 (Label) 是节点解 (NSOL)。OUTRES 命令在默认状态下每隔四个时间点把结果写入缩减位移文件一次。

8. 存储一个数据库备份

将数据库保存到一个指定名称的备份文件中。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

9. 开始瞬态求解

可以使用下列方法之一进行求解。

命令: LSSOLVE



GUI: Main Menu | Solution | Solve | From LS Files

其他的生成和求解多步载荷的方法，如矩阵参数法（array parameter）和多步求解法（multiple SOLVE）。

10. 离开SOLUTION

命令: FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单

14.7.2 观察缩减法求解的结果

缩减法瞬态动力学分析求解的结果保存在缩减位移文件 Jobname.RDSP 中。主要包含主自由度随时间变化的位移。可以用 POST26 观察时间的函数主自由度处的位移（不能用 POST1，因为现在所有自由度处的完整解还没有得到）。

除下列差别外，用 POST26 的步骤和在完全法中描述的相似。

- 在定义 POST26 变量前，应使用 FILE 命令指定从 Jobname.RDSP 中读取的数据（GUI 路径 Main Menu | TimeHist Postproc | Settings | File）。例如，如果 TRANS 是项目名，FILE 命令的格式为：FILE,TRANS,RDSP。（默认时，POST26 查找的结果文件不是缩减法瞬态分析求解过程所写的结果文件。）
- 只有节点自由度数据（在主自由度处）可以使用，因此只可以用 NSOL 命令来定义变量。

14.7.3 扩展处理

扩展处理是根据缩减解计算出在所有自由度处完整的位移、应力和力的解。这些计算仅在给定的时间点上进行。因此，在开始扩展处理前，应当观察缩减解的结果（用 POST26）并找出关键时间点。

注意：扩展处理并不总是必要的。例如，如果主要是对结构上给定点的位移感兴趣，那么缩减解本身即可满足要求。但是，如果想确定非主自由度处的位移，或是对应力或力的解感兴趣，那么就必须进行扩展处理了。

1. 注意点

1) 缩减法求解过程中生成的.RDSP，.EMAT，.ESAV，.DB 和.TRI 文件必须存在且有效。

2) 数据库中必须包含和求解过程中所用模型相同的模型。

2. 扩展解

(1) 重新进入 SOLUTION

命令: /SOLU

GUI: Main Menu | Solution

注意：在扩展解之前，必须（利用 FINISH 命令）明确地退出求解器，然后（利用 /SOLU）重新进入求解器。

(2) 激活扩展处理及其选项

表 14-3 给出了扩展处理选项。

表 14-3 扩展处理选项

选 项	命 令	GUI 路径
Expansion Pass On/Off	EXPASS	Main Menu Solution Analysis Type ExpansionPass
No. of Solutions to be Expanded	NUMEXP	Main Menu Solution Load Step Opts ExpansionPass Range of Solu's
SingleSolution to Expand	EXP SOL	Main Menu Solution Load Step Opts ExpansionPass Single Expand By Time/Freq

1) Expansion On/Off[EXPASS] 选项：选择 ON。

2) Number of Solutions to be Expanded[NUMEXP]选项：用于指定将被扩展的解的数目。扩展的将是均布在给定的时间范围内所设数目的解。靠近这些时刻处的解将被扩展。同时应指定是否要计算应力和力。

3) Single Solution to Expand[EXP SOL] 选项：如果不需要在一个范围内扩展多个解，则可用这一选项来指定要扩展的某个单一解。可以用载荷步及子步序号或时间值来指定单一解。同时指定是否要计算应力和力。

(3) 指定载荷步选项

在瞬态动力学分析扩展处理中唯一可用的载荷步选项是输出控制。

1) Printed Output[OUTPR] 选项：设置在输出文件要包含的结果数据 (Jobname.OUT)。

2) Database and Results File Output[OUTRES] 选项：控制结果文件 (Jobname.RST) 中的数据。

3) Extrapolation of Results[ERESX]选项：设置以复制结果到节点的方式而非外插值方式 (默认) 观察单元积分点结果。

注意：OUTPR 和 OUTRES 的 FREQ 域只能为 ALL 或 NONE。ERESX 可设置以复制结果到节点的方式而非外插值方式 (默认) 观察单元积分点结果。

(4) 开始扩展计算

命令：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

(5) 重复步骤 2, 3 和 4 对扩展其余的解

每一次扩展处理在结果文件中被保存为一个单独的载荷步。

(6) 离开 SOLUTION

命令：FINISH

GUI：关闭 Solution 窗口。

14.7.4 观察已扩展解的结果

扩展处理的结果保存在结构分析结果文件 Jobname.RST 中。文件中包含下列在缩减解被扩展的各时间点处计算出的数据。



1. 基本数据

节点位移 (UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ)

2. 派生数据

1) 节点和单元应力。

2) 节点和单元应变。

3) 单元力。

4) 节点反作用力。

可以用 POST1 观察这些结果。(如果已在几个时间点处扩展了解,也可以用 POST26 得到应力-时间,应变-时间的关系等的曲线图)。使用 POST1 (或 POST26) 的步骤和在完全法中描述的相同。

14.8 有预应力瞬态动力学分析

有预应力瞬态动力学分析计算有预应力结构的动力学响应,如带有残余热应力的热处理部件。对不同的瞬态动力学分析方法,预应力分析步骤是各不相同的。

14.8.1 有预应力的完全法瞬态动力学分析

可以通过在初始的静载荷步中施加预应力载荷以在完全法瞬态动力学分析中包含预应力效果。分析的过程包含如下两个步骤。

1. 建造模型,进入SOLUTION,定义瞬态分析类型 (ANTYPE,TRANS)。

1) 施加所有预应力载荷。

2) 关闭时间积分效果 (TIMINT,OFF)。

3) 打开应力刚化效果 (SSTIF,ON)。

4) 设时间为很小的值 (TIME)。

5) 将第一个载荷步写入 Jobname.S01。

如果预应力是非线性行为 (如铸造中的残余热力所引起的),则也许需要用几个载荷步来完成分析的静态预应力分析阶段。当存在几何非线性预应力时,可以用命令 NLGEOM,ON 来捕捉预应力效果。

2. 进入求解

在所有的后继载荷步中,打开时间积分效果 (TIMINT,ON),并用前面描述的完全法进行瞬态动力学分析。在用命令 LSWRITE 将所有的载荷步保存到文件中以后,就可以用命令 LSSOLVE 进行多载荷步求解了。

注意: 如果要用 IC 命令定义初始条件 (GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define),则必须单独进行静态预应力求解。IC 命令只能用于第一个载荷步。

14.8.2 有预应力的模态叠加法瞬态动力学分析

为了在模态叠加法分析中包含预应力效果，必须首先进行有预应力的模态分析。只要有预应力的模态分析结果已存在，便可像做其他模态叠加法分析那样继续进行分析了。

14.8.3 有预应力的缩减法瞬态动力学分析

进行有预应力的缩减法瞬态动力学分析要求首先通过一个单独的静力学分析将预加应力加载到结构中，进一步说明见下。分析的前提假设是瞬态（随时间变化）应力（将重叠在预应力上）比预应力本身要小得多。如果不满足此假设，应当采用完全法瞬态动力学分析。

1) 在建模并在打开预应力效果（PSTRES, ON）的前提下获取静力学分析解。获取静力学分析解的步骤已在“静力学分析”中说明。

2) 重新进入 SOLUTION[/SOLU]并求得缩减法瞬态分析解，同样也要打开预应力效果[PSTRES,ON]。静力学分析中生成的文件 Jobname.DB、Jobname.EMAT 和 Jobname.ESAV 必须存在且有效。

14.9 瞬态分析的关键技术细节

14.9.1 积分时间步长选取准则

如前所述，瞬态分析求解的精度取决于积分时间步长的大小——时间步长越小，精度越高。太大的积分时间步长将引发会影响较高阶模态的响应（从而影响整体响应）的误差。太小的时间积分步长将浪费计算机资源。要想计算出最优时间步长，应当遵循下列五个准则。

1. 计算响应频率

由于结构的动力学响应可以看成是各阶模态响应的组合，时间步长应小到能够解出对整体响应有贡献的最高阶模态。对于 Newmark 时间积分方案，已经发现当时间步长的取值为 20 倍最高频率时会产生较合理精度级的解。也就是说，如果 f 表示频率（以周/单位时间为单位），积分时间步长（ITS）应为：

$$ITS = 1/(20f) \quad (14-5)$$

如果要得到加速度结果，可能要求更小的 ITS 值。图 14-5 显示了 ITS 值对单自由度弹簧—质量系统周期延长量的影响。可以看到当取每周 20 或更多个时间点时将引起小于百分之一的周期延长。

2. 计算所加载荷/时间关系曲线

响应总是倾向滞后于所施加的载荷的，特别是对于阶跃载荷，如图 14-6 所示。阶跃载荷在发生阶跃的时间点附近，要求采用较小的 ITS 以紧紧跟随载荷的阶跃步变化。要跟随阶跃载荷，ITS 也许要小到和 $1/(180f)$ 相近。

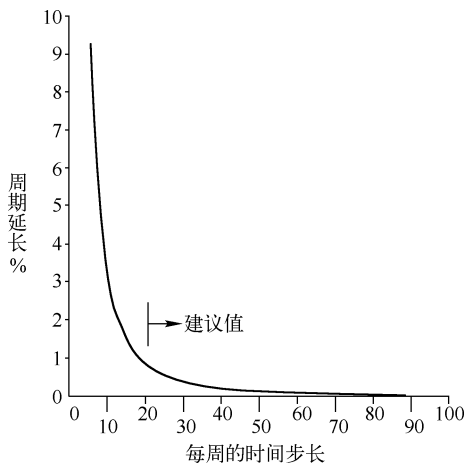


图 14-5 积分时间步长对周期延长的影响

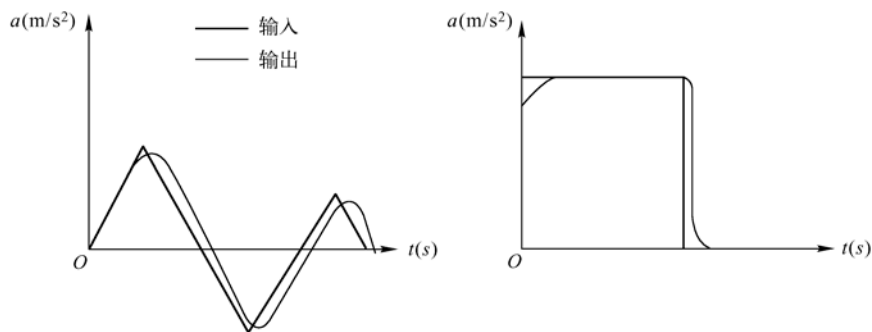


图 14-6 瞬态输入/瞬态响应曲线

3. 计算接触频率

在涉及接触（碰撞）的问题中，时间步长应当小到足以捕捉到两个接触表面之间的动量传递。在计算时如果违反上述准则，将发生明显的能量损失，从而碰撞将不会是完全弹性的。积分时间步长可由接触频率（ f_c ）确定：

$$ITS = 1/(Nf_c) \quad (14-6)$$

$$f_c = (1/2\pi)\sqrt{(k/m)} \quad (14-7)$$

其中， k 是间隙刚度； m 是作用在间隙上的有效质量； N 是每周的点数。

要使能量损失最小，每周至少要取 30 个点（ $N=30$ ）。如果要得到加速度结果，可能要取更大的 N 值。对缩减法和模态叠加法， N 必须至少为 7 以确保求解的稳定性。如果接触时间和接触质量比整个瞬态过程的时间和系统质量小得多，则可以在每周取少于 30 个点（ $N < 30$ ），这是因为此时能量损失对总响应的影响很小。

4. 计算波传播

如果对波传播效果感兴趣，则时间步长应当小到当波在单元之间传播时足以捕捉到波动效应。

5. 计算非线性

大部分问题要求满足前面四个准则的时间步长就可捕捉到非线性行为，但也有少数例外情形：当结构在载荷作用下趋于刚化（例如，从弯曲状态变化到薄膜承载状态的大变形问题），则必须求解被激活的高阶模态。

避免使用过小的时间步长，特别是建立初始条件时，因为过小的数值可能引起数值计算困难。例如，对基于时间大小的计算而言，小于相对 10^{-10} 数量级的时间步长就会引起数值计算困难。

在用合适的准则计算出时间步长后，在具体分析中应该用最小的步长值。可以采用自动时间步长来让 ANSYS 程序决定在求解中何时增大或减小时间步长，自动时间步长将在下面进行讨论。

14.9.2 自动时间步长

自动时间步长（也称为时间步长优化）试图按响应频率和非线性效果来调整求解期间的积分时间步长。此特征的主要好处是可以减少子步的总数，从而节省计算机资源。同理，采

用自动时间步长可以大大减少可能需要进行重新分析（调节时间步长等）的次数。如果存在非线性，自动时间步长还会带来另外一个好处：适当地增加载荷并在达不到收敛时回溯到先前收敛的解（二分法）。可以用命令 **AUTOTS** 激活自动时间步长。

虽然对于所有分析都激活自动时间步长似乎是一个好主意，但在有些情况下自动时间步长也可能是无益的（甚至可能是有害的）。

- 只是在结构的局部有动力学行为的问题（例如涡轮叶片和轮毂组件），这时系统部件的低频能量部分远远高于高频部分。
- 受恒定激励的问题（如地震载荷），在这种情形下当不同频率被激活时，时间步长趋于连续变化。
- 运动学问题（刚体运动），在这种情形下刚体运动对响应频率项的贡献将占主导地位。

14.9.3 阻尼

大多数系统中存在阻尼，而且在动力学分析中应当指定阻尼。在 **ANSYS** 程序可以指定如下五种形式的阻尼。

- α, β 阻尼 (α) 和 β 阻尼（瑞利阻尼）。
- 和材料相关的阻尼。
- 恒定的阻尼比。
- 振型阻尼。
- 单元阻尼。

在 **ANSYS/Professional** 程序中只有恒定阻尼比和振型阻尼可用。可以在模型中指定多种形式的阻尼，程序按所指定的阻尼之和形成阻尼矩阵[C]。表 14-4 列出了在不同结构分析中可用的阻尼类型。

表 14-4 不同分析类型中可用的阻尼

分析类型	α, β 阻尼 [ALPHAD, BETAD]	材料相关阻尼 [MP,DAMP]	恒定阻尼比 [DMPRAT]	振型阻尼 [MDAMP]	单元阻尼 [3] (COMBIN7 等)
静力学分析	—	—	—	—	—
模态分析					
无阻尼	否 (5)	否 (5)	否 (5)	否	否
有阻尼	是	是	否	否	是
谐响应分析					
完全法	是	是	是	否	是
缩减法	是	是	是	否	是
模态叠加法	是 (6)	是 (4, 6)	是 (7)	是 (7)	是 (6)
瞬态分析					
完全法	是	是	否	否	是
缩减法	是	是	否	否	是
模态叠加法	是 (6)	是 (4, 6)	是 (7)	是 (7)	是 (6)



(续)

分析类型	α, β 阻尼 [ALPHAD, BETAD]	材料相关阻尼 [MP,DAMP]	恒定阻尼比 [DMPRAT]	振型阻尼 [MDAMP]	单元阻尼 [3] (COMBIN7 等)
谱分析					
SPRS,MPRS[2]	是 (1)	是	是	是	否
DDAM[2]	是 (1)	是	是	是	否
PSD[2]	是	否	是	是	否
屈曲分析	—	—	—	—	—
子结构	是	是	否	否	是

—表示不能使用。

[1]表示只可用 β 阻尼，不可用 α 阻尼。

[2]表示阻尼只用于模态合并，不用于计算模态系数。

[3]表示包括超单元阻尼矩阵。

[4]表示如果经模态扩展转换成了振型阻尼。

[5]表示如果指定了，程序会计算出一个用于随后的谱分析的有效阻尼比。

[6]表示如果使用 QR 阻尼模态提取方法[MODOPT,QRDAMP]，在前处理或模态分析过程中指定任何阻尼，但 ANSYS 在执行模态叠加分析时将忽略任何阻尼。

[7]表示如果使用 QR 阻尼模态提取方法[MODOPT,QRDAMP]，则 DMPART 和 MDAMP 不能使用。

1. Alpha阻尼和Beta阻尼

Alpha 阻尼和 Beta 阻尼用于定义瑞利 (Rayleigh) 阻尼常数 α 和 β 。阻尼矩阵是在用这些常数乘以质量矩阵[M]和刚度矩阵[K]后计算出来的。

命令 ALPHAD 和 BETAD 分别用于确定瑞利阻尼常数 α 和 β 。通常 α 和 β 的值不是直接得到的，而是用振型阻尼比 ξ 计算出来的。 ξ 是某个振型 i 的实际阻尼和临界阻尼之比。如果 ω_i 是模态 i 的固有角频率，则 α 和 β 满足下列关系：

$$\xi = \alpha / 2\omega_i + \beta \omega_i / 2 \quad (14-8)$$

在许多实际问题中，Alpha阻尼 (或称质量阻尼) 可以忽略 ($\alpha=0$)。这种情形下，可以由已知的 ξ_i 和 ω_i 计算出 β ：

$$\beta = 2\xi_i / \omega_i \quad (14-9)$$

由于在一个载荷步中只能输入一个 β 值，因此应该选取该载荷步中最主要的被激活频率来计算 β 值。

为了确定对应给定阻尼比 ξ 的 α 和 β 值，通常假定 α 和 β 之和在某个频率范围内近似为恒定值 (见图 14-7)。这样，在给定阻尼比 ξ 和一个频率范围 $\omega_i \sim \omega_j$ 后，解两个并列方程组便可求得 α 和 β 。

Alpha 阻尼在模型中引入任意大质量时会导致不理想的结果。一个常见的例子是在结构的基础上加一个任意大质量以方便施加加速度谱 (用大质量可将加速度谱转化为力谱)。Alpha 阻尼系数在乘上质量矩阵后会在这样的系统中产生非常大的阻尼力，这将导致谱输入的不精确，以及系统响应的不精确。

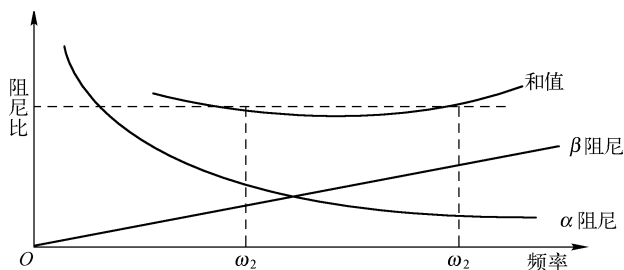


图 14-7 瑞利阻尼

Beta 阻尼和材料阻尼在非线性分析中会导致不理想的结果。这两种阻尼要和刚度矩阵相乘，而刚度矩阵在非线性分析中是不断变化的。由此所引起的阻尼变化有时会 and 物理结构的实际阻尼变化相反。例如，存在由塑性响应引起的软化的物理结构通常相应地会呈现出阻尼的增加，而存在 Beta 阻尼的 ANSYS 模型在出现塑性软化响应时则会呈现出阻尼的降低。

2. 和材料相关的阻尼

和材料相关的阻尼允许将 Beta 阻尼作为材料性质来指定[MP,DAMP]。但要注意在谱分析[ANTYPE,SPECTR]中的 MP,DAMP 是指定和材料相关的阻尼比 ζ ，而不是 β 。同样要注意对于多材料单元，只能对单元整体指定一个 β 值，而不能对单元中的每一种材料都指定。在这些情形下， β 是由单元的材料指针（用 MAT 命令设置）决定的，而不是由单元实常数 MAT 指向的材料决定的。

3. 恒定阻尼比

恒定阻尼比是在结构中指定阻尼的最简单的方法。它表示实际阻尼和临界阻尼之比，是用 DMPRAT 命令指定的小数值。DMPRAT 只可用于谱分析、谐响应分析和模态叠加法瞬态动力学分析。

4. 振型阻尼

振型阻尼可用于对不同的振动模态指定不同的阻尼比。它用 MDAMP 命令指定且只能用于谱分析和模态叠加法瞬态动力学分析、谐响应分析。

5. 单元阻尼

单元阻尼在用到有粘性阻尼特征的单元类型时会涉及到。

14.10 实例：路面冲击载荷作用下汽车的瞬态动力学分析

14.10.1 工程背景

行驶平顺性是车辆的重要性能之一。良好的平顺性可以提高乘车人员的舒适性，延长零部件使用寿命，提高运输效率并降低油耗。车辆悬架系统中座椅、轮胎的特性参数是影响整车行驶平顺性的主要因素，用传统的经验公式来确定悬架座椅、轮胎等的特性参数常常不尽如人意，往往需要经过多次样车试验、修改才能获得较合理的参数匹配方案，且开发周期长、费用高。本实例使用 ANSYS 分析 9 自由度整车模型受路面冲击激励的响应。



14.10.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

在研究汽车振动响应时,都要建立汽车振动的数学模型。对于简单模型,应用拉格朗日方程法等推导数学模型非常简单,但对于复杂模型,手工推导则显得复杂容易出错。从工程应用角度出发,可用有限元方法分析整车9自由度模型,如图14-8。

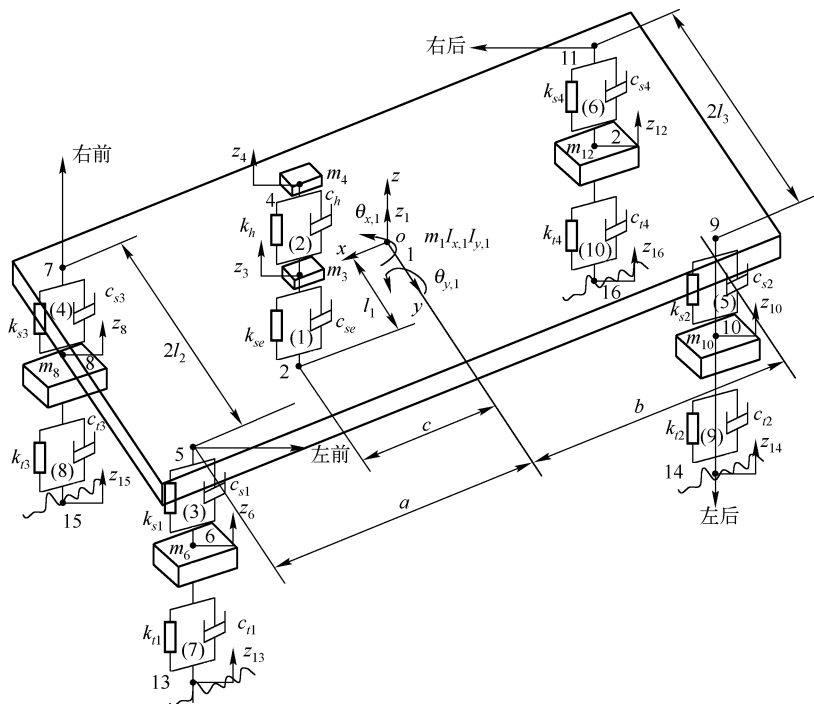


图 14-8 9 自由度整车模型

模型的几何尺寸分别为 $l_1=0.385\text{m}$, $l_2=l_3=0.7\text{m}$, $a=1.0628$, $b=1.4852$, $c=0.128$, 轮胎的高度为 $h_1=0.4\text{m}$, 车架高为 $h_2=0.65$, 座椅高为 $h_3=0.035$, 驾驶员坐姿高为 $h_4=0.85\text{m}$ 。

2. 单元的选择

本实例使用MPC184 单元模拟刚性车架, MASS21 模拟模型中的质量, COMBIN14 模拟轮胎、悬架及座椅, 下面分别给予具体说明。整车质量使用单元MASS21 模拟, 其实常数为 $m_1=878.8\text{kg}$, 绕x轴的转动惯量 $I_{x,1}=1\,963.36\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 绕y轴的转动惯量 $I_{y,1}=1\,963.36\text{kg}\cdot\text{m}^2$; 前轮胎使用 COMBIN14 模拟, 轮胎刚度 $k_{t1}=k_{t3}=100\,055\text{N/m}$, 轮胎阻尼 $c_{t1}=c_{t3}=1\,201\text{N}\cdot\text{s/m}$; 前轮胎质量使用MASS21 模拟, 质量 $m_6=m_8=53\text{kg}$; 前悬架使用COMBIN14 模拟, 悬架刚度 $k_{s1}=k_{s3}=92\,041\text{N/m}$, 悬架阻尼 $c_{s1}=c_{s3}=1\,646\text{N}\cdot\text{s/m}$; 后轮胎使用 COMBIN14 模拟, 轮胎刚度 $k_{t2}=k_{t4}=922\,800\text{N/m}$, 轮胎阻尼 $c_{t2}=c_{t4}=1\,101\text{N}\cdot\text{s/m}$; 后轮胎质量使用MASS21 模拟, 质量 $m_{10}=m_{12}=62.5\text{kg}$ 后悬架使用COMBIN14 模拟, 悬架刚度 $k_{s2}=k_{s4}=92\,041\text{N/m}$, 悬架阻尼 $c_{s2}=c_{s4}=1646\text{N}\cdot\text{s/m}$; 座椅使用COMBIN14 模拟, 座椅刚度 $k_{se}=10\,055\text{N/m}$, 座椅阻尼 $c_{se}=329\text{N}\cdot\text{s/m}$; 座椅质量使用MASS21 单元模拟, 座椅质量

$m_3=52\text{kg}$; 驾驶员使用COMBIN12 模拟, 人体刚度 $k_h=18\,333.335\text{ N/m}$, 人体阻尼 $c_h=1\,962.5\text{ N}\cdot\text{s/m}$; 人体质量使用MASS21 模拟, 人体质量 $m_4=70\text{kg}$ 。

3. 边界条件

本实例的边界条件为约束轮胎的五个方向的自由度只保留 z 方向自由; 约束刚性车架与悬架连接处的转动自由度, 载荷为作用在前后轮胎上面的冲击载荷, 其形式如下:

$$\text{作用于前轮胎的冲击载荷: } s_1(t) = \begin{cases} 0.05m & 0 \leq t \leq 1E-2 \\ 0 & 1E-2 < t \leq 4 \end{cases};$$

$$\text{作用于后轮胎的冲击载荷: } s_2(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq (a+b)/v \\ 0.05 & (a+b)/v \leq t \leq 1E-2 + (a+b)/v \\ 0 & 1E-2 + (a+b)/v < t \leq 4 \end{cases};$$

其中: v 为车速; 单位为 m/s , 本实例取 10m/s 。

14.10.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框, 在输入栏中输入 “Impact Load Transient Dynamic Analysis”, 单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 $M1=878.8$, 单击 Accept 完成对整车质量的参数定义, 按照此方法继续定义车体质量绕 x 轴的转动惯量 $IX=1963.39$, 车体质量绕 y 轴的转动惯量 $IY=276.871$, 左前轮胎刚度 $KT1=100055$, 右前轮胎刚度 $KT3=100055$, 左前轮胎阻尼 $CT1=1201$, 右前轮胎阻尼 $CT3=1201$, 左前轮胎质量 $M6=53$, 右前轮胎质量 $M8=53$, 左前悬架刚度 $KS1=92041$, 右前悬架刚度 $KS3=92041$, 左前悬架阻尼 $CS1=1646$, 右前悬架阻尼 $CS3=1646$, 左后轮胎刚度 $KT2=922800$, 右后轮胎刚度 $KT4=922800$, 左后轮胎阻尼 $CT2=1101$, 右后轮胎阻尼 $CT4=1101$, 左后轮胎质量 $M10=62.5$, 右后轮胎质量 $M12=62.5$, 左后悬架刚度 $KS2=92041$, 右后悬架刚度 $KS4=92041$, 左后悬架阻尼 $CS2=1646$, 右后悬架阻尼 $CS4=1646$, 座椅刚度 $KSE=10055$, 座椅阻尼 $CSE=329$, 座椅质量 $M3=52$, 人体刚度 $KH=18333.335$, 人体阻尼 $CH=1962.5$, 人体质量 $M4=70$, 定义车速 $V=10$, 车体几何参数 $L1=0.385$, $L2=0.7$, $L3=0.7$, $A=1.0628$, $B=1.4852$, $C=0.128$, $H1=0.4$, $H2=0.65$, $H3=0.35$, $H4=0.85$, 定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Mass, 然后在右边选择 3D mass21 单元, 单击 Apply; 继续在左边选择 Combination, 然后在右边选择 Spring-damper12 单元, 单击 Apply; 继续在左边选择 Constraint, 然后在右边选择 Nonliner MPC 184 单元, 单击 Apply, 继续在左边选择 Mass, 然后在右边选择三维 mass21 单元, 单击 OK。



(2) 定义单元属性

在单元类型对话框中选择单元类型 3 (即 MPC184), 然后单击 Options 选项, 在弹出的对话框中选择 Rigid Beam (刚性梁), 单击 OK 会弹出一个新对话框保持默认设置, 再单击 OK; 回单元类型界面, 继续选择单元类型 4MASS21, 然后单击 Options 选项, 在弹出的对话框的 K3 中选择二维 w/o rot iner, 表示该质量单元的自由度为二维自由度且不包含转动自由度, 用来模拟轮胎、悬架、座椅和人体质量, 单击 OK, 然后单击 Close 关闭对话框。

(3) 定义实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete

在弹出的对话框中单击 Add, 在弹出的对话框中选择单元类型 MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASSX=M1/3, MASSY=M1/3, MASSZ=M1/3, IXX=IX, IYY=IY, 单击 OK; 继续单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M8, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M6, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M10, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M12, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M3, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 4MASS21, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 MASS=M4; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KT3, CV1= CT3, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KT1, CV1= CT1, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KT2, CV1= CT2, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KT4, CV1= CT4, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KS3, CV1= CS3, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KS1, CV1= CS1, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KS2, CV1= CS2, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KS4, CV1= CS4, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KSE, CV1= CSE, 单击 OK; 单击 Add, 选择单元类型 2COMBIN14, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 K= KH, CV1= CH, 单击 OK, 单击 Close。

4. 建立有限元模型

(1) 定义节点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NODE=1, X=A, Y=-L2, Z=0, 单击 Apply。按照此法继续定义其他节点其他坐标分别为 2 号节点, X=A, Y=-L2, Z=H1; 3 号节点, X=A, Y=-L2, Z=H2; 4 号节点, X=A, Y=L2, Z=0; 5 号节点, X=A, Y=L2, Z=H1; 6 号节点, X=A, Y=L2, Z=H2; 7 号节点, X=-B, Y=L3, Z=0; 8 号节点, X=-B, Y=L3, Z=H1; 9 号节点, X=-B, Y=L3, Z=H2; 10 号节点, X=-B, Y=-L3, Z=0; 11 号节点, X=-B, Y=-L3, Z=H1; 12 号节点, X=-B, Y=-L3, Z=H2; 13 号节点, X=C, Y=L1, Z=H2; 14 号节点, X=C, Y=L1, Z=H2+H3; 15 号节点, X=C, Y=L1, Z=H4+H2; 16 号节点, X=C, Y=L2,

Z=H2; 17 号节点, X=0, Y=L2, Z=H2; 18 号节点, X=0, Y=L1, Z=H2; 19 号节点, X=0, Y=0, Z=H2; 20 号节点, X=0, Y=-L2, Z=H2。

(2) 定义车体质量单元

1) 定义单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 1 MASS21, 选择 REAL 中的 1, 单击 OK。

2) 创建单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 10, 单击 OK。

(3) 定义右前轮胎质单元

1) 定义单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 2, 单击 OK。

2) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 2, 单击 OK。

(4) 定义左前轮胎质量单元

1) 定义单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 3, 单击 OK。

2) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 5, 单击 OK。

(5) 定义左后轮胎质量单元

1) 定义单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 4, 单击 OK。

2) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 8, 单击 OK。

(6) 定义右后轮胎质量单元

1) 定义单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 5, 单击 OK。

2) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 11, 单击 OK。

(7) 定义座椅质量单元

1) 定义单元属性。





GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 6, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 14, 单击 OK。

(8) 定义人体质量单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 4 MASS21, 选择 REAL 中的 7, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 15, 单击 OK。

(9) 定义右前轮胎单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 8, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 1 和 2, 单击 OK。

(10) 定义左前轮胎单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 9, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 4 和 5, 单击 OK。

(11) 定义左后轮胎单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 10, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 7 和 8, 单击 OK。

(12) 定义右后轮胎单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 11, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 10 和 11，单击 OK。

(13) 定义右前悬架单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14，选择 REAL 中的 12，单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 2 和 3，单击 OK。

(14) 定义左前悬架单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14，选择 REAL 中的 13，单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 5 和 6，单击 OK。

(15) 定义左后悬架单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14，选择 REAL 中的 14，单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 8 和 9，单击 OK。

(16) 定义右后悬架单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14，选择 REAL 中的 15，单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 11 和 12，单击 OK。

(17) 定义刚性车架单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 3 MPC184，单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框，用鼠标拾取节点 3 和 6，单击 Apply，继续拾取节点 6 和 16，单击 Apply，继续拾取节点 16 和 17，单击 Apply，继续拾取节点 17 和 9，单击 Apply，继续拾取节点 9 和 12，单击 Apply，继续拾取节点 12 和 20，单击 Apply，继续拾取节点 20 和 3，单击 Apply，继续拾取节点 16 和 13，单击 Apply，继续拾取节点 13 和 18，单击 Apply，继续





拾取节点 17 和 18, 单击 Apply, 继续拾取节点 18 和 19, 单击 Apply, 继续拾取节点 19 和 20, 单击 OK。

(18) 定义座椅单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 16, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 13 和 14, 单击 OK。

(19) 定义人体单元

1) 定义单元属性。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中选择 TYPE 选项中的 2 COMBIN14, 选择 REAL 中的 17, 单击 OK。

2) 定义单元。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取节点 14 和 15, 单击 OK。

5. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Transient, 含义为进行瞬态问题求解, 单击 OK, 在弹出的对话框中选择完全法 (Full), 不勾选 LUMPM, 表示计算中使用协调一致质量矩阵, 单击 OK。

6. 设置边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取节点 3, 6, 9 和 12, 单击 Apply, 在弹出对话框中选择约束的自由度: ROTX, ROTY, ROTZ, 单击 Apply, 继续拾取节点 1, 4, 7 和 10, 单击 OK, 在弹出对话框中选择 UX, UY, ROTX, ROTY 和 ROTZ, 单击 OK。

(2) 定义冲击载荷函数

GUI: Utility Menu | Parameters | Functions | Define/Edit

弹出函数编辑器操作面板, 为了定义多段函数, 选择面板中的 Function Type (函数类型) 为 Multivalued function based on regime variable, 并设置 <Regime Var | 为 T, 并定义 T 为时间 TIME 的函数, 最终设置如图所示。选择 Regime1, 设置 T 的变化范围大于等于 0, 小于等于 $1E-2$, 在 Result(结果)框后面输入 $5E-2$, 继续选择 Regime1, 在 <upper limit | 中输入 3, 在 Result(结果)框后面输入 0。这样第一个冲击载荷的函数就定义完了。选择函数编辑器中 File|Save, 然后输入保存文件的名字为 FR, 单击保存。按照同样方法定义第二个冲击载荷函数, 并以文件名 BH 存储。这一步操作详细操作可以参见本章的视频教程。

(3) 读入函数转化为表格

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read file

弹出拾取文件对话框, 选择刚才定义的 FR 函数, 单击打开, 在弹出的对话框中的 Tabel parameter name 中输入转换后的表格名为 FR, 单击 OK。按照同样方法转换函数 BH, 并设

置转换的表格名也为 BH。

(4) 施加冲击载荷

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取节点 1 和 4, 单击 Apply, 在弹出对话框中选择施加冲击的自由度 UZ, 并设置 Apply as 选项中为 Existing table, 单击 OK, 选择 FR, 单击 Apply; 继续选择节点 10 和 7, 单击 OK, 选择 UZ, 单击 OK, 选择 BH, 单击 OK。

7. 设置载荷步

(1) 设置输出

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | OutputCtrls | DB/Results File

在弹出的对话框中选择输出每一步, 即选择 Every substep, 单击 OK。

(2) 设置求解时间步

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time - Time Step

在弹出的对话框中的 TIME 选项中输入计算结束时间 3, 在 Time step size 选项中输入计算时间步为 0.005, 在 KBC 选项中选择 Stepden 为阶跃载荷, 自动时间步 AUTOTS 选项设为 Prog Chosen, 在最小时间步尺寸 Minimum time step size 中输入 0.005, 注意这个值一定要小于 Time step size, 在最大时间步尺寸 Maximum time step size 中输入 0.005, 其他保持默认值, 单击 OK。

8. 进行求解

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

单击 OK, 忽略警告, 单击 Yes。

9. 查看结果

(1) 进入时间历程后处理器

GUI: Main Menu | TimeHist Postpro

(2) 查看驾驶员 Z 方向的位移

1) 设置图的输出格式。

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes

在弹出对话框的 X-axis label 选项中输入 TIME, 在 Y-axis label 选项中输入 UZ, 在 Axis number size face 中输入 1.9 来设置图中坐标轴的字体, 单击 OK。

2) 查看驾驶员 Z 方向的位移。

单击时间历程变量观察器中的添加按钮, 在弹出的对话框中选择 DOF Solution|Z-Component of displacemend, 单击 OK, 弹出拾取对话框, 拾取节点 15, 单击 OK, 选中变量观察器变量列表中的 UZ_2, 单击 Graph Data 按钮, 弹出时间与 Z 向位移关系图 14-9。

(3) 查看驾驶员 Z 方向的加速度

1) 设置图的输出格式。

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes

在弹出对话框中的 X-axis label 选项中输入 TIME, 在 Y-axis label 选项中输入 Z-Component of acceleration, 在 Axis number size face 中输入 1.9 来设置图中坐标轴的字体, 单击 OK。

2) 查看驾驶员 Z 方向的加速度。





单击时间历程变量观察器中的添加按钮，在弹出的对话框中选择 Acceleration Solution |Z-Component of acceleration，单击 OK，弹出拾取对话框，拾取节点 15，单击 OK，选中变量观察器变量列表中的 AZ_3，单击 Graph Data 按钮，弹出时间与 Z 向加速度关系，如图 14-10 所示。

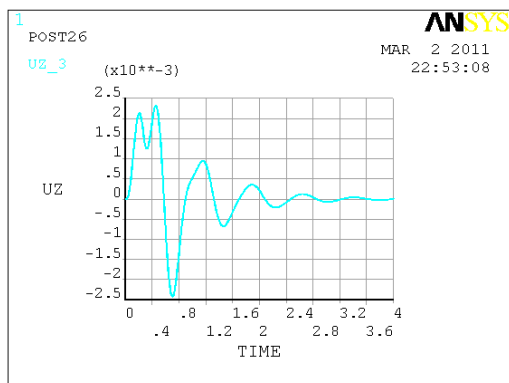


图 14-9 驾驶员 Z 方向位移与时间关系

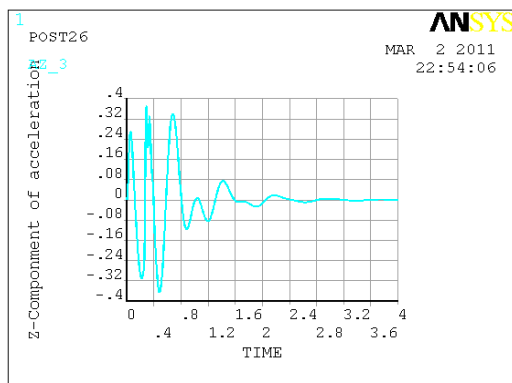


图 14-10 驾驶员 Z 方向加速度关系

第 15 章 非线性分析

15.1 概述

15.1.1 结构非线性的概念

在日常生活中,经常会遇到结构非线性问题。例如,当用钉书针钉书时,金属钉书钉将永久地弯曲成一个不同的形状。如果用户在一个木架上放置重物,随着时间的推移木架将越来越下垂。当在汽车或卡车上装载货物时,它的轮胎和下面路面间的接触面将随货物重量的变化而变化。如果将上述例子的载荷变形曲线画出来,用户将发现它们都显示了非线性结构的基本特征——结构刚度改变。引起结构非线性的原因很多,它可以被分成三种主要类型:几何非线性,材料非线性,状态非线性。

1. 几何非线性

如果结构经受大变形,其几何形状的变化可能会引起结构的非线性响应。一个例子是图 15-1 所示的钓鱼杆,其中 F_{TIP} 为鱼竿顶端承受的垂向载荷, u_{TIP} 为鱼竿顶端位移。随着垂向载荷的增加,杆不断弯曲以至于力臂明显地减少,导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。几何非线性的特点是大位移、大转动。

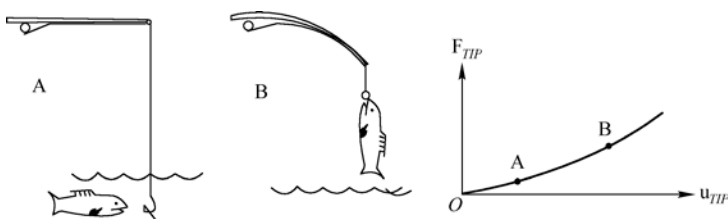


图 15-1 鱼杆的非线性变形

2. 材料非线性

非线性的应力-应变关系是结构非线性行为的常见原因。许多因素可以影响材料的应力-应变性质,包括加载历史、环境状况、加载的时间总量。

3. 状态非线性(包括接触)

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如,一根只能拉伸的电缆可能是松的,也可能是绷紧的。轴承套可能是接触的,也可能是不接触的。冻土可能是冻结的,也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变而变化。接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性中一个特殊而重要的子集。



15.1.2 非线性分析的基本知识

1. 方程求解

ANSYS 程序的方程求解器通过计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而,非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示。需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

一种近似的非线性求解是将载荷分成一系列的载荷增量。可以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后,继续进行下一个载荷增量之前程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。但是,纯粹的增量近似不可避免地要随着每一个载荷增量积累误差,导致最终失去平衡。

ANSYS 程序通过使用牛顿-拉普森平衡迭代方法(NR 方法)克服了这种困难,它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛。图 15-2 描述了在单自由度非线性分析中牛顿-拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前,NR 方法估算出残差矢量,这个矢量是回复力和所加载荷的差值,然后使用非平衡载荷进行线性求解,且核查收敛性。如果不满足收敛准则,则重新估算非平衡载荷,修改刚度矩阵,从而获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

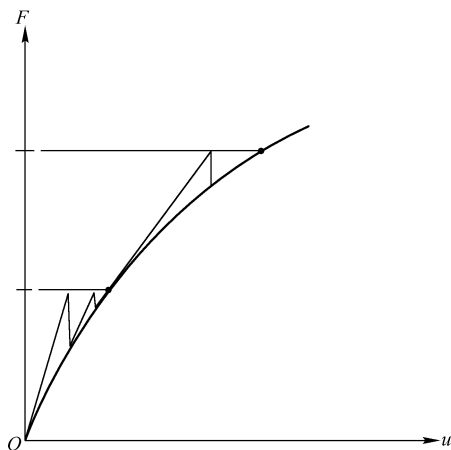


图 15-2 牛顿-拉普森迭代方法

ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性,如自适应下降、线性搜索、自动载荷步长及二分等,可被激活来加强问题的收敛性,如果不能得到收敛,那么程序继续计算下一个载荷步或终止。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析,如果用户仅仅使用 NR 方法,正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵,导致严重的收敛问题。这样的情况包括独立实体从固定表面分离的静态接触分析、结构或者完全崩溃或者“突然通过”至另一个稳定形状的非线性屈曲问题。对这样的情况,可以激活另外一种迭代方法——弧长方法,来帮助稳定求解。弧长方法导致 NR 平衡迭代沿一段弧收敛,从而即使正切刚度矩阵的斜率为零或负值,也往往阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 15-3 中。

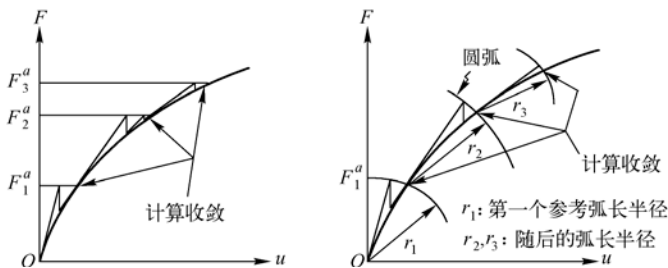


图 15-3 传统的牛顿-拉普森方法与弧长方法

分线性求解被分成三个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。

- 顶层级别由在一定“时间”范围内用户明确定义的载荷步组成，假定载荷在载荷步内线性地变化。
- 在每一个载荷步内，为了逐步加载，可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。
- 在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。

图 15-4 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。

当用户确定收敛准则时，ANSYS 程序给出了一系列的选择：可以将收敛检查建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题，还有收敛范数的选择。

当用户确定收敛准则时，应该总是选择以力或力矩为基础的准则，它提供了收敛的绝对度量。如果需要，也可以位移为基础或以转动为基础的收敛检查，但是通常不单独使用它们。

2. 保守行为与非保守行为—过程依赖性

如果通过外载输入系统的总能量，当载荷移去时复原，则这个系统是保守的。如果能量被系统消耗（如由于塑性应变或滑动摩擦），则说系统是非保守的，一个非保守系统的例子如图 15-5 所示，图中①为材料的屈服点，②为材料的最大应力点，③为材料卸载后的塑性应变。

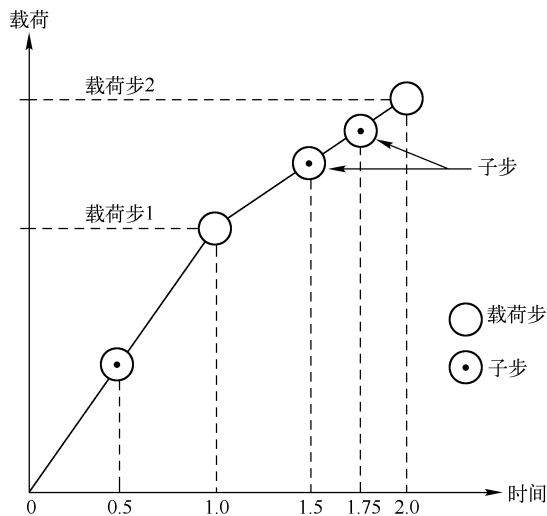


图 15-4 载荷步、子步和时间

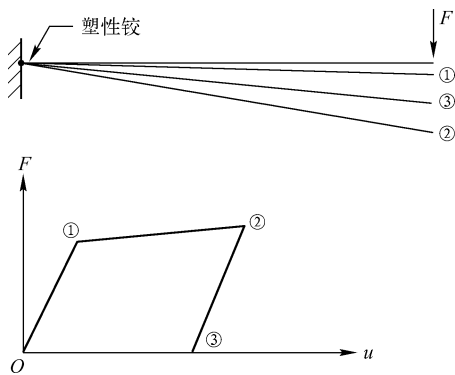


图 15-5 非保守系统力学行为

一个保守系统的分析是与过程无关的：通常可以任何顺序和以任何数目的增量加载而不影响最终结果。相反地，一个非保守系统的分析是过程相关的；必须紧紧跟随系统的实际加载历史，才能获得精确的结果。如果对于给定的载荷范围，可以有多于一个的解是有效的，这样的分析也可能是过程相关的。过程相关问题通常要求缓慢加载到最终的载荷值。

3. 子步

当使用多个子步时，用户需要考虑精度和代价之间的平衡；更多的子步通常导致较好的



精度，但以增加运行时间为代价。

用户可以激活自动时间步，以便根据需要调整时间步长，获得精度和代价之间的良好平衡。自动时间步将激活 ANSYS 程序的二分功能。二分法提供了一种对收敛失败自动矫正的方法。无论何时只要平衡迭代收敛失败，二分法将把时间步长分成两半，然后从最后收敛的子步自动重新启动。如果已二分的时间步再次收敛失败，二分法将再次分割时间步长然后重新启动，持续这一过程直到获得收敛或到达最小时间步长。

4. 载荷和位移方向

当结构经历大变形时，应该考虑到载荷将发生了什么变化。在许多情况中，无论结构如何变形，施加在系统中的载荷保持恒定的方向。而在另一些情况中，力将改变方向，随着单元方向的改变而变化，如图 15-6 所示。

ANSYS 程序根据所施加的载荷类型，可以模拟这两种情况。加速度和集中力将不管单元方向的改变，而保持它们最初的方向。表面载荷作用在变形单元表面的法向，且可被用来模拟“跟随”力。

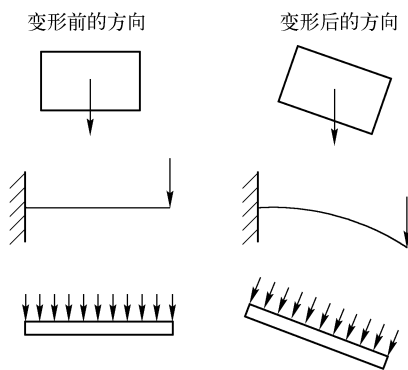


图 15-6 变形前后载荷的方向

注意：在大变形分析中，节点坐标系方向不变。因此计算出的位移在最初的方向上输出。

5. 非线性瞬态分析

非线性瞬态分析方法，与线性静态分析方法相似：以载荷增量加载，程序在每一步中进行平衡迭代。静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应。因此，在瞬态过程分析中，“时间”总是表示实际的时序。自动时间步长和二分特点同样也适用于瞬态过程分析。

15.2 结构非线性分析

本节介绍的非线性结构分析的方法适用于几何非线性、材料非线性和状态非线性。当遇到非线性问题时，首先进行问题的分类，即是几何非线性、材料分析还是状态非线性问题，其次按照总体的求解流程进行求解，然后求解中再根据每一个问题的不同的特点对求解过程进行完善，即可得到问题的解答。

15.2.1 非线性静态分析步骤

尽管非线性分析比线性分析更加复杂，但处理方法基本相同。只是在非线性分析的过程中，添加了需要的非线性特性。

非线性静态分析是静态分析的一种特殊形式。如同任何静态分析，处理流程主要由以下主要步骤组成。

1. 建模

这一步对线性和非线性分析基本上是一样的，尽管非线性分析在这一步中可能包括特殊的单元或非线性材料性质。如果模型中包含大应变效应，应力-应变数据必须依据真实应力和真实（或对数）应变表示。

2. 设置求解控制

设置求解控制包括定义分析类型、设置分析的常用选项和指定载荷步选项。在做结构非线性静态分析时，可以应用求解控制对话框来设置。该对话框对许多非线性静态分析提供了默认设置。这样，用户需要的设置降低到最少。

注意：对于非线性结构完全瞬态分析，建议应用求解控制对话框，但并不是必须如此。

(1) 在非线性静态分析中的一些特殊考虑

1) 在设置 `ANTYPE` 和 `NLGEOM` 时，如果是执行新的分析，选择大变形（`Large Displacement Static`），但要记住并不是所有的非线性分析都产生大变形。

2) 在进行时间设置时，这些选项可在任何载荷步改变。高级的时间/频率选项，参见下面的（2）。非线性分析要求在一个时间步上有多个子步，以使 `ANSYS` 能够逐渐地施加载荷，并取得精确解。`NSUBST` 和 `DELTIM` 命令产生相同的效果但互为倒数。`NSUBST` 定义一个载荷步上的子步数，而 `DELTIM` 显式地定义时间步大小。如果自动时间步（`AUTOTS`）关闭，则起始子步大小用于整个载荷步。

(2) 高级分析选项

1) 方程求解器。`ANSYS` 的自动求解控制在大多数情况下，激活稀疏矩阵直接求解器。这是默认的求解器，除了在子结构分析的生成步骤外。其他选项包括波前直接求解器和 `PCG` 求解器。对于实体单元，使用 `PCG` 求解器可能更快，尤其是在三维模型中。

如果用户采用 `PCG` 求解器，可以考虑用 `MSAVE` 命令降低内存应用。`MSAVE` 命令对于线性材料特性的 `SOLID92` 单元。为了应用这一命令，必须是小应变（`NLGEOM,OFF`）静力或完全瞬态分析。模型中不符合上述条件的其他部分，应用总体集成刚度矩阵来求解。对于符合上述条件的模型部分，用 `MSAVE,ON` 可能可节省 70% 的内存，但求解时间可能增加，这与计算机的配置和 `CPU` 速度有关。

在结构非线性分析中，选择稀疏矩阵求解器，还是选择 `PCG` 求解器，可参照下面的建议。

- 如果是梁、壳或者梁、壳、实体结构，选择稀疏矩阵求解器。
- 如果是三维结构，而且自由度数相对较大（200 000 个自由度或以上），选择 `PCG` 求解器。
- 如果问题是病态（如由不良单元形状引起的），或在模型的不同区域材料特性相差巨



大，或者位移边界条件不足，选择稀疏矩阵求解器。

2) 自动时间步。ANSYS 的自动求解控制打开自动时间步长 (AUTOTS,ON)。这一选项允许程序确定子步之间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步 (子步) 长。

在一个时间步的求解完成后，下一个时间步长的大小基于四种因素预计。

- 在最近过去的时间步中使用的平衡迭代的数目。
- 对非线性单元状态改变预测 (当状态改变临近时减小时间步长)。
- 塑性应变增加的大小。
- 蠕变增加的大小。

3) 收敛准则。程序将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则 (CNVTOL) (或者直到达到允许的平衡迭代的最大次数 (NEQIT))。如果默认的收敛准则不满意，可以自己定义收敛准则。

ANSYS 的自动求解控制应用等于 0.5% 的力 (或力矩) 的 L2 范数容限 (TOLER)，这对于大部分情况合适。在大多数情况下，除了进行力范数的检查外，还进行 TOLER 等于 5% 的位移 L2 范数的检查。

默认时，程序将通过比较不平衡力的平方和的平方根 (SRSS) 与 $VALUE \times TOLER$ 的值来检查力 (在包括转动自由度时，还有力矩) 的收敛。VALUE 的默认值是所加载荷的 SRSS 或 MINREF (其默认为 0.001)，取较大者。如果 SOLCONTROL, OFF，则对于力的收敛，TOLER 的默认值是 0.001，而 MINREF 的默认值为 1.0。

用户应当几乎总是使用力收敛检查。可以添加位移 (或者转动) 收敛检查。对于位移，程序将收敛检查建立在当前 (i) 和前面 ($i-1$) 次迭代之间的位移改变 (Δu) 上， $\Delta u = u_i - u_{i-1}$ 。

注意：如果用户明确地定义了任何收敛准则 (CNVTOL)，默认准则将失效。因此，如果用户定义了位移收敛检查，用户将不得不再定义力收敛检查 (使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则)。

使用严格的收敛准则将提高用户的结果精度，但以更多次的平衡迭代为代价。如果用户想紧缩收敛准则，用户应当改变 TOLER 一到两个数量级。一般地，用户应当继续使用 VALUE 的默认值；也就是说，通过调整 TOLER，而不是 VALUE，来改变收敛准则。用户应当确保 MINREF=0.001 的默认值在用户的分析范围内有意义。如果应用某一单位系统，使载荷变得十分小，可能需要指定较小的 MINREF 值。

在非线性分析中，不推荐把两个或多个不相连的结构放在一起分析，因为收敛检查试图把这些彼此不相连的结构联系起来，通常会产生不希望的残余力。

4) 在单一和多自由度系统中检查收敛。要在单自由度系统中检查收敛，用户对这一个自由度计算出不平衡力，然后将这个值与给定的收敛准则 ($VALUE \times TOLER$) 比较 (同样也可以对单自由度的位移或旋转收敛进行类似的检查)。然而，在多自由度系统中，用户也许想使用不同的比较方法。

ANSYS 程序提供如下三种不同的矢量范数用于收敛检查。

- 无穷范数在用户模型中的每一个自由度处重复单一自由度检查。
- L1 范数将收敛准则同所有自由度的不平衡力（或力矩）的绝对值的总和相比较。
- L2 范数使用所有自由度不平衡力（或力矩）的 SRSS 进行收敛检查。当然，对于位移收敛检查，可以执行附加的 L1、L2 检查。

对于下面例子，如果不平衡力小于或等于 5000×0.0005 ，且如果位移的改变（以 SRSS 检查）小于或等于 10×0.001 （也就是 0.01），子步将认为是收敛的。

```
CNVTOL,F,5000,0.0005,0
CNVTOL,U,10,0.001,2
```

5) 平衡迭代的最大次数

ANSYS 的自动求解控制把 NEQIT 的值根据问题的物理特性设置为 15~26 次平衡迭代。应用小时间步，可减少二次收敛迭代次数。

这个选项限制了一个子步中进行的最大平衡迭代次数（如关闭求解控制，默认=25）。如果在这个平衡迭代次数之内不能满足收敛准则，且如果自动步长是打开的（AUTOTS），分析将尝试使用二分法。如果二分法是不可行的，那么，分析将或者终止，或者进行下一个载荷步，依据用户在 NCVN 命令中发出的指示。

6) 预测-修正选项

如不存在梁或壳单元，ANSYS 的自动求解控制设置为 PRED,ON。如果当前子步的步长大大减小，PRED 将关闭。对于瞬态分析，将关闭预测选项。

对于每一个子步的第一次平衡迭代，用户可以激活自由度求解的预测。这个特点将加速收敛，且如果非线性响应是相对平滑的，它特别有用。在包含大转动或粘弹性的分析中它并不是非常有用。在大转动分析中，预测可能引起发散，因而不推荐使用。

7) 线性搜索选项

ANSYS 的自动求解控制，将根据需要关闭或打开线性搜索。对大多数接触问题，LNSRCH 打开；对大多数非接触问题，LNSRCH 关闭。

这个收敛增强工具用程序计算出的比例因子（为在 0~1 之间的值）乘以计算出的位移增量。因为线性搜索算法是用来对自适应下降选项（NROPT）进行的替代，如果线性搜索选项是开，自适应下降不被自动激活。不建议用户同时激活线性搜索和自适应下降。

当存在强制位移时，只有至少一次迭代的线性搜索值为 1，计算才可以收敛。ANSYS 调节整个 Δu 矢量，包括强制位移值，否则，除了强制自由度处以外，一个小的位移值将随处发生。直到迭代中的某一次具有 1 的线性搜索值，ANSYS 才施加全部位移值。

8) 步长缩减准则

为了更好地控制时间步长上的二分和缩减，应用 CUTCONTROL, Lab,VALUE,Option。默认时，对于 Lab=PLSLIMIT（最大塑性应变增量极限），VALUE 设置为 15%。设这么大的值，是为避免由高塑性应变引起的不必要的二分，因为高塑性应变可能是由用户并不感兴趣的局部奇异引起的。对于显式蠕变（Option=0），Lab=CRPLIM（蠕变增量极限），VALUE 设置为 10%。这对蠕变分析是一个合理的极限。对于隐式蠕变（Option=1），默认为无最大蠕变准则。但是用户可以指定蠕变率控制。对于二阶动力方程，每个周期的点数（Lab=NPOINT）默认为 VALUE=13，这样可以很小的代价获得有效精度。





3. 设置附加求解选项

这些选项不出现在求解对话框中。这些选项的默认值，一般很少需要改变。

(1) 求解控制对话框不能设置的高级分析选项

1) 应力刚化效应。为了考虑屈曲、分叉行为，ANSYS 在所有几何非线性分析中，包括了应力刚化。如果用户有信心放弃这种效应，则可以关闭应力刚化效应 (SSTIF, OFF)。在一些单元中，这个命令无作用。

命令: SSTIF

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Type | Analysis Options

2) 牛顿-拉普森选项。在存在非线性时，ANSYS 的自动求解控制将应用自适应下降关闭的完全牛顿-拉普森选项。但在应用点-点，点-面接触单元的摩擦接触分析中，自适应下降功能是自动打开的。下伏接触单元需要自适应下降才能收敛。

命令: NROPT

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Type | Analysis Options

仅在非线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切刚度矩阵。如果用户不想采用默认值，可以指定这些值中的一个。

① 程序选择 (NROPT,ANTO): 程序基于用户模型中存在的非线性种类选用这些选项中的一个。需要时牛顿-拉普森方法将自动激活自适应下降。

② 完全牛顿-拉普森法 (NROPT,FULL): 程序使用完全的牛顿-拉普森方法。在这种处理方法中，每进行一次平衡迭代，就修改刚度矩阵一次。

如果自适应下降是打开 (可选) 的，只要迭代保持稳定，程序将仅使用正切刚度矩阵。如果在一次迭代中探测到发散倾向，程序抛弃发散的迭代且重新开始求解，应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代回到收敛模式时，程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对复杂的非线性问题自适应下降通常将提高程序获得收敛的能力。

- 修正的牛顿-拉普森法 (NROPT,MODI): 使用修正的牛顿-拉普森方法。在这种方法中，正切刚度矩阵在每一子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。自适应下降不可用。
- 初始刚度牛顿-拉普森法 (NROPT,INIT): 在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵。这一选项完全选项相比似乎较不易发散，但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。它不适用于大变形分析。自适应下降不可用。
- 不对称矩阵完全牛顿-拉普森方法 (NROPT,UNSYM): 应用完全牛顿-拉普森方法，刚度矩阵在每一次平衡迭代中都修正。此外，它生成并使用在下面任何一种情况中可以应用的不对称矩阵: 如用户在运行压力产生的破坏分析，不对称的压力载荷刚度可能有助于取得收敛。可应用 SOLCONTROL,INCP 命令来包括载荷刚度。如果应用 TB,USER 命令定义不对称材料模型，则需要用 NROPT,UNSYM 命令来充分应用所定义的特性。如进行接触分析，不对称接触刚度矩阵可以完全地耦合滑动和法向刚度。用户应首先试验 NROPT,FULL 命令; 然后如果收敛困难的话，再试验 NROPT,UNSYM 命令。

注意，应用不对称求解器需要比对称求解器更多的计算机时间。

如果模型有多态单元，则将在状态改变时进行叠代修正，而不管牛顿-拉普森选项设置

如何。

(2) 求解控制对话框不能设置的高级载荷步选项

1) 蠕变准则。

如果结构表现出蠕变行为，可以指定蠕变准则用于自动时间步调整（CRPLIM，CRCR，Option）（如果自动时间步长（AUTOTS）关闭，蠕变准则无效）。程序将对所有单元计算蠕应变增量（在最近时间步中蠕变的变化 $\Delta \varepsilon_{cr}$ ）对弹性应变 ε_{el} 的比值。如果最大比值比判据 CRCR 大，程序将减小下一个时间步长；如果小，程序或许会增加下一个时间步长。对于显式蠕变（OPTION =0），如果比值 $\Delta \varepsilon_{cr} / \varepsilon_{el}$ 高于 0.25 的稳定界限，且如果时间增量不能被减小，解可能发散，且分析将由于错误信息而终止。这个问题可以通过使最小时间步长足够小来避免（DELTIM 和 NSUBST）。对于隐式蠕变（OPTION =1），默认无最大蠕变极限，但用户可以指定任意的蠕变率控制。

命令：CRPLIM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Creep Criterion

注意：如果在分析中不需要包括蠕变效应，则应用 RATE 命令及 Option=OFF，或把时间步设置成比前一个时间步长些，但不大于 $1.0E-6$ 。

2) 时间步开放控制。

这个选项可用于热分析。这个选项的主要应用是最终温度达到稳态的非稳态热分析。在这种情况下，时间步可很快开放。其默认值是，如果 TEMP 增量在三个连续子步中小于 0.1（NUMSTEP=3），则时间步大小可以为“开放”（默认值=0.1）。然后时间步被连续增加以加快求解效率。

命令：OPNCONTROL

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Open Control

3) 求解监视。

这个选项为监视指定节点上的指定自由度的求解值提供了方便。这个命令为用户快速观察求解收敛效率提供了可能，而不必通过冗长的输出文件来取得这些信息。例如，在一个子步上尝试次数过大，这个文件包含的信息将提供指示：要么降低初始时间步，要么增加最小的子步数，这可通过 NSUBST 命令来避免二分次数过多。

命令：MONITOR

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Monitor

4) 激活和杀死选项。

根据需要指定“生”、“死”选项。对选定的单元，可以“杀死”（EKILL）和“激活”（EALIVE），以模拟在结构中移走或添加材料。作为标准的“生”、“死”方法以外的另一个方法，用户可以对所选择的单元在载荷步之间改变材料特性（MPCHG）。

命令：EKILL /EALIVE

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Birth & Death | Kill Elements Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Birth & Death | Activate Elem



程序通过用一个非常小的数（它由 ESTIF 命令设置）乘以它的刚度并从总质量矩阵消去它的质量来“杀死”一个单元。对杀死单元的单元载荷（压力、热通量、热应变等等）同样地设置为零。用户需要在前处理中定义所有可能的单元，用户不可能在 SOLUTION 中产生新的单元。

要在用户的分析的后面阶段中“激活”的那些单元，在第一个载荷步前应当被“杀死”，然后在适当的载荷步的开始被重新“激活”。当单元被重新“激活”时，它们具有零应变状态，且（如果 NLGEOM,ON）它们的几何构形（长度、面积等等）被修改来与它们现在变形后的位置相适应。

另一个在求解过程中影响单元行为的方法是修改选定单元的材料特性：

命令：MPCHG

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Change Mat Props | Change Mat Num

注意：应用（MPCHG）是要注意。在求解期间改变它的材料性质参考号，可能产生不希望的结果，特别是如果用户改变材料非线性特性（TB）。

5) 输出控制选项。

除了可以通过求解控制对话框可以设置的 OUTRES 外，用户还可以设置其他输出选项。

命令：OUTPR /ERESX

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout

Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Output Ctrl | Integration Pt

打印输出选项（OUTPR）可在输出文件（Jobname.OUT）中包括所想要的任何结果数据。

结果外推（ERESX）复制一个单元的积分点应力和弹性应变结果到节点来替代外推，如果在单元中存在非线性（塑性、蠕变、膨胀）的话。积分点非线性应变总是被复制到节点。

4. 施加载荷

在这一步把载荷施加到模型中，具体过程参见加载一章。记住惯性载荷和点载荷将保持方向不变，但表面载荷在大变形分析中将跟随结构的变形而变化。用户可以定义一维数据表来施加复杂边界条件。

5. 求解

1) 把数据库保存为一个文件。

命令：SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save as

2) 求解。

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

3) 如用户定义了多个载荷步，则必须指定时间设置、载荷步选项等，然后保存和求解每个附加的载荷步。

4) 退出求解器。

命令：FINISH

GUI: 关闭求解菜单

6. 观察结果

非线性静态分析的结果，主要由位移、应力、应变以及反作用力组成。可以使用通用后处理器 POST1，或者时间历程后处理器 POST26，来考察这些结果。

记住用 POST1 一次仅可以读取一个子步，且来自那个子步的结果应当已被写入 Jobname.RST。典型的 POST1 后处理顺序将在下面描述。

要记住的要点有：用 POST1 考察结果，数据库中的模型必须与用于求解计算的模型相同；结果文件（Jobname.RST）必须是可用的。

15.2.2 非线性瞬态分析步骤

许多需要进行非线性瞬态分析的任务，与非线性静力分析和线性完全瞬态分析相同或相似。本节将论述非线性瞬态分析的一些附加考虑。

1. 建模

这一步骤与非线性静力分析相同。但是，如果分析中包含时间的积分效应，则必须输入质量密度。如果需要，还可以定义与材料相关的结构阻尼。

2. 施加载荷和求解

(1) 指定瞬态分析类型，定义分析选项

- 新的分析或重启动 (ANTYPE)。
- 分析类型：瞬态 (ANTYPE)。
- 大变形效应 (NLGEOM)。
- 大位移瞬态（如果用求解控制对话框设置分析类型）。

(2) 施加载荷，并指定载荷步选项

这与线性完全瞬态动力分析相同。瞬态时间历程通常需要多个载荷步，其中第 1 载荷步典型地用于建立初始条件，如前所述。此外，非线性静力分析中所用的一般的非线性、生或死、输出控制等，在非线性瞬态分析中也可应用。

在非线性瞬态分析中，时间必须大于 0。

对于非线性瞬态分析，用户必须说明是阶梯载荷还是斜坡载荷 (KBC)。

命令：ALPHAD/ BETAD /TIMINT /TINTP

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Time/Frequenc | Damping

Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration

(3) 动力选项解释

1) 阻尼常数用常数质量 (ALPHAD) 和刚度 (BETAD) 矩阵乘子定义 Rayleigh。在非线性分析中，刚度可能激烈改变——除特殊情况外，不要应用 BETAD。

2) 时间积分效应 (TIMINT)。只在瞬态分析中，时间积分效应才默认打开。对于蠕变、粘弹性、粘塑性、膨胀，应当关闭时间积分效应（即进行静力分析）。这些时间相关效应通常不包括在动力分析中，因为瞬态动力时间步，对于任何明显的长期变形来说，时间太短。



除了在运动学（刚体运动）分析中，用户应当很少需要调整瞬态积分参数（TINTP），它对 Newmark 方程提供数值阻尼。ANSYS 的自动求解控制，把默认设为一个新的时间积分方案，对于应用一阶瞬态方程。这通常用于不稳定状态热问题（ $\theta=1$ ，由 SOLCONTROL, ON 设置），这是反向欧拉（EULER）方案。它是无条件稳定的。对于如相变这样的高度非线性热问题，这种方案更有效。振荡极限容限默认为 0.0，以使响应的一阶特征值可用于更精确地决定一个新的时间步值。

注意：如果用求解控制对话框设置求解控制，用户可在 Transient 标签中进入所有这些选项。

(4) 把各个载荷步的载荷数据写到载荷步文件中

命令：LSWRITE

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

(5) 把数据库备份到一个命名文件中

命令：SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save As

(6) 开始求解

命令：LSSOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | From LS Files

(7) 在求解完所有载荷步后，退出求解

命令：FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单。

3. 观察结果

与非线性静力分析一样，可以用 POST1 来处理某一时刻的结果，其使用方法也相同。再次提醒，应在进行后处理之前检查计算是否收敛。

时间历程后处理程序 POST26 的应用，也与非线性静力分析中基本相同。

15.2.3 非线性分析的提示

1. 准备非线性分析

花一些时间来认真研究并进行分析。这样可以避免许多与非线性分析有关的困难。下面的建议对用户应当有所帮助。

(1) 熟悉程序动作和结构行为

如果用户在以前未应用过某一种非线性特性，则应当在分析大型、复杂的模型之前，首先建立一个十分简单的模型，并确保对其特性了解。

首先，对初步的简化模型，深入了解其结构行为。对于非线性静力分析模型，一个初步的线性静力分析，也可以揭露模型在那个区域首先经受非线性响应，在什么样的载荷水平下，这些非线性将起作用。对于非线性瞬态分析，初步的梁、质量、弹簧模型，可以用最小代价提供对结构的深入了解。初步的非线性静力、线性瞬态动力和（或）模态分析，也可帮助用户在进行最终的非线性瞬态动力分析前了解结构非线性响应的各个方面的内容。

(2) 保持简洁

保持最终模型尽可能简单。如果可用二维平面应力、平面应变或轴对称模型来代表三维结构, 就应该这么做。如果可通过对称或反对称面来使模型规模减小, 也就应该这么做。然而, 如果载荷是反对称的, 则通常不采用反对称的特点。反对称也可能在大变形分析时不适用于运用。如果忽略某一非线性细节而不会影响模型关键区域的结果, 那么就应这么做。在可能时, 用静力等效载荷来模拟瞬态动力载荷。考虑把模型中的线性区域作为一个子结构, 以减小计算工作量。

(3) 应用足够的网格密度

应当认识到, 在经受塑性变形的区域, 应当有足够的积分点密度。低阶单元提供了与高阶单元相同的积分点数目, 因此在塑性分析中应用低阶单元较合适。在塑性铰区域, 网格密度尤其重要。

在接触表面要有足够的网格密度, 以使接触应力分布较光滑。为了求解应力, 也要有足够的网格密度。需要计算应力或应变的区域要比位移或非线性解析区域网格要密一些。

对于需要高阶模态时, 网格密度要足够。需要的单元数目, 取决于单元假定的位移形状函数, 以及模态形状本身。

对于瞬态动力波传播, 要采用足够密的网格。如果波传播很重要, 则一个波长最小要 20 单元。

(4) 逐渐地施加载荷

对于非保守、路径相关系统, 施加载荷时要用足够小的载荷增量, 以保证分析接近载荷-响应曲线。

有时, 可以采用逐渐加载的方法, 使得保守系统的收敛行为有所改进, 这样可使牛顿-拉普森平衡迭代数最小。

2. 克服收敛问题

收敛失败可能表示结构产生物理上的不稳定性, 也可能仅仅是在有限元模型中的某些数值问题引起的。

ANSYS 程序为用户提供了一些克服数值不稳定的工具。如果用户正在模拟的系统实际上是物理不稳定的 (即存在 0 或负刚度), 则问题就棘手得多了。用户有时可用一种或多种窍门来得到这种情况下的解。下面来介绍一些可在分析中用来尝试改进收敛的技术和方法。

(1) 用图形追踪收敛性

在执行非线性分析过程中, ANSYS 在每个迭代期间根据收敛准则计算收敛模。批命令方式和交互方式均可应用的图形求解追踪 (GST) 特性, 在计算过程中将显示计算的收敛模以及准则。默认时, 对于交互方式, GST 为 ON; 而对于批命令方式, GST 为 OFF。要打开或关闭 GST, 可应用:

命令: /GST

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | OutputCtrls | Grph Solu Track

(2) 应用自动时间步

请确保应用 DELTIM 或 NSUBST 命令设置自动时间步的上限, 特别是对复杂模型。这将确保精确地包括所需的模态和行为。在下述情况下, 这可能非常重要。



- 有局部动态行为的问题（如透平机叶片和毂座安装），这种情况下，系统的低频能量可能控制高频区域。
- 对于在载荷中某些短时间斜坡载荷的问题。如果时间步尺寸允许变得太大，载荷历程的斜坡部分可能无法精确表征；
- 对于承受恒定频率范围激励的结构问题。

在模拟运动学结构（即有刚体运动）时要特别小心。下面的方法可帮助用户取得良好的解：

- 求解时结合显著的数值阻尼（在 TINTP 命令中， $0.45 < \gamma < 0.1$ ），以过滤掉高阶频率噪声，特别是在应用较大的时间步的情况下。在运动学分析中，不要应用 α 阻尼（质量矩阵乘子，ALPHAD 命令），因为它会使刚体运动（0 频率的模式）受阻。
- 避免强迫位移历程，因为强迫位移输入理论上会产生加速度无限跳跃，从而引起 Newmark 时间积分算法的稳定问题。

（3）应用线性搜索

线性搜索（LNSRCH）可以加强收敛，但可能开销很大（特别是塑性分析）。在下列情况下，可以考虑打开线性搜索。

- 当结构是力-加载（与位移控制对应）。
- 在分析一个刚度会增大的薄结构（如鱼杆）时。
- 如果用户从程序输出信息注意到振荡收敛情况。

（4）应用弧长法

可以应用弧长法（ARCLen 和 ARCTRM）来得到许多物理不稳定结构的数值稳定解。在应用弧长法时，请记住如下几点。

- 弧长法仅限于比例结构加载的静力分析。
- 程序根据第一个子步的第一次迭代的载荷或位移增量计算参考弧长半径。在选择子步数时，更多的子步将导致较长的求解时间。理想地，需要选择最小子步来达到有效的求解。
- 用户可能不得不对子步数先进行“猜测”，然后调整，然后再分析。
- 在激活弧长法时不要用线性搜索（LNSRCH）、预测（PRED），自适应下降（NROPT,,,ON）、自动时间步（AUTOTS,TIME,DELTIM）或时间积分效应（TIMINT）。
- 不要试图应用基于位移（CNVTOL,U）的收敛判据，要用基于力（CNVTOL,F）收敛的判据。
- 为了在应用弧长法时使求解时间最小，一个子步上的最大平衡迭代数（NEQIT）应当小于或等于 15。
- 如果弧长法求解在预先设置的最大迭代数（NEQIT）上收敛失败，程序将自动二分并继续求解。直到得到收敛解，否则将一直二分下去或直到应用了最小的弧长半径，最小弧长半径用 NSBSTP（NSUBST）和 MINARC（ARCLen）定义。
- 通常不能用这个方法来得指定载荷或位移处的解，因为在平衡激活时，其值沿弧长改变。

在非线性屈曲分析中，应用弧长法时，可能难以确定载荷或挠度的极限值（按已知的容

差)。因为用户通常不得不应用试算法调整参考弧长半径(应用 NSUBST)来得到极值点的解。因此对于非线性屈曲分析,应用标准牛顿-拉普森迭代法及二分(AUTOTS),可能更为方便。

用户在应用弧长法时,一般应当避免应用 JCG 求解器(EQSLV),因为弧长法可能得到负定义刚度(负 Pivot),这在用 JCG 求解器时可能会求解失败。

在任何载荷步开始时,用户可以自由地从牛顿-拉普森迭代法切换到弧长法。然而,要从弧长法切换到牛顿-拉普森迭代法,则必须终止并重启动,在重启动的第一个载荷步上关闭弧长法(ARCLN, OFF)。

在下面所述情况下,弧长法求解终止。

- 达到 ARCTRM 或 NCNV 命令定义的极限值时。
- 在作用载荷上的解收敛时。
- 应用放弃文件(Jobname.ABT)时。

应用载荷-挠度曲线作为评估和调整分析的指引,这样有助于达到合适的结果。在每次分析中,用图形来显示载荷-挠度曲线,应用 POST26 命令,通常是一个好的主意。

经常,通过追踪不成功的弧长法分析,可以发现弧长半径要么太大,要么太小。在分析中追踪到沿载荷-挠度曲线反向“漂移回去”,是一个典型的难题,这是由太大或太小的弧长半径引起的。研究载荷-挠度曲线可以搞清楚这一问题。然后可应用 NSUBST 和 ARCLN 命令调整弧长半径大小和范围。

总弧长载荷系数(SOLU 命令中的 ALLF 项)可以为正或负。与此类似,在弧长分析中的 TIME 与总弧长载荷系数相关,也可以为正或为负。负的 ALLF 或 TIME 表示弧长特性在相反方向上施加载荷,以便保持稳定。负的 ALLF 或 TIME 值在各种跳跃分析中通常可碰到。

在 POST1 后处理程序(SET)把弧长结果读入到数据库时,用户应当总是用载荷步和子步数(LSTEP 和 SBSTEP),或用数据集号(NSET)来作为合适结果的参照。不能应用 TIME 作为参照号,因为 TIME 在弧长分析中不总是单调增加的。此外,程序不能正确解释负的 TIME 值。如果 TIME 变成负值,请记住在建立任何 POST26 图形前,定义一个合适的变化范围。

(5) 在模型响应中人为抑制发散

如用户不想应用弧长法来分析一个力-加载结构在开始或通过一个奇异(0 刚度)构形,有时可以应用其他技术来人工抑制模型响应中的发散。

在一些情况下,可用强迫位移代替力。这个方法可用于开始一个接近于平衡位置的静力分析,或者在不稳定响应(如跳跃或后屈曲)之前控制位移。

另一个可用于一些初始不稳定问题的有效技术,是把静力问题当做“缓慢的动力问题”来分析(即在试算中应用时间-积分效应,以避免在任一载荷步上解的分叉)。

也可以把临时人工刚度应用到不稳定的自由度上,这要应用控制单元,或在其他单元上应用“生死”选项。这里的思路是为了防止从计算中得到不真实的大位移,人为地约束系统(在载荷步之间)。在系统变形到稳定构形时,刚度被人为移走。

(6) 关闭特殊单元形状

ANSYS 提供了“不协调”模式列式(也称为“特殊的形状”)用于模拟弯曲。如果一个





问题是显著的大变形，则可以选择关闭“特殊形状”，以减少 CPU 及存储要求，以加强收敛。然而这样做的结果是排除了模拟任何弯曲的能力。

(7) 明智地应用“生死”选项

结构刚度矩阵的任何突然改变，可能会引起收敛问题。在激活或杀死单元时，试一下把改变分开到几个子步上。此外还要知道，在激活或杀死单元时可能会产生奇异（如尖锐的凹角）。这种奇异也可能引起收敛问题

(8) 用图形显示载荷和响应历程

这个验证技术可以看做是图形与另两种技术（合理性检查和迭代历程检查）的结合。POST26 的载荷和响应历程图应当与该结构的行为相吻合。感兴趣的结果如位移、反力、应力等，应当揭示相对光滑的响应历程。任何不光滑的情况可能表示载荷步太大。

15.3 几何非线性

15.3.1 大应变效应

一个结构的总刚度依赖于它的组成部件的方向和单个部件的刚度。当一个单元的节点经历位移后，那个单元对总体结构刚度的贡献可以以两种方式改变。首先，如果这个单元的形状改变，它的单元刚度将改变。其次，如果这个单元的取向改变，它的局部刚度转化到全局部件的变换也将改变。小的变形和小的应变分析假定位移小到足够使所得到的刚度改变无足轻重。这种刚度不变假定意味着使用基于最初几何形状的结构刚度的一次迭代足以计算出小变形分析中的位移。

相反，大应变分析考虑由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响，且反之亦然，所以在在大应变分析中需要迭代求解来得到正确的位移。通过发出 NLGEOM,ON 命令（GUI 路径：Main Menu | Solution | Analysis Options），来激活大应变效应。这种效应改变单元的形状和取向，且还随单元转动表面载荷。在大多数实体单元，以及部分的壳单元中大应变特性是可用的。

大应变过程对单元所承受的总旋度或应变没有理论限制。然而，应限制应变增量以保持精度。因此，总载荷应当被分成几个较小的步，这可用（NSUBST, DELTIM, AUTOTS）命令自动实现。无论何时如果系统是非保守系统，如在模型中有塑性或摩擦，或者有多个大位移解存在（如具有突然转换现象），使用小的载荷增量具有双重重要性。

15.3.2 应力与应变

在大应变求解中，所有应力与应变输入和结果将依据真实应力以及真实或对数应变，一维时，真实应变将表示为 $\varepsilon = \ln(l/l_0)$ 。对于响应的小应变区，真实应变和工程应变基本上是一致的。要从小工程应变转换成对数应变，使用 $\varepsilon_{\ln} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$ 。要从工程应力转换成真实应力，使用 $\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng})$ （这种应力转化仅对不可压缩塑性应力—应变数据是有效的）。

为了得到可接受的结果，对真实应变超过 50% 的塑性分析，应使用大应变单元。应该认识到在大应变分析的任何迭代中粗劣的单元形状（大的纵横比，过度的顶角以及具有负面积的已扭曲单元）将是有害的。因此，必须像注意单元的原始形状一样注意单元已扭曲后的形

状（除了探测出具有负面积的单元外，ANSYS 程序对于求解中遇到的粗劣单元形状不发出任何警告，必须进行人工检查）。如果已扭曲的网格是不能接受的，可以人工改变开始网格（在容限内）以产生合理的最终结果（参看 15-7）。

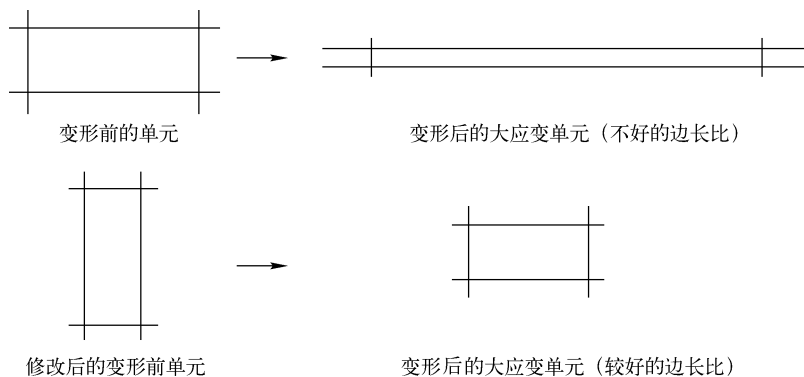


图 15-7 单元变形前与变形后

15.3.3 小应变大位移

某些单元支持大的转动，但不支持大的形状改变。一种称做大位移的大应变特性的受限形式对这类单元是适用的。在一个大位移分析中，单元的转动可以任意地大，但是应变假定是小的。在所有梁单元和大多数壳单元中，以及许多非线性单元中这个特性是可用的。通过打开 NLGEOM,ON（GUI 路径 Main Menu | Solution | Analysis Options）来激活那些支持这一特性的单元中的大位移效应。

15.3.4 应力刚化

结构的面外刚度可能极大地受那个结构中面内应力状态的影响。面内应力和横向刚度之间的耦合，通称为应力刚化，在薄的、高应力的结构中，如缆索或薄膜中，是最明显的。一个鼓面，当它绷紧时会产生垂向刚度，这是应力强化结构的一个普通的例子。尽管应力刚化理论假定单元的转动和应变是小的，在某些结构的系统中（如在图 15-8a 中），刚化应力仅可以通过进行大挠度分析得到。在其他的系统中（如图 15-8b 中），刚化应力可采用小挠度或线性理论得到。

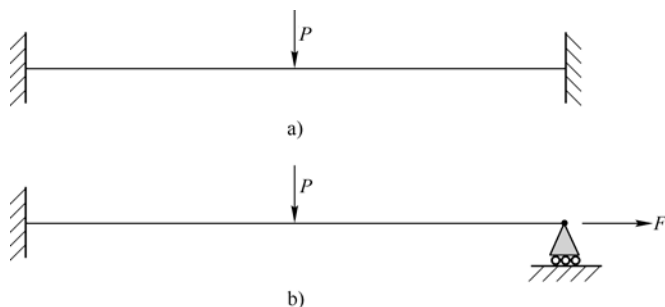


图 15-8 梁的应力刚化

a) 系统类型 1 b) 系统类型 2



要在第二类系统中使用应力刚化，必须在第一个载荷步中发出 `SSTIF,ON` 命令（GUI 路径：Main Menu | Solution | Analysis Options）。ANSYS 程序通过生成和使用一个称为“应力刚度矩阵”的辅助刚度矩阵来考虑应力刚化效应。尽管应力刚度矩阵是使用线性理论得到的，但由于应力（应力刚度矩阵）在每次迭代之间是变化的，因而它是非线性的。

大应变和大挠度过程包括初始应力效应，它作为大应变和大挠度理论的一个子集，对于许多实体和壳单元，当大变形效应被激活时（`NLGEOM,ON`）（GUI：Main Menu | Solution | Analysis Options）自动包括初始刚化效应。

在大变形分析中（`NLGEOM, ON`）包含应力刚化效应（`SSTIF, ON`）将把应力刚度矩阵加到主刚度矩阵上，以在具有大应变或大挠度性能的大多数单元中产生一个“近似的”协调切向刚度矩阵。

在大变形分析中使用应力刚化的建议如下。

- 对于大多数实体单元，应力刚化的效应是与问题相关的，在大变形分析中的应用可能提高也可能降低收敛性。在大多数情况下，首先应该尝试一个应力刚化效应关闭（`OFF`）的分析。如果用户正在模拟一个受到弯曲或拉伸载荷的薄的结构，当用应力刚化关（`OFF`）时遇到收敛困难，则尝试打开应力硬化。
- 应力刚化不建议用于包含“不连续单元”的结构。对于这样的问题，当应力刚化为开（`ON`）时，结构刚度上的不连续线性很容易导致求解“胀破”。
- 对于杆、梁和壳单元，在大挠度分析中通常应使用应力刚化。实际上，在应用这些单元进行非线性屈曲和后屈曲分析时，只有当打开应力刚化时才可得精确的解。然而，当用户应用杆、梁或者壳单元来模拟刚性连杆、耦合端或结构刚度的大变化时，用户不应使用应力刚化。

注意：无论何时使用应力刚化，务必定义一系列实际的单元实常数。使用不是“成比例”的实常数将影响对单元内部应力的计算，且将相应地降低那个单元的应力刚化效应。结果将是降低解的精度。

15.3.5 旋转软化

旋转软化是指动态质量效应调整（软化）旋转物体的刚度矩阵。在小位移分析中这种调整近似于由于大的环形运动而导致几何形状改变的效应。通常它和预应力（`PSTRES`）一起使用，这种预应力由旋转物体中的离心力所产生。它不应和其他变形非线性、大挠度和大应变一起使用。当只要进行指定转速的预应力模态分析时，旋转软化就会自动激活。

15.4 屈曲分析

屈曲分析是一种用于确定结构开始变得不稳定时的临界载荷和屈曲模态形状（结构发生屈曲响应时的特征形状）的技术，非线性屈曲分析是一种典型且重要的几何非线性分析。

15.4.1 屈曲分析的类型

ANSYS 提供了两种结构屈曲载荷和屈曲模态的分析方法——非线性屈曲分析和特征值

(线性) 屈曲分析。这两种方法通常得到不同的结果, 下面先讨论一下二者的区别。

1. 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析比线性屈曲分析更精确, 故建议将其用于对实际结构的设计或计算。该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷。线性技术, 模型中就可以包括诸如初始缺陷、塑性、间隙、大变形响应等特征。此外, 使用偏离控制加载, 用户还可以跟踪结构的后屈曲行为。

2. 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度(分叉点)。该方法相当于教科书里的弹性屈曲分析方法。例如, 一个柱体结构的特征值屈曲分析的结果, 将与经典欧拉解相当。但是, 初始缺陷和非线性使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲的。因此, 特征值屈曲分析经常得出非保守结果, 通常不能用于实际的工程分析中。

3. 屈曲分析命令

用户可以应用与静力分析相同的命令集来进行屈曲分析。同样, 不论何种分析, 都可以应用类似的 GUI 菜单来建立模型和求解。

15.4.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是在大变形效应开关打开的情况下(NLGEOM,ON)的一种静力分析, 该分析过程一直进行到结构的极限载荷或最大载荷为止。其他诸如塑性等非线性也可以包括在分析中。

1. 施加载荷增量

非线性屈曲分析的基本方法是, 逐步地施加一个恒定的载荷增量, 直到解开始发散为止。尤其重要的是, 要一个足够小的载荷增量, 来使载荷达到预期的临界屈曲载荷。若载荷增量太大, 则屈曲分析所得到的屈曲载荷就可能不精确。在这种情况下, 打开二分和自动时间步长功能(AUTOTS,ON)有助于避免这种问题。

2. 自动时间步长功能

打开自动时间步长功能, 程序将自动地寻找出屈曲载荷。如果在一个静力分析中, 打开了自动时间步长功能, 并且加载方式是斜坡加载, 而在某一给定载荷下解不收敛, 程序就会将载荷增量减半, 在这个载荷下重新进行新一轮求解。在一个屈曲分析中, 每一次这种收敛失败都通常伴随着一个“负主对角”信息, 这意味着所施加的载荷等于或超过了屈曲载荷。如果程序接着又成功地求得了一个收敛解, 则用户可以忽略这些信息。如果应力刚度激活(SSTIF,ON), 则用户应当在没有自适应下降(NROPT,FULL,OFF)的情况下运行, 以确保达到屈曲载荷的下限。随着这种二分和重新求解过程, 使得载荷步增量达到了所定义的最小时间步增量(由 DELTIM 或 NSUBST 命令定义)时, 通常也就收敛到了临界载荷。因此用户所定义的最小时间步, 将直接影响到求解的精度。

3. 注意事项

特别要注意的是, 一个非收敛的解, 并不意味着结构达到了其最大载荷。它也可能是由于数值不稳定引起的, 这可以通过细化模型的方法来修正。跟踪结构响应的载荷-变形历程, 可以确定一个非收敛的载荷步, 到底是表示了一个实际的结构屈曲, 还是反映了其他问题。用户可以先用弧长法(ARCLEN 命令)来进行预分析, 以预测屈曲载荷(近似值), 将



此近似值与用二分法求得的更精确的值做比较, 来确定是否结构已真正达到了其最大载荷。用户也可以用弧长法本身来求得一个精确的屈曲载荷, 但这需要用户自己不断地修正弧长半径, 以及人工直接干预程序来执行一系列重求解。

除上面的论述以外, 用户还需注意以下六点。

1) 如果结构上的载荷完全是在平面内的(只有膜应力或轴向应力), 则不会产生导致屈曲所必须的面外变形, 所进行的分析也就不能求得屈曲结果。要克服这个问题, 可以在结构上施加一个很小的面外扰动, 如一个适当的瞬时力或强制位移, 以激发屈曲响应。对结构做一个预先的特征值屈曲分析来预测屈曲模态很有用, 它可以帮助用户确定施加扰动的合适位置以激起所希望的屈曲响应。初始缺陷或扰动应与实际结构在位置和大小上一致, 因屈曲载荷对这些参数非常敏感。

2) 在大变形分析中, 力和位移将保持其初始方向, 但表面载荷将跟随结构改变其几何形状, 因此, 要确保所施加的载荷类型正确。

3) 用户在实际工作中应将一个稳态分析进行到结构的临界载荷点, 以计算出结构产生非线性屈曲的安全系数。仅仅说明结构在一个给定的载荷水平下是稳定的, 在大多数实际的设计实践中并不足够。用户通常应提供一个确定的安全系数, 而这一点必须通过屈曲分析得到结构实际的极限载荷来实现。

4) 用户可以通过激活弧长法 (ARCLEN), 将分析扩展到后屈曲范围。使用该特征来跟踪“载荷-变形”曲线通过那些发生了“阶跃 (snap-through)”或“回跃 (snap-back)”响应的区域。

5) 对于那些支持一致切向刚度矩阵的单元, 激活一致切向刚度矩阵可以增强非线性屈曲分析的收敛性, 改善求解的精确度。单元的 KEYOPT 必须在求解的第一载荷步之前定义, 并且一旦求解开始后就不能改变。

6) 其他许多单元(如 BEAM188、BEAM189、SHELL181)将在 (NLGEOM, ON) 时提供一致切线刚度矩阵。

4. 初始缺陷或扰动的施加

在进行非线性的屈曲分析时, 分析过程与一般的非线性分析过程相同。采用一系列子步以增量加载的方式施加一给定载荷, 直到求解发散。在很多情况下, 为了有助于计算, 应在模型上施加初始缺陷或扰动。

预先进行一个特征值分析有助于非线性屈曲分析。

特征值屈曲载荷是预期的线性屈曲载荷的上限, 可以作为非线性屈曲分析的给定载荷, 在渐进加载达到此载荷前, 非线性求解应该发散。

特征矢量屈曲形状可以作为施加初始缺陷或扰动载荷的根据。

以特征值的屈曲形状为基础定义初始几何缺陷的步骤如下。

- 1) 建立没有初始几何缺陷的模型。
- 2) 进行特征值屈曲分析。
- 3) 用 UPGEOM 或 UPCOORD 命令来施加几何缺陷。
- 4) 进行非线性屈曲分析。

5. 弧长法的使用

当使用弧长法时, 应注意以下几点。

1) 在采用弧长法时, 为了求得屈曲载荷, 施加一个比预测的屈曲载荷高出 10%~20% 的给定载荷, 一般来说, 特征值屈曲载荷是一个较好的估计值。

2) 当采用弧长法时, 为了使计算更快, 一般采用两个载荷步。

① 在第一个载荷步中, 打开自动步长使用一般的非线性屈曲过程, 直到接近临界载荷。

② 在第二个载荷步中, 使用弧长法使分析通过临界载荷。

3) 采用弧长法时, 不要指定时间值, 在进行弧长分析时, 时间值实际上是载荷因子 (给定载荷的乘子)。

4) 如果使用弧长法分析失败, 使用 NSUBST 命令的 NSBSTP 区域来减少初始半径可以加强收敛, 使用 ARCLen 命令的 MINARC 域来降低弧长半径的下限也可以克服收敛困难。

5) 使用在时间历程后处理中得到的载荷-变形曲线来指导分析, 当调整分析时, 确定结构在哪儿变得不稳定可能是十分有用的。

6) 使用较低的平衡迭代数 (10~15)。

7) 为了引起非线性的屈曲模式, 有些弧长问题需要初始几何缺陷, 对于这种情况, 使用特征值分析得到模态, 然后给模型加一个对应于此模态的几何缺陷来启动模态形状。

15.4.3 特征值 (线性) 屈曲分析

1. 基本知识

应力刚度矩阵可以加强或减弱结构的刚度, 这取决于刚度应力是拉应力还是压应力。

对受压情况, 当 F 增大时, 弱化效应增加, 当达到某个载荷时, 弱化效应超过结构的固有刚度, 此时没有了净刚度, 位移无限增加, 结构发生屈曲。

ANSYS 的线性屈曲分析使用相似的概念, 使用特征值的公式计算造成结构负刚度的应力刚度矩阵的比例因子。

$$([K] + \lambda[S])\{\phi\} = 0 \quad (15-1)$$

其中, $[K]$ 为刚度矩阵; $[S]$ 为应力刚度矩阵, $\{\phi\}$ 为位移特征矢量; λ 为特征值 (也叫做比例因子或载荷因子)。

利用上面的特征值公式可以决定结构的分叉点, 分叉点是指两条或多条载荷-变形曲线的相交点。具有分叉屈曲的结构在达到屈曲载荷之前其位移-变形曲线表现出线性关系, 达到屈曲载荷之后, 曲线将跟随另外的路线, 分叉屈曲的典型例子是欧拉梁和薄的轴向加载的圆柱壳。

关于特征值公式的几点说明如下。

- 特征值表示给定载荷的比例因子。
- 如果给定载荷是单位载荷, 特征值即是屈曲载荷。
- 特征矢量是屈曲形状。
- 一般来说只对第一个特征值和特征矢量感兴趣。

由于特征值屈曲不考虑任何非线性和初始扰动, 因此它只是一种学术解, 利用特征值屈



曲分析可以预测出屈曲载荷的上限，然而在通常情况下一般都期望得到保守载荷（下限）。特征值屈曲分析的优点是计算快。在进行非线性屈曲分析之前可以利用线性屈曲分析了解屈曲形状。

2. 特征值屈曲分析的步骤

再一次提醒用户，特征值屈曲分析通常产生非保守结果，故通常不应用于实际结构的设计。若用户认为特征值屈曲分析对于自己的应用是合适的话，则可按如下步骤进行分析。

(1) 建立模型

定义作业名和分析标题，进入 **PREP7** 定义单元类型、单元实常数、材料性质、模型几何实体。这些任务与其他大多数分析类似。应注意如下几点。

1) 只允许线性行为。如果定义了非线性单元，则将按线性单元对待。若结构中包含有接触单元，则基于它在静态预应力分析后的状态来进行其刚度计算，而且在后续分析中永不改变。

2) 必须定义材料的弹性模量 **EX** 或某种形式的刚度。材料性质可以是线性、各向同性或各向异性的，以恒值或与温度相关的。非线性性质即使定义了也将被忽略。

(2) 获得静力解

该过程与一般静力分析过程一致，只是要注意以下几点。

1) 必须激活预应力影响 (**PSTRES**)。因为该分析需要计算应力刚度矩阵。

2) 通常只要施加一个单位载荷就足够了（亦即不用施加实际载荷）。由屈曲分析计算出的特征值，表示屈曲载荷系数。因此，若施加的是单位载荷，则该特征值就表示实际的屈曲载荷，并且所有的载荷都做相应的缩放。注意，**ANSYS** 允许的最大特征值是 1 000 000。若求解时特征值超过了此限度，则用户应施加一个较大的载荷。

3) 注意特征值对所有的载荷都做相应的缩放。如某些载荷是常数如自重载荷，而其他载荷是可变的如外载荷，则必须要确保从常数载荷得到的刚度，在特征值求解时不被缩放。达到这一目的的一个策略，是在特征解上迭代，调整可变载荷，直到特征值变成 1.0。用这种迭代方法来得到最终结果时，设计优化功能最有用。如图 15-9 所示，撑杆自重为 W_0 ，支承外载荷 A 。为了在特征值屈曲分析中确定 A 的极限值，可以应用不同的 A 重复求解，直到由迭代得到特征值为可接受的 1.0。

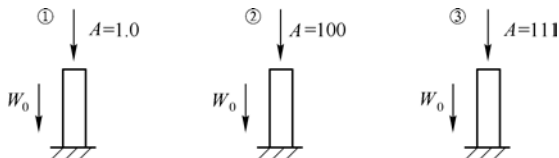


图 15-9 调整合适的载荷以迭代得到特征值为 1.0

如同静力分析一样，可以在前处理阶段施加非 0 约束。在特征值屈曲分析中得出的解，是作用于非 0 约束值的载荷系数。但是，在这些自由度上，模态值为 0，而不是指定的非 0 值。

求解完成后，退出求解器 (**FINISH**)。

(3) 获得特征值屈曲解

这一步需要从静力分析中得到的 Jobname.EMAT 和 Jobname.ESAV 文件。而且，数据库必须包含该模型。获得特征值屈曲解的步骤如下。

1) 进入求解。

命令: / SOLU

GUI: Main Menu | Solution

2) 定义分析类型。

命令: ANTYPE, BUCKLE

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

注意: 在特征值屈曲分析中, 重启动分析无效。在指定特征值分析时, 将出现一个适合于屈曲分析的 Solution 菜单。这个菜单可能是“简化 (Abridged)”或“完整 (Unabridged)”菜单, 这与用户在进行这一步之前的操作有关。“简化 (Abridged)”菜单仅包括屈曲分析中有效或推荐的求解选项。如处在“Abridged (简化)”菜单上, 可以选“完整 (Unabridged)”而进入到完整的菜单。

3) 定义分析选项。

命令: BUCOPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Options

不论是用命令流方法还是 GUI 方法, 用户可以指定下面这些选项。

Method: 指定特征值提取方法。选择子空间迭代法或 Block Lanczos 方法。这两种方法都使用完全系统矩阵。

NMODE: 指定提取的特征值数。默认为 1, 一般来说已经足够。

SHIFT: 指定要计算特征值的点。该选项在遇到数值问题时 (例如由负特征值引起的问题) 很有用, 默认值是 0.0。

4) 定义载荷步选项。

特征值屈曲分析中, 有效的载荷步选项是输出控制和扩展过程选项。

命令: OUTPR, NSOL, ALL

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout

可以把扩展过程作为特征值求解过程的一个选项, 也可以单独的步骤执行。

5) 用一个另外的文件名保存一个数据库的备份文件 (SAVE 命令)。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save As

6) 开始求解。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

求解过程的输出内容, 主要是特征值结果, 它被作为输出文件的一部分 (Jobname.OUT)。特征值表示了屈曲载荷系数, 若在前面静力分析中施加的是单位载荷, 则特征值就是屈曲载荷。此时数据库或结果文件中还没有屈曲模态形状, 因此还不能对结果做后处理, 需先扩展解以后才能做后处理。





有些时候，用户可以发现程序同时计算出了正特征值和负特征值。此时，负特征值表示结构在相反的方向上施加载荷也会发生屈曲。

7) 退出求解器。

命令: FINISH

GUI: 关闭求解菜单

(4) 扩展解

若用户想要观察屈曲模态形状，则不管采用何种方法提取的特征值，都必须对解做展开。对于子空间迭代法，用户可简单地认为此步是将屈曲模态形状写入结果文件。

需要注意如下两点。

- 必须存在从特征值屈曲分析得到的模态文件 (Jobname.MODE)。
- 数据库必须包含与求解时相同的模型。

展开屈曲模态形状的过程阐述如下。

1) 重新进入求解器。

命令: / SOLU

GUI: Main Menu | Solution

注意: 用户在进行扩展解前，必须显式地离开求解器 (用 FINISH 命令)，然后重新进入求解器 (用 / SOLU 命令)。

2) 激活扩展过程及其选项。

命令: EXPASS,ON

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | ExpansionPas

3) 指定扩展过程选项。

命令: MXPAND,NMODE,,,Elcalc

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | ExpansionPass | Single Expand | Expand Modes

不论是应用命令流方法还是 GUI 方法，都需要如下的选项。

- ① NMODE: 指定要扩展的模态数。默认为提取的总模态数。
- ② Elcalc: 指明是否要计算“应力”。在特征值分析中“应力”并不是真实的应力，只是给出各个模态下一个相对应力或力的概念。默认是不计算“应力”。

4) 定义载荷步选项。

在屈曲展开过程中，有效的载荷步选项只有如下输出控制。

① 打印输出

该选项将任何结果数据包含在输出文件 (Jobname.OUT) 中。

命令: OUTPR

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Solu Printout

② 数据库和结果文件输出

该选项控制结果文件 (Jobname.RST) 中的数据。

命令: OUTRES

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

注意：OUTPR 和 OUTRES 命令中的 FREQ 域只能是 ALL 或 NONE，亦即，只能进行数据处理所有模态或无模态。

5) 开始扩展

输出包括扩展模态形状，各个模态的相对应力分布（如果需要的话）。

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

6) 退出求解器

命令：FINISH

GUI: 关闭求解菜单

注意：扩展过程在这里被描述成一个独立的步骤。用户可以把该过程作为特征值求解过程的一部分，方法是在特征值求解时将 MXPAND 命令包括进去，作为分析选项之一。

(5) 查看结果

屈曲扩展过程的结果写在结果文件中，包括屈曲载荷系数、屈曲模态形状、相对应力分布等，可在 POST1 中对结果进行观察。

注意：在用 POST1 观察结果时，数据库必须包含与屈曲计算相同的模型。而且，必须存在从扩展得到的结果文件。

1) 显示所有屈曲载荷系数

命令：SET,LIST

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Detailed Summary

2) 读入想要观察的模态，以显示屈曲模态形状。

命令：SET,SBSTEP

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step

3) 显示模态形状。

命令：PLDISP

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape

4) 值线显示相对应力分布。

命令：PLNSOL

15.5 材料非线性分析

许多与材料有关的参数可以使结构刚度在分析期间改变。塑性材料、非线性弹性材料、超弹性材料、混凝土材料的非线性应力-应变关系，可以使结构刚度在不同载荷水平下改变。蠕变、粘塑性和粘弹性可以引起与时间、率、温度和应力相关的非线性。膨胀可以引起作为温度、时间、时间函数的应变。

ANSYS 程序应可以考虑多种材料非线性特性。



- 1) 率不相关塑性指材料中产生的不可恢复的即时应变。
- 2) 率相关塑性也可称之为粘塑性，材料的塑性应变大小将是加载速度与时间的函数。
- 3) 材料的蠕变行为也是率相关的，产生随时间变化的不可恢复应变，但蠕变的时间尺度要比率相关塑性大得多。
- 4) 非线性弹性允许材料的非线性应力应变关系，但应变是可以恢复的。
- 5) 超弹性材料应力应变关系由一个应变能密度势函数定义，用于模拟橡胶、泡沫类材料，变形是可以恢复的。
- 6) 粘弹性是一种率相关的材料特性，这种材料应变中包含了弹性应变和粘性应变。
- 7) 混凝土材料具有模拟断裂和压碎的能力。
- 8) 膨胀是指材料在中子流作用下的体积扩大效应。

15.5.1 塑性理论简介

许多常用的工程材料，在应力水平低于比例极限时，应力-应变关系为线性的。超过这一极限后，应力-应变关系变成非线性，但却不一定是非弹性的。以不可恢复的应变为特征的塑性，则在应力超过屈服点后开始出现。由于屈服极限与比例极限相差很小，ANSYS 程序在塑性分析中，假设这两个点相同，见图 15-10。

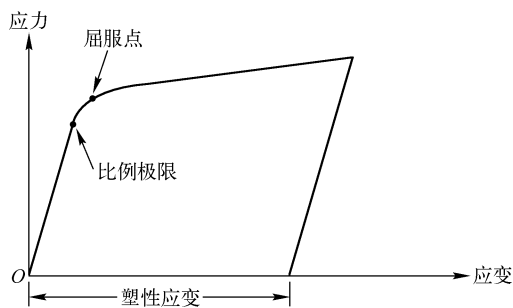


图 15-10 弹塑性应力-应变曲线

塑性是一种非保守的、与路径相关的现象。换句话说，载荷施加的顺序以及什么时候发生塑性响应，将影响最终求解结果。如果用户预计在分析中会出现塑性响应，则应

把载荷处理成一系列的小增量载荷步或时间步，以使模型尽可能拟合载荷-响应路径。最大塑性应变是在输出 (Jobname.OUT) 文件的子步信息中打印的。

在一个子步中，如果执行了大量的平衡迭代，或得到大于 15% 的塑性应变增量，则塑性将激活自动时间步选项。如果取了太大的时间步，则程序将二分时间步，并重新求解。

其他类型的非线性行为可以与塑性同时产生。实际上，大位移和大应变几何非线性经常伴随有塑性材料响应，如果用户预计在结构中存在大变形，则必须在分析中用 NLGEOM 命令激活这些效应。对于大应变分析，材料应力-应变特性必须按真实应力和对数应变输入。

1. 屈服准则

对单向受拉试验，可以通过简单的比较轴向应力与材料的屈服应力来决定是否有塑性变形发生，然而，对于一般的应力状态，是否到达屈服点并不是明显的。

屈服准则是一个可以用来与单轴测试的屈服应力相比较的应力状态的标量表示。因此，知道了应力状态和屈服准则，程序就能确定是否有塑性应变产生。

在多轴应力状态下，屈服准则可以用下式来表示：

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (15-2)$$

其中, σ_e 为等效应力; σ_y 为屈服应力。

当等效应力超过材料的屈服应力时, 将会发生塑性变形。

(1) Von Mises 屈服准则

Von Mises 屈服准则是一个比较通用的屈服准则, 尤其适用于金属材料。对于 Von Mises 屈服准则, 其等效应力为:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (15-3)$$

其中, σ_1 , σ_2 , σ_3 为三个主应力。

可以在主应力空间中画出 Von Mises 屈服准则, 见图 15-11。

在三维主应力空间中, Von Mises 屈服面是一个以 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 为轴的圆柱面, 在二维中, 屈服面是一个椭圆, 在屈服面内部的任何应力状态都是弹性的, 屈服面外部的任何应力状态都会引起屈服。静水压应力状态 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) 不会导致屈服: 屈服与静水压应力无关, 而只与偏差应力有关, 因此, $\sigma_1 = 180$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 的应力状态比 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 180$ 的应力状态接近屈服。Von Mises 屈服准则是一种除了土壤和脆性材料外典型使用的屈服准则, 在土壤和脆性材料中, 屈服应力是与静水压应力有关的, 侧限压力越高, 发生屈服所需要的剪应力越大。

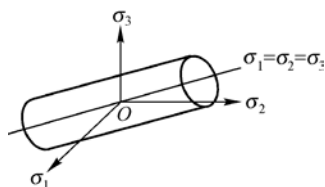


图 15-11 主应力空间中的 Von Mises 屈服面

(2) Drucker-Prager (DP) 屈服准则

Drucker-prager 屈服准则是对 Mohr-Coulomb 准则的近似, 它修正了 Von Mises 屈服准则, 即在 Von Mises 表达式中包含一个附加项。其屈服面并不随着材料的逐渐屈服而改变, 因此没有强化准则, 塑性行为被假定为理想弹塑性, 然而其屈服强度随着侧限压力 (静水应力) 的增加而相应增加, 另外, 这种材料考虑了由于屈服而引起的体积膨胀, 但不考虑温度变化的影响。此材料选项适用于混凝土、岩石和土壤等颗粒状材料。

对 DP 材料, 其屈服准则表达式为:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} = \sigma_y \quad (15-4)$$

其中

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; \quad \sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \text{ 为平均应力, } \{S\} \text{ 为偏差应力。}$$

材料常数 β 和屈服强度 σ_y 的表达式如下:



$$\begin{cases} \beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \\ \sigma_y = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \end{cases} \quad (15-5)$$

其中, ϕ 为内摩擦角; C 为粘滞力。

对 DP 材料, 当材料参数 β 、 σ_y 给定后, 其屈服面为一圆锥面, 此圆锥面是六角形的摩尔-库仑屈服面的外接锥面, 如图 15-12 所示。

2. 流动准则

流动准则描述了发生屈服时, 塑性应变的方向, 也就是说, 流动准则定义了单个塑性应变分量 (ε_x^{pl} , ε_y^{pl} 等) 随着屈服是怎样发展的。流动准则由以下方程给出:

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (15-6)$$

其中, λ 是塑性乘子, 决定了塑性应变变量; Q 为塑性势, 是应力的函数, 决定了塑性应变方向。

一般来说, 流动方程是塑性应变在垂直于屈服面的方向发展的屈服准则中推导出来的, 即 Q 等于屈服函数, 这种流动准则叫做关联流动准则, 如果使用其他的流动准则, 则叫做不关联的流动准则。

3. 强化准则

强化准则描述了初始屈服准则随着塑性应变的增加是怎样发展的。一般来说, 屈服面的变化是以前应变历史的函数, 在 ANSYS 程序中, 使用了如下三种强化准则。

1) 等向强化: 是指屈服面以材料中所做塑性功的大小为基础在尺寸上扩张。对 Von Mises 屈服准则来说, 屈服面在所有方向均匀扩张, 见图 15-13。

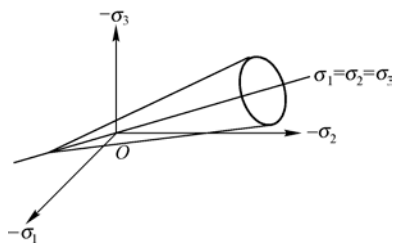


图 15-12 Drucker-Prager 屈服面

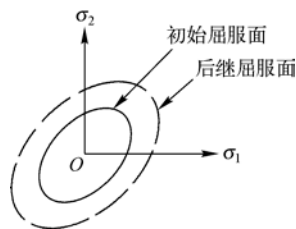


图 15-13 等向强化时的屈服面变化图

由于等向强化, 在受压方向的屈服应力等于受拉过程中所达到的最高应力。

2) 随动强化 假定屈服面的大小保持不变而仅在屈服的方向上移动, 当某个方向的屈服应力升高时, 其相反方向的屈服应力应该降低, 见图 15-14。

在随动强化中, 由于拉伸方向屈服应力的增加导致压缩方向屈服应力的降低, 所以在对应的两个屈服应力之间总存在一个 $2\sigma_y$ 的差值, 初始各向同性的材料在屈服后将不再是各向同性的。

3) 混合强化是等向强化和随动强化的结合, 屈服面不仅在大小上扩张, 而且还在屈服的方向上移动, 见图 15-15。

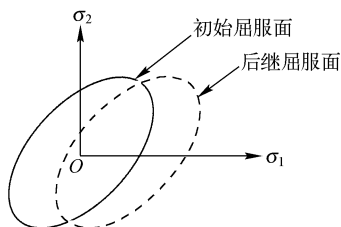


图 15-14 随动强化时的屈服面变化图

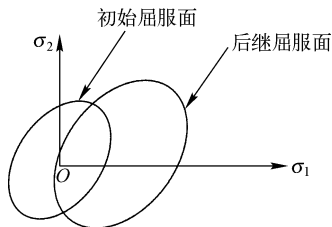


图 15-15 混合强化时的屈服面变化图

15.5.2 常用的非线性材料本构关系简介

1. 双线性随动强化 (BKIN) 选项

该选项假设总应力范围等于屈服应力的两倍，以包括包辛格效应 (见图 15-16)。对于服从 Von Mises 屈服准则的一般小应变分析，建议用这一选项。不应该应用于大应变分析。用户可以用 BKIN 和 HILL 选项组合来模拟各向异性随动强化塑性。应力-应变-温度数据的示例如下。图 15-17 说明了这种材料选项的典型显示 (TBPLLOT)。

MPTEMP,1,0,500	!定义两个温度点
MP,EX,1,12E6,-8E3	!定义与两个温度点对应的弹性模量
TB,BKIN,1,2	!激活数据表
TBTEMP,0,0	!温度= 0.0
TBDATA,1,44E3,1.2E6	!屈服应力= 44,000; 剪切模量= 1.2E6
TBTEMP,500	!温度= 500
TBDATA,1,29.33E3,0.8E6	!屈服应力 = 29,330; 剪切模量 = 0.8E6
TBLIST,BKIN,1	!列出数据表

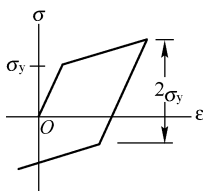


图 15-16 包辛格效应

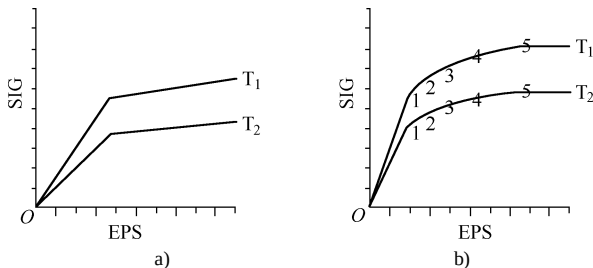


图 15-17

a) 双线性随动强化 b) 多线性随动强化

2. 双线性各向同性强化 (BISO) 选项

这一选项与多线性各向同性强化 MISO 选项相似，只是用双线性曲线代替多线性曲线。其输入类似于双线性随动强化选项，只是现在 TB 命令要应用 BISO 标号。这一选项通常对大应变分析较佳。用户可以把这一选项与非线性随动强化 (CHABOUCHÉ) 选项组合，以定义材料的各向同性强化行为。用户也可以把这一选项与 HILL 选项组合来模拟各向异性塑性及各向同性强化，或与 RATE 选项组合以模拟率相关粘塑性。

3. 多线性各向同性强化 (MISO) 选项

这一选项应用 Von Mises 屈服准则以及各向同性工作强化的假定。这个选项不建议用于



周期载荷或高度非比例历史载荷的小应变分析。但可应用于大应变分析。MISO 选项可包括 20 个不同的温度曲线，每条曲线可以有最多 100 个不同的应力-应变点。在各条曲线上，应变点可以不同。用户可以把这个选项与非线性随动强化（CHABOCHE）选项组合，以模拟周期强化或弱化。用户还可以把 MISO 选项与 HILL 选项组合来模拟各异性塑性及各向同性强化，以及与 RATE 选项组合以模拟率相关粘塑性。在 MKIN 选项的示例中的应力-应变-温度曲线可以作为多线性各向同性强化材料的输入，方法如下：

```
MPTEMP,1,0,500          !定义两个温度点
MP,EX,1,12E6,-8E3        !定义与温度点相对应的弹性模量
TB,MISO,1,2,5             !激活一个数据表
TBTEMP,0.0               !温度 = 0.0
TBPT,DEF1,3.67E-3,29.33E3 !温度=0 时的应变-应力
TBPT,DEF1,5E-3,50E3
TBPT,DEF1,7E-3,55E3
TBPT,DEF1,10E-3,60E3
TBPT,DEF1,15E-3,65E3
TBTEMP,500               !温度= 500
TBPT,DEF1,3.67E-3,29.33E3 !温度=500 时的应变-应力
TBPT,DEF1,5E-3,37E3
TBPT,DEF1,7E-3,40.3E3
TBPT,DEF1,10E-3,43.7E3
TBPT,DEF1,15E-3,47E3
/XRANGE,0,0.02
TBPLOT,MISO,1
```

4. Drucker-Prager (DP) 选项

这一选项用于颗粒状（摩擦）材料，如土、岩体、砼（混凝土）等，并利用圆锥面来近似 Mohr-Coulomb 定律。

```
MP,EX,1,5000
MP,NUXY,1,0.27
TB,DP,1
TBDATA,1,2.9,32,0        !粘聚力= 2.9,内摩擦角= 32（度）,膨胀角= 0
```

15.5.3 如何使用塑性

在这一节中，将介绍在程序中怎样使用塑性，重点介绍以下几个方面。

- 可用的 ANSYS 输入。
- ANSYS 输出量。
- 使用塑性的一些原则。
- 加强收敛性的方法。
- 查看塑性分析的结果。

1. ANSYS输入

当使用 TB 命令选择塑性选项和输入所需常数时，应该考虑到如下几点

- 常数应该是塑性选项所期望的形式，例如，一般总是需要应力和总的应变，而不是应力与塑性应变。
- 如果还在进行大应变分析，应力-应变曲线数据应该是真实应力-真实应变。对双线性选项（BKIN,BISO），输入常数 σ_y 和 E_T 可以按下述方法来决定，如果材料没有明显的屈服应力，通常以产生 0.2% 的塑性应变所对应的应力作为屈服应力，而 E_T 可以通过在分析中所预期的应变范围内来拟合实验曲线得到。

其他有用的载荷步选项如下

- 使用的子步数。既然塑性是一种与路径相关的非线性，因此需要使用许多载荷增量来加载。
- 激活自动时间步长。
- 如果在分析所经历的应变范围内，应力-应变曲线是光滑的，使用预测器选项能够极大地降低塑性分析中的总迭代数。

2. 输出量

在塑性分析中，对每个节点都可以输出下列量。

EPPL: 塑性应变分量 ϵ_x^{pl} , ϵ_y^{pl} 等; EPEQ: 累加的等效塑性应变; SEPL: 根据输入的应力-应变曲线估算出的对于EPEQ的等效应力; HPRES: 静水压应力; PSV: 塑性状态变量; PLWK: 单位体积内累加的塑性功。

上面所列节点的塑性输出量实际上是指离节点最近的那个积分点的值。

如果一个单元的所有积分点都是弹性的，那么节点的弹性应变和应力从积分点外插得到，如果任一积分点是塑性的，那么节点的弹性应变和应力实际上是积分点的值，这是程序的默认情况，但可以人为改变它。

3. 程序使用中的一些基本原则

下面的这些原则应该有助于执行一个精确的塑性分析。

- 1) 需要的塑性材料常数必须能够足以描述所经历的应力或应变范围内的材料特性。
- 2) 慢加载，应该保证在一个时间步内，最大的塑性应变增量小于 5%，一般来说，如果 F_y 是系统刚开始屈服时的载荷，那么在塑性范围内的载荷增量应近似为： $0.05 * F_y$ ——对用面力或集中力加载的情况； F_y ——对用位移加载的情况。
- 3) 当模拟类似梁或壳的几何体时，必须有足够的网格密度，为了能够足够地模拟弯曲响应，在厚度方向必须至少有两个单元。
- 4) 除非那个区域的单元足够大，应该避免应力奇异，由于建模而导致的应力奇异有如下几种。
 - 单点加载或单点约束。
 - 凹角。
 - 模型之间采用单点连接。
 - 单点耦合或接触条件。
- 5) 如果模型的大部分区域都保持在弹性区内，那么可以采用下列方法来降低计算时间。
 - 在弹性区内仅仅使用线性材料特性。
 - 在线性部分使用子结构。



4. 加强收敛性的方法

如果不收敛是由于数值计算导致的, 可以采用下述方法来加强问题的收敛性。

- 1) 使用小的时间步长。
- 2) 如果自适应下降因子是关闭的, 打开它; 相反, 如果它是打开的, 且割线刚度正在被连续地使用, 那么关闭它。
- 3) 用线性搜索, 特别是当大变形或大应变被激活时。
- 4) 预测器选项有助于加速缓慢收敛的问题, 但也可能使其他的问题变得不稳定。
- 5) 可以将默认的牛顿-拉普森选项转换成修正的或初始刚度牛顿-拉普森选项, 这两个选项比全牛顿-拉普森选项更稳定, 但这两个选项仅在小位移和小应变塑性分析中有效。

5. 查看结果

- 1) 感兴趣的输出项(如应力, 变形, 支反力等)对加载历史的响应应该是光滑的, 一个不光滑的曲线可能表明使用了太大的时间步长或太粗的网格。
- 2) 时间步长内的塑性应变增量应该小于 5%, 这个值在输出文件中以 “Max plastic Strain Step” 输出, 也可以使用 POST26 来显示这个值。
- 3) 塑性应变等值线应该是光滑的, 通过任一单元的梯度不应该太大。
- 4) 画出某点的应力-应变图, 应力是指输出量 Von Mises 等效应力 (SEQV), 总应变由累加的塑性应变 EPEQ 和弹性应变得来。

15.6 实例: 支撑架特征值屈曲分析

15.6.1 工程背景

随着科学与经济的发展, 刚架结构被广泛应用于机械工程和建筑工程中, 它们的安全与稳定问题备受关注, 尤其对于承载重量的细长类刚架, 为保证结构甚至生命财产的安全, 必须要弄清承重刚架正常工作的载荷范围和失效机理, 这就有必要去计算其发生塑性弯曲变形时的最小临界载荷, 本实例利用 ANSYS 软件对建筑施工中某承重系统的一个支撑架进行了有限元建模和特征值屈曲分析, 并利用 ANSYS 的后处理模块观察了它的各阶屈曲模态及其轴向应力。

15.6.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

该支撑架在承重系统中的最大承载为 2000N, 它全部由空心钢管焊接而成, 其总高为 10 m, 分成 10 小节, 每小节 1 m, 支撑架横截面为边长 200 mm 的正方形, 如图 15-18 所示。

2. 单元的选择及实常数

本实例采用 Beam188 单元模拟钢管, 采用梁单元截面输入实常数, 管外直径 25 mm, 壁厚 2 mm, 材料的弹性模量为 2E11Pa, 泊松比 0.25。

3. 施加边界条件

为简化有限元模型, 应对实体模型进行适当简化, 忽略横向加强筋两端的砸扁对结构刚

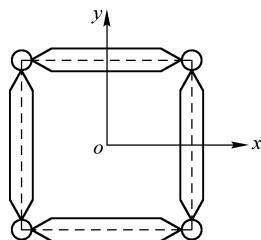


图 15-18 支撑架横截面示意图

度产生的影响, 假设所有焊接接头都为完全焊接。该结构底部固定支撑, 顶部四角顶点受均匀集中载荷作用。

15.6.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出一个对话框, 在输入栏中输入 “Eigenvalue Buckling Analysis of the Bearer”, 单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 $D1=0.025$, 单击 Accept, 完成对管外直径的参数定义, 按照此方法继续定义管厚度 $T=0.002$, 管内直径 $D2=D1-2 \times T$, 支撑架横截面边长 $L=0.2$, 支撑架的每一节的长度 $H1=1$, 定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Beam, 然后在右边选择 2 node 189 单元, 单击 OK, 单击 Close。

(2) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 $EX=2E11$, $PRXY=0.25$, 单击 OK, 退出对话框。

4. 定义梁截面形状

GUI: Main Menu | Preprocessor | Sections | Beam | Common Sections

在弹出的 Beam Tool 面板中输入 $ID=1$, 在 Sub-Type 选项中选择 O 型, 输入 $R1=D2/2$, $Ro=D1/2$, $N=25$, 单击 OK, 单击 Close。

5. 建立模型

(1) 建立长方体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $X1=-L/2$, $X2=L/2$, $Y1=-L/2$, $Y2=L/2$, $Z1=0$, $Z2=H1$, 单击 OK。

(2) 复制复制长方体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取刚建立的长方体, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 2, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 3, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 4, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 5, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 6, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 7, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 8, 单击 Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 Apply; 继续拾取刚复制成功的体 9, 单击



Apply, 在弹出的对话框输入 $DZ=H1$, 单击 OK。

(3) 粘结所有体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Volumes

弹出拾取对话框, 单击 Pick All 表示拾取所有的体。

(4) 仅仅删除体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Trefftz Domain | TZ Geometry | Delete | Volumes Only

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

(5) 仅仅删除面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Areas Only

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

6. 网格划分

(1) 设定智能网格划分级别为 4

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool

打开网格划分工具面板, 勾选 Smart Size, 并设置为 4。

(2) 进行网格划分

在网格划分工具面板上单击 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

7. 设置分析类型

(1) 定义进行静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静态问题求解。

(2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出求解分析选项对话框, 拖动滚动条, 找到 PSTRES 并将其设置为 Prestress ON。

8. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取支撑架底端的四个角节点 1, 5, 8 和 2, 单击 OK, 在弹出对话框的 DOFs to be constrained 选项中选择 ALL DOF, 单击 OK。

(2) 施加载荷

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取支撑架顶端的四个角节点 184, 181, 178 和 177, 单击 OK, 在弹出的对话框的 Direction of force/mom 的选项中选择 FZ, 表示施加 Z 方向的力, 在 Force/moment value 中输入 -1, 单击 OK。

9. 进行静力求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框，单击 OK。

10. 设置屈曲求解

(1) 设置求解类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Eigen Buckling，含义为进行特征值屈曲问题求解。

(2) 设置特征值屈曲分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出特征值屈曲分析 (Eigenvalue Buckling Option) 对话框，设置 NMODET 为 10，表示提取前 10 阶屈曲模态，其他保持默认值，单击 OK。

11. 进行特征值屈曲求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框，单击 OK。

12. 后处理

(1) 查看发生屈曲的临界载荷

GUI: General Postproc | Results Summary

弹出计算结果，从结果可以看出发生屈曲的最小载荷为 4981.7N，远大于 2000N，所以该结构是安全的，结构的临界载荷第 1、2 阶相等；第 3、4 阶相等；依次类推，这是因为该支撑架结构的横截面是正方形，两个方向的惯性矩相等，因此只需考虑奇数阶屈曲解。

(2) 查看 1 阶屈曲载荷的屈曲构形

1) 指定查看的阶数为 1

GUI: General Postproc | Read Results | By Pick

弹出拾取结果对话框，选择 Set 为 1，单击 Read，单击 Close。

2) 查看其屈曲构形

GUI: General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

在弹出的对话框选择 DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK，其构形如图 15-19 所示。

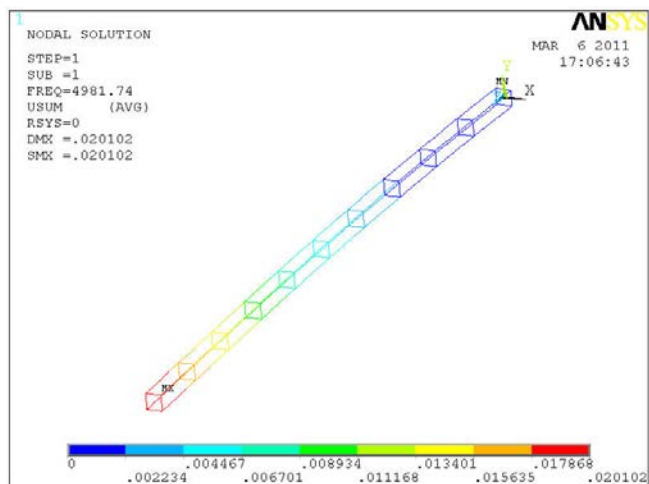


图 15-19 第 1 阶的屈曲构形图



(3) 查看 10 阶屈曲载荷的屈曲构形

1) 指定查看的阶数为 10

GUI: General Postproc | Read Results | By Pick

弹出拾取结果对话框, 选择 Set 为 10, 单击 Read, 单击 Close。

2) 查看其屈曲构形

GUI: General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

在弹出的对话框选择 DOF Solution | Displacement vector sum, 单击 OK, 其构形如图 15-20 所示。

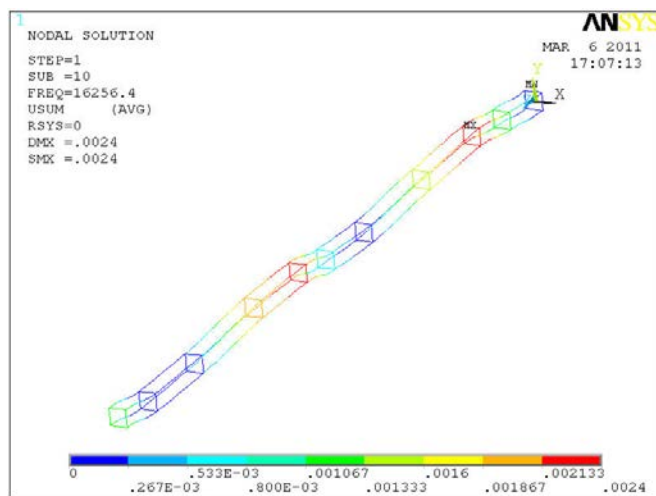


图 15-20 第 10 阶的屈曲构形

15.7 实例：复合地基沉降的弹塑性分析

15.7.1 工程背景

随着国民经济的发展, 普通等级公路已经不能满足交通运输业的需要。近年来, 我国高速公路得到了迅速的发展。高速公路上行车速度快, 交通流量大, 与一般公路相比较, 高速公路对路面、路基的要求更高。受地理位置的限制, 许多高速公路不得不建立在软土地段上, 由于软土的强度很低, 压缩性高, 透水性很小, 而且还存在流变性, 使得筑路工程技术变得困难和复杂。从已建软土地基上高速公路的运行情况来看, 工后沉降普遍较大。交通载荷作用下路面的沉降变形, 一直是工程界普遍关心的问题, 也是一个值得深入研究的课题。本实例首先建立复合地基的沉降模型, 并采用弹塑性土体本构关系, 使用有限单元法计算了复合土层的沉降量。

15.7.2 问题的描述

1. 模型的几何参数

如图 15-21 所示, 复合路基模型由顶层的风化花岗岩层和底下的三个层组成。

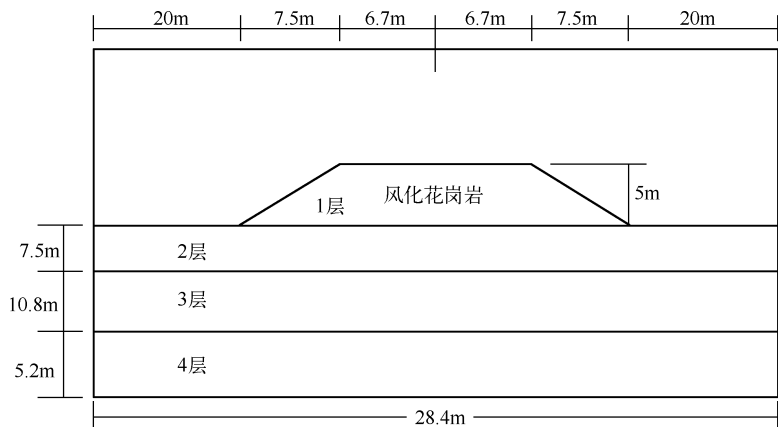


图 15-21 复合路基的模型简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例选择 PLANE42 单元并设置单元为平面应变模拟复合地基，土体的应力-应变关系非常复杂，它具有非线性、弹塑性、粘弹性、流变性等特征，还受到节理裂隙的影响，在实际计算中要综合考虑到各种因素是非常困难的。在很多的室内模拟试验中，发现在太大的载荷下不论是桩的 P-S 曲线，还是土体的应力-应变关系都会出现明显的非线性特征，用线弹性模型描述这种关系是不合理的。从已有的对土体强度的模型研究成果中不难发现，弹塑性模型能较好地反映土的非线性特征。本例对作为主要模拟对象的土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型，在 ANSYS 软件中 DP 材料可以满足该要求。

在 DP 材料选项的数据表中，需要输入 3 个值：粘聚力 C 、内摩擦角 φ 、膨胀角 h 。膨胀角 h 被用来控制体积膨胀的大小，如果膨胀角为 0° ，则不会发生体积膨胀。如果膨胀角等于内摩擦角，在材料中则会发生严重的体积膨胀。一般来说，膨胀角为 0° 是一种保守的方法；本例取膨胀角为 0° 。表 15-1 给出了各层的材料。

表 15-1 各层材料常数

	E	ν	ρ	c	φ
1 层	2E9Pa	0.24	1900 kg/m ³	30E3Pa	20
2 层	8E7Pa	0.26	1896 kg/m ³	20E3Pa	21.2
3 层	4E7Pa	0.26	1882 kg/m ³	24E3Pa	13.5
4 层	6E7Pa	0.26	2000 kg/m ³		14.5

3. 边界条件

边界条件为：底边固定所有方向的位移；左右两边固定 X 方向的位移；整个复合路基只承受重力。

15.7.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

在弹出的对话框中输入“Foundation Settlement Calculation”，单击 OK。



2. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

因为 13.0 版本对单元库有些调整, PLANE42 不能使用 GUI 单元库定义, 只能输入单元编号进行定义, 其方法为 GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete, 弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的右边下面输入 42, 单击 OK。

(2) 定义单元属性

单击单元类型面板 (Element Types) 的 Options 按钮, 在弹出的对话框中设置单元关键字 K3 为 Plane strain, 表示单元模拟平面应力的力学行为, 单击 OK, 单击 Close。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

在弹出的对话框中单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 EX=2E9, PRXY=0.24, 单击 OK, 设置单元密度 Structural | Density, 在弹出对话框中输入 DENS=1900, 设置材料的屈服准则为 DP 设置方法, 单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Non-metal Plasticity | Drucker-Prager, 在弹出的对话框中输入内聚力 (Cohesion) 为 30E3, 摩擦角 (Fric Angle) 为 20, 流动角或膨胀角 (Flow Angle) 为 0; 选择定义材料模型行为 (Define Material Model Behavior) 面板的 Material | New Model, 在弹出的对话框中输入 2, 单击 OK, 按照前面定义材料常数的方法继续定义材料 2 的材料常数 EX=8.1E7, PRXY=0.26, DENS=1896, Cohesion=20E3, Fric Angle=21.2, Flow Angle=0; 继续定义材料 3 的材料常数 EX=4.1E7, PRXY=0.26, DENS=1882, Cohesion=24E3, Fric Angle=13.5, Flow Angle=0; 继续定义材料 4 的材料常数 EX=6.13E7, PRXY=0.26, DENS=2000, Cohesion=20E3, Fric Angle=14.5, Flow Angle=0, 选择 Material | Exit, 推出面板。

3. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=-14.2, Y=0, Z=0, 单击 Apply, 继续输入 NPT=2, X=14.2, Y=0, Z=0, 单击 Apply, 继续输入 NPT=3, X=6.7, Y=5, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=4, X=-6.7, Y=5, Z=0, 单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取关键点 1, 2, 3 和 4, 单击 OK。

(3) 建立其余 3 层模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

在弹出的对话框输入 X1=-34.2, X2=34.2, Y1=-7.5, Y2=0, 单击 Apply; 继续输入 X1=-34.2, X2=34.2, Y1=-18.3, Y2=-7.5, 单击 Apply; 继续输入 X1=-34.2, X2=34.2, Y1=-23.5, Y2=-18.3, 单击 OK。

(4) 粘结所有面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Areas

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

4. 划分网格

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 SIZE=1, 单击 OK。

(3) 对第一层进行网格划分

1) 设置网格划分属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中选择材料常数 (MAT) 为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 设置单元划分方式为映射网格。选择网格划分工具面板中的单元形状 (Shape) 为 Quad, 划分方式为 Mapped。

3) 进行网格划分。选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取第一层, 单击 OK。

(4) 对第二层进行网格划分

1) 设置网格划分属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中选择材料常数 (MAT) 为 2, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 设置单元划分方式为自由网格。选择网格划分工具面板中的单元形状 (Shape) 为 Quad, 划分方式为 Free。

3) 进行网格划分。选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取第二层, 单击 OK。

(5) 对第三层进行网格划分

1) 设置网格划分属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中选择材料常数 (MAT) 为 3, 其他保持默认值单击 OK。

2) 设置单元划分方式为自由网格。选择网格划分工具面板中的单元形状 (Shape) 为 Quad, 划分方式为 Mapped。

3) 进行网格划分。选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取第三层, 单击 OK。

(6) 对第三层进行网格划分

1) 设置网格划分属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中选择材料常数 (MAT) 为 4, 其他保持默认值单击 OK。

2) 设置单元划分方式为自由网格

选择网格划分工具面板中的单元形状 (Shape) 为 Quad, 划分方式为 Mapped。

3) 进行网格划分

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取第四层, 单击 OK。

5. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

6. 设置边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines





弹出拾取对话框，用鼠标拾取模型的左右边界线 L8, L17, L19, L6, L18 和 L20，单击 Apply，在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 UX，其他保持默认设置，单击 Apply，弹出拾取对话框，用鼠标拾取模型底边 L13，单击 OK，在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 ALL DOF，单击 OK。

(2) 定义重力载荷

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Gravity | Global
在弹出的对话框中输入 ACELY=9.8，单击 OK。

7. 定义载荷步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | DB/Results File

在弹出的对话框中的文件写出频率 (File write frequency) 选项中选择 Every substep，表示输出每一个子步。

8. 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框，单击 OK。

9. 后处理

(1) 设置云图字体

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Legend Font

弹出字体大小选择对话框，设置字体大小为三号。

(2) 查看 Y 方向位移云图

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of Displacement，在比例因子选项设置 Auto Calculated 为自动计算比例，单击 OK，如图 15-22 所示。

(3) 查看等效应力云图

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK，如图 15-23 所示。

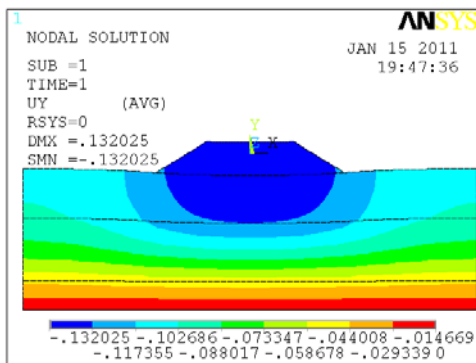


图 15-22 路基的 Y 方向位移云图

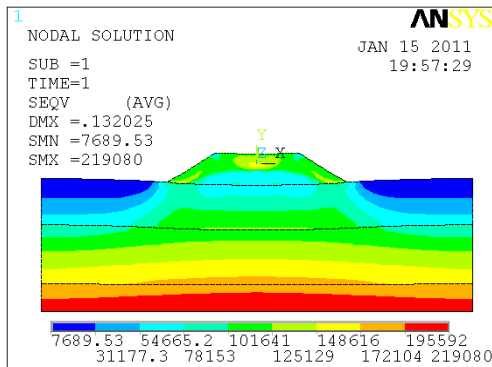


图 15-23 路基的等效应力云图

第 16 章 接 触 分 析



16.1 概述

接触问题属于状态非线性，且是一种高度非线性行为，需要较多的计算机资源。为了进行切实有效的计算，理解问题的物理特性和建立合理的模型是很重要的。

模拟接触问题存在两个较大的难点。其一，在用户求解问题之前，用户通常不知道接触区域。随载荷、材料、边界条件和其他因素的不同，表面之间可以接触或分开，这往往在很大程度上是难以预料的，并且还可能是突然变化的。其二，大多数的接触问题需要考虑摩擦作用，有几种摩擦定律和模型可供挑选，它们都是非线性的。摩擦效应可能是无序的，所以摩擦使问题的收敛性成为一个难点。

注意：如果在模型中不考虑摩擦，且物体之间总是保持接触，则可以应用约束方程或自由度耦合来代替接触。约束方程仅在小应变分析（NLGEOM,off）中可用。

16.2 接触分类

接触问题分为两种基本类型：刚体-柔体的接触，柔体-柔体的接触。在刚体-柔体的接触问题中，接触面中的一个或多个被当做刚体。一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，可以假定为刚体-柔体的接触，许多金属成形问题归为此类接触。柔体-柔体的接触是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体。柔体-柔体接触的一个例子是栓接法兰。

16.3 ANSYS接触分析功能

ANSYS 支持四种接触方式：点-点，点-面，线-面，面-面接触。每种接触方式使用不同的接触单元集，并适用于某一特定类型的问题。

为了给接触问题建模，首先必须认识到模型中的哪些部分可能会相互接触。如果相互作用的其中之一是一个点，模型的对应组元是一个节点。如果相互作用的其中之一是一个面，模型的对应组元是单元，如梁单元、壳单元或实体单元。有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触对，接触单元是覆盖在分析模型接触面之上的一层单元，至于 ANSYS 使用的接触单元和使用它们的过程，后面会分类详述，然后论述 ANSYS 接触单元和他们的功能。本章主要详细讲解面-面接触问题的分析步骤，其他接触方式的分析步骤与之相似。



16.3.1 点-点接触

点-点接触单元主要用于模拟点-点的接触行为。为了使用点-点接触单元，用户需要预先知道接触位置，这类接触问题只能适用于接触面之间有较小相对滑动的情况。其中一个例子是传统的管道装配模型，其中接触点总是在管端和约束之间的。

点-点接触单元也可以用于模拟面-面的接触问题，如果两个面上的节点一一对应，相对滑动又可以忽略不计，两个面位移（转动）保持小量，那么可以用点-点的接触单元来求解面-面的接触问题，过盈装配问题是一个用点-点的接触单元来模拟面-面接触问题的典型例子。

另一个点-点接触单元的应用是表面应力的精确分析，如透平机叶片的分析。

ANSYS 的 `CONTA178` 单元是大多数点-点接触问题的最好选择。它与其他单元相比提供了范围更广的选项和求解类型。

16.3.2 点-面接触

点-面接触单元主要用于为点-面接触行为建模，例如两根梁的相互接触，铆头装配部件的角点。如果通过一组节点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点-面接触单元来模拟面-面的接触问题。面既可以是刚性体也可以是柔性体。这类接触问题的一个典型例子是插头插到插座里。

使用这类接触单元，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格。并且允许有大的变形和大的相对滑动，虽然这一功能也可以模拟小的滑动。

`CONTACT175` 单元是点-面的接触单元。该单元支持大滑动、大变形，以及接触部件间不同的网格。用户也可以用这两种单元来进行热-机械耦合分析，其中热在接触实体之间的传导非常重要。目标单元采用 `TARGE169` 或 `TARGE170`。

16.3.3 线-面接触

在三维线-面接触中，接触单元选用三维线单元 `CONTA177`，目标单元使用 `TARGE170`。`CONTA177` 单元具有两个或三个节点，实常数的设置与面-面接触单元一样。支持三维的刚-柔和柔-柔接触。

16.3.4 面-面的接触

ANSYS 支持刚体-柔体和柔体-柔体的面-面的接触单元。这些单元应用“目标”面和“接触”面来形成接触对。

分别用 `TARGE169` 或 `TARGE170` 来模拟二维和三维目标面。用 `CONTA171`、`CONTA172`、`CONTA173`、`CONTA174` 来模拟接触面。为了建立一个“接触对”，给目标单元和接触单元指定相同的实常数号。这些面-面接触单元非常适合于过盈装配安装接触、塑性成型等问题的求解。与点-面接触单元相比，面-面接触单元有许多优点。

- 支持面上的低阶和高阶单元（即角节点或有中节点的单元）。
- 支持有大滑动和摩擦的大变形。计算一致刚度阵，可用不对称刚度阵选项。
- 提供满足工程目的需要的更好的接触结果，如法向压力和摩擦应力。

- 没有刚体表面形状的限制，刚体表面的光滑性不是必须的，允许有自然的或网格离散引起的表面不连续。
- 与点-面接触单元相比，需要较少的接触单元，因而只需较小的磁盘空间和 CPU 时间，并具有高效的可视化功能。
- 允许多种建模控制，如绑定接触，不分离接触，粗糙接触等。
- 渐变初始穿透。
- 目标面自动移动到初始接触。
- 平移接触面（考虑梁和单元的厚度），用户定义的接触偏移。
- 死活功能。
- 支持热-力耦合分析。

使用这些单元作为刚性目标面，能模拟二维和三维环境中的直线和曲线，通常用简单的几何形状（如圆、抛物线、球、圆锥、圆柱）来模拟曲面。更复杂的刚体形状或普通可变形体，可以应用特殊的前处理技巧来建模。

面-面接触单元不能很好地应用于点-点或点-面接触问题，如管道或铆头装配。在这种情况下，应当应用点-点或点-面接触单元。用户也可以在大多数接触区域应用面-面接触单元，而在少数接触角点应用点-点接触单元。

面-面接触单元，只支持一般的静态或瞬态分析，屈曲、模态、谱分析或子结构分析。不支持谐响应分析、缩减或模态叠加瞬态分析、缩减或模态叠加谐响应分析。

16.4 面-面的接触分析

用户可以应用面-面接触单元来模拟刚体-柔体或柔体之间的接触。从  进入接触向导，为大多数接触问题建立接触对提供了简单的方法。接触向导将指导用户建立接触对的整个过程。

在用户未对模型的任何区域分网之前，接触向导不能应用。如果用户希望建立刚体-柔体模型，则在进入接触向导前，仅对用做柔体接触面的部分分网，不对刚体目标面分网。如用户希望建立柔体-柔体接触模型，则应在进入接触向导前，对所有作为接触面的部件进行分网。

16.4.1 应用面-面接触单元

在涉及到两个边界的接触问题中，很自然地会把一个边界作为“目标”面，而把另一个面作为“接触”面。对刚体-柔体的接触，目标面总是刚性面，接触面总是柔性面。对柔体-柔体的接触，目标面和接触面都与变形体关联。这两个面合起来叫做“接触对”。使用 TARGE169 与 CONTA171、CONTA172 或 CONTA175 单元来定义二维接触对。使用 TARGE170 与 CONTA173、CONTA175、CONTA176 或 CONTA177 单元来定义三维接触对。程序通过相同的实常数号来识别每一个接触对。下面将依次讲解各个分析步骤。

16.4.2 建立几何模型并划分网格

在这一步，用户需要建立代表接触体的几何实体模型。与其他分析一样，需要设置单元类型、实常数、材料特性。用恰当的单元类型给接触体划分网格。



命令: AMESH /VMESH

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas/Volumes | Free

16.4.3 识别接触对

用户必须判断模型在变形期间的哪些地方可能发生接触。一旦已经判断出潜在的接触面,就应该通过目标单元和接触单元来定义它们,目标和接触单元将跟踪变形阶段的运动。构成一个接触对的目标单元和接触单元通过共享的实常数号联系起来。

接触区域可以任意定义,然而为了更有效地进行计算,用户可能想定义更小的局部化的接触区域,但要保证它足以描述所需要的所有接触行为。不同的接触对必须通过不同的实常数号来定义,即使实常数没有变化。但不限制允许的面数目。

由于几何模型和潜在变形的多样性,有时候一个接触面的同一区域可能与多个目标面产生接触关系。在这种情况下,应该定义多个接触对,每个接触对有不同的实常数号,见图 16-1。

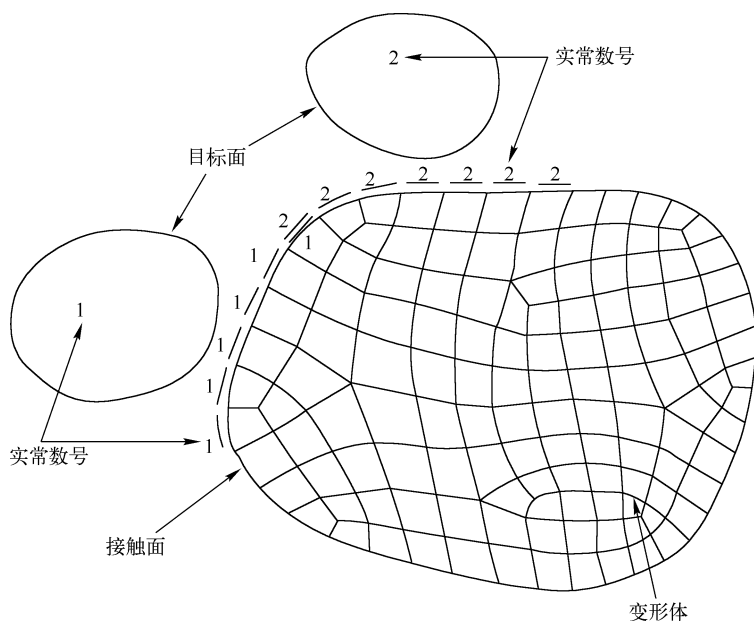


图 16-1 局部接触区域

16.4.4 指定接触面和目标面

接触单元被限制不得穿透目标面。但是,目标单元可以穿透接触面。对于刚体-柔体接触,目标面总是刚体表面,而接触面总是柔体表面。对于柔体-柔体接触,选择哪一个面为接触面或目标面可能会引起穿透量的不同,从而影响求解结果。这可参照如下几点。

- 如凸面预期与一个平面或凹面接触,则平面或凹面应当指定为目标面。
- 如一个面有较密的网格,而相比之下,另一个面网格较粗,则较密网格的面应当是接触面,而较粗网格的面则为目标面。
- 如一个面比另一个面刚性强,则较柔的面应当指定为接触面,而刚性较强的面则为

目标面。

- 如果高阶单元位于一个外表面，而低阶单元位于另一个面，则前者应指定为接触面，后者则为目标面。
- 如果一个面明显地比另一个面大（如一个面包围其他面），则较大的面应指定为目标面。

上面的论述对于不对称接触是正确的。但不对称接触也许不能满足模型需要。下面详细论述不对称接触和对称接触的差异，并简要说明需要对称接触的一些场合。

不对称接触的定义为所有的接触单元在一个面上，而所有的目标单元在另一个面上的情况。有时也称为“单向接触”。这在模拟面-面接触时最为有效。但是，在某些环境下，不对称接触不能满足要求。在这些情况下，可以把任一个面指定为目标面和接触面。然后在接触的面之间生成两组接触对。这就称为对称接触，有时也称为“双向接触”。显然，对称接触不如非对称接触效率高。但是，许多分析要求应用对称接触。要求对称接触的情况如下。

- 接触面和目标面区分不十分清楚。
- 两个面都有十分粗糙的网格。对称接触算法比非对称接触算法在更多的面上施加了接触约束条件。

如果两个面上的网格相同并且足够密，则使用对称接触算法可能不会显著缩短运行时间，而事实上可能更费 CPU 时间。在这种情况下，拾取一个面为目标面，而另一个面为接触面。在任何接触模型中，可以混合不同的接触对：刚体-柔体或柔体-柔体接触对；对称接触或非对称接触。但在一个接触对中只能有一种类型。

16.4.5 定义目标面

目标面可以是二维或三维的刚体或柔体面。对于柔体目标面，一般应用 ESURF 命令来沿现有网格的边界生成目标单元。也可以按相同的方法来生成柔体接触面。用户不应当使用下列刚性目标面作为柔体接触面：ARC、CARC、CIRC、CYL1、CONE、SPHE 或 PILO。对于刚体目标面的情况论述如下。

在二维情况下，刚性目标面的形状可以通过一系列直线、圆弧和抛物线来描述，所有这些都可用 TARGE169 单元来表示。另外，可以使用它们的任意组合来描述复杂的目标面。在三维情况下，目标面的形状可以通过三角面、圆柱面、圆锥面和球面来描述，所有这些都可用 TAPGE170 单元来表示。对于一个复杂的、任意形状的目标面，可以使用低阶或高阶三角形和四边形来建模。

1. 控制节点

刚性目标面可能会与“控制（pilot）节点”联系起来，它实际上是一个只有一个节点的单元，其运动控制整个目标面的运动，因此可以把控制节点作为刚性目标的控制器。整个目标面的力/力矩和转动/位移可以只通过控制节点来表示。控制节点可能是目标单元中的一个节点，也可能是一个任意位置的节点。只有当需要转动或力矩载荷时，控制节点的位置才是重要的。如果用户定义了控制节点，ANSYS 程序只在控制节点上检查边界条件，而忽略其他节点上的任何约束。

2. 基本图元

用户可以使用基本几何图元，如圆、圆柱、圆锥和球来模拟目标面。也可以组合图元与一般的直线、抛物线、三角形和四边形来定义目标面。



3. 单元类型和实常数

在生成目标单元之前，首先必须定义单元类型

命令：ET

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

随后必须设置目标单元的实常数。

命令：Real

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants

对于TARGE169 单元和 TARGE170 单元，仅需设置实常数 R_1 和 R_2 。

注意：只有在使用直接生成法建立目标单元时，才需要指定实常数 R_1 、 R_2 。另外除了直接生成法，用户也可以使用ANSYS网格划分工具生成目标单元。

4. 使用直接生成法建立刚性目标单元

为了直接生成目标单元，可以使用下面的命令和菜单。

命令：TSHAP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

随后指定单元形状，可能的形状有：直线（二维）、抛物线（二维）、顺时针的圆弧（二维）、反时针的圆弧（二维）、圆（二维）、三角形（三维）、圆柱（三维）、圆锥（三维）、球（三维）、控制节点（二维和三维）。

一旦用户指定目标单元形状，所有以后生成的单元都将保持这个形状，除非用户指定另外一种形状。

注意：不能在同一个目标面上混合二维和三维目标单元。不能在同一个目标面上混合刚体目标单元和柔体目标单元。在求解期间，ANSYS 对具有下伏单元的目标单元指定为可变形状状态，而对没有下伏单元的目标单元指定为刚体状态。如果删除柔性表面的下伏单元的一部分，在求解时会出现一个错误。

用户可以用标准的 ANSYS 直接生成技术生成节点和单元。

命令：N/E

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes

Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements

在建立单元之后，可以通过列表单元来验证单元形状。

命令：ELIST

GUI: Utility Menu | List | Elements | Nodes + Attributes

5. 使用ANSYS网格划分工具生成刚性目标单元

用户也可以用标准的 ANSYS 网格划分功能让程序自动地生成目标单元。ANSYS 程序会基于体模型生成合适的目标单元形状，而忽略 TSHAP 命令的选项。

为了生成一个控制（Pilot）节点，可以使用下面的命令或 GUI 路径。

命令：KMESH

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Keypoints

注意: KMESH 总是生成控制节点。

为了生成一个二维刚性目标单元, 可以使用下面的命令和 GUI 路径。ANSYS 在每条线上生成一条单一的线, 在 B 样条曲线上生成抛物线线段, 在每条圆弧和倒角线上生成圆弧线段, 参见图 16-2。如果所有的圆弧形成一个封闭的圆, ANSYS 生成一个单一的圆, 参见图 16-3。但是, 如果围成封闭圆的弧是从外部输入的几何实体, 则 ANSYS 可能无法生成一个单一的圆。

命令: LMESH

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines

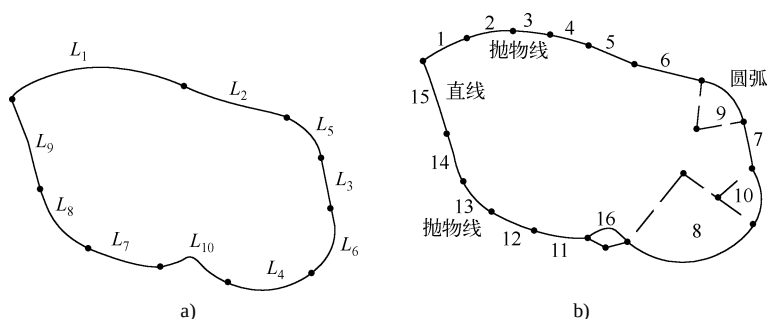


图 16-2 ANSYS 几何实体和相应的刚性目标单元

a) 基础线 b) 创建目标单元

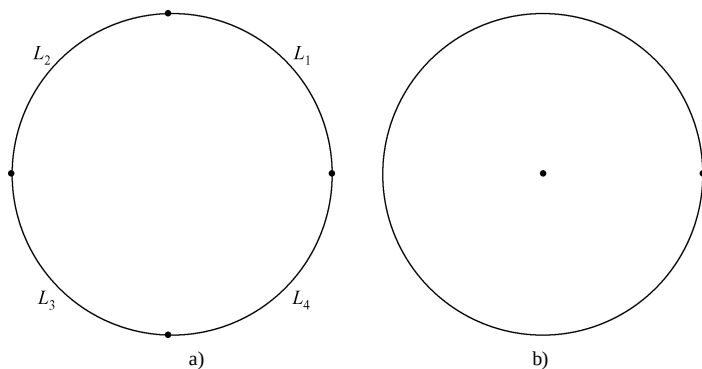


图 16-3 从圆弧线段生成单一的圆

a) 初始几何图形 b) 在完整的圆形上生产一个目标单元

为了生成三维的目标单元, 可以使用下面的命令或 GUI 路径。

命令: AMESH

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas

如果实体模型的表面部分形成了一个完整的球、圆柱或圆锥, 那么 ANSYS 程序通过 AMESH 命令, 将自动生成一个基本的三维目标单元。因为生成较少的单元, 从而使用户分析计算更有效率。对任意形状的表面, 应该使用 AMESH 命令来生成目标单元。在这种情况下, 网格形状的质量不重要。而目标单元的形状是否能较好地模拟刚性面的表面几何形状显得更重要。



在所有可能的面上，推荐使用映射网格。如果在表面边界上没有曲率，则在网格划分时，将没有曲率的边界划分为一份。刚体 TAREG169 单元总是在一根线上按一个单元这样来分网，而忽略 LESIZE 命令的设置。默认的单元形状是四边形，如果要使用三角形目标单元，应用 MSHAPE ,1 命令。图 16-4 表示了任意目标面的网格布局。下面的命令或 GUI 路径，将尽可能地生成一个映射网格

命令：MSHKFY,2

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Target Surf

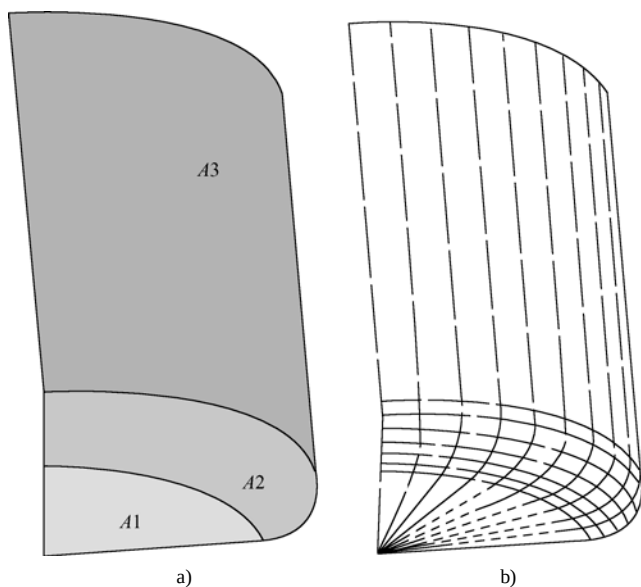


图 16-4 任意目标面的网格布局

a) 基础面 b) 创建目标面

如果目标面是平面，用户可以选择低阶目标单元（3 节点三角形或 4 节点四边形单元）。如果目标面是曲面，用户应该选择高阶目标单元（6 节点三角形或 8 节点四边形单元）。为此在目标单元定义中设置 KEYOPT (1) =1。

注意：低阶单元致使获取穿透和间隙时 CPU 的开销较小；但是，分网后的面可能不够光滑。高阶单元则在获取穿透和间隙时 CPU 的开销较大；但是需要较少的单元就可以离散整个目标曲面。

注意：如果通过程序划分网格（KMESH、LMESH、ESURF 命令）来建立目标单元，则忽略 TSHAP 命令，而 ANSYS 自动选择合适的形状。

(1) 建模和网格划分的一些诀窍

一个目标面可能由两个或多个不连续的区域组成。用户应该尽可能地通过定义多个目标面，来使接触区域限于局部。刚性面上的形状不限制，不要求光滑。但是，要保证刚性目标面上曲面的离散足够。过粗的网格离散可能导致收敛问题。如果刚性面有一个尖锐的凸角，求解大的滑动问题时很难获得收敛结果。为了避免这些建模问题，在实体模型上使用线或面的

倒角来使尖角光滑化，或者在曲率突变的区域使用更细的网格或高阶单元，见图 16-5。



图 16-5 凸角的光滑化

(2) 检验目标面的节点号顺序（接触方向）

目标面的节点号顺序是非常重要的，因为它定义了接触方向。对二维接触问题，当沿着目标线从第一个节点移向第二个节点时，变形体的接触单元必须位于目标面的右边，见图 16-6。

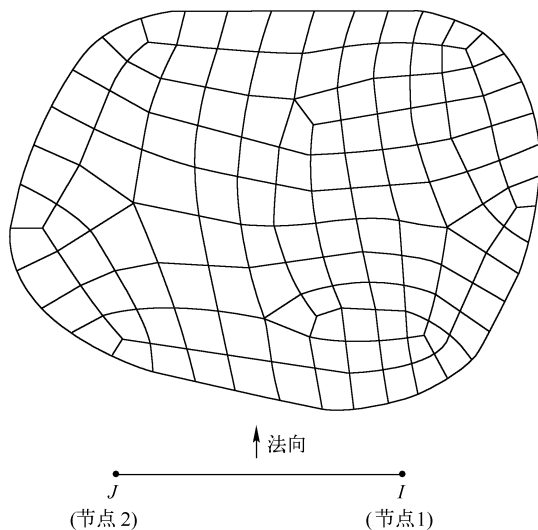


图 16-6 正确的节点顺序

对三维接触问题，目标三角形单元号应使刚性面的外法线方向指向接触面。外法线通过右手法则来定义。

如果单元法向不指向接触面，选择该单元，反转表面法线的方向。

命令：ESURF,,REVE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf

注意：在目标元素上的接触，只能在这些目标元素的外表面上出现。

16.4.6 定义柔体的接触面

为了建立柔体的接触面，对于二维接触必须使用 CONFA171 或 CONFA172 接触单元；



对于三维接触必须使用 CONTA173 或 CONTA174 接触单元。

程序通过组成柔体表面的接触单元来定义接触面。接触单元与下伏柔体单元有同样的几何特性。接触单元与下伏柔体单元必须处于同一阶次，以使在边上的节点协调。高阶接触单元可以通过消除中节点而与低阶下层单元匹配。下伏单元可能是实体单元、壳单元、二维梁单元。接触面可以在壳或梁单元的任何一边。下伏单元也可以是超单元。但是，轴对称调和单元不能用做下伏单元。

与目标面单元一样，用户必须定义接触面的单元类型，然后选择正确的实常数号，在每个接触对中，实常数号必须与它所对应的目标面的实常数号相同，最后生成接触单元。

1. 单元类型

下面简单描述四种类型的接触单元，如图 16-7 所示。

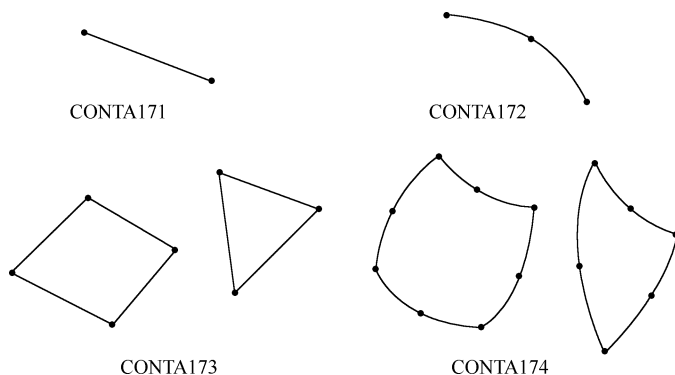


图 16-7 接触单元类型

CONTA171: 这是二维、两个节点的低阶线单元，可位于两实体、壳或梁单元的表面。

CONTA172: 这是二维、3 节点的高阶抛物线形单元，可位于有中节点的二维实体或梁单元的表面。

CONTA173: 这是三维、4 节点的低阶四边形单元，可位于三维实体或壳单元（如 SOLID45 或 SHELL181）的表面。可退化成 3 节点的三角形单元。

CONTA174: 这是三维、8 节点的高阶四边形单元，可位于有中节点的三维实体或壳单元的表面。可退化成 6 节点的三角形单元。

命令: ET

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

2. 实常数和材料特性

在定义了单元类型之后，需要选择正确的实常数集。一个接触对中的接触面和目标面必须有相同的实常数号。每个接触对必须有不同的实常数号。

ANSYS 使用下伏单元的材料特性来计算一个合适的接触（或罚）刚度。在下层单元有用 TB 命令定义的塑性材料特性（不论激活与否）的情况下，接触的法向刚度可能按照系数 100 降低。ANSYS 自动为切向（滑动）刚度定义一个与 MU 和法向刚度成正比的默认值。如果下伏单元是一个超单元，接触单元的材料必须与超单元形成时的原始结构单元相同。

3. 生成接触单元

既可以通过直接生成法生成接触单元，也可以在下层单元的外表面上自动生成接触单

元。推荐采用自动生成法，这种方法更为简单和可靠。可以通过下面三个步骤，来自动生成接触单元。

(1) 选择节点

选择已分网的柔体表面的节点。对每一个面，检查节点排列。如果用户确定某一部分节点永远不会接触到目标面，用户可以忽略它以便减少计算时间。然而用户必须保证设有漏掉可能会接触到目标面的节点。

命令: NSEL

GUI: Utility Menu | Select | Entities

(2) 生成接触单元

命令: ESURF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf

如果接触单元是附在已用实体单元划分网格的面或体上，程序会自动决定接触计算所需的外法向。如果下层单元是梁或壳单元，则必须指明哪个表面（上表面或下表面）是接触面。

命令: ESURF,, TOP 或 BOTIOM)

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf

使用默认（TOP）生成接触单元，它们的外法向与梁或壳单元的法向相同；使用 BOTIOM 生成接触单元，则它们的外法向与梁或壳单元的法向相反。必须确保梁上的单元或壳单元有一致的法向。如果下伏单元是实体单元，则 TOP 或 BOTTOM 选项不起作用

(3) 检查接触单元外法向

当程序进行是否接触的检查时，接触面的外法线方向至关重要。对于三维单元，按节点序号以右手法则来决定单元的外法向。接触面的外法向应该指向目标面。否则，在开始分析计算时，程序可能会认为是有过度穿透的面，而很难找到初始解。在这些情况下，程序一般会立即停止执行。图 16-8 说明了正确和不正确的外法向。

命令: /PSYMB,ESYS

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Symbols

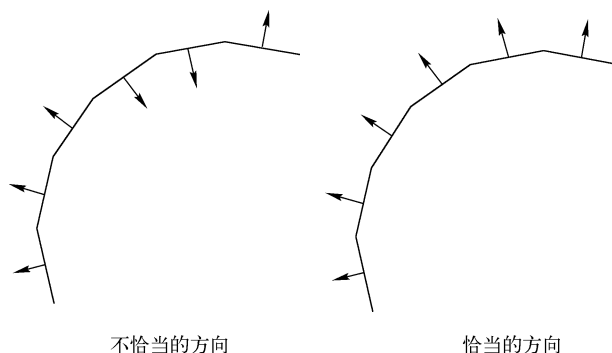


图 16-8 定义接触单元的外法向

当发现单元的外法线方向不正确时，必须通过反转所选择的不正确单元的节点号来改变它们。

命令: ESURF,,REVE



GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf

16.4.7 设置实常数和单元关键选项

程序使用 22 个实常数和数个单元关键选项，来控制面-面接触单元的接触。

1. 实常数

在 22 个实常数中，两个（R1 和 R2）用来定义目标面单元的几何形状。剩下的用来控制接触面单元。

R1 和 R2：定义目标单元几何形状。

FKN：定义法向接触刚度因子。

FTOLN：是基于单元厚度的一个系数，用于计算允许的穿透。

ICONT：定义初始闭合因子。PINB：定义“Pinball”区域。

PMIN 和 PMAX：定义初始穿透的容许范围。

TAUMAX：指定最大的接触摩擦。

CNOF：指定施加于接触面的正或负的偏移值。

FKOP：指定在接触分开时施加的刚度系数。

FKT：指定切向接触刚度。

COHE：指定滑动抗力粘聚力。

TCC：指定热接触传导系数。

FHTG：指定摩擦耗散能量的热转换率。

SBCT：指定 Stefan-Boltzman 常数。

RDVF：指定辐射观察系数；

FWGT：指定在接触面和目标面之间热分布的权重系数。

FACT：指定静摩擦系数和动摩擦系数的比率。

DC：指定静、动摩擦衰减系数。

SLTO：指定当摩擦系数非零时控制最大滑动距离。

TNOP：指定允许的最大拉伸接触压力。

TOLS：指定添加一个能扩展到目标表面的边缘的小容限。

PPCN：指定压力-透穿准则（只适应用于接触单元）

命令：R

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants

对实常数 FKN、FTOLN、ICONT、PINB、PMAX、PMIN、FKOP 和 FKT，用户既可以定义一个正值，也可以定义一个负值。程序将正值作为比例因子，将负值作为绝对值。程序将下伏单元的厚度作为 ICON、FTOLN、PINB、PMAX 和 PMIN 的参考值。例如 $ICON = 0.1$ 表明初始闭合因子是“ $0.1 \times$ 下层单元的厚度”。然而， $ICON = -0.1$ 则表示真实调整带是 0.1 单位。如果下伏单元是超单元，则将接触单元的最小长度作为厚度，参见图 16-9。

在模型中，如果单元尺寸变化很大，而且在实常数（如 ICONT、FTOLN、PINB、PMAX、PMIN）中应用比例系数，则可能会出现問題。因为从比例系数得到的实际结果，取决于下层单元的厚度，这就可能引起大、小单元之间的重大变化。如果出现这一问题，请用绝对值代替比例系数。TCC、FHTG、SBCT、RDVF 和 FWGT 仅用于热接触分析（KEYOPT (1) = 1）。

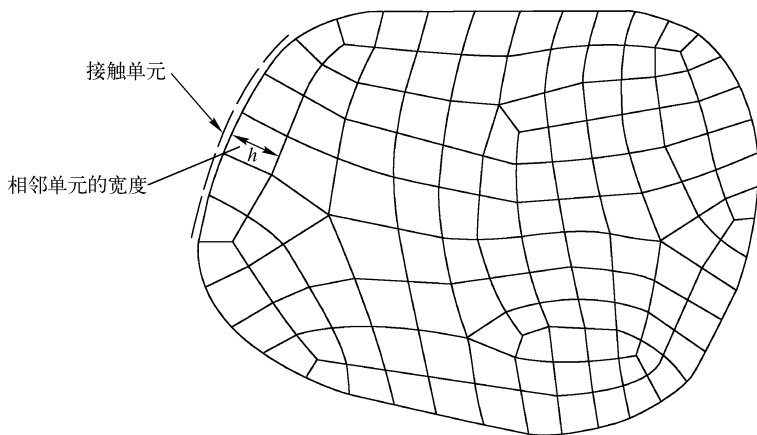


图 16-9 下层单元的厚度

2. 单元关键选项

每种接触单元都包括数个关键选项。对大多数的接触问题，默认的关键选项是合适的。而在某些情况下，可能需要改变默认值。下面是可以控制接触行为的一些关键选项。

自由度	KEYOPT (1)
接触算法（罚函数+拉格朗日乘子或罚函数）	KEYOPT (2)
存在超单元时的应力状态（仅二维）	KEYOPT (3)
接触检测点的位置（仅低阶接触单元）	KEYOPT (4)
CNOF 自动调整	KEYOPT (5)
接触刚度变化范围	KEYOPT (6)
时间步控制	KEYOPT (7)
伪接触预防	KEYOPT (8)
初始穿透或间隙的影响	KEYOPT (9)
法向和切向接触刚度修正方法控制	KEYOPT (10)
壳的厚度影响	KEYOPT (11)
接触面行为（粗糙、绑定等）	KEYOPT (12)

命令：KEYOPT/ET

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

3. 选择接触算法

对面-面接触单元，程序可以使用增进的拉格朗日方法或罚函数方法。通过单元关键字 KEYOPT (2) 来指定：

罚函数法（Penalty method）（KEYOPT (2) = 1）；

增进的拉格朗日方法（Augmented Lagrangian）（默认）（KEYOPT (2) = 0）；

拉格朗日方乘子法（Lagrange multiplier on contact normal and penalty on tangent）（KEYOPT (2) = 3）；

纯拉格朗日方乘子法（Pure Lagrange multiplier on contact normal and tangent）（KEYOPT (2) = 4）；

内部多点约束（Internal multipoint constraint）（MPC）（KEYOPT (2) = 2）。



增进的拉格朗日方法是为了找到精确的拉格朗日乘子（即接触力），而对罚函数进行一系列修正迭代。与罚函数的方法相比，拉格朗日方法容易得到良态条件，对接触刚度的敏感性较小。然而，在有些分析中，增进的拉格朗日方法可能需要更多的迭代，特别是在变形后网格变得太扭曲时。

使用拉格朗日方法的同时应使用实常数 **FTOLN**。**FTOLN** 为拉格朗日方法指定容许的最大穿透。如果程序发现穿透大于此值，即使不平衡力和位移增量已经满足了收敛准则，总的求解仍被当做不收敛处理。**FTOLN** 的默认值为 0.1。用户可以改变这个值，但要注意，如果此值太小，可能会造成太多的迭代次数或不收敛。

4. 确定接触刚度

所有的接触问题都需要定义接触刚度，两个表面之间穿透量的大小取决于接触刚度。过大的接触刚度可能会引起总刚矩阵的病态，从而造成收敛困难。一般来说，应该选取足够大的接触刚度以保证接触穿透小到可以接受，但同时又应该让接触刚度足够小以不致引起总刚矩阵的病态而保证收敛性。

ANSYS 程序根据下伏柔体单元的材料特性，来估计一个默认的接触刚度值。用户可用实常数 **FKN** 来为接触刚度指定一个比例因子或指定一个绝对值。比例因子一般在 0.01 和 10 之间；对于大变形问题，选 1 是比较好的；而对于弯曲为主的问题，通常为 0.01~0.1。用户应当总是检验以使穿透到达极小值，而又避免过多的迭代次数。

注意：**FTOLN** 和 **FKN** 从一个载荷步到另一个载荷步中，都可以修改。也可以在重启动中修改。这时，必须定义 **KEYOPT (10) = 1, 2**。

为了确定一个较好的接触刚度值，可能需要一些经验。用户可以按下面的步骤来进行尝试。

1) 开始时取一个较低的值。低估值要比高估值好，因为由一个较低的接触刚度导致的穿透问题，比过高的接触刚度导致的收敛性困难。

2) 对前几个子步进行计算分析，直到最终载荷的一个比例（刚好完全建立接触）。

3) 检查每一子步中的穿透量和平衡迭代次数。如果总体收敛困难是由过大的穿透引起的（而不是由不平衡力和位移增量引起的），那么可能低估了 **FKN** 的值，或者是将 **FTOLN** 的值取得大小。如果总体的收敛困难是由于不平衡力和位移增量达到收敛值时需要过多的迭代次数，而不是由于过大的穿透量引起的，那么 **FKN** 的值可能被高估。

4) 按需要调整 **FKN** 或 **FTOLN** 的值，重新进行完整的分析。

注意：如果穿透控制变成总体平衡迭代中的主因（如果使问题收敛到穿透容差内，比收敛到不平衡力的容差内，需要更多的迭代），用户应该增大 **FTOLN** 值，以允许更多的穿透，或增大 **FKN**。

5. 选择摩擦类型

(1) 摩擦应用的背景

在基本的库仑摩擦模型中，两个接触面在开始相互滑动之前，在它们的界面上会有达到某一大小的剪应力产生。这种状态称为粘合状态。库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力 τ ，在某一法向压应力 p 作用下剪应力达到此值时表面开始滑动（ $\tau = \mu p + COHE$ ，其中 μ 是摩擦系数 **MU**，作为材料特性定义，而 **COHE** 是粘聚力）。一旦剪应力超过此值后，两个表面之

间将开始相互滑动。这种状态,叫做滑动状态。粘合/滑动计算决定什么时候一个点从粘合状态变到滑动状态,或从滑动状态变到粘合状态。摩擦系数可以是任一非负值,程序默认值为表面之间无摩擦。对于粗糙或绑定接触 (KEYOPT (12) =1、3、5、6), 程序将不管给定的 MU 值而认为摩擦阻力无限大。

(2) 摩擦的模式

程序提供了一个人为指定最大等效剪应力的选项, 不管接触压力值的大小, 如果等效剪应力达到此值时, 即发生滑动, 见图 16-10。为了指定接触界面上最大容许剪应力, 设置常数 TAUMAX (默认为 1.0E20)。这个剪应力极限, 通常用于在接触压力非常大的时候 (如在某些加工过程中) 的一些情况, 以至于用库仑理论计算出的界面剪应力超过了材料的屈服极限。TAUMAX 的一个合理上限估值为 $\sigma_y / \sqrt{3}$ (σ_y 是表面附近材料的 von Mises 屈服应力)。经验数据有助于决定 TAUMAX 的值。

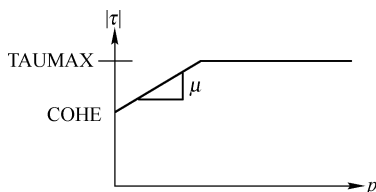


图 16-10 摩擦模式

(3) 静、动摩擦系数

摩擦系数依赖于接触面的相对滑动速度, 通常静摩擦系数高于动摩擦系数。

ANSYS 提供了如下表示的指数衰减摩擦模型:

$$\mu = \mu_{\text{动}} \times (1 + (MB - 1) \exp(-SJ \times V_{\text{rel}})) \quad (16-1)$$

其中, μ 为静摩擦系数, $\mu_{\text{动}}$ 为动摩擦系数, 用 MP 命令输入; MB 是静摩擦系数与动摩擦系数之比, 默认为最小值 1.0, SJ 为衰减系数, 默认为 0.0, 单位为时间/长度 (因此, 时间在静态分析中有一些意义), V_{rel} 是 ANSYS 计算的滑动速度。

对于各向同性摩擦模型, 如上所述可以使用 MP 或 TB 输入 $\mu_{\text{动}}$ 。对于各向异性摩擦模型, $\mu_{\text{动}}$ 是由 MU₁ 和 MU₂ 来计算出等效摩擦系数, 并且使用 TB 命令输入。

$$\mu = \sqrt{\frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{2}} \quad (16-2)$$

图 16-11 给出了摩擦系数的指数衰减曲线, 其中静态摩擦系数由下式给出:

$$\mu_s = MB \times \mu_{\text{动}} \quad (16-3)$$

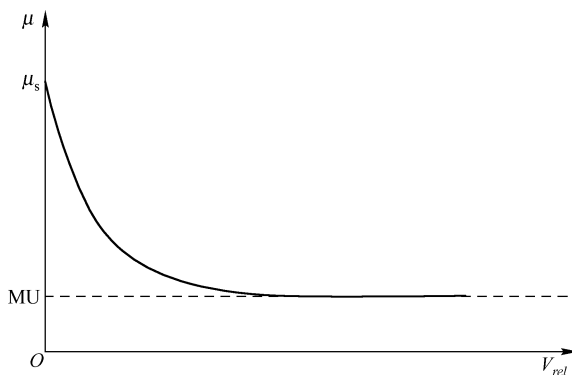


图 16-11 摩擦系数的指数衰减曲线

如果知道静、动摩擦系数和至少一个数据点 (μ_1, V_{rel}), 则可以确定摩擦衰减系数为:



$$SJ = \frac{1}{V_{rell}} \times \ln\left(\frac{\mu_1 - \mu_{动}}{(MB - 1) \times \mu_{动}}\right) \quad (16-4)$$

如果不指定衰减系数, 且 MB 大于 1.0, 当接触进入滑动状态时, 摩擦系数会从静摩擦系数突变到动摩擦系数, 这种行为类似于动摩擦模型, 因为这会导致收敛困难, 所以不建议采用。

(4) 对称、不对称求解器

对无摩擦、粗糙和绑定接触, 接触单元刚度矩阵是对称的。而涉及摩擦的接触问题产生了一个不对称的刚度。在每次迭代中使用不对称的求解器, 比对称的求解器需要更多的计算时间。因此 ANSYS 程序采用对称化算法。通过采用这种算法, 大多数摩擦接触问题能够使用对称系统的求解器来求解。如果摩擦应力在整个位移场内有相当大的影响, 并且摩擦应力的尺寸高度依赖于求解过程, 则对刚度阵的任何对称近似都可能导致收敛性降低。在这种情况下, 选择不对称求解选项 (NROPT, UNSYM) 来改善收敛性。

6. 选择接触检查的位置

接触检查点位于接触单元的积分点上。在积分点上, 接触单元不穿透进入目标面。然而, 目标面能穿透进入接触面, 见图 16-12。

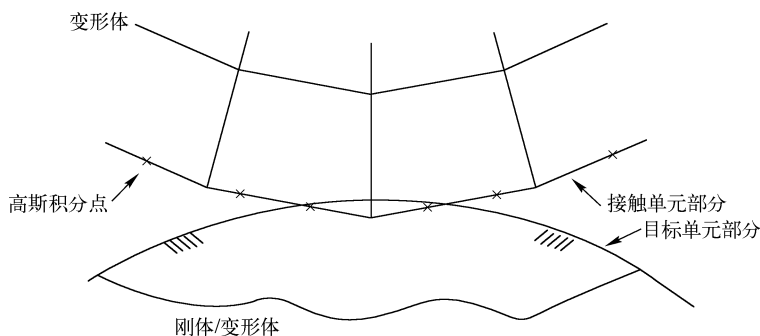


图 16-12 接触检查点位于高斯积分点上

ANSYS 面-面接触单元使用高斯积分点作为默认值, 高斯积分点通常会比 Newton-Cotes/Lobatto 节点积分方法产生更精确的结果, Newton-cotes/Lobatto 用节点本身作为积分点。通过 KEYOPT (4) 来选择用户想使用的方法。这一选项仅适用于低阶接触。然而, 使用节点本身作为积分点仅适用于角接触问题 (见图 16-13)。

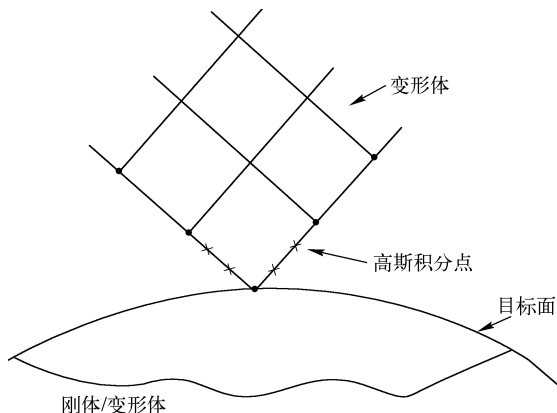


图 16-13 接触检查点位于节点上

注意，使用节点作为接触检查点可能会导致其他收敛性问题，例如“滑脱”（节点滑出目标面的边界），见图 16-14。对大多数的点-面的接触问题，推荐使用其他的点-面的接触单元。

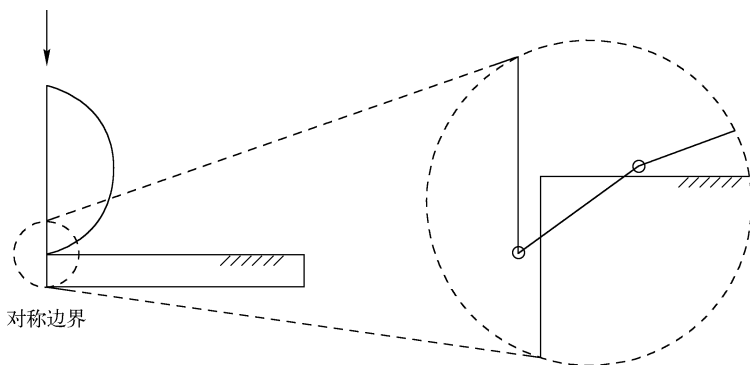


图 16-14 节点滑脱

7. 调整初始接触条件

(1) 背景

在动态分析中，刚体运动一般不会引起问题。然而在静力分析中，当物体没有足够的约束时会产生刚体运动，有可能引起错误而终止计算。在仅仅通过接触的出现来约束刚体运动时，必须保证在初始几何体中，接触对是接触的。换句话说，用户要建立模型以便接触对是“刚好接触”的。然而这样做，可能会遇到以下问题。

- 刚体外形常常是复杂的，很难决定第一个接触点发生在哪儿。
- 即使实体模型在初始时处于接触状态，在网格划分后由于数值舍入误差，两个面的单元网格之间也可能会产生小缝隙。
- 接触单元的积分点和目标单元之间可能有小缝隙。

同理，在目标面和接触面之间可能发生过大的初始穿透。在这种情况下，接触单元可能会高估接触力，导致不收敛或接触面之间脱离接触关系。定义初始接触也许是建立接触分析模型时最重要的方面。因此，程序提供了几种方法来调整接触对的初始接触条件。

注意：下面的技巧可以在开始分析时独立执行，或几个联合起来执行。执行它们是为了消除由于生成网格造成的数值舍入误差而引起的小间隙或穿透，而不是为了改正网格或几何数据的错误。

(2) 应用关键字 **KEYOPT (5)** 和 **KEYOPT (9)** 使用 **PMIN**、**PMAX**、**CNOF**、**ICONT**

1) 应用实常数 **CNOF** 来指定一个接触面偏移。

指定正的值得使整个接触面偏向目标面。指定负的值来使接触面离开目标面。

ANSYS 能够自动提供 **CNOF** 值到刚好闭合间隙或减少初始穿透。通过如下方法设置 **KEYOPT (5)**：=1：闭合间隙；=2：减少初始穿透；=3：闭合间隙或减少初始穿透。

如果设置了 **KEYOPT (5) = 0**，则 **ICONT** 默认值为 0。

2) 使用实常数 **ICONT** 来指定一个小的初始接触环，初始接触环是指沿着目标面的“调整环”的深度。如果没有人为指定 **ICONT** 的值，程序会根据几何尺寸来给 **ICONT** 提供一个小值（但有意义的值），同时输出一个表示什么值被指定的警告信息。**ICONT** 正值表示



相对于下层单元厚度的比例因子；负值表示接触环的绝对值。任何落在“调整环”域内的接触检查点被自动移到目标面上，（参见图 16-15a）。建议使用一个十分小的 ICONT 值，否则可能会发生严重不连续（参见图 16-15b）

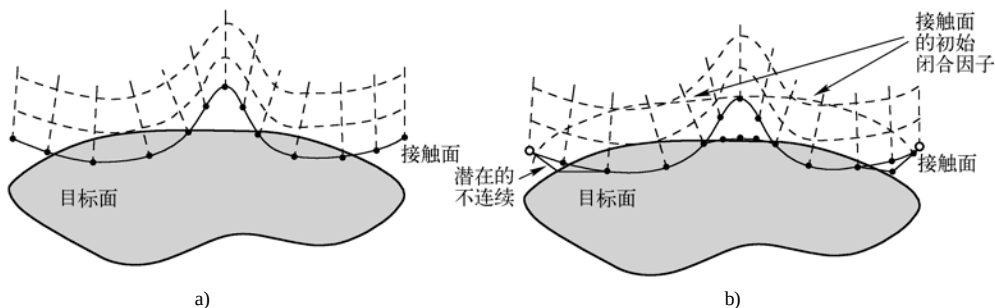


图 16-15 用 ICONT 进行接触面的调整

a) 调整之前 b) 调整之后

CNOF 与 ICONT 之间的差别，是前者把整个接触面移动 CNOF 的距离，而后者把所有初始分开的（刚好位于调整环 ICONT 内的）接触点向目标面移动。

如果用户应用其他方法来平衡初始未约束的自由体（如 FTOLN, PINB, PMAX 和 PMIN），基本上消除 ICONT 的影响（把它关联一个很小的值，如 $1E-20$ ），是一个好办法。但是，设置 $ICONT=0$ ，并不会关闭它。而是导致 ANSYS 用默认值代替。当与其他约束自由体的方法联用时，这反而可能不能达到所期望的效果。

3) 使用实常数 PMIN 和 PMAX 来指定初始容许的穿透范围。当指定 PMAX 或 PMIN 后，在开始分析时，程序会将目标面移到初始接触状态，见图 16-16。如果初始穿透大于 PMAX，程序会调整目标面来减少穿透。接触状态的初始调整仅仅通过平移来实现。

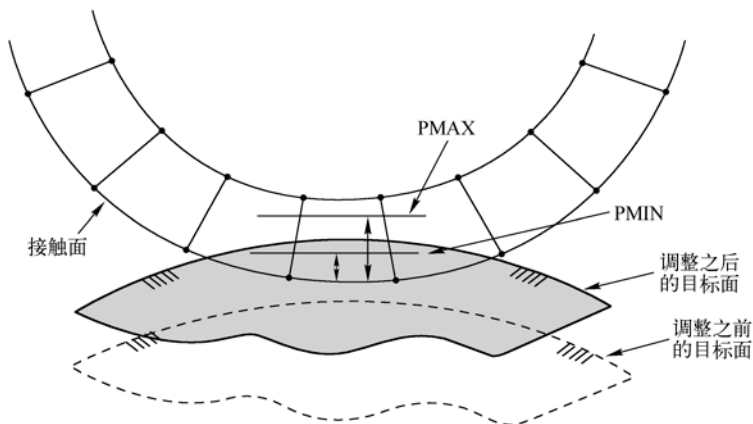


图 16-16 接触面调整(PMIN、PMAX)

对给定载荷或给定位移的刚性目标面，将会执行初始接触状态的初始调整。对没有指定边界条件的目标面，也同样可以进行初始接触的调整。

当目标面上的所有节点有给定的零位移值时，使用 PMAX 和 PMIN 的初始调整将不会被执行。

注意：ANSYS 程序独立地处理目标面上节点的自由度。例如，如果用户指定自由度 UX 值为“0”，那么沿着 X 方向就没有初始调查。然而，在 Y 和 Z 方向仍然会激活 PMAX 和 PMIN 选项。

初始状态调整是一个迭代过程，程序最多进行 20 次迭代。如果目标面不能进入可接受的穿透范围（即 PMIN, PMAX 范围），程序将在原始几何实体上操作。这时程序会给出一个警告信息，警告用户可能需要调整用户的初始几何模型。

图 16-17 给出了一个初始接触调整迭代失败的例子。目标面的 UY 被约束。因此，初始接触唯一容许的调整是在 X 方向的。然而，在这个问题中，刚性目标面在 X 方向的任何运动都不会引起初始接触。

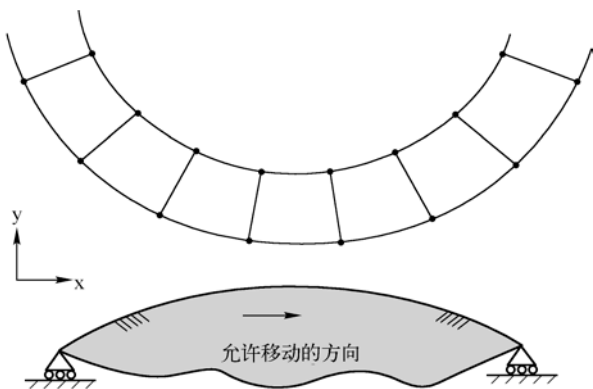


图 16-17 一个初始调整失败的例子

对于柔体-柔体接触，这种方法不仅移动整个目标面，还同时移动与目标面相连的整个柔体。请确保没有其他接触面或目标面与柔体相连。

4) 设置 KEYOPT (9) =1 来调整初始穿透或间隙，见图 16-18。

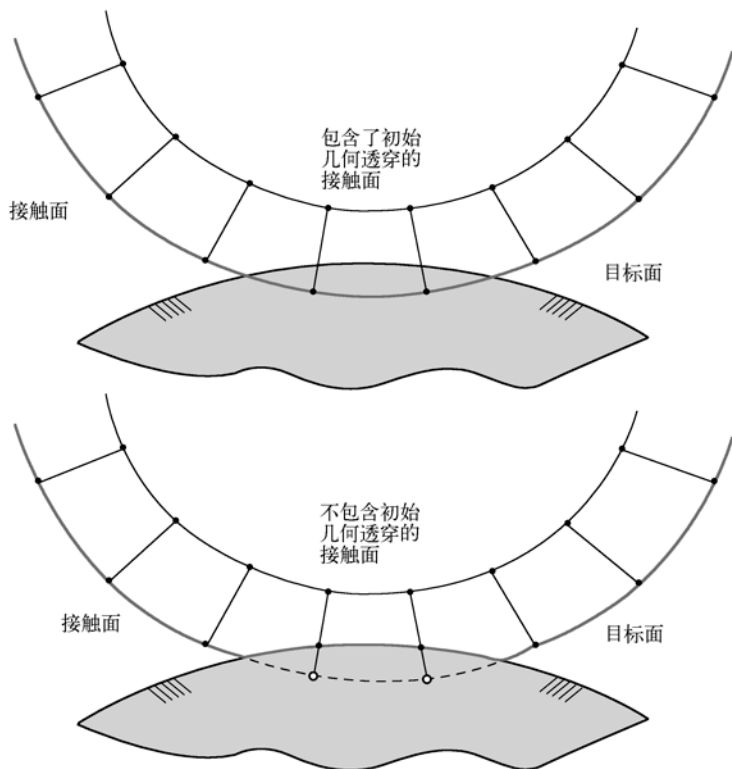


图 16-18 忽略初始穿透,KEYOPT(9)=1



真正的初始穿透包括以下两部分。

- 几何模型产生的穿透或间隙。
- 用户定义的接触面偏移 (CNOF) 产生的穿透或间隙。

KEYOPT (9) 提供了下列功能。

- 包括由几何和接触面偏移产生的初始穿透, 设置 KEYOPT (9) =0, 这是默认项。
- 忽略上面两者引起的初始穿透, 设置 KEYOPT (9) =1。在 KEYOPT (12) =4 或 5 时, 这一 KEYOPT (9) =1, 也将忽略间隙弹簧的初始力, 这样, 建立了一个初始的“理想的”接触面——在接触截面上没有初始力的作用。
- 为了包括定义的接触面偏移 (CNOF), 但忽略由于几何模型引起的初始穿透, 设置 KEYOPT (9) =3。在 KEYOPT (12) =4 或 5 时, 这一 KEYOPT (9) =3, 也将忽略打开间隙弹簧的初始力, 这样, 建立了一个初始的“理想的”接触面——在接触截面上没有初始力的作用。

在某些情况下, 例如过盈装配问题, 期望有过度的穿透。如在第一个载荷步施加阶跃初始穿透, 可能造成收敛困难。为了缓解收敛性困难, 可以在第一个载荷步中设置渐变的初始穿透, 见图 16-19。

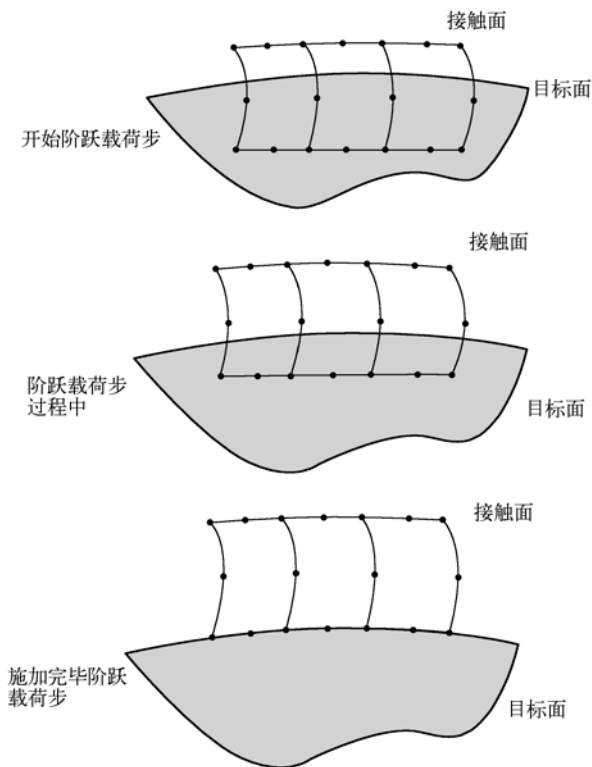


图 16-19 渐变初始过盈

下面的 KEYOPT (9) 设置用来提供渐变功能。

- 设置 KEYOPT (9) =2, 渐变施加初始穿透 (CNOF+由于几何模型造成的偏移)。
- 设置 KEYOPT (9) =4, 渐变施加接触面穿透, 但忽略由于几何模型造成的穿透。

对于上面两个 KEYOPT (9) 设置, 用户还应该设置 KBC,0, 并在第一个载荷步中不要给定任何其他外载荷。还要确保球形 (Pinball) 区域足够大以捕捉到初始过盈。

用户可以联合应用上面的技术。例如, 用户可能希望设置十分精确的初始渗透或间隙, 但有限元节点的初始坐标可能无法提供足够的精度。这时, 可以采用以下几种方法。

- 应用 ICONT 来移动初始张开的接触点刚好碰到目标面。
- 应用 CNOF 来指定穿透 (正值) 或间隙 (负值)。
- 应用 KEYOPT (9) =3 来在第一个子步求解初始穿透, 或应用 KEYOPT (9) =4 来逐渐求解初始穿透。

在开始分析时, 程序会给出每个目标面的初始接触状态的输出信息 (输出窗口或输出文件中), 这个信息有助于决定每个目标面的最大穿透或最小间隙。

对于给定的目标面, 如果没有发现接触, 可能是目标面离接触面太远 (超出了球形区域), 或者是接触或目标单元已经被杀死。

8. 决定接触状态和球形区域

接触单元相对于其目标面的运动和位置, 决定了接触单元的状态; 程序检测每个接触单元, 并给出如下之一的状态。

STAT=0, 未闭合的远场接触。

STAT=1, 未闭合的近场接触。

STAT=2, 滑动接触。

STAT=3, 粘合接触。

当目标面进入球形区域后, 接触单元就被当做未闭合的近场接触, 球形区域是以接触单元的积分点为中心的。

使用实常数 PINB 来为球形区域指定一个比例因子 (正值), 或其绝对值 (负值)。默认时, 程序将球形区域定义为一个以“4×下层单元厚度 (对于刚体-柔体接触)”或“2×下层单元厚度 (对于柔体-柔体接触)”为半径的圆 (对二维问题) 或球 (对三维问题)。

检查接触的计算时间依赖于球形区域的大小, 远场接触单元计算简单, 计算时间较少。近场接触计算 (对于接近接触或实际接触的接触单元) 较慢并且较复杂。当单元已经接触时, 计算最为复杂。

如果刚性面有好几个凸形区域, 为了克服伪接触定义, 设置一个合适的球形区域是有用的。而对大多数问题, 默认值是合适的。

9. 在自接触问题中避免伪接触

在一些对称接触问题 (包括自接触) 中, ANSYS 可能错误地假设在十分接近的几何位置上的接触面和目标面之间的接触。在自接触问题的角点会发生这一问题。它可能是由单元的初始几何位置引起的, 也可能是在分析时通过变形而引起的。在二个面位于球形区域内, 而且它们之间夹角小于 90° 时, 会产生这一问题。在这种情况下, ANSYS 程序认为发生了十分大的穿透。图 16-20 说明了这种情况。

ANSYS 在各个载荷步中第一次检测到伪接触时会发出一个警告。如 ANSYS 在第 1 载荷步中发现这种接触, 用户可看到如下的信息:

“Contact element x has too much penetration related to target element y.
We assume it (may be more elements) is spurious contact.”





如果 ANSYS 检测到归类为伪接触的突变, 用户看到如下信息:

“Contact element x status changed abruptly with target element y.

We assume it (may be more elements) is spurious contact.”

ANSYS 在一个载荷步中仅发出一次这样的信息。在该载荷步中如果还存在其他的伪接触, ANSYS 不再提醒。

注意: 在应用 KEYOPT (8) =1 之前, 请认真检查模型。ANSYS 将忽略符合了过度穿透准则的真正接触。这一技术应当仅用于在改变球形区域 PINB 不能阻止伪接触的情况。

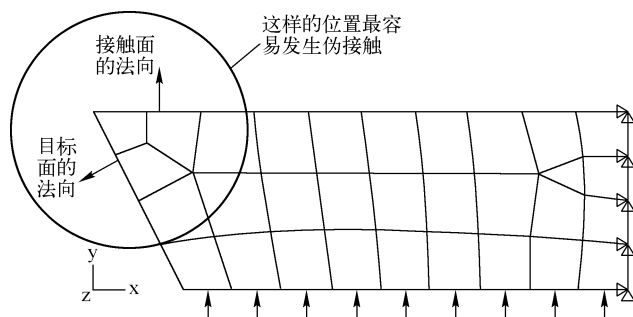


图 16-20 检测伪接触

10. 修正法向和切向接触刚度

在分析过程中, 可以修正法向和切向接触刚度。可以自动修正 (由于改变下伏单元刚度的大应变效应产生), 也可以显式地修正 (由用户重新指定 FKN 或 FKT 值)。KEYOPT (10) 控制法向和切向接触刚度如何修正。

- KEYOPT (10) =0, 禁止那些已经处于“闭合”状态的单元的接触刚度修正。对于从“张开”变化到“闭合”状态的单元, 将在每一个子步上修正接触刚度。
- KEYOPT (10) =1, 允许已处于“闭合”状态的单元的接触刚度, 在载荷步之间或在重启动期间改变。对于从“张开”变化到“闭合”状态的单元, 将在每一个子步上修正接触刚度。
- KEYOPT (10) =2 与 KEYOPT (10) =1 相同, 只是对所有单元 (不论其状态) 将在每一个子步上, 由程序决定自动修正。

11. 选择表面作用模式

面-面接触单元支持法向单向接触模式及其他力学表面作用模式。通过设置 KEYOPT (12) 来选择下面的某种作用模式。

- KEYOPT (12) =0, 法向单向接触, 即在接触分开时, 法向压力等于 0。
- KEYOPT (12) =1, 理想粗糙接触, 用来模拟无滑动的、表面完全粗糙的摩擦接触问题, 这种设置对应于摩擦系数无限大, 因此用户定义的摩擦系数 (MU) 被忽略。
- KEYOPT (12) =2, “不分离”接触, 接触面和目标面一旦接触, 在其后的分析中就连在一起 (虽然允许有相对滑动)。
- KEYOPT (12) =3, 绑定接触模式, 目标面和接触面一旦接触, 随后就在所有方向上绑定。

- KEYOPT (12) =4, 不分离接触, 其中的接触积分点, 或初始在球形区域内, 或一旦接触, 就总是与目标面沿接触面的法向连在一起的, 但允许滑动。调整 FKOP (见下), 可用“软弹簧”把这些区域联系在一起。
- KEYOPT (12) =5, 绑定接触模式, 其中接触积分点, 或者初始在球形区域内, 或者一旦接触, 就总是与目标面沿接触面的法向和切向绑定在一起的。
- KEYOPT (12) =6, 绑定接触模式, 其中初始接触的接触积分点保持与目标面接触, 而初始处于打开状态的接触积分点, 在整个分析期间保持打开状态。这个选项与在初始接触的区域应用 CEINTF 类似。

对于模拟不分离或绑定接触, 用户可能需要设置 FKOP 实常数。这在接触张开时, 提供一个刚度系数。如果 FKOP 为正值, 则真正的接触张开刚度等于 FKOP 乘以接触闭合时施加的刚度。如果 FKOP 为负值, 该值作为接触张开刚度的绝对值。默认的 FKOP 值为 1。

不分离或绑定接触, 在接触发生张开时, 产生“回拉”力, 这个力可能不足以阻止分离。为了减小分离, 定义一个较大的 FKOP 值。在有些时候, 希望接触面分离, 但需要在接触面之间建立联系来阻止刚体运动, 在这种情况下, 可以指定较小的 FKOP 值, 以使接触面之间保持联系 (这是“软弹簧”效应)。

12. 用超单元建立接触模型

(1) 背景

面-面的接触单元能模拟刚体 (或一个线弹性体) 和另一个有小位移的线弹性体的接触。这些线弹性体可用超单元来建模, 这大大降低了进行接触迭代的自由度数。记住任何接触或目标节点都必须是超单元的主自由度。

由于超单元仅仅由一组保留的节点自由度组成, 它没有用来定义接触面和目标面的几何形状。因此, 必须在形成超单元之前在原始单元表面上定义接触面和目标面。来自超单元的信息包括节点连结和组合刚度, 但是没有材料特性和应力状态 (轴对称、平面应力或平面应变)。一个限制是接触单元的材料特性设置必须与形成超单元之前的原始单元的材料特性相同。

(2) 使用 KEYOPT (3) 来提供二维接触分析的信息

CONTA171、CONTA172 单元的选项如下。

- KEYOPT (3) =0, 不使用超单元。
- KEYOPT (3) =1, 轴对称。
- KEYOPT (3) =2, 平面应变或单位厚度的平面应力。
- KEYOPT (3) =3, 需要厚度输入的平面应力。

对这种情况, 使用实常数 R2 来指定厚度。

对于三维接触分析, CONTA173, CONTA174 单元的 KEYOPT (3) 选项忽略。ANSYS 将自动检查下伏单元是否为超单元。

13. 考虑厚度影响

(1) 背景

程序能够用 KEYOPT (11) 来考虑壳 (二维和三维)、梁 (二维) 的厚度。对于刚体-柔体接触, ANSYS 将自动移动接触面到壳、梁的底面或顶面。对于柔体-柔体接触, ANSYS 将自动移动与壳、梁单元相连的接触面和目标面。默认时, 程序不考虑单元厚度, 用中面来





表示梁和壳，而穿透距离从中面计算。

(2) 使用关键字 KEYOPT (11)

当设置 KFTOPI (11) =1 时，则考虑壳或梁的厚度。从指定的底面或顶面来计算穿透距离。

注意：仅在使用节点位于中面的壳或梁单元时（例如，KEYOPT (11) =0 的 SHELL181 单元），用 KEYOPT (11) =1 来考虑厚度影响。

建模时如要考虑厚度，记住偏移可能来自接触面、目标面或来自两者。在和 KEYOPT (11) =1 一起指定接触偏移 (CNOF) 时，CNOF 从壳或梁的顶面和底面计算，而不是中面。当和 SHELL181 一起使用时，还考虑变形过程中的厚度变化。

14. 使用时间步长控制

(1) 背景

时间步长控制是一个自动时间步长特征，这个特征预测什么时间接触单元的状态将发生变化，或者二分当前时间步。

(2) 使用关键字 KEYOPT (7)

使用 KEYOPT (7) 来选择下列四种行为之一来控制时间步长。KEYOPT (7) =0 时不提供控制（默认），KEYOPT (7) =3 提供最多的控制。

- KEYOPT (7) =0，无控制。时间步大小不受预测影响。当自动时间步长激活，且允许一个很小的时间步长时，这个设置对大多数情况是合适的。
- KEYOPT (7) =1，如果一次迭代期间产生太大的穿透，或者接触状态急剧变化，则进行时间步长二分。
- KEYOPT (7) =2，对下一个子步，预测一个合理的时间增量。
- KEYOPT (7) =3，对下一个子步，预测一个最小的时间增量。

15. 使用死活单元选项

面-面接触的接触单元和目标单元允许激活或杀死，而且也跟随其下伏单元的死活状态。能够在分析的某一阶段中杀死这个单元，而在以后的阶段再重新激活它。这个特征对于模拟复杂的金属成形过程是有用的，在此过程的不同分析阶段，有多个刚性目标面需要和接触面相互作用。回弹模拟常常需要在成形过程的后期移走刚性工具。这一选项不能用于“不分离”或绑定接触。

16.4.8 控制刚性目标面的运动（刚体-柔体接触）

刚性目标面是在其原始构形上定义的。而整个面的运动，通过控制节点上的给定位移来定义（如果没有定义控制节点，则通过目标面上的不同节点来定义）。

为控制整个目标面的边界条件（和运动），在下面任何情况下，必须使用控制节点。

- 目标面上作用着给定的外力。
- 目标面发生旋转。
- 目标面和其他单元相连（例如结构质量单元 MASS21 等）。
- 目标面的运动有平衡条件调节。

控制节点的自由度代表着整个刚性面的运动，包括二维中的两个平移和一个转动自由

度，或三维中的三个平移和三个转动自由度。用户可以在控制节点上施加边界条件（位移、初速度）、集中载荷、转动等等。为了考虑刚体的质量，可在控制节点上定义一个质量单元。

当使用控制节点时，记住对目标面有如下一些限制。

- 每个目标面只能有一个控制节点。
- ANSYS 忽略除了控制外的所有节点上的边界条件。
- 只有控制节点能与其他单元相连。

当定义了控制节点后，不能使用约束方程（CE）或节点耦合（CP）来控制目标面的自由度。如果要在刚性面上施加任意载荷或者约束，用户必须定义控制节点，并在控制节点上加约束。如果没有使用控制节点，则只能有刚体运动。

注意：控制节点可以是目标单元上的一个节点，或者是任意位置的节点，但不应该是接触单元上的节点。只有在施加了转角或力矩时，控制节点的位置才重要。对于每一个控制节点，ANSYS 将自动定义一个内节点及一个内部约束方程。通过内部约束方程，控制节点的转动自由度与内节点的平移自由度联系了起来。

默认时，目标单元的 KEYOPT (2) =0，ANSYS 对每个目标面检查边界条件。如果下面的条件都满足，那么程序将目标面进行固定处理。

- 在目标面节点上没有明确定义边界条件或给定力。
- 目标面上的节点没有和其他单元相连。
- 没有在目标面的节点上使用约束方程或节点耦合。

在每个载荷步的末尾，程序将会释放内部设置的约束条件。

在结果文件（Jobname.RST）和数据库（Jobname.DB）中保存的约束条件可能会由于这些改变而被修改。用户应当在重新启动一个分析或用交互模式重新求解之前，仔细检查当前的约束条件是否合乎要求。

如果需要，用户可以通过在目标单元定义中设置 KEYOPT (2) =1，来控制目标节点的约束条件。

16.4.9 热接触模拟

可以应用面-面接触单元，结合热-结构耦合场实体单元，来模拟在接触面之间的热传导。为了激活结构自由度和热自由度，要设置 KEYOPT (1) =1。

热接触模拟支持下面的热接触特性。

- 两个接触面之间的热接触传导。
- 从一个“自由面”到周围，或两个小间隙分离面之间的热对流（“近场”对流）。
- 从一个“自由面”到周围，或两个小间隙分离面之间的热辐射（“近场”辐射）。
- 由摩擦耗散而产生的热。
- 热通量输入。

1. 热接触行为与接触状态

每个接触对可覆盖一个或多个热接触特性。激活哪个特性取决于接触状态。

- 闭合接触：热接触传导在两个接触面间传热。
- 摩擦滑动：摩擦耗散能量，在接触面和目标面上生成热。



近场接触：考虑了接触面和目标面之间的热对流和热辐射。外部通量对接触面有贡献。

自由面接触：考虑了接触面和周围之间的热对流和热辐射。外部通量仅对接触面和目标面有贡献。

2. 自由热表面

如果要模拟自由表面热对流、自由表面热辐射或施加了热流值的表面，用户可定义自由热表面。自由热表面可以是一个接触面而无相应的目标面（即无目标单元的接触对），也可以设置目标单元类型定义的 $KEYOPT(3)=1$ 来定义一个自由热表面。在设置了这个 $KEYOPT$ 时，只要检测到接触张开，就要考虑自由表面辐射和对流。这种情况下，在接触面和目标面之间无对流或辐射热传递。

3. 目标面上的温度

对于界面热传导、近场热传导或近场辐射，需要求解接触面和目标面的温度。在目标表面和接触检测点法线之间的交点上的温度代表目标温度。控制节点上的温度代表整个刚性目标面上的温度（如果存在控制节点），如图 16-21 所示。

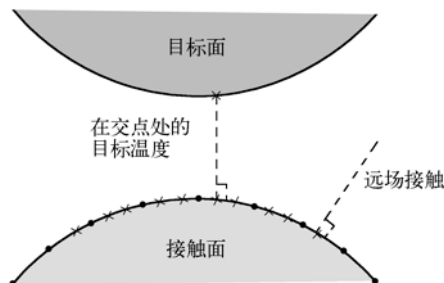


图 16-21 目标温度

4. 传导模拟

为了考虑接触面与目标面之间的热交换，用户需要通过一个实常数表来指定热接触传导系数 TCC 。用户可以用表格输入把 TCC 定义为接触压力（压力表）、接触检测点温度（温度表）、时间和接触检测点位置（ X, Y, Z 表）的函数。为了模拟存在小间隙的两个面之间的接触传导，应用 $KEYOPT(12)=4$ 或 5 来定义“绑定接触”或“不分开接触”选项。

两个接触面之间的热传导通过下式定义：

$$q = TCC \times (T_t - T_c) \quad (16-5)$$

其中， q 为单位面积上的热流量； TCC 为热接触传导系数； T_t 和 T_c 分别是接触目标单元接触点和接触面上的接触点温度。

TCC 可以通过实常数进行定义，通过使用表格选项可以被定义为温度 $[(T_c + T_t)/2]$ 、压力和位置的函数。

如果发生接触，一个很小的 TCC 值会产生一些不良的接触，并且温度在界面之间发生了间断。对于一个较大的 TCC 值，界面之间的温度不连续将趋于消失，由此产生一个良好的热接触。

然而当不存在接触时，则在两个界面之间没有热传递。

为了模拟存在间隙的两个界面的热传导问题，用户需设置关键字 $KEYOPT(12)=4$ 或 5 去定义接触状态为绑定接触或不分裂接触。在热接触分析中用户应该使用快速热瞬态求解器。为了满足求解要求，用户要对接触单元做如下设置。

$KEYOPT(1)=2$ ，只有温度一个自由度。

$KEYOPT(12)=5$ 或 6 ，粘结接触或初始粘结接触。

在热接触分析中，用户应该使用快速瞬态求解选项，为了使用快速瞬态求解功能，应该进行如下设置。

$KEYOPT(1)=2$ ，设置只有一个温度自由度。

KEYOPT (12) = 5 或 6, 设置接触状态为总是粘结接触或初始粘结接触。

注意: 在热接触模拟中只有唯一的实常数 (即 TCC), 它可以使用时间和温度函数。在接触面两侧可以使用不同的网格。

5. 对流模拟

为了模拟对流热交换, 用户必须应用 SFE 命令指定热对流系数 CONV。CONV 可以是一常数 (只允许均匀的) 或是通过表格输入的作为温度、时间、位置的函数。对于自由面对流, 用户必须通过 SFE 命令或下列菜单指定体积温度。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Convection | On Elements | Uniform

6. 辐射模拟

(1) 为了模拟辐射热交换需要指定的下列数值之一:

1) 通过材料特性定义热辐射系数 EMIS。

2) 通过实常数定义 Stefan-Boltzman 常数 SBCT。如果这个值未定义, 将不包括辐射效应。

3) 偏量温度 TOFFST。如按华氏度或摄氏度来定义数据, 必须用 TOFFST 命令指定一个温度偏量值, 操作方法如下。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options

4) 辐射观察系数 RDVF。通过实常数定义, 仅用于近场辐射, 默认为 1。它可定义为温度、间隙距离、时间、位置的函数用表格输入。对于远场辐射, RDVF 设置为 0, 并忽略用户指定的值。其他自由表面条件使用用户指定的 RDVF。

5) 环境 (外界) 温度。它仅用于自由辐射, 以 KVAL=2 和 CONV 为表格参数, 用 SFE 命令输入 (这与自由表面对流模拟中的体积温度相同)。

(2) 使用 SBCT 和 RDVF

当接触张开时, 通过辐射进行热量传递。传导方程:

$$q = RDVF \times EMIS \times SBCT [(T_e + TOFFST)^4 - (T_c + TOFFST)^4] \quad (16-6)$$

其中, TOFFST 为偏移绝对零度的温度值; EMIS 为表面辐射率; SBCT 为 Stefan-Boltzman 常数; RDVF 为形状系数 t (默认值 1)。使用表格可以把 RDVF 定义为温度, 间隙距离、时间和位置的函数。

对于近场辐射, 当接触面和目标面在垂直方向存在相交并且间隙距离小于 pinball 半径时, T_e 为相交处目标面的温度。在辐射模拟中假设在两个表面间隙的法向发生辐射传热。通过把 RDVF 定义为间隙函数, 用户可以考虑几何形状对辐射传热的影响。对于一般的辐射问题, 使用辐射求解器进行求解。

7. 摩擦生热的模拟

(1) 背景

为了模拟摩擦耗散能量的热生成, 用户应当执行瞬态热-结构耦合分析。如果用户希望的话, 可以应用 TIMINT, STRUC,OFF 命令关闭结构自由度上的瞬态效应。但是, 必须包括热自由度上的瞬态效应, 这需要如下二个实常数。

1) FHTG, 转换成热的摩擦耗散能量 (默认为 1.0)。





2) FWGT, 接触面和目标面之间热分布的权重系数 (默认为 0.5)。

(2) 使用 FHTG 和 FWGT

在模拟热-结构耦合的问题中, 通过下式定义摩擦耗散率:

$$q = FHTG \times \tau \times V \quad (16-7)$$

其中, τ 为等效摩擦应力; V 为滑动率; FHTG 为摩擦耗散能转换成热量的比例系数。默认值为 1, 并且也可以作为实常数进行输入。对于 FHTG = 0 情况应该输入一个很小的值, 如果用户输入了 0, 那么程序将采用默认值。

在接触面和目标面上摩擦耗散能的计算公式为:

$$\begin{cases} q_C = FWGT \times FHTG \times T \times V \\ q_T = (1 - FWGT) \times FHTG \times T \times V \end{cases} \quad (16-8)$$

其中, q_C 为接触面上的摩擦耗散能; q_T 为目标面上的摩擦耗散能; FWGT 为在接触面和目标面之间热量分配权重因子, 可以作为实常数输入默认为 0.5。对于 FWGT = 0 的情况, 应该输入一个很小的值, 如果用户输入了 0, 那么程序将采用默认值。

8. 外部热通量模拟

用户可以通过 SFE 命令给接触单元施加热通量。只能施加均匀热通量。热通量不能施加于目标单元。然而, 对于近场接触, 外部热通量施加于接触面, 将贡献到目标单元。

对于自由热表面, 如目标单元的 KEYOPT (3) = 1, 外热通量仅施加于接触侧。对于一个给定的接触单元, 必须指定 CONV 和 HFLUX 二者之一 (但不是二者)。然而, 用户可以定义两个不同的接触对: 一个模拟对流, 一个模拟热通量。

16.4.10 为柔体单元施加必要的边界条件

现在可以按需要施加边界条件。施加方法与其他的分析类型相同, 可参见前面的有关章节。

16.4.11 定义求解和载荷步选项

接触问题的收敛性随问题的不同而不同。下面列出了一些典型的、在大多数面-面的接触分析中推荐使用的选项。

时间步长必须足够小, 以捕捉适当的接触区。如果时间步太大, 则接触力的光滑传递会被破坏。时间步的大小, 是由子步数或时间步本身指定的。下述命令用于调整这些值。

命令: NSUBST

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

命令: DELTIM

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time-Time Step

注意: 设置精确时间步长的可靠方法是打开自动时间步长。

命令: AUTOTS,ON

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time-

Time Step or Time and Substeps

如果在迭代期间接触状态变化,可能发生不连续。为了避免收敛太慢,使用修正的刚度阵,将牛顿-拉普森选项设置成 FULL。

命令: NROPT,FULL,,OFF

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Analysis Type | Analysis Options

不要使用自适应下降。对面-面的问题,自适应下降通常不会有任何帮助,建议关掉它。

在摩擦滑动占主导地位时,设置不对称求解选项 (NROPT,UNSYM,,OFF),以避免收敛减慢或发散。

按合理的时间步,设置合适的平衡迭代次数。这个命令的默认平衡迭代次数为 15~26,取决于问题的物理性质。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Equilibrium Iter

因为大的时间增量会使迭代趋向于不稳定,需要使用线性搜索选项来使计算稳定化。

命令: LNSRCH

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Line Search

除大转动和动态分析外,打开时间步长预测器选项。

命令: PRED

GUI: Main Menu | Solution | Unabridged Menu | Load Step Opts | Nonlinear | Predictor

在接触分析中,许多不收敛问题是由于使用了太大的接触刚度引起的(实常数 FKN)。需要检验是否使用了合适的接触刚度。

注意: 对于大多数小应变、小位移、小滑动分析,设置 NLGEOM,OFF。这种设置将加快搜索时间,但是,如果接触问题涉及大滑动,则要设置 NLGEOM,ON。

16.4.12 求解

现在可以求解接触问题。求解过程与一般的非线性问题求解过程相同。记住如下几点。

- 总是检查与接触对相关的实常数集,并检查目标面的约束条件。预先的“试运行”可能改变这些设置。
- 在开始分析时,总是检查目标面的接触状态。如果检查到任何不希望的间隙(或不接触),或过度的穿透,终止分析,然后检查几何模型。
- 总是认真地检查分析结果。

按照下面的步骤来进行求解。

1) 把数据库保存到一个文件。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu | File | Save As

2) 开始求解。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

如果需要,可以定义多个载荷步。



16.4.13 观察结果

接触分析的结果主要包括位移、应力、应变，支反力和接触信息，如接触压力、滑动等。用户可以在通用后处理器（POST1）或时间历程后处理器（POST26）中观察结果。对于接触相关的结果，可以选择 CONT 作为输出或列表的项目。

记住在 POST1 中，一次只能观察一个子步的结果，并且该子步的结果必须已被写到 Jobname.RST 文件中。

1. 在POST1 中观察结果

(1) 进入 POST1。

命令：/POST1

GUI: main menu | General postproc

(2) 读入所期望的载荷步和子步的结果，这可以通过载荷步和子步数，也可以通过时间来实现。

命令：SET

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

(3) 使用下面的任何一个选项来显示结果：

1) 显示变形形状

命令：PLDISP

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape

2) 等值显示节点数据

命令：PLNSOL 或 PLESOL

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

使用这个选项来显示应力、应变或其他项的等值线图。如果相邻的单元有不同的材料特性（例如塑性或多线性弹性材料特性，不同的材料类型或不同的死活属性），则在结果显示时应避免节点应力平均所产生的错误。下面列出 PLNSOL 和 PLESOL 命令的各种 CONT 选项：CONT STAT 接触状态：3 为粘合接触；2 为滑动接触；1 为未合的近区接触；0 为未合的远区接触。PENE：接触穿透。PRES：接触压力。SFRIC：接触摩擦应力。STOT：接触总应力（压力加摩擦）。SLIDE：接触滑动距离。GAP：接触间隙距离。FLUX：接触面的热通量。

注意：对于刚体-柔体接触，或不对称柔体-柔体接触，接触单元提供真实的压力和摩擦应力。但是，对于对称柔体-柔体接触，真实的压力和摩擦应力，是从接触单元两侧的压力和摩擦应力平均得到的。

3) 等值显示单元表的数据。

命令：PLETAB/PLLS

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Elem Table

应用 PLETAB 命令显示单元表数据，应用 PLLS 命令显示线单元数据。

4) 列表显示节点结果

命令：PRNSOL

GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution

2. 在POST26 中观察结果

用户也可以用 POST26 来查看一个非线性结构对加载历程的响应。应用 POST26 可以比较一个变量与另一个变量的变化关系。例如, 可以画出某个节点位移-载荷的曲线, 某个节点的塑性应变-时间的关系。查看方法同典型的非线性分析的步骤一样。

16.5 实例：薄钢板冲压分析

16.5.1 工程背景

在汽车、航空、家电等工业部门,许多构件是用板料冲压成形生产的。板料成形过程牵涉到几何非线性、材料非线性和边界条件非线性的复杂的力学问题。金属板料冲压成型利用金属塑性变形的特点,通过对金属板料施加压力,使其产生塑性变形,从而获得所需要的形状。由于板料冲压成型过程包含大位移、大变形等十分复杂的物理现象,使得对其成型控制非常困难,以前更多的是通过反复试验的方法制造出合乎要求的产品,其过程需要花费大量的时间和经费。随着有限元模拟技术的迅速发展,利用有限元软件模拟金属板料冲压成型过程及分析其回弹量已成为可能。本实例使用 ANSYS 模拟薄钢板的冲压分析。

16.5.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

本实例假设薄钢板两个方向的尺寸远大于厚度,因此可以简化为平面应变问题,又因为平面模型的左右对称性,所以只需建立平面的 1/2 模型,其力学模型简图如图 16-22 所示。图中给出了基本的模型尺寸,且薄钢板的半长为 L ,薄钢板的厚度为 H , L_2 和 L_1 之间存在以下关系: $L_2=L_1+H$,表 16-1 给出了模型的基本数据。

表 16-1 模型的基本几何尺寸

L	H	L_1	H_1	H_2
0.1m	0.004m	0.08m	0.02m	0.02m
L_3	R_1	R_2	R_3	R_4
0.04m	0.009m	0.009m	0.009m	0.009

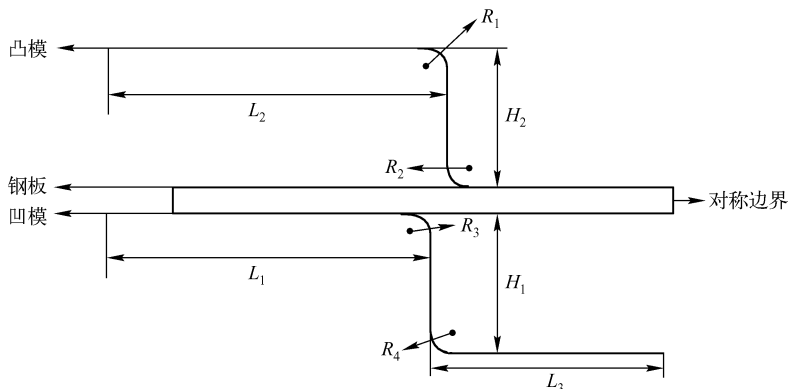


图 16-22 薄板冲压的模型简图



2. 单元的选择及材料常数

因为冲压是大变形、塑性，所以本实例选用 4 节点平面单元 PLANE42，并通过设置关键字 K3 实现模拟平面应变问题。凸模和凹模假设为刚性材料，通过接触向导来实现对其的定义；钢板的应力应变关系假设为双线性等向强化，各材料参数分别为弹性模型为 2E11Pa，泊松比为 0.3，屈服强度为 200MPa，切线模量为 2E9Pa，其应力应变关系如图 16-23 所示。

3. 边界条件

本实例假设整个冲压过程为准静态，即为静力学分析并且步考虑温度的影响。固定凹模的所有自由度，在凸上约束 X 平移自由度和转动自由度，在凸模上施加 Y 方向的位移为 -H1；约束薄钢板的右端面为对称约束，冲压接触后再施加 Y 方向位移为 0.2×H2。

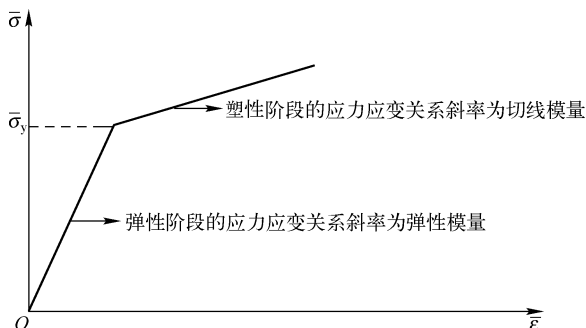


图 16-23 薄钢板的应力应变关系曲线

16.5.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出对话框，在输入栏中输入“Analysis of Sheet Metal”，单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 L=0.1，单击 Accept 完成对薄钢板半长的参数定义，按照此方法继续定义薄钢板厚度 H=0.004，凹模的半长 L1=0.08，凹模的深度 H1=0.02，凸模的半长 L2=L1+H，凸模的深度 H2=H1，凹模的底半长 L3=0.04，凸模圆角 R1=0.009，凸模圆角 R2=0.009，凹模圆角 R3=0.009，凹模圆角 R4=0.009，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

因为 13.0 版本对单元库有些调整，PLANE42 不能使用 GUI 单元库定义，只能输入单元编号进行定义，其方法如下。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的右边下面输入 42，单击 OK。

(2) 定义单元属性

单击单元类型面板 (Element Types) 的 Options 按钮，在弹出的对话框中设置单元关键

字 K3 为 Plane strain，表示单元模拟平面应力的力学行为，单击 OK，单击 Close。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 EX=2E11, PRXY=0.3，单击 OK，设置材料应力应变关系为双线性等向强化，设置方法为单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Rate Independent | Isotropic Hardening Plasticity | Mises Plasticity | Bilinear，在弹出的对话框中输入屈服应力 (Yield Stss) 为 350E6，切线模量 (Tang Mod) 为 3.5E9Pa，选择 Material | Exit，推出面板。

4. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS，在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=0, Y=0, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=2, X=L1, Y=0, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=3, X=L1, Y=-H1, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=4, X=L1+L3, Y=-H1, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=4, X=L1+L3, Y=-H1, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=5, X=0, Y=H2+H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=6, X=L2, Y=H2+H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=7, X=L2, Y=H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=8, X=L1+L3, Y=H, Z=0，单击 OK。

(2) 通过关键点定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord

弹出拾取对话框，用鼠标拾取关键点 1 和 2，继续拾取关键点 2 和 3，拾取关键点 3 和 4，拾取关键点 5 和 6，拾取关键点 6 和 7，拾取关键 7 和 8，单击 OK。

(3) 定义面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 X1=L1+L3-L, X2=L1+L3, Y1=0, Y2=H，单击 OK。

(4) 定义圆角

1) 显示线号。

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Numbering，在弹出的面板中勾选 LINE。

2) 显示线。

GUI: Utility Menu | Plot | Lines

3) 定义圆角。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet

弹出拾取对话框，拾取线 L4 和 L5，单击 Apply，在弹出的对话框的圆角半径 (Fillet radius) 中输入 R1，单击 Apply；继续拾取线 L5 和 L6，单击 Apply，在弹出的对话框的圆角半径 (Fillet radius) 中输入 R2，单击 Apply；继续拾取线 L1 和 L2，单击 Apply，在弹出的对话框的圆角半径 (Fillet radius) 中输入 R3，单击 Apply；继续拾取线 L2 和 L3，单击 Apply，在弹出的对话框的圆角半径 (Fillet radius) 输入 R4，单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool





(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中的 Global | Set，在弹出的对话框中输入 SIZE=0.002，单击 OK。

(3) 设置单元划分方式为映射网格

选择网格划分工具面板中的单元形状 (Shape) 为 Quad，划分方式为 Mapped。

(4) 进行网格划分

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，用鼠标拾取面 1，单击 OK。

6. 使用接触管理器定义接触单元

(1) 打开接触管理器 (Contact Manager)

单击工具栏中的  按钮，弹出接触向导，如图 16-24 所示：

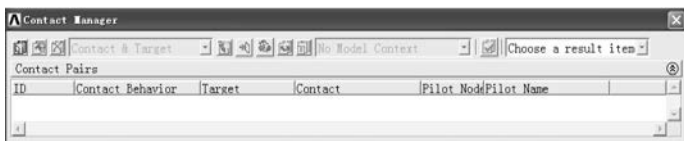


图 16-24 接触管理器对话框

(2) 定义接触单元

单击接触管理器面板上的接触向导按钮 ，弹出如图 16-25 所示的对话框，按照图中进行设置并单击拾取目标体 (Pick Target) 按钮，弹出拾取对话框，用鼠标拾取线 L4, L11, L5, L12 和 L6，单击 Apply，单击弹出对话框中的 Next 按钮，弹出图 16-26，并按照图进行设置，单击 Pick Entity，弹出拾取对话框，拾取关键点 5，单击 Apply，继续单击弹出对话框上的 Next 按钮，在弹出的对话框中单击 Pick Contact，拾取线 L9，单击 Apply，继续单击弹出对话框上的 Next 按钮。

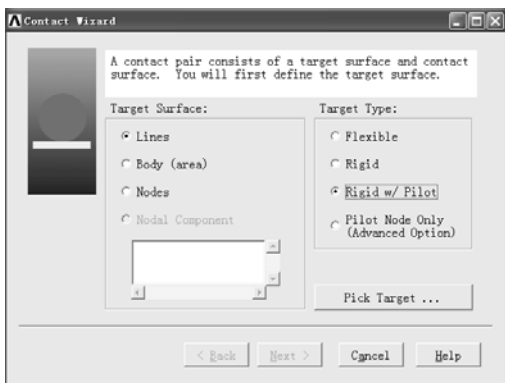


图 16-25 接触向导设置目标单元面板



图 16-26 接触向导设置控制节点位置

单击弹出对话框上的 Optional settings 按钮，弹出接触对特性设置对话框，选择对话框上的基本 (Basic) 选项卡，并按照图 16-27 设置；继续选择对话框上的摩擦 (Friction) 选项卡，并按照图 16-28 设置完毕后单击 OK，继续单击接触向导中的 Creat 按钮，创建凸模和钢板之间的接触单元，观察接触单元和目标单元的方向是否符合规定，单击 OK。

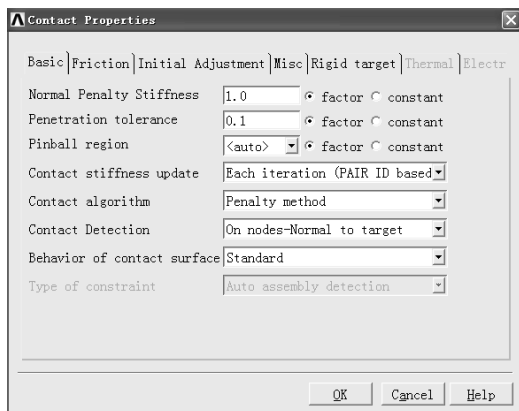


图 16-27 接触对性质基本设置面板

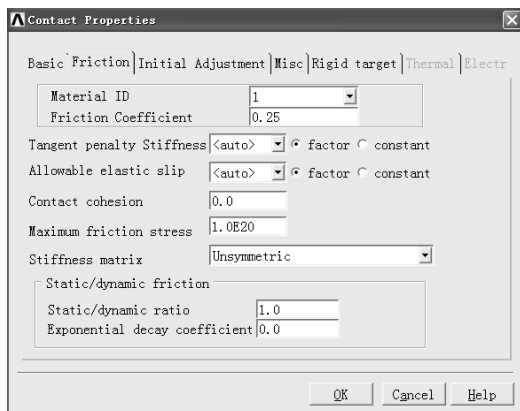


图 16-28 接触对性质摩擦设置面板

按照此方法继续定义凹模和钢板之间的接触单元。

7. 设置分析类型

(1) 定义静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 **Static**, 含义为进行静力学问题求解。

(2) 设置静力学分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

在弹出的对话框中勾选大变形 (Large deform effects), 设置牛顿-拉普森选项为完全牛顿拉弗森 (Full-N-R unsymm) 求解方法, 单击 OK。

8. 定义第一个载荷步文件

(1) 定义边界条件

1) 定义位移约束。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints

弹出拾取对话框, 拾取关键点 1, 单击 Apply, 选择 ALL DOF, 其余保持默认值, 单击 Apply, 继续拾取关键点 5, 单击 Apply, 选择 UX 和 ROTZ, 其余保持默认值, 单击 Apply, 继续拾取关键点 5, 单击 Apply, 选择 UY, 并在位移值 (Displacement value) 选项中输入 -H1, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 对称边界。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L8, 单击 OK。

(2) 定义载荷步

1) 设置输出所有子步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

在弹出对话框中的文件写出频率 (File write frequency) 选项中选择 Every substep, 表示



输出每一个子步。

2) 定义计算时间步及子步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

弹出时间和子步选项卡 (Time and Substep Options), 设置载荷步计算终止时间 (Time at end of load step) 为 1, 这里的时间只代表计算的载荷步, 不具有真正的时间意义, 设置子步数量 (Number of substeps) 为 500, 载荷类型为斜坡载荷 (Ramped), 其他保持默认值, 单击 OK。

(3) 定义第一个载荷步文件

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

弹出写载荷步文件 (Write Load Step File) 对话框, 输入 1, 单击 OK。

9. 定义第二个载荷步文件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints

弹出拾取对话框, 拾取关键点 5, 单击 Apply, 选择 UY, 并在位移值 (Displacement value) 选项中输入 $0.2 \cdot H1$, 其他保持默认值, 单击 OK。

(2) 定义计算时间步及子步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

弹出时间和子步选项卡 (Time and Substep Options), 设置载荷步计算终止时间 (Time at end of load step) 为 2, 这里的时间只代表计算的载荷步, 不具有真正的时间意义, 设置子步数量 (Number of substeps) 为 300, 载荷类型为斜坡载荷 (Ramped), 其他保持默认值, 单击 OK。

(3) 定义第二个载荷步文件

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File, 弹出写载荷步文件 (Write Load Step File) 对话框, 输入 2, 单击 OK。

10. 进行求解多载荷步

GUI: Main Menu | Solution | Solve | From LS Files

弹出求解载荷步文件对话框 (Solve Load Step Files), 输入 LSMIN=1, LSMAX=2, 其他保持默认, 单击 OK, 开始求解。

11. 后处理

(1) 查看回弹后的等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises Stress, 单击 OK, 如图 16-29 所示。

(2) 查看等效塑性应变

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Plastic Strain | von Mises plastic strain, 单击 OK, 如图 16-30 所示。

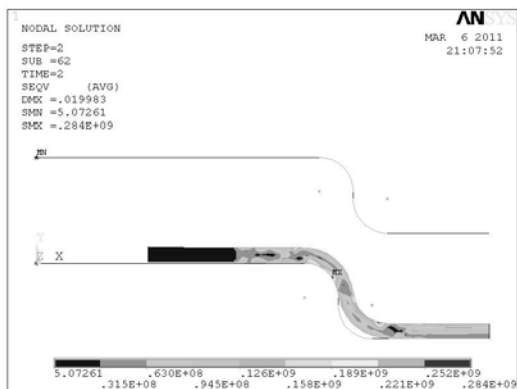


图 16-29 回弹后的薄板等效应力云图

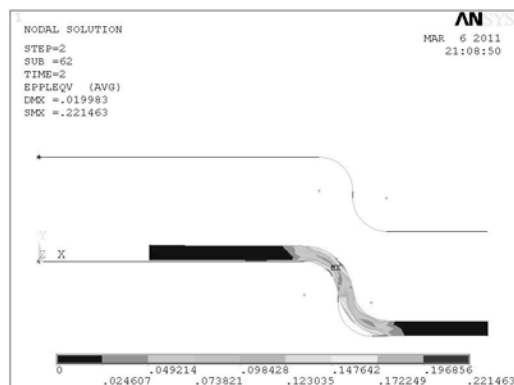


图 16-30 回弹后的薄板等效塑性应变云图



第 17 章 复 合 材 料

17.1 复合材料的相关概念

复合材料作为结构应用已有相当长的历史。在现代，复合材料构件已被大量应用于飞行器结构、汽车、体育器材及许多消费产品中。复合材料由一种以上具有不同结构性质的材料构成，它的主要优点是具有很高的比刚度（即刚度与重量之比）。在工程应用中，典型复合材料有纤维和叠层型材料，如玻璃纤维、玻璃环氧树脂、石墨环氧树脂、硼环氧树脂等。

ANSYS 程序中提供一种特殊单元——层单元来模拟复合材料。利用这些单元就可以进行任意的结构分析，包括非线性（如大挠度和应力刚化等）问题。

17.2 建立复合材料模型

与铁或钢等各向同性材料相比，建立复合材料的模型要复杂一些。由于各层材料性能为任意正交各向异性，材料性能与材料主轴取向有关，在定义各层材料的材料性能和方向时要特别注意。

17.2.1 选择合适的单元类型

用于建立复合材料模型的单元类型有 SHELL181、SHELL281、SOLSH190、SOLID185 和 SOLID186 五种单元。具体应选择哪一类单元，要根据具体应用和所需计算结果类型等来确定。所有的层单元允许失效准则计算。

1. SHELL181 有限应变壳单元

SHELL181 是一种 4 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元具备完全非线性分析能力，包括大应变且允许多达 250 层的等厚材料层。层状材料的常数通过截面命令定义，而不是实常数。可以通过 FC 命令定义失效准则。

该单元主要适用于薄到中等厚度的板和壳结构，一般要求宽厚比应大于 10。对于宽厚比小于 10 的结构，则应考虑选用 SOLID46 来建立模型。SHELL181 允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层厚度在单元面内呈现双线性变化的不等厚材料层。如果材料数层大于 250，用户可通过输入自己的材料矩阵来建立模型。还可以通过一个选项将单元节点偏置到结构的表层或底层。

2. SHELL281 有限应变壳单元

SHELL281 是一种 8 节点三维实体壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元适用于薄到中等厚度的板和壳结构且支持线性、大转动或是大应变的非线性分析。层状材料的常数通过截面命令定义，而不是实常数。可以通过 FC 命令定义失效准则。

3. SOLSH190 三维层状结构实体壳单元

SOLSH190 是 8 节点三维壳单元, 每个节点有 3 个自由度。该单元适用于薄到中等厚度的板和壳结构且支持所有的非线性功能 (包括大应变), 允许有多达 250 层材料层。应该通过截面命令, 而不是实常数来定义层的信息, 可以通过 FC 命令来指定失效准则。

4. SOLID185 三维层状结构体单元

SOLID185 是 8 节点三维实体单元 SOLID45 的一种叠层形式, 其每个节点有 3 个自由度 (UX, UY, UZ)。该单元支持塑形, 超弹性, 应力刚化。蠕变, 大变形和大应变功能。该单元既可以模拟几乎不能压缩的弹塑性材料, 也可以模拟完全不能压缩的超弹性材料。可以通过 FC 命令来指定失效准则。

5. SOLID186 三维层状结构体单元

SOLID186 是一个高阶三维 20 节点固体结构单元, SOLID 186 具有一次位移模式可以更好的模拟不规则的网例如通过不同的 CAD/CAM 系统建立的模型。单元通过 20 个节点来定义, 每个节点有 3 个沿着 xyz 方向平移的自由度。SOLID186 可以具有任意的空间各向异性, 单元支持塑性、超弹性、蠕变、应力钢化、大变形和大应变能力, 还可采用混合模式模拟几乎不可压缩弹塑材料和完全不可压缩超弹性材料, 有不同的输出选项可用。

6. 其他

除上述层单元外, 还有其他的一些具有层功能的单元。

- SHELL63 是四节点壳单元, 可用于对“三明治”壳结构做粗糙、近似的计算。如两块金属片之间夹有一层聚合物的问题就很典型, 此时聚合物的弯曲刚度相对于金属片的弯曲刚度来说是一个小量。用户可以用实常数 RMI 来修正单元的弯曲刚度, 使其等效于由金属片引起的弯曲刚度。从中面到外层纤维的距离 (实常数 CTOP 和 CBOT) 可用来获得“三明治”壳的表层输出应力。这种单元不如 SHELL181、SHELL281 和 SHELL181 那样用得频繁, 故后面不再论述。
- SOLID65 是三维钢筋混凝土实体单元, 可以模拟在三个用户指定方向配筋的各向同性介质。
- BEAM188 和 BEAM189 为三维有限应变梁单元, 其截面可以包含多种材料。

17.2.2 定义材料的叠层结构

复合材料最重要的特征就是其叠层结构。每层材料都可能由不同的正交各向异性材料构成, 并且其主方向也可能各不相同。对于叠层复合材料, 纤维的方向决定了层的主方向。

有如下两种方法可用来定义材料层的配置。

- 通过定义各层材料的性质。
- 通过定义表示宏观力、力矩与宏观应变、曲率之间相互关系的本构矩阵。

1. 定义各层材料的性质

这种方法由下到上一层一层定义材料层的配置。底层为第一层, 后续的层沿单元坐标系的 Z 轴正方向自底向上叠加。如果叠层结构是对称的, 可以只定义一半的材料层。

有时, 某个物理层可能只延伸到模型的一部分。为了建立连续的层, 可以把这些中断的层的厚度设置为零, 图 17-1 显示了一个四层模型, 其中第二层在某处中断了。

对于每一层材料, 由单元实常数表 (R, RMORE, RMODIF) 定义如下性质。

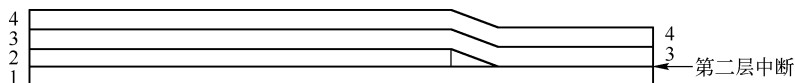


图 17-1 复合材料的中断

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。

分层的截面可以通过截面工具来定义（Prep | Sections | Shell-Add/Edit）。对每一层，通过截面命令或截面工具（SECTYPE, SECDATA）定义下面的属性。

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 来定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。
- 每层积分点的数目（NUMPT）。

（1）材料性质

与其他单元一样用 MP 命令定义线性材料特性，用 TB 命令定义非线性数据表。唯一不同是，复合材料单元的材料参考号由其实常数表来指定。对于层单元，MAT 命令属性仅用于 MP 命令的 DAMP 和 REFT 参数。各层的线性材料特性可以是各向同性，也可以是正交异性。典型的纤维加强复合材料包括各向异性材料，且这些特性主要以泊松比的形式提供。材料方向平行于层坐标系（由单元坐标系和层定向角定义）。

（2）层的定向角

它定义层坐标系相对于单元坐标系的角度。它是这两个坐标系的 X 轴之间的夹角（单位为“度”）。默认情况是层坐标系与单元坐标系平行。所有单元都有默认的坐标系，可用 ESYS 命令（Main Menu | Preprocessor | Attributes | Default Attribs）来改变。用户还可用自己的子程序来定义单元和层坐标系。

（3）层的厚度

如果层的厚度是常数，用户只需定义节点 I 处的厚度 TK (I)，否则四个角节点处的厚度都需输入。中断的层必须为零厚度。

（4）每层的积分点数目

用于确定计算结果的详细程度。对于非常薄的层，当其和很多其他层一起使用时，有一个积分点就足够了。但对于层数很少的片状结构，需要的积分点应该比较多，默认为 3。本特性仅适用于通过截面命令定义的截面。

注意：目前，GUI 只允许层数（实常数）最大值为 100。如果需要层数大于 100，可以使用 R 和 RMORE 命令来实现。

2. 夹层（“三明治”）结构和多层结构

夹层结构有两个薄的面板和一个厚度相对软的夹心层。图 17-2 显示了一个夹层结构，并假定夹心层承受了所有的横向剪切载荷，而面板则承受了所有的（或几乎所有的）弯曲载荷。

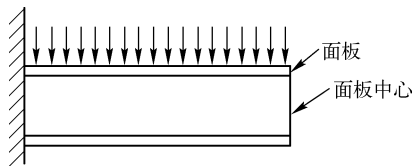


图 17-2 夹层结构

夹层结构可用 SHELL181 或 SHELL281 单元来建立有限元模型。SHELL181 和 SHELL281 通过能量等效方法模拟横向剪切偏转。

3. 节点偏置

SHELL181 和 SHELL281 通过截面命令定义截面, 可以在定义截面时通过 SECOFFSET 命令偏置节点。图 17-3 表示节点在板的中面 (KEYOPT (11) =0), 各板在这点对齐。图 17-4 表示节点在板的底面 (KEYOPT (11) =1), 各板在这点对齐。

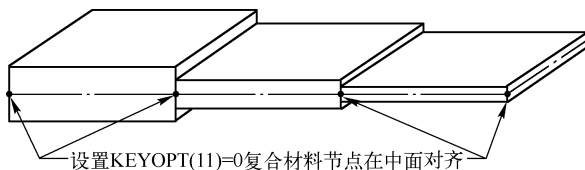


图 17-3 复合材料节点在中面对齐

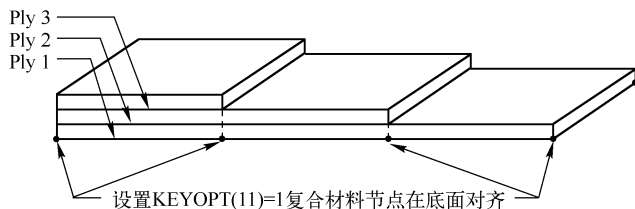


图 17-4 复合材料节点在底面对齐

17.2.3 定义失效准则

失效准则用于获知在所加载荷下, 各层是否失效。用户可从三种预定义好了的失效准则中选择失效准则, 或者自定义多达六种失效准则。三种预定义失效准则是。

最大应变失效准则, 它允许有九个失效应变。

最大应力失效准则, 它允许有九个失效应力。

Tsai-Wu 失效准则, 它允许有九个失效应力和三个附加的耦合系数。有两种方式可用以计算这种准则。

失效应变、应力和耦合系数可以是与温度相关的。通过 TB 命令族或 FC 命令族指定失效准则。

FC 命令族包括 FC、FCDELE 和 FCLIST 命令, 其典型的命令流:

```
FC,1,TEMP,,100,200                                !温度
FC,1,S,XTEN,1500,1200                              !最大应力分量
FC,1,S,YTEN,400,500
FC,1,S,ZTEN,10000,8000
FC,1,S,XY,200,200
FC,1,S,YZ,10000,8000
FC,1,S,XZ,10000,8000
FCLIST, ,100 !
FCLIST, ,150 !
```




```
FCLIST, ,200 !
PRNSOL,S,FAIL ! 使用失效准则
FC,1,S,XTEN,767E6$FC,1,S,XCMP,-392E6 !定义 X 方向拉压强度
FC,1,S,YTEN,20E6$FC,1,S,YCMP,-70E6 !定义 Y 方向拉压强度
FC,1,S,ZTEN,30E6$FC,1,S,ZCMP,-55E6 !定义 Z 方向拉压强度
FC,1,S,XY,41E6$FC,1,S,YZ,30E6$FC,1,S,XZ,41E6 !定义三个抗剪强度
LAYER,1,$PRNSOL,S,FAIL$PRNSOL,S,1 !显示层 1 的失效准则值
```

注意：FC 和 FCLIST 命令适用于所有的二维或三维结构实体单元和三维壳单元。

定义失效准则的一些注意事项如下。

- 失效准则是正交各向异性的，因此用户必须输入所有方向上的失效力或失效力变值（在压缩值等于拉伸值时例外）；
- 如果不希望在某个特定的方向上检查失效力或失效力变，则在那个方向上定义一个大值。
- 用户可通过用户子程序 USRFC1 到 USRFC6 自定义失效准则。这些子程序应事先与 ANSYS 程序做连接。

17.2.4 应遵循的建模和后处理规则

1. 如何处理耦合效应

复合材料会体现出几种类型的耦合效应，诸如弯扭耦合、拉弯耦合等。这是由具有不同性质的多层材料互相重叠引起的。其结果是，如果材料层的积叠顺序是非对称的，则即使模型的几何形状和载荷都是对称的，也不能按照对称条件只求解一部分模型，因为结构的位移和应力可能不对称。

2. 获得准确的层间剪应力

在模型自由边界上的层间剪切应力通常都是很重要的。要求得到在这些部位相对精确的层间剪切应力，则模型边界上的单元尺寸应约等于总的叠层厚度。对于壳来说，增加实际材料层数并不一定提高层间剪切应力的求解精度。壳单元的层间横向剪切应力的计算基于单元上下表面不承受应力的假设。这些层间剪切应力只在单元的中心处计算，而不是沿着单元边界。建议使用壳-实体子模型精确计算自由边的层间应力。

3. 验证输入数据

因为复合材料的求解需要大量的输入数据，故在进行求解之前应对这些数据进行检验，可用如下命令来完成这些工作。

ELIST 命令：列表显示所有被选单元的节点和属性。

EPLLOT 命令：图形显示所有被选单元。在该命令之前使用[ESHape,1]命令将使壳单元以实体单元的形式显示，显示出的厚度为从实常数中得到的厚度（图 17-5）。

/PSYMB,LAYR,n 命令：在执行 EPLLOT 命令之前执行该命令，可图形显示所选全部单元的第 n 层。它可用以显示并检验整个模型的每一层。

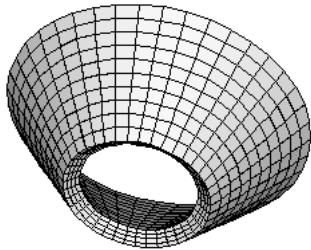


图 17-5 显示复合材料实例

/PSYMB,ESYS,1 命令：在 EPLOT 命令之前执行该命令，可显示出那些默认单元坐标系被改变了的单元坐标系。

LAYLIST 命令 (Utility Menu | List | Elements | Layered Elements)：可根据实常数列表显示层的叠加顺序和 SHELL99、SHELL91、SOLID46、SOLID191 单元的任意两种材料的性能。还可以指定要显示层的范围。

LAYPLOT 命令 (Utility Menu | Plot | Layered Elements)：以卡片的形式图形显示层的积叠顺序 (图 17-6)。为清楚起见，各层以不同的颜色和截面线显示，截面线的方向表示了层的方向角 (实常数 THETA)，颜色表示了层材料号 (实常数 MAT)。还可以指定要显示层的范围。

SECPLOT 命令：以卡片的形式图形显示截面的积叠顺序 (图 17-6)。为清楚起见，各截面以不同的颜色和截面线显示，截面线的方向表示了层的方向角 (THETA)，颜色表示了层材料号 (MAT)。还可以指定要显示层的范围。

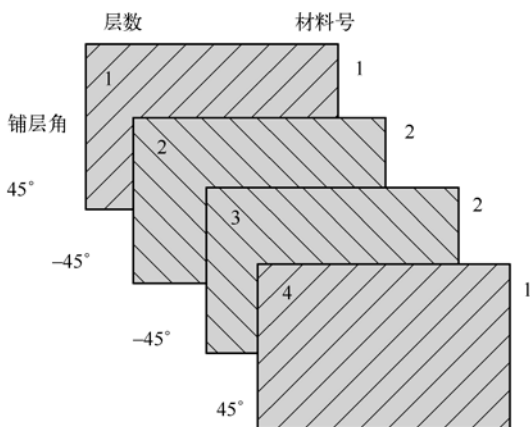


图 17-6 复合材料显示铺层角

4. 指定结果文件数据

默认情况下，只有第一层 (底层) 的底面、最后一层 (顶层) 的顶面以及最大失效值所在层的结果数据被写入结果文件，如果用户对所有层的结果数据都感兴趣，则应设置 KEYOPT (8) = 1，但这样可能导致结果文件很大。

5. 选择特定层号的单元

通过 ESEL,S,LAYER 命令选择特定层号的单元。如果某单元指定层为零厚度，则不被选中。

6. 指定处理哪一层的结果

在后处理 POST1 中使用 LAYER 命令 (Main Menu | General Postproc | Options for Outp)，或在 POST26 中使用 LAYERP26 命令 (Main Menu | Timelist Postpro | Define Variables)，来指定要处理哪一层的结果。用 SHELL 命令 (Main Menu | Timelist Postpro | Define Variables) 来定义到底是使用该层的顶面、中面还是底面的结果。在 POST1 中默认存储的是底层底面的结果、顶层顶面的结果和最大失效准则值所在层的结果。在 POST26 中默认存储的是第一层的结果。

如果单元 KEYOPT (8) = 1 (即保存所有层的结果)，则 LAYER 和 LAYERP26 命令将存储指定层的顶面 (TOP) 和底面 (BOT) 的结果，而中面 (MID) 的结果则由其顶面和底面的结果取平均值得到。

如果在求解中单元 SHELL181 或 SHELL281 设置关键字 KEYOPT (8) = 2 则 LAYER 和 LAYERP26 命令将存储指定层的顶面 (TOP)、底面 (BOT) 和中面 (MID) 的结果。在这种情况下，中面值直接来自结果文件。对于横向剪切应力并且 KEYOPT (8) = 0，POST1 中只能以线性变化的形式显示，而在单元解打印输出数据中 (KEYOPT (8) = 2) 的形式则



可以是二次变化的。

默认时, POST1 将在总体笛卡儿坐标系中显示所有结果。使用 RSYS 命令可将结果转换到别的坐标系中。对于层单元, 如果执行了 LAYER 命令, 且命令中指定的层号非零, 则 [RSYS,SOLU]命令可使结果在层坐标系中显示。

17.3 实例：复合材料传动轴的失效分析

17.3.1 工程背景

碳纤维复合材料由于较高的比强度和比模量以及较小的密度, 在航空航天领域已经得到了广泛的应用, 日前正在逐步向民用产业扩展。沿着纤维的方向, 复合材料的抗拉和抗压性能较好, 因此纤维方向被称为复合材料的主方向。在现代加工行业中, 可以利用碳纤维复合材料这种可变的性能参数来满足不同的使用性能要求, 而复合材料结构设计标准的不足常常成为限制复合材料有效应用的重要原因。传动轴是复合材料的一个重要应用方面, 目前在航天飞机、高性能汽车以及特殊用途的机械中得到了广泛的应用。

17.3.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

传动轴的长度为 1m, 壁厚 3mm, 直径为 0.08m, 复合材料传动轴共 10 层, 从第一层到第十层的铺角分别为 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 、 -45° 、 45° 。

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用模拟复合材料的 SHELL181 单元, 材料为正交各向异性材料, 其材料常数 $EX=195E9Pa$, $EY=35E9Pa$, $EZ=35E9Pa$, $PRXY=0.28$, $PRYZ=0.3$, $PRXZ=0.28$, $GXY=15E9Pa$, $GYZ=3.78E9Pa$, $GXZ=15E9Pa$ 。复合材料传动轴的失效参数: X 方向拉强度为 $767E5Pa$, X 方向压强度为 $-392E5Pa$, Y 方向拉强度为 $20E5Pa$, Y 方向压强度为 $-70E5$, Z 方向拉强度为 $30E5Pa$, Z 方向压强度为 $-55E5Pa$, XY 方向的剪切强度为 $41E5Pa$, YZ 方向的剪切强度为 $30E5Pa$, XZ 方向的剪切强度为 $41E5Pa$ 。

3. 边界条件

传动轴的底端固定, 传导轴的另外一端承受 $2000N \cdot m$ 的扭矩。

17.3.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出一个对话框, 在输入栏中输入 “Composite Propeller Shaft”, 单击 OK。

2. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Shell, 然后在右边选择三维 4node 181 单元, 单击 OK。

(2) 定义单元属性

单击单元类型面板 (Element Types) 的 Options 按钮, 在弹出的对话框中设置单元关键字 K8 为存储所有层的计算结果 (Storage of layer data), 单击 OK, 单击 Close。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Orthotropic, 弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 EX=195E9, EY=35E9, EZ=35E9, PRXY=0.28, PRYZ=0.3, PRXZ=0.28, GXY=15E9, GYZ=3.78E9, GXZ=15E9, 单击 OK, 选择 Material | Exit, 退出面板。

3. 定义复合材料传动轴的失效参数

GUI: Main Menu | General Postproc | Failure Criteria | Add/Edit

弹出定义失效准则对话框, 材料号保持默认值 1, 单击 OK, 弹出添加失效准则对话框, 输入失效拉伸应变 (Strain in Tension) 为 X=0.05, Y=0.08, Z=0.04, 输入失效压缩应变 (Strain in Compression) 为 X=-0.045, Y=-0.06, Z=-0.045, 输入失效剪切应变 (Strain in Shear) 为 XY=0.035, YZ=0.042, XZ=0.025, 输入失效拉伸应力 X=767E6, Y=20E6, Z=30E6 输入失效压缩应力为 X=-392E6, Y=-70E6, Z=-55E6, 输入失效剪切应力为 XY=41E6, YZ=30E6, XZ=41E6。

4. 定义复合材料传动轴的层数、层厚度和铺层角

GUI: Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add / Edit

弹出创建和修改壳单元界面面板 (Creat and Modify Shell Sections) 如图 17-7 所示, 连续单击 Add Layer 添加层数直到 10 层为止, 在每一层都输入 Thickness=0.0003, 奇数层输入 Orientation=-45, 偶数层输入 Orientation=45。

定义完毕后单击 OK。

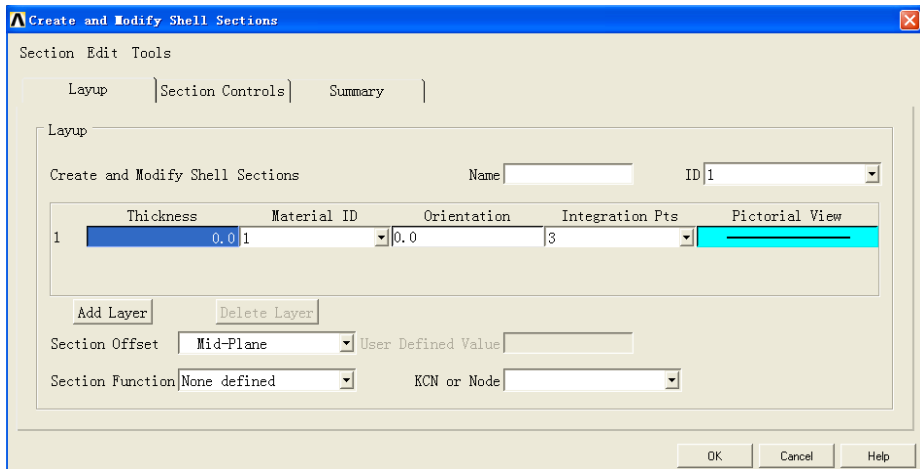


图 17-7 创建和修改壳单元截面面板

5. 定义局部柱坐标系

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



弹出拾取对话框，用鼠标拾取任意位置，单击 OK，弹出在指定位置创建局部坐标系（Creat Local CS at Specified Location）的对话框，选择对话框中的 KCS 选项为 Cylindrical 1，表示建立柱坐标系，输入 XC=0，YC=0，ZC=0，其他保持默认单击 OK。

6. 建立模型

(1) 建立圆柱体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 RAD1=0.04，Z2=1，其他保持默认值，单击 OK。

(2) 只删除体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Volume and Below

弹出拾取对话框，用鼠标拾取体 1，单击 OK。

(3) 删除上下底面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Area and Below

弹出拾取对话框，用鼠标拾取上下底面，单击 OK。

7. 划分网格

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool。

(2) 设置划分单元属性

选择单元属性（Element Attributes）选项中的 Set，弹出网格属性对话框，设置单元坐标系（Element coordinate sys）为 11。这样设置的原因为复合材料传动轴模型是曲面，为了满足铺层角，必须把单元坐标系设置为局部柱坐标系。

(3) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global | Set，在弹出的对话框中输入 SIZE=0.007，单击 OK。

(4) 设置单元划分为自由网格

选择网格划分工具面板中的单元形状（Shape）为 Quad，划分为 Free。

(5) 进行网格划分

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，单击 Pich All。

8. 建立刚体多点约束

(1) 显示线号

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Numbering

在弹出的对话框中勾选 LINE。

(2) 显示线

GUI: Utility Menu | Plot | Lines

(3) 打开接触管理器（Contact Manager）

单击工具栏中的  按钮，弹出接触向导。

(4) 定义刚体多点约束

单击接触管理器面板上的接触向导按钮 ，在弹出的对话框中选择 Pilot Node Only，单击 Next，选择 At center of mass of contact geometric entities，单击 Next，按照图 17-8 进行设

置后, 单击 Pick Contact。

弹出拾取对话框, 拾取线 L5, L6, L8 和 L7, 单击 OK, 单击弹出对话框中的 Next 按钮, 按照图 17-9 进行设置, 弹出的对话框, 单击 Creat, 单击 Finish。

9. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis,

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

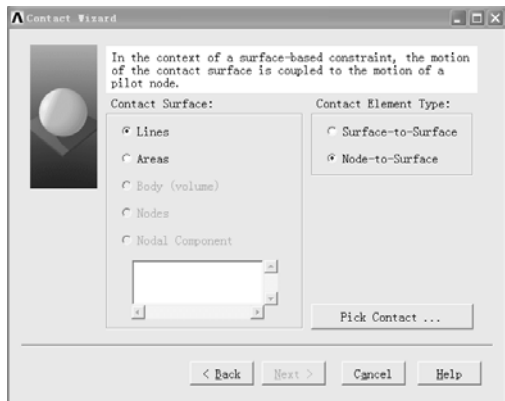


图 17-8 接触向导设置面板

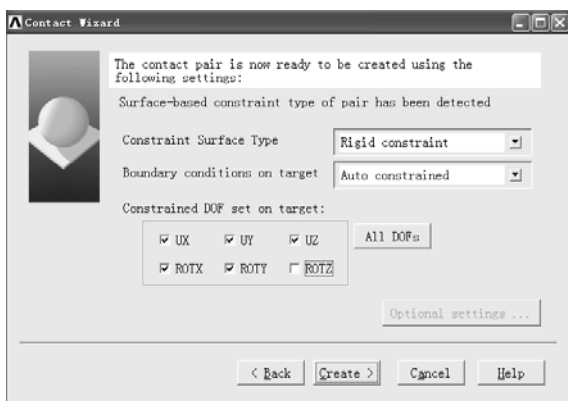


图 17-9 多点约束设置面板

10. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取底面的 4 个边, 单击 OK, 约束所有自由度, 即选择 ALL DOF, 其他保持默认, 单击 OK。

(2) 定义扭矩

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取刚体多点约束的控制节点, 单击 OK, 弹出施加载荷对话框, 选择 MZ, 并在 Force/moment value 中输入 2000。

11. 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

12. 后处理

(1) 设置云图字体

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Legend Font

弹出字体大小选择对话框, 设置字体大小为三号。

(2) 查看位移

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | DOF



Solution | Displacement vector sum 在比例因子选项中设置 Auto Calculated 为自动计算比例，单击 OK，如图 17-10 所示。

(3) 查看等效应力云图

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu
弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK，如图 17-11 所示。

(4) 查看是否失效

1) 查看最大应力失效云图。

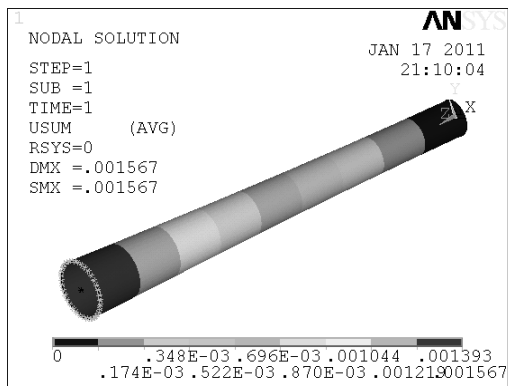


图 17-10 传动轴位移云图

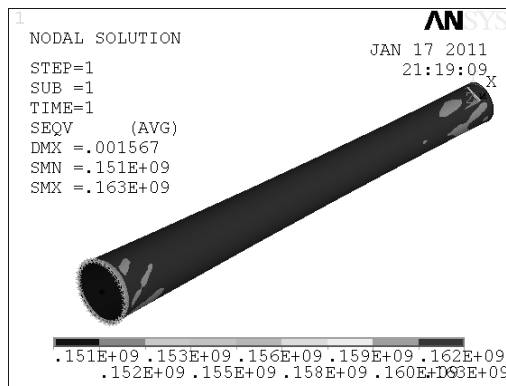


图 17-11 传动轴等效应力云图

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu
弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择 Nodal Solution | Failure Criteria | Maximum Stress，单击 OK，如图 17-12 所示。

2) 查看最大应变失效云图。

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu
弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择 Nodal Solution | Failure Criteria | Maximum Strain，单击 OK，如图 17-13 所示。

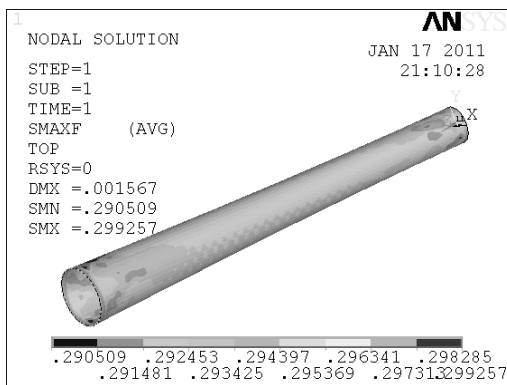


图 17-12 传动轴最大应力失效云图

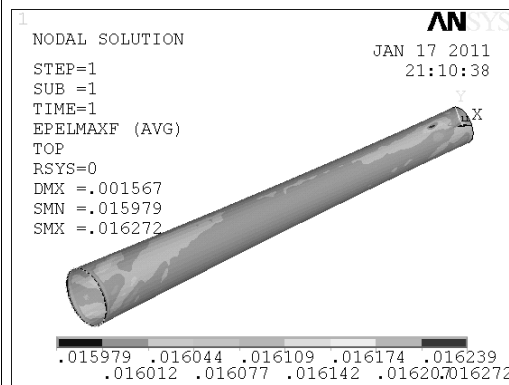


图 17-13 传动轴最大应变失效云图

第 18 章 断裂力学分析

传统的设计概念使用过强度方法来设计部件。这种方法不考虑材料发生破坏的应力水平，结构中的应力达到或超过该应力水平时，结构将发生灾难性的后果。断裂力学考虑了结构中的裂纹或缺陷。断裂力学方法在设计结构时将裂纹或缺陷尺寸视为一个重要的变量，并用断裂韧性代替材料强度作为相关的材料参数。典型的断裂分析使用能量准则或应力强度因子准则。使用能量准则时，用裂纹扩展一个单位长度的能量（能量释放率）描述断裂韧性。使用应力强度因子准则时，用应力幅值的关键值和位移场描述断裂韧性。在某种特定的环境下，这两种准则是等效的。本章将详细讲解断裂分析过程。

18.1 断裂分析基础

18.1.1 断裂模式

根据失效运动学（即形成裂纹的两个面的相对运动）可将断裂模式分为三种，见图 18-1。

模式 1：开放或张开模式。

模式 2：剪切或滑移模式。

模式 3：撕裂或面外（out-of-plane）模式。

实际的断裂通常是由这三种模式综合描述的。

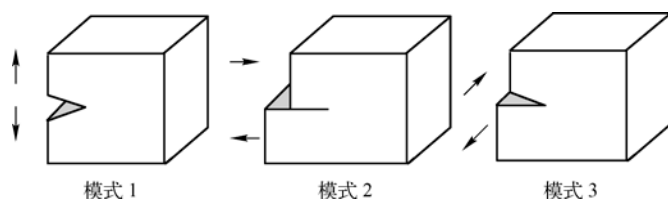


图 18-1 断裂模式图解

18.1.2 断裂力学参数

典型的断裂力学参数有能量释放率及裂纹尖端的应力幅值和位移场。下面的参数被广泛应用于断裂力学分析中。

- 应力强度因子。
- 能量释放率。
- J 积分。

应力强度因子和能量释放率只适用于线弹性断裂力学。J 积分对于线弹性和非线性弹-塑性材料均适用。



1. 应力强度因子

对于线弹性材料，裂纹尖端的应力、应变场表达式为：

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \quad (18-1)$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} g_{ij}(\theta) \quad (18-2)$$

式中， K 是应力强度因子， r 和 θ 为极坐标系（见图 18-2）的坐标。上面的方程对三种断裂模式都适用。

对于第一种模式的断裂，应力场为：

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\ \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{cases} \quad (18-3)$$

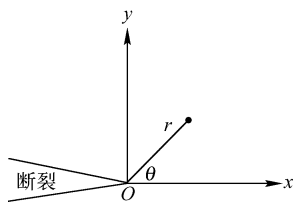


图 18-2 裂纹尖端示意图

应力张量因子和能量释放率通过下式建立联系：

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (18-4)$$

式中， G 表示能量释放率，对于平面应变，有：

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (18-5)$$

对于平面应力，有：

$$E' = E \quad (18-6)$$

其中， E 为材料的杨氏模量； ν 为泊松比。

2. J积分

J 积分是弹-塑性断裂力学中最广为接受的参数之一。J 积分的定义为：

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma_0} [(w+T)\delta_{ij} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}] n_i d\Gamma \quad (18-7)$$

式中， w 是应变能密度， T 是动能密度， σ 是应力， u 是位移向量， Γ 是积分边界。对于线弹性材料中的裂纹，J 积分表示能量释放率。对于非线性材料，J 积分还表示裂纹尖端的应力幅值和位移场。

Hutchinson、Rice 和 Rosengren 独立推导出了非线性材料裂纹尖端场的 J 积分描述。他们都假设在塑性应变和应力之间存在指数关系。如果包含弹性应变，单轴变形关系由下式给出：

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (18-8)$$

式中， σ_0 是参考应力（材料的屈服应力）； $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$ ， α 是无尺寸的常数； n 是硬化分量。他们指出，在距离裂纹尖端很近的距离且完全位于塑性区内，裂纹尖端应力和裂纹尖

端前的应变可以表示为:

$$\sigma_{ij} = f(\theta) \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (18-9)$$

$$\varepsilon_{ij} = g(\theta) \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (18-10)$$

对于弹性材料, $n=1$, 上面的方程显示 $1/\sqrt{r}$ 奇异, 这与线弹性断裂力学的结论是一致的。

18.2 断裂力学模型的建立

断裂分析综合了应力分析和断裂力学参数计算。应力分析是标准的 ANSYS 线弹性或非线弹性-塑性分析。由于高应力梯度出现在裂纹尖端周围的区域, 因此在建立包含裂纹的有限元模型时必须特别注意裂纹区域。

裂纹周围区域的二维和三维表示和相关术语已在下面的部分列出。在二维模型中, ANSYS 将裂纹的尖端作为裂纹尖端; 在三维模型中将裂纹的边线作为裂纹前缘, 如图 18-3 所示, 图中 μ 、 v 、 r 为裂纹尖端局部极坐标。

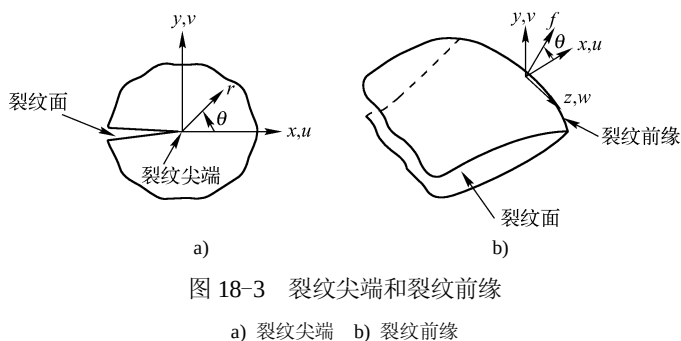


图 18-3 裂纹尖端和裂纹前缘

18.2.1 裂纹尖端区域建模

裂纹尖端周围区域的应力和位移场梯度通常是较高的。对应力及位移场的预测精度取决于材料、几何和其他因素。为了捕捉该区域应力和位移的急剧变化, 需要在裂纹尖端区域进行网格的细化。

对于线弹性问题, 在裂纹尖端 (或裂纹前缘) 附近的位移的变化为 $\sqrt{r}$, r 是距裂纹尖端的距离。裂纹尖端的应力和应变是奇异的, 以 $1/\sqrt{r}$ 变化。为了产生应力、应变的奇异性, 裂纹尖端的网格应该具有下面几个特点。

- 断裂面应该是一致的。
- 裂纹尖端 (或裂纹前缘) 周围的单元应该是二次单元, 在 1/4 点 (at the quarter points) 处有中节点 (这些单元被称为 “奇异单元”)。

1. 二维线弹性断裂问题建模

对于二维断裂模型推荐使用单元 PLANE183, 这是一个 8 节点二次实体单元。围绕裂纹尖端的第一排单元应该是奇异的, 如图 18-4 所示。

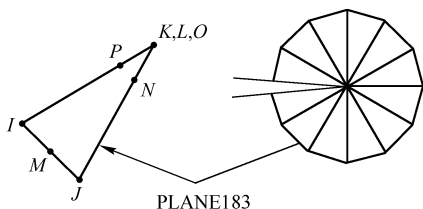


图 18-4 二维奇异单元

PREP7 前处理器的 KSCON 命令 (GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | Concentrat KPS | Create) 可以用来指定围绕一个关键点的单元尺寸, 该功能在断裂问题建模中是非常有用的。它在指定的关键点周围自动生成奇异单元。该命令的其他字段允许控制第一排单元的半径以及周向的单元个数等信息。

为了得到可信的结果, 裂纹尖端周围的第一排单元的半径应该接近于 $a/8$ 或更小, a 是裂纹长度。在周向上, 推荐每 $30^\circ \sim 40^\circ$ 为一个单元。裂纹尖端的单元应避免扭曲, 且应该是等腰三角形。

2. 三维线弹性断裂问题建模

对于三维模型推荐使用单元 SOLID186, 这是一个 20 节点单元。如图 18-5 所示, 裂纹前缘周围的第一排单元应该是奇异单元。注意这些单元是楔形的, 单元的 KLOP 面塌陷到线 KO 上。生成三维断裂模型考虑的问题比二维情况下更多。对于三维模型, KSCON 命令不可用。必须确保裂纹前缘是沿着单元的 KO 边的。单元尺寸的推荐值同二维的情况。另外, 所有方向上的长宽比应在 $1 \sim 4$ 之间。对于曲线形式的裂纹前缘, 沿裂纹前缘的单元尺寸取决于局部曲率的大小。通常的准则是沿弧形的裂纹前缘应保证每 $15^\circ \sim 30^\circ$ 至少有一个单元。所有单元的边应是直线, 包括裂纹前缘上的单元边。

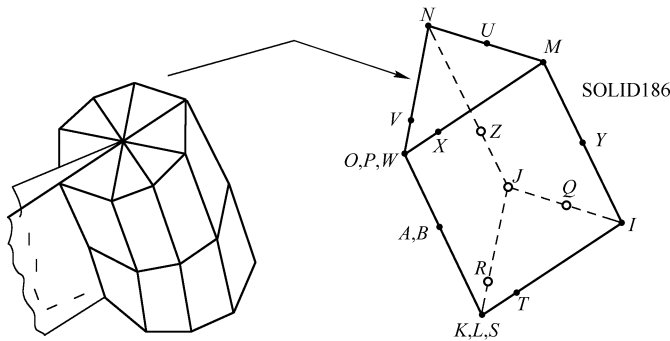


图 18-5 三维奇异单元

18.2.2 计算断裂参数

ANSYS 允许计算以下断裂参数。

- J 积分。
- 应力强度因子 (K_I, K_{II}, K_{III})

J 积分的计算是在求解过程中执行的, 其结果存储在 ANSYS 结果文件 (.rst 文件) 中用

于后处理。为执行 J 积分的计算, 需要用到 CINT 命令, 应力张量因子在后处理器 (POST1) 中使用 KCAL 命令计算。

18.3 ANSYS断裂力学参数数值计算

18.3.1 J积分计算

ANSYS 中 J 积分的计算基于 Shih 发明的域积分法。域积分法对于二维问题使用面积积分, 对三维问题使用体积积分。面积和体积积分比边界积分和表面积分的精度更高, 并且更容易用数值方法实现。该方法本身也是容易使用的。

1. 理解域积分法

对于二维问题, 在没有热应变的情况下, 路径依赖于塑性应变, 体力存在于积分面积内, 压力在裂纹面上, 域积分表示的 J 积分由下式给出:

$$J = \int_A [\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - w \delta_{ij}] \frac{\partial q}{\partial x_i} dA \quad (18-11)$$

式中, q 是裂纹扩展向量。 q 的方向为裂纹尖端前的局部坐标系的 x 方向。 q 向量在沿边界 Γ 上的节点上为 0, 在 Γ 内的除中节点外所有节点上为一个单位向量。如有任何直接与 Γ 相连的节点, ANSYS 将这些节点和一个单位 q 向量作为虚拟裂纹扩展节点。

对于高阶单元 (比如 PLANE183 和 SOLID186), 在中节点上的 q 向量取相应的角节点上 q 向量的平均值。J 积分的离散形式由下式给出:

$$J = \int_{ie=1}^{ne} [\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - w \delta_{ij}] \frac{\partial q}{\partial x_i} W_{iw} A_{ie} \quad (18-12)$$

式中, ne 是进行积分的单元数目, W_{iw} 是权函数, A_{ie} 是由 ie 表示的单元面积。

对于三维问题, J 积分的域积分表示变为体积分, 它也是在一组单元上计算的积分。它的实现更加复杂, 然而, 原理与二维问题是类似的。

(1) 虚拟裂纹扩展节点和 J 积分边界

虚拟裂纹扩展节点是 J 积分计算所需要的最重要的输入数据元素之一。它有时也被说成是裂纹尖端节点分量。

对于二维裂纹问题, 裂纹尖端节点分量通常包含一个是裂纹尖端节点的节点。J 积分的面积积分的第一个边界是在与裂纹尖端节点分量相连的单元上计算的。J 积分的面积积分的第二个边界是在与第一个边界相邻接的单元上计算的。对于所有边界重复该过程。为确保得到准确的结果, 边界积分单元不能达到模型的外边界 (裂纹面例外)。

对于三维裂纹问题, 裂纹尖端节点分量由沿裂纹前缘的节点构成。不需要对裂纹尖端节点分量进行存储。三维 J 积分边界与二维情况类似。

(2) 单元选择和材料行为

J 积分计算 (通过 CINT 命令访问) 支持以下单元类型。

- PLANE182。
- PLANE183。



- SOLID185。
- SOLID186。
- SOLID187。

J 积分计算支持以下材料行为。

- 线弹性。
- 塑性。

2. J积分计算的过程

在求解期间，当一个子步收敛后，ANSYS 计算 J 积分并把该值存入结果文件。CINT 命令用来初始化 J 积分计算和指定计算所需要的不同的参数。J 积分计算的步骤如下

(1) 初始化一个新的 J 积分计算

为启动一个 J 积分计算，使用 CINT 命令的“NEW”选项并提供一个编号以识别 J 积分计算的输入信息。该命令的语法是：

```
CINT, NEW, n
```

在这里， n 是用来识别该 J 积分计算的编号。

(2) 定义裂纹信息

对于 J 积分计算，需要定义裂纹尖端节点分量和裂纹扩展方向。在 CINT 命令中有两种方法可以用来指定这些信息。

1) 定义裂纹尖端节点分量和裂纹平面法向。

该方法适用于二维裂纹几何和三维平裂纹面。它提供了定义一个三维 J 积分计算的简单方法，该方法只需用定义裂纹尖端（前缘）节点分量和裂纹平面法向。当裂纹平面是平的使用该方法。

对于二维裂纹几何，定义一个裂纹尖端节点分量（通常在裂纹尖端有一个节点），也可以定义围绕裂纹尖端包括裂纹尖端上的一组节点。ANSYS 使用这组节点作为起始节点，形成必要的信息以进行自动边界积分。

对于三维平裂纹几何，必须定义一个包含了裂纹前缘上所有节点的裂纹尖端节点分量。然而，在每一个节点位置只能出现一个节点。裂纹尖端节点分量中的所有节点必须是可连接的，并且由这些节点所在的单元边线能够形成一条线，这条线就是裂纹前缘。ANSYS 用它来自动地确定用于边界积分的单元。该过程与二维裂纹几何的情况是相似的，并且是通过在裂纹前缘上的所有节点来实现的。

该命令的语法是：

```
CINT, CTNC, CMNAME
```

定义了裂纹尖端节点分量之后，使用 CINT 命令的 NORMAL 选项来定义裂纹平面的法向。基于单元信息，ANSYS 自动将其转换到裂纹扩展向量 q 。裂纹扩展向量的取向为沿着由裂纹平面法向和裂纹尖端节点的切线方向形成的平面相垂直的方向，并正则化为一个单位向量。

该命令的语法为：

```
CINT, NORMAL, par1, par2
```

在这里, par1 是坐标系编号, par2 是坐标系 par1 的坐标轴。

示例:

```
!局部坐标系
LOCAL,11,0,,,
! 选择沿裂纹前缘上的节点并定义其为裂纹前缘/尖端节点分量
NSEL,S,LOC,X,Xctip
NSEL,R,LOC,Y,Yctip
CM,CRACK_TIP_NODE_CM! 定义一个新的 J 积分计算
CINT,NEW,1
CINT,CTNC, CRACK_TIP_NODE_CM
CINT,NORMAL,11,2
```

2) 定义裂纹扩展节点分量和裂纹扩展方向。

该方法适用于三维曲线裂纹平面, 裂纹平面没有一个单一的法向。然而, 必须在每一个裂纹尖端节点位置定义裂纹扩展节点分量和裂纹扩展方向。当裂纹平面不是平面或裂纹尖端是由一组节点形成的(比如裂纹尖端网格塌陷的情况)时使用该方法。

定义一个由一个或多个形成裂纹尖端的节点组成的节点分量。该节点分量可以有一个或多个节点。例如:

```
CINT,CENC,CMNAME
```

如果节点分量包含不止一个节点, 则逐个地识别裂纹尖端节点。如果一个裂纹尖端节点没有识别, 那么节点分量的第一个节点将被作为第一个节点。例如:

```
CINT,CENC, CMNAME,node1
```

定义裂纹扩展方向的一种方法是, 首先识别附加在所考虑的裂纹上的局部坐标系, 然后识别坐标轴(上述局部坐标系的), 允许裂纹该坐标轴扩展。例如:

```
CINT,CENC,CMNAME,node1, 11, 2
```

另一种方法是, 通过直接指定裂纹扩展矢量全局坐标系的 X、Y、Z 分量来定义裂纹扩展方向。例如:

```
CINT,CENC,CMNAME,node1, , , compx, compy, compz
```

对裂纹前缘的所有节点重复上述过程。

(3) 指定计算的积分路径数量

可用下面的命令指定 J 积分计算的边界数:

```
CINT,NCONTOUR,n
```

此处 n 是积分路径数量。

(4) 定义裂纹对称条件

如果裂纹位于一个对称面上, 并且使用 1/2 模型, 这时须定义对称条件以便 ANSYS 可以正确求解:

```
CINT,SYMM,ON
```





(5) 指定输出控制

ANSYS 在求解时计算 J 积分并将其存储于结果文件以用于后处理。J 积分输出所有经 OUTRES 命令定义的值。命令 OUTRES,ALL 包含 CINT 命令的结果。然而,也可以使用 OUTRES,CINT 命令来指定 J 积分所要输出的结果:

```
CINT,NEW,1
CINT,CTNC,CRACK_TIP_NODE_CM
CINT,SYMM,ON
CINT,NCONT,5
OUTRES,CINT,10
! 每 10 个子步输出 J 积分结果
```

18.3.2 应力强度因子计算

1. 通过互动积分法计算应力强度因子

在 13.0 中对应力强度因子的计算增加了一种计算方法即互动积分法 (Interaction Integrals), 这种方法与计算 J 积分的主域积分法类似。在二维问题中进行面积分, 在三维问题中进行体积分来获得应力强度因子。这种方法与传统的位移扩展法相比精度高, 需要的单元数少。

(1) 开始一个新的应力强度因子计算

为了开始应力强度因子计算, 按照下面形式输入两次 CINT 命令:

```
CINT,NEW,n
CINT,TYPE,SIFS
```

其中, n 是应力强度因子计算的数字标识。

例如:

```
CINT,NEW,1          !开始一个新的计算并编号为 1
CINT,TYPE,SIFS      !指定为应力强度因子计算
```

(2) 定义裂纹的信息

和 J 积分计算相似, 裂纹尖端节点组件和裂纹扩展方向在裂纹尖端应力强度因子计算中必须定义。两种方法都涉及 CINT 的命令, 对于指定的值都可用。

1) 定义二维裂纹尖端节点组件和裂纹面法向。二维裂纹面中裂纹尖端组件的定义方法是: 用户首先围绕裂纹尖端定义一组节点, 其中也包括裂纹尖端节点。程序使用这组节点为自动积分提供必要的信息。对于裂纹面为平面的三维裂纹问题, 用户定义的裂纹尖端节点组件必须包括沿着裂纹前端所有的节点。然而在每一个节点位置, 只能存在一个节点。裂纹尖端节点组件中节点必须是相连的, 并且连接起来是一条直线。这条直线就是裂纹前缘。

命令格式:

```
CINT, CTNC, Par1, Par2, Par3
```

其中, Par1 为裂纹尖端组件名, Par2 定义裂纹扩展方向的计算辅助节点 (any node on

the open side of the crack), Par3 为裂纹前端所定义裂纹面上最后节点的扩展方向。Par2 和 Par3 是为了帮助确定裂纹扩展方向而设计的。虽然程序能够为计算裂纹尖端应力强度因子自动计算出局部坐标系, 但最好还是使用 Par2 定义一个裂纹面节点, 用来帮助对齐裂纹尖端节点的扩展方向。默认情况下当裂纹尖端节点撞击自由面时, 程序会使用外表面去定义裂纹扩展方向和法向。然而用户可以使用 Par3 覆盖这个默认的坐标系统的计算。

定义完裂纹尖端组件之后, 使用 CINT 命令的 NORMAL 选项去定义裂纹面的法向。基于单元信息, 程序会自动把它转换为裂纹扩展矢量 q

命令格式:

CINT,NORMAL,Par1, Par2

其中, Par1 为坐标系编号, Par2 为 Par1 坐标系中的坐标轴。

2) 定义三维裂纹扩展节点组件和裂纹扩展方向。三维曲面裂纹面的问题, 在这种情况下不存在唯一的法向。然而, 用户必须在任何裂纹尖端节点位置定义裂纹扩展节点组件和裂纹扩展方向。辅助的裂纹尖端场是基于裂纹扩展的方向的。为了确保应力强度因子计算的准确性, 正确的定义裂纹扩展是关键。

① 定义一个包含一个或多个组成裂纹尖端的节点组件。这个组件可以包括一个或多个节点。例如:

CINT, CENC, CMName

② 如果节点组件由多个节点组成, 那么要分别确定裂纹尖端的节点。如果不确定裂纹尖端节点, 那么节点组件的第一个节点就被认为是第一个裂纹尖端的第一个节点。例如:

CINT, CENC, CMName, node1

③ 定义裂纹扩展方向。首先确定需要计算其裂纹尖端应力强度因子裂纹的局部坐标系。接下来确定裂纹扩展的局部坐标轴。例如:

CINT, CENC, CMName, node1, 11, 2

此外, 也可以通过直接指定裂纹扩展矢量组件的总体坐标 X、Y 和 Z 来定义裂纹扩展方向。例如:

CINT, CENC, CMName, node1, , , compx, compy, compz

对裂纹前缘的所有节点重复这种方法。虽然程序能够为计算裂纹尖端应力强度因子自动计算出局部坐标系, 但最好还是使用 NORMAL 定义一个裂纹面节点, 帮助对齐被计算的裂纹尖端节点法向。

3) 裂纹尖端局部坐标系。辅助裂纹尖端场是基于局部裂纹尖端坐标系的。为了确保应力强度因子计算的准确性, 必须定义一个正确的裂纹尖端局部坐标系, 其中, x 轴指向裂纹扩展方向, y 轴指向裂纹面的法向, z 轴指向裂纹前缘的切向。

(3) 确定计算的积分轮廓线

用户确定互动积分的轮廓线数量, 命令格式为:

CINT,NCON,n



其中， n 为积分路径数量。

对于三维裂纹，沿着裂纹前缘的每一个节点都有相同的积分路径数量

```
CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CRACK_FRONT_NODE_SET,NODE
CINT,NCON,6
```

(4) 定义裂纹尖端对称条件

通常情况下，对于混合型裂纹不存在裂纹对称条件。然而当使用裂纹对称条件时应力强度因子 K_{II} 和 K_{III} 被置为 0。

定义为对称边界条件的命令是：

```
CINT, SYMM, ON
```

(5) 确定输出控制

ANSYS 在求解时计算应力强度因子并将其存储于结果文件以用于后处理。应力强度因子输出所有经 OUTRES 命令定义的值。命令 OUTRES,ALL 包含 CINT 命令结果。然而，也可以使用 OUTRES,CINT 命令来指定 J 积分所要输出的结果。

```
CINT,NEW,1
CINT,TYPE,SIFS
CINT,CTNC,CRACK_TIP_NODE_CM
CINT,SYMM,ON
CINT,NCON,5
OUTRES,CINT,10 !输出 10 个计算结果
```

2. 通过位移外推法计算应力强度因子

POST1 中的 KCALC 命令（GUI：Main Menu|General Postproc|Nodal Calcs|Stress Int Factr）计算混合节点应力强度因子 K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 。该命令只适用于裂纹区域的材料为均质、各向同性线弹性材料的情况。在 POST1 后处理器中使用 KCALC 名要遵循以下步骤。

(1) 定义裂纹尖端或裂纹前缘的局部坐标系。

X 轴必须平行于裂纹面（在三维模型中垂直于裂纹前缘），Y 轴垂直于裂纹面（如图 18-3 “裂纹尖端和裂纹前缘”所示）。当执行 KCALC 命令时，该坐标系必须是激活的模型坐标系（CSYS）且是结果坐标系（RSYS）。

命令：LOCAL（或 CLOCAL,CS,CSKPD 等）

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

(2) 定义沿裂纹面的路径

路径上的第一个节点应该是裂纹尖端点。对于 1/2 裂纹模型，需要两个附加节点，它们都位于裂纹面上。对于两个裂纹面都包括在内的完整的裂纹模型，需要四个附加节点，每个裂纹面上有两个。

命令：PATH（或 PPATH）

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path

下面的图 18-6 是两个二维模型的例子，图中 μ , v , r 为裂纹尖端局部极坐标。数字 1、2、3、4、5 为路径选取节点的顺序。

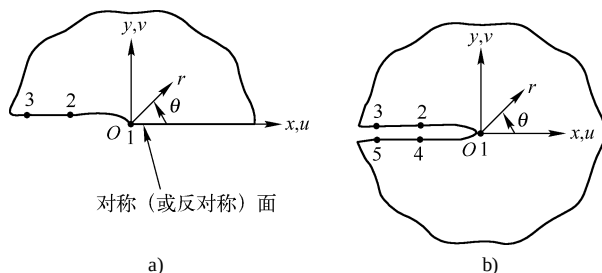


图 18-6 典型的裂纹面路径定义

a) 半裂纹模型 b) 全裂纹模型

(3) 计算 K_I 、 K_{II} 和 K_{III}

KCALC 命令的 KPLAN 字段用于指定模型处于平面应变还是平面应力状态。除了薄板的分析之外，渐近线或裂纹尖端的力学行为通常认为是平面应变。KCSYM 字段指定模型是有对称边界条件的 1/2 模型，还是有反对称边界条件的 1/2 模型，又或是完整的裂纹模型。

命令: KCALC

GUI: Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Stress Int Factr

18.4 实例：弹塑性焊接接头的J积分计算

18.4.1 工程背景

由于焊接的工艺性质决定了焊接接头的特点是不连续的。例如在几何上存在缺陷及截面变化的不连续性、在力学上存在残余应力及应力集中、化学上存在成分不均匀性、金属学上存在组织结构的不均匀性。在现有的缺陷评定规范中，对焊接接头的不连续性做了一定的考虑，如在进行裂纹扩展驱动力分析时考虑了焊接残余应力等因素，在制备焊接接头断裂韧性试样时也做了相应的规定。随着学科的发展，焊接接头不连续性及对断裂性能影响的研究日益受到重视，焊接接头力学性能不均匀性对焊接接头断裂性能的影响规律的研究就是其中之一。本实例使用 ANSYS 计算了焊接接头的裂纹扩展驱动力 J 积分。

18.4.2 问题的描述

1. 焊接接头的几何参数

焊接接头的力学模型如图 18-7 所示，它主要由母材区、热影响区和焊缝区组成，整个焊接接头为薄钢板，其厚度为 $H_1=0.002\text{m}$ ，其他几何参数为焊接接头的宽度 $H=0.08$ ，母材区 1 的长度 $ML_1=0.1\text{m}$ ，热影响区 1 的长度 $RL_1=0.006\text{m}$ ，焊缝区的长度 $HL=0.01\text{m}$ ，母材区 2 的长度 $ML_2=0.1\text{m}$ ，热影响区 2 的长度 $RL_2=0.006\text{m}$ ，裂纹的中心位置 O 到底边的距离 $OH=0.04\text{m}$ ，到热影响区 1 的距离 $OL=0.003\text{m}$ ，裂纹的半长 0.004m 。

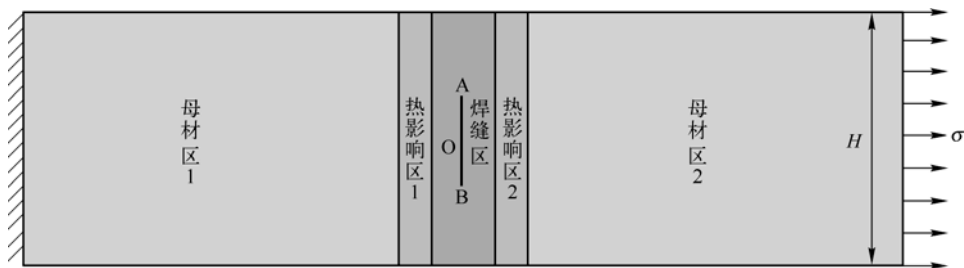


图 18-7 焊接接头模型简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例的单元选用可以模拟断裂奇异性的 8 节点 PLANE183 单元，假设焊接接头的每个区的材料都为双线性等向强化模型，每个区的具体材料常数见表。

表 18-1 焊接接头各区的材料性能常数

	母材区 1	热影响 1	焊 缝 区	热影响区 2	母材区 2
弹性模量	2E11Pa	2.5E11Pa	1.9E11Pa	2.6E11Pa	2.1E11Pa
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
屈服强度	300MPa	200MPa	500Mpa	250MPa	350MPa
切线模量	2E10Pa	2.1E10Pa	1.2E10Pa	2.1E10Pa	2E10Pa

3. 边界条件

假设焊接接头的左端约束所有自由度，右端面承受拉应力 σ 为 300MPa。

18.4.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入 “Welded Joint”，单击 OK。

2. 定义几何参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters，在弹出对话框中的 Selection 中输入 $H1=0.003$ ，单击 Accept 完成对焊接接头厚度参数的定义，按照此方法继续定义焊接接头的宽度 $H=0.08$ ，母材区 1 的长度 $ML1=0.1$ ，热影响区 1 的长度 $RL1=0.006$ ，焊缝区的长度 $HL=0.01$ ，母材区 2 的长度 $ML2=0.1$ ，热影响区 2 的长度 $RL2=0.006$ ，裂纹的半长 $A=0.004$ ，裂纹中心到热影响区 1 的距离 $OL=0.003$ ，裂纹中心到底边的距离 $OH=0.04$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 8node 183 单元，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，选择图 18-8 中的选项。

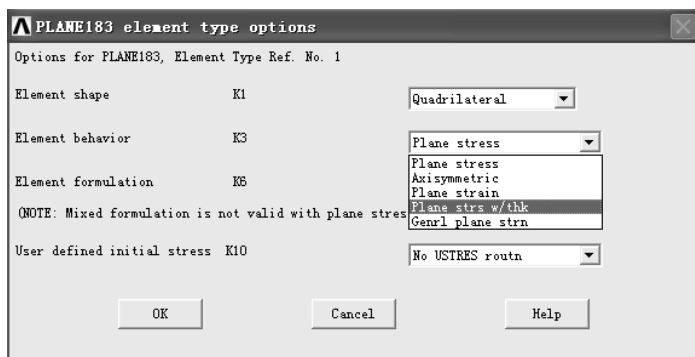


图 18-8 定义单元的关键字

(3) 定义材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框，首先定义母材区 1 的材料常数，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 EX=2E11，PRXY=0.3，单击 OK，设置材料的应力应变关系为双线性等向强化，单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Rate Independent | Mises Plasticity | Bilinear，在弹出的对话框中输入屈服应力（Yield Stss）为 300E6，切线模量（Tang Mod）为 2E10，按照前面定义材料常数的方法继续定义热影响区 1、焊缝区、热影响区 2 和母材区 2 的材料常数。

(4) 定义单元的实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Rear Constans | Add/Edit/Delete | Add | OK

在对话框中的 THK 中输入钢板的厚度 0.002m，然后单击 OK，单击 Close。

4. 建立焊接接头的模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=ML1+RL1, Y=0, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=2, X=ML1+RL1+OL, Y=0, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=3, X=ML1+RL1+HL, Y=0, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=4, X=ML1+RL1+HL, Y=H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=5, X=ML1+RL1+OL, Y=H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=6, X=ML1+RL1, Y=H, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=7, X=ML1+RL1+OL, Y=OH-A, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=8, X=ML1+RL1+OL, Y=OH, Z=0，单击 Apply；继续输入 NPT=9, X=ML1+RL1+OL, Y=OH+A, Z=0，单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs，弹出拾取对话框，用鼠标按顺序拾取关键点 1, 2, 7, 8, 9, 5 和 6，单击 Apply，继续拾取关键点 2, 3, 4, 5, 9, 7 和 2，单击 OK。

(3) 建立矩形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions



在弹出的对话框中输入 $X1=0$, $X2=ML1$, $Y1=0$ 和 $Y2=H$, 单击 Apply, 继续输入 $X1=ML1$, $X2=ML1+RL1$, $Y1=0$, $Y2=H$, 单击 Apply, 继续输入 $X1=ML1+RL1+HL$, $X2=ML1+RL1+HL+RL2$, $Y1=0$ 和 $Y2=H$, 单击 Apply, 继续输入 $X1=ML1+RL1+HL+RL2$, $X2=ML1+RL1+HL+RL2+ML2$, $Y1=0$, $Y2=H$, 单击 OK。

(4) 粘结面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Areas

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取面 A3, A4 和 A1, 单击 Apply, 继续拾取面 A2, A5 和 A6, 单击 OK。

(5) 割分裂纹所在面

由于一个面只能存在一个裂纹端点网格划分, 因此必须使用工作平面的割分方法, 把裂纹所在面割分成两个面。

1) 移动工作平面到裂纹中心。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | XYZ Locations

弹出拾取对话框, 在拾取对话框中输入裂纹中心的坐标, 即 $ML1+RL1+OL, OH, 0$, 单击 OK。

2) 转动工作平面。为了割分平面, 必须使得 XY 平面垂直于模型。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments, 弹出工作平面偏移面板, 设置移动角度为 90° , 并且输入 $XY=0$, $YZ=90$, $ZX=0$, 单击 OK。

3) 使用工作平面割分焊缝区

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by WrkPlane

弹出拾取对话框, 拾取焊缝区的两个面 A1 和 A2, 单击 OK。

5. 网格划分

(1) 设置裂纹尖端网格

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | Concentrat KPs | Create

用鼠标拾取关键点 7, 单击 Apply, 在 DELR 对话框中输入 A/9, 在 NTHET 对话框中输入 15, 在 KCTIP 中选择 Skewed 1/4pt, 表示在单元的 1/4 节点处建立节点, 在中其他对话框保持默认值, 单击 Apply; 继续设置裂纹尖端的另外一个关键点 9, 关键点的设置基本参数相同。

(2) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(3) 划分母材区 1 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中选择材料号为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set, 在弹出对话框的 SIZE 选项中输入 0.005, 单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取母材区 1 的面, 单击 OK。

(4) 划分热影响区 1 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框

中选择材料号为 2，其他保持默认值，单击 OK。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.003，单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取热影响区 1 的面，单击 OK。

(5) 划分焊缝区的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中选择材料号为 3，其他保持默认值，单击 OK。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.001，单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取焊缝区的面，单击 OK。

(6) 划分热影响区 2 的网格

1) 选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中选择材料号为 4，其他保持默认值，单击 OK。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.002，单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取热影响区 2 的面，单击 OK。

(7) 划分母材区 2 的网格

1) 选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中选择材料号为 5，其他保持默认值，单击 OK。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.005，单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取母材区 2 的面，单击 OK。

6. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static，含义为进行静力学问题求解。

7. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

用鼠标拾取模型左边的线，单击 OK，在弹出的对话框 Lab2 中拾取 All DOF，单击 OK。

(2) 定义力边界条件

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines

用鼠标拾取右边的线，单击 OK，在弹出的对话框中输入-3E8。





8. 使用宏命令计算J积分

(1) 定义裂纹尖端局部坐标系

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

弹出拾取对话框，在对话框中输入裂纹尖端所在关键点 7 的坐标：ML1+RL1+OL,OH-A,0，单击 OK，弹出创建局部坐标系对话框，在对话框中的 KCN 输入 11，输入 THXY=90，其他保持默认值，单击 OK。

(2) 激活总体笛卡儿坐标系

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

(3) 定义裂纹尖端节点组

1) 提取裂纹尖端节点编号。在命令窗口中输入 NC=NODE (ML1+RL1+OL,OH-A,0)。

2) 通过节点编号选取节点。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

在弹出的拾取对话框中输入 NC，单击 OK。

3) 创建裂纹尖端节点组。

GUI: Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component

弹出创建节点组 (Creat Component) 对话框，在 Cname 中输入 CRACKTIP，单击 OK。

(4) 选择所有

GUI: Utility Menu | Select | Everything

(5) 在命令窗口输入下列命令

CINT,NEW,1	! 定义裂纹尖端 ID 号
CINT,CTNC,CRACKTIP	!定义裂纹尖端节点组
CINT,SYMM,OFF	! SYMMETRY OFF
CINT,NCON,5	! 定义 J 积分的条数
CINT,NORM,11,2	! 定义裂纹尖端的法向

9. 开始计算

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框，单击 OK。

10. 后处理

(1) 查看 J 积分的计算结果

在命令窗口输入 PRCINT,1，单击回车键，弹出 5 条 J 积分结果。

(2) 查看裂纹尖端等效塑性应变

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Date) 对话框，选择 Nodal Solution | Plastic Strain | von Mises plastic strain，单击 OK，如图 18-9 所示。

(3) 查看裂纹尖端等效应力

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Date) 对话框，选择 Nodal Solution | Stress

| von Mises stress, 单击 OK, 如图 18-10 所示。

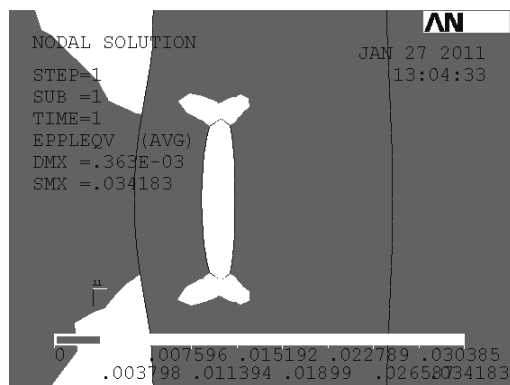


图 18-9 焊接接头裂纹尖端等效塑性应变

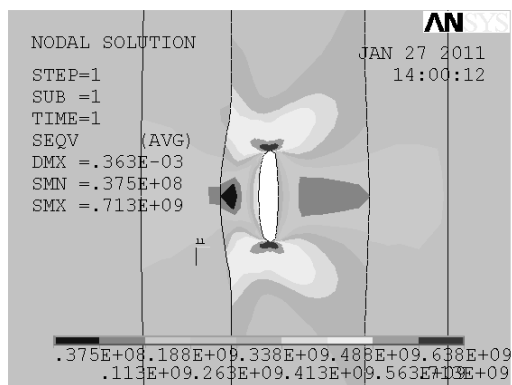


图 18-10 焊接接头裂纹尖端等效应力



第 19 章 热 分 析

19.1 热分析概述

19.1.1 热分析的目的

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布，并导出其他热物理参数。热分析在许多工程应用中扮演着重要的角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。通常在完成热分析后将进行结构应力分析，计算由于热膨胀或收缩而引起的热应力。

19.1.2 ANSYS中的热分析

ANSYS 热分析基于由能量守恒原理导出的热平衡方程。ANSYS 使用有限元法计算各节点的温度，并由其导出其他热物理参数。

ANSYS 可以处理所有的三种主要热传递方式：热传导、热对流及热辐射。

1. 热对流

热对流在 ANSYS 中作为一种面载荷，施加于实体或壳单元的表面。首先需要输入对流换热系数和环境流体温度，ANSYS 将计算出通过表面的热流量。如果对流换热系数依赖于温度，可以定义温度表，以及在每一个温度点处的对流换热系数。

2. 辐射

ANSYS 提供了四种方法来解决非线性的辐射问题。

- 1) 辐射杆单元 (LINK31)。
- 2) 使用含热辐射选项的表面效应单元 (SURF151-二维或 SURF152-三维)。
- 3) 在 AUX12 中，生成辐射矩阵，作为超单元参与热分析。
- 4) 使用 Radiosity 求解器方法。

3. 特殊的问题

除了前面提到的三种热传递方式外，ANSYS 热分析还可以解决一些诸如相变、内部热生成等的特殊问题。例如，可使用热质点单元 MASS71 模拟随温度变化的内部热生成。

19.1.3 热分析的类型

ANSYS 支持如下两种类型的热分析。

- 1) 稳态热分析用于确定在稳态条件下的温度分布及其他热特性。
- 2) 瞬态热分析用于计算在随时间变化的条件下，温度的分布和热特性。

19.1.4 耦合场分析

ANSYS 中可与热分析进行耦合的方式有热-结构、热-电磁等。耦合场分析可以使用 ANSYS 中的矩阵耦合单元，或者在独立的物理环境中使用顺序载荷耦合。

19.2 基础知识

19.2.1 符号与单位

表 19-1 给出了热分析中的符号和单位。

表 19-1 热分析中的单位

项 目	国际单位	ANSYS 代号
长度	m	
时间	s	
质量	kg	
温度	℃	TEMP
力	N	
能量(热量)	J	
功率(热流率)	W	HEAT
热流密度	W/m ²	HFLUX
生热速率	W/m ³	HGEN
导热系数	W/m · K	KXX
对流系数	W/m ² · K	HF
密度	Kg/m ³	DENS
比热	J/kg · K	C
焓	J/m ³	ENTH

19.2.2 热分析经典理论回顾

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律。

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）：

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \tag{19-1}$$

式中， Q 为热量。 W 为做功； ΔU 为系统内能； ΔKE 为系统动能； ΔPE 为系统势能。

对大多数工程传热问题， $\Delta KE = \Delta PE = 0$ 。

通常不考虑做功， $W = 0$ ，则 $Q = \Delta U$ 。

对于稳态热分析， $Q = \Delta U = 0$ 即流入的热量等于流出的热量。

对于瞬态热分析， $q = \frac{dU}{dt}$ 即流入、流出的热传递速率等于系统内能的变化。



19.2.3 热传递的方式

1. 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅里叶定律： $q^n = -k \frac{dT}{dx}$ ，式中， q^n 为热流密度 (W/m^2)， k 为导热系数 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)，负号表示热量流向温度降低的方向。

2. 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述：

$$q^n = h(T_s - T_b) \quad (19-2)$$

式中， h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等）， T_s 为固体表面的温度， T_b 为周围流体的温度。

3. 热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的能量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量就越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬—波尔兹曼方程来计算：

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (19-3)$$

式中， q 为热流率； ε 为辐射率（黑度）， σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数，约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ； A_1 为辐射面 1 的面积； F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数； T_1 为辐射面 1 的绝对温度； T_2 为辐射面 2 的绝对温度，由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

19.2.4 稳态热分析

如果系统的净流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量： $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$ ，则系统热稳态。在稳态热分析中，任意节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）：

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (19-4)$$

式中， $[K]$ 为传导矩阵，包含热系数、对流系数及辐射和形状系数； $\{T\}$ 为节点温度向量； $\{Q\}$ 为节点热流率向量，包括热生成。

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 及 $\{Q\}$ 。

19.2.5 瞬态热分析

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热

边界条件以及系统内能随时间有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态传热可以表达为（以矩阵形式表示）：

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (19-5)$$

式中， $[K]$ 为传导矩阵，包含热系数、对流系数及辐射和形状系数； $[C]$ 为比热矩阵，考虑系统内能的增加； $[T]$ 为节点温度向量； $\dot{T}$ 为温度对时间的导数； $\{Q\}$ 为节点热流率向量，包括热生成。

19.2.6 热辐射

1. 热辐射计算公式

热辐射是一种通过电磁波传递热能的方式。电磁波以光的速度进行传递，而能量传递与辐射物体之间的介质无关。热辐射只在电磁波的频谱中占小部分的带宽。由于辐射产生的热流与物体表面的绝对温度的四次方成正比，因此热辐射有限元分析是高度非线性的。物体表面的辐射遵循 Stefan-Boltzmann 定律：

$$q/A = \sigma T^4 \quad (19-6)$$

式中， T 为物体表面的绝对温度； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数，公制为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。

2. 辐射分析中用到的一些术语的定义

1) 黑体：被定义为在任意温度下，吸收并发射最大的辐射能的物体；通常的物体为“灰体”，即 $\varepsilon < 1$ ；在某些情况下，辐射率（黑度）随温度变化。

2) 辐射率（黑度）：物体表面的辐射率（黑度）定义为物体表面辐射的热量与黑体在同一表面辐射热量之比。

$$\varepsilon = q/q_0 \quad (19-7)$$

式中， ε 为辐射率（黑度）； q 为物体表面辐射热量； q_0 为黑体在同一表面辐射的热量。

3) 形状系数：用于计算两个面之间的辐射热交换，在 ANSYS 中，可以用隐藏/非隐藏的方法计算二维和三维问题，或者用半立方的方法来计算三维问题。

表面 I 与表面 J 之间的形状系数为：

$$F_{II} = \frac{\text{表面}J\text{接受的由表面}I\text{发出的辐射能}}{\text{由表面}I\text{发出的辐射能}} \quad (19-8)$$

形状系数是关于表面面积、面的取向及面间距离的函数。

4) 辐射对：在辐射问题中，辐射对由一些相互之间存在辐射的面组成，可以是开放的或是闭合的。在 ANSYS 中，可以定义多个辐射对，它们相互之间也可以存在辐射。ANSYS 使用辐射对来计算一个辐射对中各面间的形状系数；每一个开放的辐射对都可以定义自己的环境温度，或是向周围环境辐射的空间节点。

5) Radiosity 求解器：当所有面上的温度已知时，Radiosity 求解器方法通过计算每一个面上的辐射热流来得到辐射体之间的热交换。而面上的热流为接下来的热传导分析提供了有限元模型的边界条件。重复上面的过程，就会由于新的时间步或新的迭代循环而得到新的热流边界条件，从而计算出新的温度分布。在计算中使用的每个表面的温度必须是均匀的，这



样才能满足辐射模型的条件。

19.2.7 线性与非线性

如果有下列情况产生，则为非线性热分析。

- 材料热性能随温度变化，如 $K(T)$ ， $C(T)$ 等。
- 边界条件随温度变化。
- 含有非线性单元。
- 考虑辐射传热。

非线性热分析的热平衡方程为：

$$[C(T)]\{\dot{T}\}+[K(T)][T]=\{Q(T)\} \quad (19-9)$$

19.2.8 边界条件和初始条件

ANSYS 热分析的边界条件或初始条件可分为七种：温度，热流率、热流密度、对流、辐射、绝热、生热。

19.2.9 热分析误差估计

热分析误差估计仅用于评估由于网格密度不够带来的误差，仅适用于 SOLID 或 SHELL 的热单元。热分析误差估计基于单元边界的热流密度的不连续。通过使用自适应网格划分可对误差进行控制。

19.3 稳态热分析

19.3.1 稳态热分析的概念

稳态热分析用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析之前进行稳态热分析，以确定初始温度分布。也可以在所有瞬态效应消失后，将稳态热分析作为瞬态热分析的最后一步进行分析。稳态热分析可以计算确定由于不随时间变化的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。稳态热分析可用于材料属性固定不变的线性问题和材料性质随温度变化的非线性问题。事实上，大多数材料的热性能都随温度变化，因此在通常情况下，热分析都是非线性的。当然，如果在分析中考虑辐射，则分析也是非线性的。

19.3.2 热分析的单元

ANSYS 和 ANSYS/Professional 中大约有 40 种单元有助于进行稳态分析。这些热分析单元主要如下表 19-2～表 19-7 所示。

表 19-2 二维实体单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
PLANE35	二维	六节点三角形单元	温度（每个节点）
PLANE55	二维	四节点四边形单元	温度（每个节点）

(续)

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
PLANE75	二维	四节点谐单元	温度 (每个节点)
PLANE77	二维	八节点四边形单元	温度 (每个节点)
PLANE78	二维	八节点谐单元	温度 (每个节点)

表 19-3 三维实体单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
SOLID70	三维	八节点六面体单元	温度 (每个节点)
SOLID87	三维	十节点四面体单元	温度 (每个节点)
SOLID90	三维	二十节点六单元	温度 (每个节点)

表 19-4 辐射连接单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
LINK31	二维或三维	二节点线单元	温度 (每个节点)

表 19-5 传导杆单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
LINK32	二维	二节点线单元	温度 (每个节点)
LINK33	三维	二节点线单元	温度 (每个节点)

表 19-6 对流连接单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
LINK34	三维	二节点线单元	温度 (每个节点)

表 19-7 壳单元

单 元	维 数	形状及特点	自 由 度
SHELL57	三维	四节点四边形单元	温度 (每个节点)
SHELL131	三维	四节点四边形单元	多重温度 (每个节点)
SHELL132	三维	八节点四边形单元	多重温度 (每个节点)

19.3.3 稳态热分析的步骤

ANSYS 热分析包含如下三个主要步骤。

①前处理：建模；②求解：施加载荷并求解；③后处理：查看结果。

以下内容将讲述如何执行上面的步骤。

19.3.4 建模

建立一个模型的内容包括：首先为分析指定工作名和标题；然后在前处理器（PREP7）中定义单元类型、单元实常数、材料属性以及建立几何实体。



(1) 定义单元类型

命令: ET

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

(2) 定义固定材料属性

命令: MP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models | Thermal

(3) 定义温度相关的材料属性

首先要定义温度表, 然后定义对应的材料属性值。可以通过下面的方法定义温度表。

命令: MPTEMP 或 MPTEGN

然后定义对应的材料属性, 使用 MPDATA。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models | Thermal

对于温度相关的对流换热系数也是通过上述的 GUI 路径和命令来定义的。

注意: 如果以多项式的形式定义了与温度相关的膜系数, 则在定义其他具有固定属性的材料之前, 必须定义一个温度表。创建几何模型及划分网格的过程。

19.3.5 施加载荷和求解

在这一步骤中, 必须指定所要进行的分析类型及其选项, 对模型施加载荷, 定义载荷选项, 最后执行求解。

1. 指定分析类型

在这一步中, 可以通过如下方式指定分析类型。

命令: ANTYPE,STATIC,NEW

GUI: Main Menu | Solution | New Analysis | Steady-state (static)

2. 施加载荷

可以直接在实体模型或有限元模型上施加载荷和边界条件, 这些载荷和边界条件可以是单值的, 也可以用表格或函数的方式来定义复杂的边界条件。

(1) 恒定的温度 (TEMP)

恒定的温度通常作为自由度约束施加于温度已知的边界上。

(2) 热流率 (HEAT)

热流率作为节点集中载荷, 主要用于线单元模型中, 而这些线单元模型通常不能直接施加对流和热流密度载荷。如果输入的值为正, 表示热流流入节点, 即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上, 则温度约束条件优先。对于 SHELL131 和 SHELL132 单元, 设置 KEYOPT (3) = 0 或 1, 则可以使用 HTOP 代替 HEAT 在节点处定义载荷。

注意: 如果在实体单元的某一节点上施加热流率, 则此节点周围的单元应该密一些; 特别是与该节点相连的单元的导热系数差别很大时, 尤其要注意, 不然可能会得到异常的温度值。因此, 只要有可能, 都应该使用热生成率或热流密度边界条件, 这些热载荷即使是在网格较为粗糙的时候都能得到较好的结果。

(3) 对流 (CONV)

对流边界条件作为面载施加于分析模型的外表面上，用于计算与模型周围流体介质的热交换，它仅可施加于实体和壳模型上。对于线单元模型，可以通过对流杆单元 LINK34 来定义对流。

(4) 热流密度 (HFLUX)

热流密度也是一种面载荷。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOTRAN CFD 的计算可得到时，可以在模型相应的外表面或表面效应单元上施加热流密度。如果输入的值为正，表示热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。单元的表面可以施加热流密度，也可以施加对流，但 ANSYS 仅读取最后施加的面载进行计算。

(5) 热生成率 (HGEN)

热生成率作为体载施加于单元上，可以模拟单元内的热生成，比如化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。表 19-8 总结了在热分析中的载荷类型。

表 19-8 热载荷类型

载 荷 类 型	类 别	命 令	GUI 路 径
温度(TEMP)	约束	D	Main Menu Solution Define Loads Apply Thermal Temperature
热流率(HEAT)	力	F	Main Menu Solution Define Loads Apply Thermal Heat Flow
对流(CONV), 热流密度(HFLUX)	面载荷	SF	Main Menu Solution Define Loads Apply Thermal Convection Main Menu Solution Define Loads Apply Thermal Heat Flux
热生成率(HGEN)	体载荷	BF	Main Menu Solution Define Loads Apply Thermal Heat Generat

3. 采用表格和函数施加边界条件

除了一般使用表格来定义边界条件的方法外，下面讨论热分析中特有的一些问题，对单元类型没有特别的限制。表 19-9 列出了热分析中能够用于每一种边界条件的自变量。

表 19-9 载荷边界条件及其自变量

热边界条件	命 令 族	自 变 量
固定温度	D	TIME, X, Y, Z
热流	F	TIME, X, Y, Z, TEMP
对流换热系数(对流)	SF	TIME, X, Y, Z, TEMP, VELOCITY
环境温度(对流)	SF	TIME, X, Y, Z
热流密度	SF	TIME, X, Y, Z, TEMP
热生成	BF	TIME, X, Y, Z, TEMP
流体单元(FLUID116) 边界条件		
流率	SFE	TIME
压力	D	TIME, X, Y, Z

为了使用更加灵活的热传导系数，可以使用函数的方式来定义边界条件。除了上述自变量外，函数边界条件还可以用下面的参数作为函数的自变量。

表面温度 (TS)；密度 (ρ)；材料属性 (DENS)；比热 (材料属性 C)；导热率 (材料属性 KXX)；导热率 (材料属性 KYY)；导热率 (材料属性 KZZ)；粘度 (材料属性 μ)；



辐射率（材料属性 ϵ ）。

4. 定义载荷步选项

对于一个热分析，可以确定通用选项、非线性选项以及输出控制。表 19-10 列出了热分析中可能用到的载荷步选项。

表 19-10 确定载荷步选项

选 项	命 令	GUI 路径
通用选项		
时间	TIME	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time-Time Step
时间步数	NSUBST	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time and Substps
时间步长	DELTIM	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time-Time Step
阶跃或斜坡加载	KBC	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time-Time Step
非线性选项		
最大平衡迭代数	NEQIT	Main Menu Solution Load Step Opts Nonlinear Equilibrium Iter
自动时间步长	AUTOTS	Main Menu Solution Load Step Opts Time/Frequenc Time-Time Step
收敛容差	CNVTOL	Main Menu Solution Load Step Opts Nonlinear Convergence Crit
求解中断选项	NCNV	Main Menu Solution Load Step Opts Nonlinear Criteria to Stop
线性搜索选项	LNSRCH	Main Menu Solution Load Step Opts Nonlinear Line Search
预测-矫正因子	PRED	Main Menu Solution Load Step Opts Nonlinear Predictor
输出控制选项		
打印输出	OUTPR	Main Menu Solution Load Step Opts Output Ctrl \Solu Printout
数据库和结果文件输出	OUTRES	Main Menu Solution Load Step Opts \Output Ctrl DB/Results File
结果外插	ERESX	Main Menu Solution Load Step Opts \Output Ctrl Integration Pt

5. 通用选项

(1) 时间选项

该选项定义载荷步的结束时间，虽然对于稳态热分析来说，时间选项并没有实际的物理意义，但它提供了一个方便的设置载荷步和载荷子步的方法。

默认情况下，第一个载荷步结束的时间是 1.0，此后的载荷步对应的时间逐次增加 1.0。

(2) 每载荷步中子步的数量或时间步大小

对于非线性分析，每一载荷步需要多个子步。默认情况下每个载荷步有一个子步。

(3) 阶跃或斜坡加载

如果定义阶跃载荷，则载荷值在这个载荷步内保持不变；如果为斜坡加载，则载荷值在当前载荷步的每一个子步内线性变化。

6. 非线性选项

如果存在非线性，则需要定义非线性载荷步选项。

(1) 平衡迭代次数

本选项设置每一子步允许的最大迭代次数，默认值为 25，对大多数非线性热分析问题已经足够。

(2) 自动时间步长

对于非线性问题，可以自动设定子步间载荷的增量，保证求解的稳定性和准确性。

(3) 收敛容差

只要运算满足所说明的收敛判据, 程序就认为它收敛, 收敛判据可以基于温度, 也可以是热流率, 或二者都有。在实际定义时, 需要说明一个典型值 (CNVTOL 命令的 VALUE 域) 和收敛容差 (TOLER 域), 程序将 $VALUE \times TOLER$ 的值视为收敛判据。例如, 说明温度的典型值为 500, 容差为 0.001, 那么收敛判据则为 0.5°C 。

对于温度, ANSYS 将连续两次平衡迭代之间节点上温度的变化量 ($\Delta T = T_i - T_{i-1}$) 与收敛准则进行比较来判断是否收敛。就上面的例子来说, 如果在某两次平衡迭代间, 每个节点的温度变化都小于 0.5°C , 则认为求解收敛。

对于热流率, ANSYS 比较不平衡载荷矢量与收敛标准。不平衡载荷矢量表示所施加的热流与内部 (计算) 热流之间的差值。ANSYS 公司推荐 VALUE 值由默认确定, TOLER 的值默认为 $1.0\text{E-}3$ 。

(4) 求解结束选项

假如在规定平衡迭代数内, 其解并不收敛, 那么 ANSYS 程序会根据用户设置的终止选项, 来决定程序停止计算或是继续进行下一个载荷步。

(5) 线性搜索

设置本选项可使 ANSYS 用牛顿-拉普森方法进行线性搜索

(6) 预测矫正

本选项在每一子步的第一次迭代时, 对自由度求解进行预测矫正。

(7) 进行非线性热分析时, ANSYS 在每次平衡迭代完成后, 都计算收敛范数, 并与相应的收敛标准比较。不管是使用在批处理还是交互式的方法, 都可以在计算过程中, 使用图形求解跟踪 (GST) 来显示计算的收敛范数和收敛标准。在交互式时, 默认为图形求解跟踪 (GST) 打开, 批处理运行时, 默认为 GST 关闭。使用下面的方法, 可打开或关闭 GST。

命令: /GST

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | Grph Solu Track

7. 输出控制

(1) 控制打印输出

本选项控制将何种结果数据输出到打印输出文件 (jobname.out) 中。

(2) 控制数据库和结果文件输出

该选项控制将何种结果数据输出到结果文件 (jobname.rth) 中。

(3) 外推结果

该选项可将单元积分点结果复制到节点上, 而不是按常规的方式外推到节点上 (默认采用外推方式)。

8. 定义求解选项

(1) 可考虑的求解选项

牛顿-拉普森选项。该选项仅对非线性分析有用, 用以定义在求解过程中切线矩阵的更新频率, 有如下四种选择。

1) Program-chosen (程序选择此为默认值, 在热分析中建议采用)。

2) Full (完全法)。

3) Modified (修正法)。



4) Initial Stiffness (初始刚度法)。

注意：对于单物理场非线性热分析，ANSYS 通常采用全牛顿-拉普森算法。

要定义该选项，或打开/关闭牛顿-拉普森自适应下降功能（只对全牛顿-拉普森法有效），方法如下。

命令：NROPT

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

(2) 选择求解器

命令：EQSLV

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

注意：对于不含超单元的热分析模型，可选用快速求解（Iterative）求解器，但对于含相变的传热问题，则不建议采用（可用 sparse 或 frontal 求解器）。该求解器在计算过程中不生成 Jobname.EMAT 和 Jobname.EROT 文件。

(3) 定义温度偏移

温度偏移为当前所采用温度系统的零度与绝对零度之间的差值。温度偏移包含在相关单元计算中。偏移温度输入可以是摄氏度，也可以是华氏度，在进行热辐射分析时，要将目前的温度值换算为绝对温度。如果使用的温度单位是摄氏度，此值应设定为 273；如果使用的是华氏度，则为 460。在后处理中，不同的温度可以用同样的方法进行处理。设置温度偏移的方式如下。

命令：TOFFST

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

9. 保存模型

在完成了加载和指定分析类型后，通常建议保存数据库文件，以备在求解过程中由于计算机系统故障而导致数据丢失后能够恢复数据。

命令：SAVE

GUI: 单击 ANSYS 工具条 SAVE_DB

10. 求解

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

19.3.6 后处理

ANSYS 将热分析的结果写入热结果文件 jobname.rth 中，该文件包含如下数据。

- 基本数据：节点温度。
- 导出数据：节点及单元的热流密度（TFX, TFY, TFZ, TFSUM）；节点及单元的热梯度（TGX, TGY, TGZ, TGSUM）；单元热流率；节点的反作用热流率。可以用通用后处理器 POST1 进行后处理，具体的操作方法参见后处理一章。

注意：在通用后处理器中查看结果时，数据库必须与结果有相同的模型。此外，结果文

件 jobname.rth 必须可用。

19.4 瞬态热分析

19.4.1 瞬态热分析的定义

瞬态热分析用于计算一个系统随时间变化的温度场及其他热参数。在工程上一般用瞬态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。许多传热应用-热处理问题（喷管，引擎堵塞，管路系统，压力容器等）都包含瞬态热分析。

瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似。主要的区别是，瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。为了表达随时间变化的载荷，可使用提供的函数工具描述载荷-时间曲线并将该函数作为载荷施加，或将载荷-时间曲线分为载荷步。载荷-时间曲线中的每一个拐点为一个载荷步，如图 19-1 所示。

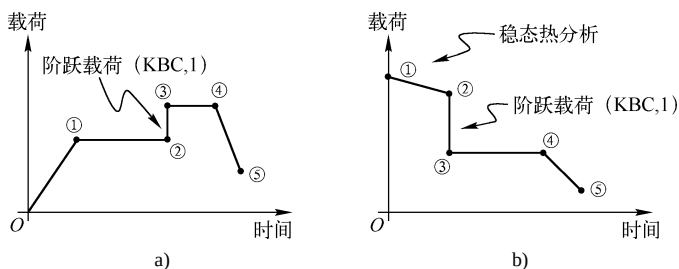


图 19-1 用载荷步定义时变载荷

a) 载荷-时间曲线 1 b) 载荷-时间曲线 2

对于每一个载荷步，必须定义载荷值及时间值，同时还需定义其他载荷步选项，如载荷步为渐变或阶跃、自动时间步长等，定义完一个载荷步的所有信息后，将其写为载荷步文件，最后利用载荷步文件统一求解。

19.4.2 瞬态热分析中使用的单元和命令

瞬态热分析中使用的单元与稳态热分析相同。

19.4.3 瞬态热分析的步骤

瞬态热分析的步骤为：①建模；②施加载荷并求解；③在后处理中查看结果。

以下内容将讲述瞬态分析的基本步骤，由于并不是每个瞬态分析的过程都一致，因此本书先对整个过程进行了一般的讲解，再进行实例的分析。

19.4.4 建模

要建立一个模型首先应为分析指定工作名和标题。如果运行的是 GUI，可以在 Main Menu | Preferences 中对菜单进行过滤。然后进入前处理器（PREP7）完成以下工作：定义单元类型；定义需要的单元实常数；定义材料属性；建立几何实体；划分网格。



19.4.5 施加载荷和求解

1. 指定分析类型

在这一步中，可以通过如下方法指定分析类型：

命令：ANTYPE,TRANSIENT,NEW

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis | Transient.

2. 为分析建立初始条件

瞬态热分析的初始条件来自于对应的一个稳态计算结果，或者直接为所有节点设定初始温度。

(1) 设置均匀的初始温度

如果已知模型起始时的环境温度，可用下面的方法来设定所有节点的初始温度。

命令：TUNIF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Settings | Uniform Temp

如果不在对话框中输入数据，则默认为参考温度，参考温度的默认值为零，可以通过如下方法设定参考温度。

命令：TREF

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Settings | Reference Temp

注意：设定均匀的初始温度，与下面的设定节点温度（自由度）不同。

命令：D

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature |

On Nodes

初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效；而设定节点温度将使节点温度在整个瞬态分析过程中等于指定值，除非通过下列方法删除此约束。

命令：DDELE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Delete | Thermal | Temperature |

On Nodes

(2) 设置非均匀的初始温度

在瞬态热分析中，可以指定一个和一组初始温度不均匀的节点，方法如下。

命令：IC

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define

还可以对某些节点设定非均匀的初始温度，同时再设定其他节点的初始温度为均匀初始温度。要做到这点，只需要在为选择的节点定义不均匀温度之前，先定义均匀的温度即可。

用以下命令可显示具有非均匀初始温度的节点。

命令：ICLIST

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | List

Picked

如果初始温度场是不均匀的且又是未知的，就必须首先进行稳态热分析来确定初始条件，步骤如下。

1) 指定相应的稳态分析载荷, 如温度约束, 对流换热等。

2) 关闭瞬态效应。

命令: TIMINT, OFF, THERRM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time

Integration

3) 定义较小的一个时间值 (如: 1E-6 秒)。

命令: TIME

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time

Step

4) 定义斜坡或阶越载荷, 如果使用斜坡载荷, 则就必须考虑相应的时间内产生的温度梯度效应。

命令: KBC

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time

Step

5) 写载荷步文件。

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Write LS Fil

对于第二个载荷步, 要记住删除所有固定温度边界条件, 除非能够判断哪些节点上的温度确实在整个瞬态分析过程中都保持不变。同时, 记住执行 TIMINT,ON,THERM 命令以打开瞬态效应。

3. 设置载荷步选项

(1) 设置时间步的策略

对于瞬态热分析, 既可以用多个载荷步完成, 也可以只用一个载荷步、采用表格边界条件并由一个数组参数定义时间点。表格边界条件方式仅适用于传热单元、热电单元、热表面效应单元、热流体单元以及这些类型单元的部分组合。

1) 如果采用载荷步的方法, 则按下述步骤进行。

① 设定每一载荷步结束时的时间。

命令: TIME

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time

Step

② 设定载荷变化方式。如果载荷在这个载荷步是恒定的, 需要设为阶跃选项; 如果载荷值随时间线性变化, 则要设定为渐变选项。

命令: KBC

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time

Step

③ 定义在本载荷步结束时的载荷数值。

④ 将载荷步信息写入载荷步文件。

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Write LS File



⑤ 对于其他载荷步,重复步骤①~④即可,直到所有的载荷都已经写入到载荷步文件中。如要删除部分载荷(非温度约束),最好将其设置为在一个微小的时间段中值变为零,而不是直接删除。

2) 如果采用表格参数定义载荷,则按如下步骤进行。

① 用 **TABLE** 类型的数组参数定义载荷特性(例如,载荷与时间的关系)。

② 打开自动时间步长功能(**AUTOTS,ON**),定义时间步长(**DELTIM**)或子步数。

③ 定义时间步重置选项。可以选择在求解中不重置时间步,或基于一个已定义好的时间数组重置时间步,或基于一个新的关键时间数组重置时间步。

命令: **TSRES**

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time-Time Step

如果选择用新数组并交互时运行,此时程序要求填写一个 $n \times 1$ 的关键时间数组。如果以批处理方式运行,则必须在执行 **TSRES** 命令之前定义一个数组,其将时间步重置为由 **DELTIM** 或 **NSUBST** 命令定义的初始值。如果在应用时间步重置数组(**TSRES** 命令)的同时又采用了另外的时间值数组,则需确认:如果 **FREQ** 数组的时间值比在 **TSRES** 数组中所对应的最接近的时间值大,则大的数值至少应由 **DELTIM** 或 **NSUBST** 命令定义的初始时间步增量。

注意: **TSRES** 命令只有在设置了 **AUTOTS,ON** 的情况下才有效,如果采用固定时间步长(**AUTOTS,OFF**),则 **TRES** 被忽略。

定义关键时间数组的方式如下。

命令: ***DIM**

GUI: Utility Menu | Parameters | Array Parameters | Define/Edit

在关键时间数组中,时间值必须是升序排列的,并且不能超过由 **TIME** 命令定义的载荷步结束时间。在求解过程中,时间步可能会在数组定义的关键时刻点被重置。重置的大小基于命令 **DELTIM,DTIME** 或 **NSUBST,NSBSTP** 设置的初始时间步尺寸或子步数。

④ 用一个与关键时间数组类似的 $n \times 1$ 数组参数来指定将哪些时刻的计算结果写入结果文件。如果是交互式运行程序,可在此时创建一个数组或采用已有数组,如果是批处理方式运行程序,则必须在 **OUTRES** 命令之前定义该数组。

命令: **OUTRES**

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl's | DB/Results File

(2) 通用选项

1) 求解控制选项。该选项打开或关闭 **ANSYS** 内部的求解控制功能,如果打开,则用户通常只需定义子步数(**NSUBST**)或时间步长(**DELTIM**),以及载荷步结束时间(**TIME**),其他的求解控制命令将由程序自动设置为其最佳值。

命令: **SOLCONTROL**

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls

2) 时间选项

该选项定义载荷步的结束时间,默认情况下,第一个载荷步结束的时间是 1.0,此后的载荷步对应的时间将逐次加 1.0。

命令: TIME

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time and Substps

3) 每载荷步中子步的数量或时间步大小

对于非线性分析, 每一载荷步需要多个子步。默认情况下每个载荷步有一个子步。对于瞬态分析, 在热梯度较大的区域, 热流方向的最大单元尺寸和能够得到好结果的最小时间步长有一个关系。在时间步保持不变的时候, 更多的单元通常会得到更好的结果; 但是, 在网格尺寸不变的时候, 子步越多, 结果反而会变得越差。当采用自动时间步和带中间节点的二次单元时, ANSYS 建议用户根据输入的载荷来控制最大的时间步长, 根据下面的关系来定义最小的时间步长:

$$ITS = \Delta^2 / 4\alpha \quad (19-10)$$

其中, Δ 为在热梯度最大处沿热流方向的单元长度; α 为扩散率, 它等于导热系数除以密度与比热的乘积 ($\alpha = k / (\rho \times c)$)。当采用有中间节点的单元时, 如果违反上述关系式, ANSYS 的计算会出现不希望的振荡, 计算出的温度会在物理上超出可能的范围。如果不采用带中间节点的单元, 则一般不会计算出振荡的温度分布, 那么上述建议的最小时间步长就有些保守。

注意: 不要采用特别小的时间步长, 特别是当建立初始条件时。在 ANSYS 中, 很小的数值可能导致计算错误。例如, 当一个问题时间量级为 10^{-2} 的时候, 时间步长为 1×10^{-10} 时就可能产生数值错误。

命令: NSUBST 或 DELTIM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time Step

4. 非线性选项

(1) 非线性热分析求解选项对于单场非线性热分析, ANSYS 允许三种求解选项: FULL 选项对应于默认的全 N-R 算法; Quasi 选项对应于在非线性热问题求解过程中有选择性地重构热矩阵, 只有当非线性材料的性质改变量较大时, 才重构热矩阵, 该选项在时间步间不执行平衡迭代, 材料性质根据载荷步开始时的温度来确定; Linear 选项只在每个载荷步的第一个时间步构建一个热矩阵, 它只适用于进行快速求解以得到一个近似的结果。

在 ANSYS 中, 这些选项可通过 THOPT 命令来选择, Quasi 和 Linear 选项直接生成总体热矩阵, 只有 ICCG 和 JCG 求解器支持这种求解, 可用 EQSLV 命令选择这些求解器。

对于 Quasi 求解选项, 必须定义用于矩阵重构的材料参数改变容差, 默认的容差为 0.05, 对应于材料参数变化 5%。Quasi 选项设置一个单一的固定材料表以及在最高和最低温度之间等分的温度指针, 用以计算随温度变化的材料性质。因此, 采用该选项时, 必须为固定材料表定义温度指针数以及最高和最低温度。还可用 THOPT 命令定义其他非线性载荷选项。

命令: THOPT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options



(2) 非线性载荷步选项及参数

只有存在非线性时，才需要定义如下几种非线性载荷步选项及参数

1) 平衡迭代次数。此选项设置每一子步允许的最大迭代次数，默认值为 25，对大多数非线性热分析问题已经足够。如果打开求解控制 (SOLCONTROL,ON)，则默认的迭代数介于 15~26 之间，根据具体的物理问题而变化。

命令: NEQIT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Equilibrium Iter

2) 自动时间步长。此选项自动时间步长在瞬态分析中也称为的时间步优化。它使程序自动确定子步间的载荷增量。同时，它根据分析模型的响应情况，自动增、减时间步大小。在瞬态分析中，响应检测基于热特征值。对于 THOPT, Quasi 选项，时间步的修正也基于求解过程中的材料参数变化情况。如果特征值小，就采用大的时间步，反之亦然。在确定下一时间步长时，上一时间步中所进行的平衡迭代数量也是要依据之一，同时也要考虑非线性单元的状态变化。

① 设置积分时间步长的上下限，上下限。

命令: NSUBST 或 DELTIM

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/ Frequenc | Time-Time Step

② 设置自动时间步选项。

命令: AUTOTS

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

③ 调整自动时间步长中的默认参数值。

命令: TINTP

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration

时间积分效应: 该选项决定了是否包括结构惯性力，热容之类的瞬态效应。

④ 指定时间积分效应:

命令: TIMINT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration

注意: 在瞬态分析时，时间积分效应默认是打开的，如果将其设为 OFF，ANSYS 将进行稳态分析。

3) 瞬态积分参数。此参数控制时间积分方案的性质并设定自动时间步长控制标准。为尽量减小计算结果中的误差，可将此参数 (THETA 值) 设为 1。

命令: TIMINT

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration

对收敛容差、求解结束、线性搜索，预测一矫正等选项的设置参见本书第 3 章。输出控

制和求解与稳态的方法一致。

19.4.6 后处理

ANSYS 提供两种后处理方式：通用后处理（POST1）和时间历程后处理（POST26）。时间历程后处理器 POST26 对随时间变化的变量进行操作，ANSYS 为每一个变量安排一个编号，第一个编号固定为时间。在时间历程后处理中首先要定义变量。

19.4.7 相变问题

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，例如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态问题，典型的相变应用有如下两种。

- 金属浇铸：确定相变过程中不同点处的温度分布、相变发生的时间长度。
- 合金生产：由化学差异而不是物理差异导致相变。

相变问题是一个非线性的瞬态热分析，线性的瞬态热分析与非线性的瞬态热分析之间唯一的不同是需要考虑潜热，即在相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑潜热，如图 19-2 所示。

焓的单位是 J/m^3 ，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (19-11)$$

求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON，以使程序在相变前、相变中、相变后自动调整时间步长。

选用低阶的热单元，例如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，请利用相应的单元选项设置“Diagonalized Specific heat matrix”（对于低阶单元，这是默认值）。

在设定瞬态积分参数时，请将 THETA 值设置为 1（默认为 0.5），以便使瞬态时间积分采用欧拉向后差分算法。

命令：TINTP

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration | Newmark Parameters

线性搜索将有助于加速相变问题的求解。

命令：LNSRCH

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Line Search

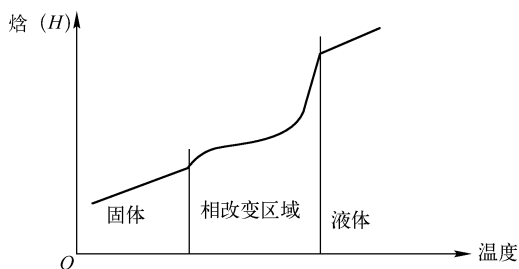


图 19-2 材料的焓随温度的变化

19.5 表面效应单元

19.5.1 简介

表面效应单元类似一层皮肤，覆盖在实体单元的表面。它利用实体表面的节点形成单



元。因此，表面效应单元不增加节点数量（孤立节点除外），只增加单元数量。ANSYS 中热分析专用的表面效应单元为 SURF151（二维）及 SRUF152（三维）。

19.5.2 表面效应单元的应用

利用表面效应单元可更加灵活地定义表面热载荷。

当热流密度和热对流边界条件同时施加于同一表面时，必须将其中一个施加于实体单元表面，另一个施加在表面效应单元。建议将热对流边界施加于表面效应单元。

可将热对流边界条件中的流体温度施加于孤立节点上，将对流系数施加于表面单元，这样可更灵活地控制对流载荷。当对流系数随温度变化时，表面效应单元可提供设置计算对流系数的选项。表面效应单元还可以用于模拟点与面的辐射传热。

19.5.3 设置表面效应单元

SURF151 是单元可用于多种载荷和表面效应的应用。可以覆盖在任何二维热实体单元的表面。该单元可用于二维热分析，多种载荷和表面效应可以同时存在。SURF151 单元有 2 到 4 个节点，如考虑对流传热和辐射的影响，需要定义一个外部节点。传热量和热对流量以表面载荷的形式施加在单元上。

SURF152 是三维热表面效应单元，可用于多种载荷和表面效应的应用。它可以覆盖在任何三维热单元的表面，该单元可用于三维热分析。该单元中多种载荷和表面效应可以同时存在。

1. 单元关键字

1) 中间节点。Include: Keyopt (4) =0; Exclude: Keyopt (4) =1, 如果实体单元为带中间节点的单元（如 Solid90），则设为 Include，否则为 Exclude。

2) 是否有孤立节点。Exclude: Keyopt (5) =0。Include: Keyopt (5) =1。如果在表面效应单元上施加热流密度，则为 Exclude；如果在表面效应单元上施加热对流，则可为 Exclude，也可为 Include。如果有孤立节点，则对流系数施加在表面效应单元上，流体温度施加在孤立节点上。如果无孤立节点，则对流系数和流体温度都施加在表面效应单元上。

3) 热流密度或对流边界条件。忽略热流密度和对流边界条件：Keyopt (8) =0；施加热流密度，忽略对流。Keyopt (8) =1。根据平均温度（壁面与流体） $(TS+TB)/2$ ，计算对流系数：Keyopt (8) =2。根据固体表面温度 TS，计算对流系数：Keyopt (8) =3。根据流体温度 TB，计算对流系数：Keyopt (8) =4。根据固体表面与流体温差 $|TB-TS|$ ，计算对流系数：Keyopt (8) =5。

4) 设置单元行为：平面模型设置 Keyopt (3) =0。轴对称模型设置 Keyopt (8) =4。带厚度的平面模型设置：Keyopt (8) =4。

2. 单元的实常数

使用表面效应单元施加对流或热流密度边界条件，一般不需要定义实常数。面内厚度在表面效应单元的每个角节点默认为 1。只有当生成的热载荷施加于表面效应单元时，厚度才有作用，因为生成的热基于单元体积。其他实常数，在辐射热分析或结构分析时设置。

3. 单元的材料属性

使用表面效应单元施加对流或热流密度边界条件，一般不需要定义材料属性，但有一例

外：对流系数随温度变化时，最好单独设定一材料编号，定义材料的对流系数随温度变化的表。在表面单元上施加对流边界时输入负号及材料编号（例如“-3”），其他材料属性在辐射或结构分析时设置。

19.5.4 创建表面效应单元

1. 创建无孤立节点的表面效应单元

划分实体网格，设定表面效应单元的属性。

GUI: Main | Menu | Preprocessor | Meshing Attributes | Default Attribs

一般无需设定表面效应单元的材料编号，但为了选择、加载及后处理方便，最好为每组表面单元设置一个唯一的材料编号。

(1) 直接在相应的线或面上生成网格

GUI: Main | Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Lines/Area

(2) 选择要生成表面效应单元的边（二维）或面（三维）及所属节点

设定表面效应单元的属性（TYPE，MAT 等），创建表面效应单元。

GUI: Main | Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Element | Surf Effect

2. 创建带孤立节点的表面效应单元

如果在表面效应单元选项设置时，带孤立节点，Keyopt (5) =1，则：

创建孤立节点。

GUI: Main | Menu | Preprocessor | Modeling | Create | nodes

选择要创建表面效应单元的面或线，以及所属节点。

设定单元属性。

创建表面效应单元。

GUI: Main | Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Element | on free SURF

输入关键点编号，单击 OK

3. 管流单元热分析

在 ANSYS 中有三个用于管流热分析的单元：FLUID116 热管流单元；SURF1512-D 热表面单元；SURF1523-D 热表面单元。

其中，FLUID116 单元求解一维带泵送效应的泊努利方程和一维带质量传递的热传递，可与 SURF151 或 SURF152 连接模拟对流效应。它的压力、流率、温度、角速度、滑移系数可以表格化参数方式输入。主要的单元属性有流体导热系数、流体密度、流体比热、流体黏度、流体流率等。

而表面效应单元的额外节点在 FLUID116 单元上，这样用管流单元 FLUID116 上的节点温度作为对流中的流体温度，将对流系数赋予表面效应单元上，模拟流体与管壁的耦合传热。

命令：LFSUR, Sline, Tline

对组元 Sline 中包含的线划分表面效应单元，并连接表面效应单元和距离最近的管流单元。这些管流单元已经划分网格，并定义为组元 Tline。

命令：AFSUR, Sarea, Tline

对组元 Sarea 中包含的面划分表面效应单元，并连接表面效应单元和距离最近的管流单



元。这些管流单元同样已经划分网格，并定义为组元 Tline。

可用如下命令控制显示表面效应单元的额外节点。

命令: /PSYMB, XNODE, 1

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Symbols

19.6 热应力分析

当一个结构加热或冷却时，会发生膨胀或收缩。如果结构各部分之间膨胀收缩程度不同或结构的膨胀、收缩受到限制，就会产生热应力。

19.6.1 热应力分析的分类

ANSYS 提供了如下三种进行热应力分析的方法。

1) 在结构应力分析中直接定义节点的温度。如果节点的温度已知，则可以通过命令直接定义节点温度。节点温度在应力分析中作为体载荷，而不是节点自由度。

2) 间接法。首先进行热分析，然后将求得的节点温度作为体载荷施加在结构应力分析中。

3) 直接法。使用具有温度和位移自由度的耦合单元，同时得到热分析和结构应力分析的结果。

如果节点温度已知，适合第一种方法。但节点温度一般是不知道的。对于大多数问题，推荐使用第二种方法——间接法。因为这种方法可以使用所有热分析的功能和结构分析的功能。如果热分析是瞬态的，只需要找出温度梯度最大的时间点，并将此时间点的节点温度作为载荷施加到结构应力分析中去。如果热和结构的耦合是双向的，即热分析影响结构应力分析，同时结构变形又会影响热分析，则可以使用第三种直接法——使用耦合单元。此外只有第三种方法可以考虑其他分析领域对热和结构的影响。

19.6.2 间接法进行热应力分析的步骤

1. 进行热分析

可以使用热分析的所有功能，包括传导、对流、辐射和表面效应单元等，进行稳态或瞬态热分析。但要注意划分单元时要充分考虑结构分析的要求。例如，在有可能有应力集中的地方的网格要密一些。如果进行瞬态分析，在后处理中要找出热梯度最大的时间点或载荷步。

2. 重新进入前处理转换单元

将热单元转换为相应的结构单元，表 19-11 是热单元与结构单元的对应表。可以使用菜单进行转换。

命令: ETCHG

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Switch Elem Type

注意：设定相应的单元选项。例如热单元的轴对称不能自动转换到结构单元中，需要手工设置。在命令流中，可将原热单元的编号重新定义为结构单元，并设置相应的单元选项。

表 19-11 热单元及相应的结构单元

热单元	结构单元	热单元	结构单元
LINK32	LINK1	SOLID79	SOLID45
LINK33	LINK8	MASS71	MASS21
PLANE35	PLANE2	PLANE75	PLANE25
PLANE55	PLANE42	PLANE77	PLANE82
SHELL57	SHELL63	PLANE78	PLANE83
PLANE67	PLANE42	PLANE87	PLANE92
LINK68	LINK8	PLANE90	PLANE95

3. 设置材料属性

设置结构分析中的材料属性（包括热膨胀系数）以及前处理细节，如节点耦合、约束方程等。

4. 读入热分析中的节点温度

GUI: Solution | Load Apply | Temperature | From Thermal Analysis

输入或选择热分析的结果文件名*.rth。如果热分析是瞬态的，则还需要输入热梯度最大的时间点或载荷步。节点温度是作为体载荷施加的。

5. 设置参考温度

GUI: Main Menu | Solution | Load Setting | Reference Temp.

6. 进行求解、后处理。

具体操作可参考结构分析。

19.7 实例：多芯片组件热分析

19.7.1 工程背景

MCM（多芯片组件）作为当代先进电子组装技术，由于具有组装密度高、_连线短、体积小、重量轻、性能好等特点，受到了高度重视，并得到了迅速发展。但与此同时，它的高密度、微型化的特点也带来了一系列设计、组装技术方面的难题，其中芯片的散热问题尤为突出。因此，MCM 的热分析技术成了 MCM 可靠性设计的关键技术之一。由于电子组件结构、材料参数、组件内功率器件的分布、环境条件等，传统的数值分析方法往往无能为力。随着计算机技术的发展，利用有限元模拟的方法由于具有计算能力强、运算速度快等优点越来越得到人们的重视，本实例主要以 ANSYS 软件为例，介绍利用其对 MCM 进行热分析的实例。

19.7.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

如图 19-3 所示为 MCM 的俯视图，5 片芯片按如图所示尺寸分布于基板上，芯片采用硅材料，芯片与基板之间通过粘结剂粘合，粘合剂的厚度为 0.1mm。大芯片的尺寸为 8mm×8mm×0.7mm，周围 4 个小芯片的尺寸相等，为 4mm×4mm×0.7mm，大小芯片之间的中心距离为 10 mm。基板的尺寸为 65mm×45 mm×1.5mm。

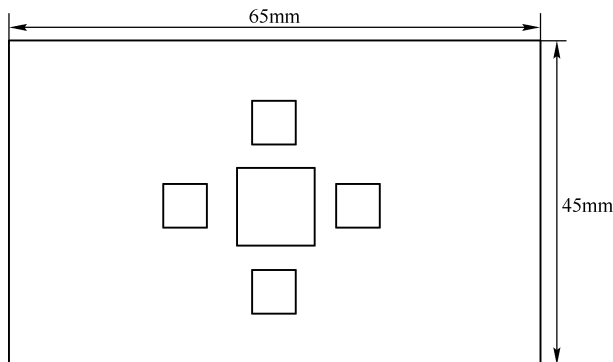


图 19-3 MCM 俯视图

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用的是适合规则长方体形状单元划分 20 节点的三维实体热单元 SOLID90。芯片的材料为硅，其热传导系数为 $80 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，粘合剂的导热系数为 $1.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，基板材料为聚酰亚胺其导热系数为 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

3. 边界条件

芯片的正常工作室温为 20°C ，热源为芯片的功耗，其中间大芯片功耗 2W ，周围 4 个小芯片功耗 0.25W 。各功率芯片的功耗在 ANSYS 中用热生成率 H_G 表示，计算公式如下：

$$H_G = \frac{P}{V} \quad (19-12)$$

式中， P 为芯片的功耗； V 为芯片的体积。内部各材料之间通过热传导进行传热，服从傅里叶传热定律；模型外部通过与对流进行散热，服从牛顿冷却定律。本实例计算空气自然对流，对流系数为 10。

19.7.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“Multi-chip module”，单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 $A1=0.06$ ，单击 Accept 完成对基板的长度的参数定义，按照此方法继续定义基板的宽度 $B1=0.04$ ，基板的厚度 $H1=0.0015$ ，大芯片的长度 $A2=0.008$ ，大芯片的宽度 $B2=0.008$ ，大芯片的厚度 $H2=0.0007$ ，粘结剂的厚度 $H4=0.0001$ ，小芯片的长度 $A3=0.004$ ，小芯片的宽度 $B3=0.004$ ，小芯片的厚度 $H3=0.0007$ ，大芯片与小芯片的中心距 $H5=0.01$ ，大芯片的功率 $P1=2$ ，小芯片的功率 $P2=0.25$ ，大芯片的体积 $V1=A2 \times B2 \times H2$ ，小芯片的体积 $V2=A3 \times B3 \times H3$ ，大芯片的生热率 $HG1=P1/V1$ ，小芯片的生热率 $HG2=P2/V2$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Thermal Solid, 然后在右边选择 Brick 20 node 90 单元, 单击 OK。

(2) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Thermal | Conductivity | Isotropic, 弹出一个输入材料热传导系数的对话框, 输入 KXX=80, 单击 OK; 继续定义材料 2 的材料常数, 单击定义材料模型行为对话框的 Material | New Model, 在弹出的对话框中输入 2, 单击 OK, 单击 Thermal | Conductivity | Isotropic, 弹出一个输入材料热传导系数的对话框, 输入 KXX=1.1, 单击 OK; 按照这种方法定义材料 3 的热传导系数为 0.2, 选择 Material | Exit, 推出面板。

4. 建立模型

(1) 建立基板模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入, $X1=-A1/2$, $X2=A1/2$, $Y1=-B1/2$, $Y2=B1/2$, $Z1=0$, $Z2=H1$, 单击 OK。

(2) 建立小芯片粘结剂模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入, $X1=-A3/2$, $X2=A3/2$, $Y1=-B3/2$, $Y2=B3/2$, $Z1=H1$, $Z2=H1+H4$, 单击 OK。

(3) 建立小芯片模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入, $X1=-A3/2$, $X2=A3/2$, $Y1=-B3/2$, $Y2=B3/2$, $Z1=H1+H4$, $Z2=H1+H4+H3$, 单击 OK。

(4) 复制小芯片粘结剂模型到指定位置

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取小芯片粘结剂, 单击 OK, 在弹出对话框中的 DY 中输入 H5, 单击 Apply; 弹出拾取对话框, 继续拾取中间位置的小芯片粘结剂, 单击 OK, 在弹出对话框的 DY 中输入 -H5, 单击 Apply; 弹出拾取对话框, 继续拾取中间位置的小芯片粘结剂, 单击 OK, 在弹出对话框的 DX 中输入 H5, 单击 OK。

(5) 把中间位置的小芯片粘结剂移动到指定位置

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取中间位置的粘结剂模型, 单击 OK, 在弹出对话框的 DX 中输入 -H5, 单击 OK。

(6) 复制小芯片模型到指定位置

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取小芯片, 单击 OK, 在弹出对话框的 DY 中输入 H5, 单击 Apply; 弹出拾取对话框, 继续拾取中间位置的小芯片, 单击 OK, 在弹出对话框的 DY 中输入 -H5, 单击 Apply; 弹出拾取对话框, 继续拾取中间位置的小芯片, 单击 OK, 在弹出对话框的 DX 中输入 H5, 单击 OK。

(7) 把中间位置的小芯片移动到指定位置





GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取中间位置的小芯片模型, 单击 OK, 在弹出对话框框的 DX 中输入 -H5, 单击 OK。

(8) 建立中间大芯片粘合剂模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入, $X1=-A2/2$, $X2=A2/2$, $Y1=-B2/2$, $Y2=B2/2$, $Z1=H1$, $Z2=H1+H4$, 单击 OK。

(9) 建立中间大芯片模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

在弹出的对话框中输入, $X1=-A2/2$, $X2=A2/2$, $Y1=-B2/2$, $Y2=B2/2$, $Z1=H1+H4$, $Z2=H1+H3+H4$, 单击 OK。

(10) 把所有体粘结到一起

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Volumes

弹出拾取对话框, 单击 Pick All, 把所有体粘结到一起。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool

(2) 划分芯片单元

1) 设置划分单元属性

选择单元属性 (Element Attributes) 选项中的 Set, 弹出网格属性对话框, 设置材料号 (Material number) 为 1。

2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 SIZE=0.002, 单击 OK。

3) 划分芯片单元

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取五个芯片, 单击 OK。

(3) 划分粘结剂单元

1) 设置划分单元属性。选择单元属性 (Element Attributes) 选项中的 Set, 弹出网格属性对话框, 设置材料号 (Material number) 为 2。

2) 设置单元尺寸。选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 SIZE=0.002, 单击 OK。

3) 划分粘结剂单元

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取 5 个粘结剂, 单击 OK。

(4) 划分基板单元

1) 设置划分单元属性。选择单元属性 (Element Attributes) 选项中的 Set, 弹出网格属性对话框, 设置材料号 (Material number) 为 3。

2) 设置智能尺寸。选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 SIZE=0.002, 单击 OK。勾选网格划分工具面板的 Smart Size, 并设置为 3。

3) 划分基板单元。选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取基板, 单击 OK。

6. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Stead-State, 含义为进行稳态热问题求解。

7. 定义热边界条件

(1) 定义热对流

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Convection | On Areas

弹出拾取对话框, 拾取所有与空气接触的面, 单击 OK, 在弹出对话框的 Film coefficient 中输入 10, 表示换热系数, Bulk temperature 中输入 20, 表示外界的介质温度一般为空气, 单击 OK。

(2) 定义生热率

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Heat Generat | On Volumes

弹出拾取对话框, 拾取四个小芯片, 单击 OK, 在弹出对话框的 VALUE 中输入 HG2, 单击 OK; 按照这种方法定义大芯片的生热率, 其值为 HG1。

8. 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

9. 后处理

(1) 查看温度云图

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | DOF Solution | NodalTemperature, 在比例因子选项中设置 Auto Calculated 为自动计算比例, 单击 OK, 如图 19-4 所示。

(2) 查看热梯度云图

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | DOF Solution | NodalTemperature 在比例因子选项中设置 Auto Calculated 为自动计算比例, 单击 OK, 如图 19-5 所示。

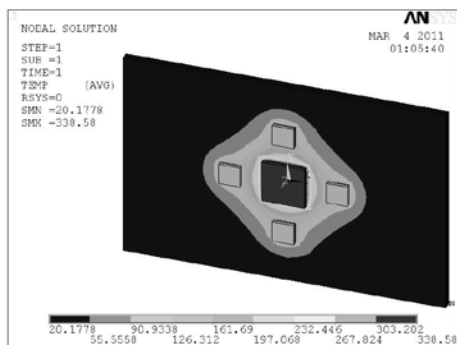


图 19-4 多芯片的温度云图

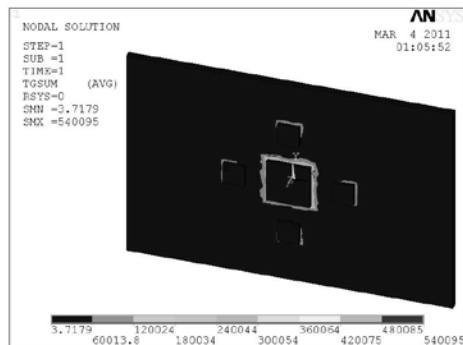


图 19-5 多芯片的热梯度云图



第 20 章 边坡稳定性分析

20.1 边坡稳定性分析概述

20.1.1 边坡稳定性研究概况

边坡的稳定性问题一直是土木工程中的一个非常重要的问题。不论是修建高速公路、铁路、机场等交通设施，还是建造矿井、大坝和大型建筑工程等都需要分析边坡的稳定性。通常按照两种不同的观点对边坡的运动现象进行研究。第一种观点是把边坡运动现象作为一种自然过程加以考虑，并研究其起因、运动的方向和所形成的表面形状。而另外一种观点则从岩土力学原理出发来研究工程的安全性，提出评价边坡的稳定可靠性的方法、应采取的控制和补救措施。但是，只有把上述两种方法结合起来，才能取得评价边坡稳定问题的最好效果。持有第二种观点的专家用岩土力学方法对边坡稳定性进行定量分析，必须具有区域地质构造、地层组合和走向以及地形地貌学历史的知识。另一方面，持有第一种观点的专家可以把自己的设想与根据岩土力学研究所进行的工程分析结果对照，从而得出关于岩土体运动过程的起因和特征的一个清晰的概念。例如，寻找滑坡的最好方法之一，是发现具有透水性或可溶性岩土层覆盖在不透水层或与相对不透水层互层的情况。近几年来，国内不少学者致力于地质学和岩土力学的有机结合，取得了一定的进展。

20.1.2 边坡稳定性分析的研究方法

1. 极限平衡分析方法

应用极限平衡法研究边坡稳定性，首先要确定一个潜在的滑动面，并在做一系列简化假定后，由力系平衡或能量守恒求的沿滑动面的安全系数，用它作为评价边坡安全性的指标。这一方法有瑞典条分法、毕肖普法、江布法、斯宾塞法、摩根斯坦-普赖斯法、传递系数法、萨尔玛法等。

这些方法的基本出发点是一样的，即刚塑性假定，不同之处在于对条间力所做的假定不同。由于这些假定的物理意义不一样，因此它们所能满足的平衡条件也不相同，计算步骤有简有繁，为了检验所列的各方法和其他边坡稳定性分析方法的精确性，许多学者在过去的几十年里从不同的角度做了大量的研究并进行了系统的总结。

2. 数值模拟方法

现代工程建设的工程地质问题已相当复杂，在对这些问题进行分析时传统的解析方法受到了很大的制约。于是，人们在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上，借助于计算机，来获得满足工程要求的数值解，这就是数值模拟。

目前用于边坡稳定性分析的数值模拟方法主要有：有限单元法、边界单元法、有限差分

法、离散单元法和块体系统不连续变形分析法等。但究其适用性、灵活性和应用的广泛性而言,有限单元法是数值模拟方法中用于岩土力学分析的有效技术之一。

3. 模拟实验方法

根据边坡原型,按一定相似条件建立小尺寸物理模型,施加相应的工程载荷以及超载,研究边坡的破坏机理,即为模拟实验方法,这种方法目前主要有地质力学模拟实验方法和离心机模拟实验方法。由于模拟实验方法费用昂贵,因而目前仅适用于较大型的边坡工程。

4. 边坡监控实测及反分析法

自从 Kavanach 和 Clough 发表了反演弹性模重的有限元方法至今,在岩土工程中,反分析方法的研究和应用已取得了显著发展,特别是考虑了时间相关性、空间效应、消除测量前位移损失的影响及围岩与支护相互作用、测量误差处理、测点优化布置等方面取得了不少有价值的成果。

20.2 稳定安全系数的计算

20.2.1 计算的主要方法

1. 有限元极限平衡法

有限元极限平衡法是人们早期普遍使用的一种方法,它先求得每一单元的应力及应变,然后选择相应的强度破坏准则,根据力的平衡关系来计算假定滑面上的稳定安全系数,这种方法计算比较复杂,并且与传统的极限平衡法实质上并无二致。

2. 强度折减有限元法

边坡的稳定安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时对土的剪切强度进行折减的程度,即定义稳定安全系数是土的实际抗剪强度与临界破坏时折减后的剪切强度的比值,这种强度折减技术特别适合于用有限元方法来实现。其优点有:能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算;考虑土体的本构关系,以及变形对应力的影响;能够模拟土坡的滑移面形状(滑移面大致在水平位移突变的地方及塑性变形发展严重的地方);能够模拟土体与支护结构的共同作用;求解稳定安全系数时不需要假定滑移面的形状。

20.2.2 强度折减法的计算原理

抗剪强度折减系数(SSRF, shear strength reduction factor)定义为:在外载荷保持不变的情况下,边坡内土体所发挥的最大抗剪强度与外载荷在边坡内所产生的实际剪应力之比。外载荷所产生的实际剪应力应与抵御外载荷所发挥的最低抗剪强度即按照实际强度指标折减后确定的,与实际中得以发挥的抗剪强度相等。当假定边坡内所有土体抗剪强度的发挥程度相同时。这种抗剪强度折减系数定义为边坡的整体稳定安全系数。由此所确定的安全系数可以认为是强度储备安全系数,而在地基极限承载力与传统边坡稳定性分析中所采用的常规安全系数一般是指载荷增大系数或加载系数。强度折减概念能够将强度储备安全系数与边坡的整体稳定安全系数统一起来。而且在有限元数值分析中无需事先确定破坏面形状与位置。因此在实际中逐渐得到广泛应用。

在基于强度折减概念的弹塑性有限元数值分析中,对于域内某一点,按照 Bishop 安全



系数的一般定义。同时考虑到该点的抗剪强度，可用摩尔—库伦破坏准则表示为：

$$\tau_f = C + \sigma \tan \phi \quad (20-1)$$

式中， τ_f 为土体的抗剪切强度； C 为土体的内聚力； σ 为上体的正应力； ϕ 为内摩擦角。

该点土体在这个预定剪切面上的安全系数为

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{C + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (20-2)$$

式中， F 为安全系数； τ 为土体剪切应力。

假如此时土体没有发生剪切破坏，土体中实际剪应力与实际中得以发挥的抗剪强度相同，即：

$$\tau = \tau_{fm} = \frac{\tau_f}{F} = \frac{C + \sigma \tan \phi}{F} = C_m + \sigma \tan \phi_m \quad (20-3)$$

由此可知实际中得以发挥的抗剪强度相当于折减后抗剪强度的指标。折减后的抗剪强度指标分别为：

$$C_m = \frac{C}{F}; \quad \phi_m = \arctan \frac{\tan \phi}{F} \quad (20-4)$$

20.2.3 颗粒状材料（混凝土、岩石和土壤）的 4 种屈服准则

工程中最为常用的是摩尔——库伦屈服准则（以下简称 M-C 准则）：

$$\frac{1}{3} J_1 \sin \phi + [\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi] \sqrt{J_2} = C \cos \phi \quad (20-5)$$

式中， J_1 为应力张量第一不变量； J_2 为应力偏量第二不变量； θ 为应力罗代角

如图 20-1 所示，M-C 准则的屈服面是不规则的六棱锥面，有一个奇异的顶点，因此导数的计算非常困难甚至是不收敛。因此，学者陆续提出了一系列修正模型。

德鲁克-普拉格屈服面（D-P 准则）：

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \text{ 或者 } \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (20-6)$$

D-P 准则的本质是屈服面光滑。根据不同的光滑面变化出下面四种 D-P

P1，外角点外接 D-P 圆（ANSYS 软件中采用的标准输入）：

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}; \quad k = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (20-7)$$

P2，内角点外接 D-P 圆：

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}; \quad k = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (20-8)$$

P3，等面积 D-P 圆（边坡稳定性的研究中常用的模型）：

$$\alpha = \frac{\sqrt{2\sqrt{3}} \sin \phi}{\sqrt{\pi(9 - \sin^2 \phi)}}; \quad k = \frac{6\sqrt{\sqrt{3}} C \cos \phi}{\sqrt{2\pi(9 - \sin^2 \phi)}} \quad (20-9)$$

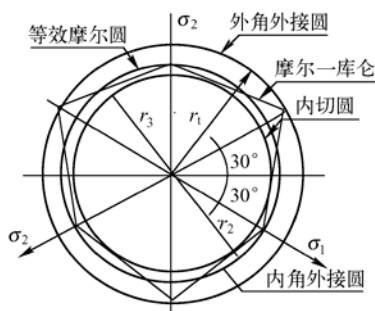


图 20-1 不同的屈服准则

P4, 内切 D-P 圆:

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}}; \quad k = \frac{3C \cos \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}} \quad (20-10)$$

20.2.4 屈服准则在ANSYS中的实现

在 ANSYS 中仅提供外角点外接 D-P 圆。本章推导了其他三种屈服圆, 具体方法如下: 由于各种屈服准则中不同的只是通过参数 α 和 k , 而 α 和 k 又是材料参数 φ 和 C 的函数, 恰好 ANSYS 中 D-P 准则正是通过输入 φ 和 C 值实现的, 那么可以假设 φ 和 C 为真实的材料参数, 只需通过换算求出一组 φ' 和 C' 值, 将其输入 ANSYS 中就能够得到想要的屈服准则类型。比如选用等面积 D-P 圆时, 可按下式进行换算:

$$\frac{\sqrt{2\sqrt{3}} \sin \varphi'}{\sqrt{\pi(9 - \sin^2 \varphi')}} = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}} = \alpha \quad (20-11)$$

$$\frac{6\sqrt{\sqrt{3}} C' \cos \varphi'}{\sqrt{2\pi(9 - \sin^2 \varphi')}} = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}} = k \quad (20-12)$$

由式 (20-11), 得

$$\sin \varphi' = \pm \sqrt{\frac{\alpha^2 \pi 9}{2\sqrt{3} + \alpha^2 \pi}} \quad (20-13)$$

把式 (20-13) 代入式 (20-11), 排除增根。然后可以得到相应的角度 φ' 。把 φ' 代入 (20-12), 得

$$\begin{aligned} 6\sqrt{\sqrt{3}} C' \cos \varphi' &= k \sqrt{2\pi(9 - \sin^2 \varphi')} \\ C' &= \frac{k \sqrt{2\pi(9 - \sin^2 \varphi')}}{6\sqrt{\sqrt{3}} \cos \varphi'} \end{aligned} \quad (20-14)$$

20.2.5 采用折减系数法计算边坡稳定系数

首先设定一个折减系数 F , 然后根据折减系数法原理, 得到 $\bar{\varphi} = \arctan \frac{\tan \varphi'}{F}$; $\bar{c} = \frac{c'}{F}$,

把参数 $\bar{\varphi}$ 和 $\bar{c}$ 输入到 ANSYS 的 D-P 本构方程中, 不断地改变 F 至计算发散为止。

20.3 实例：确定边坡安全系数

20.3.1 工程背景

边坡是天然斜坡和人工边坡的总称。边坡失稳是生态环境和工程建设中经常遇到的广泛且严重的地质灾害之一, 给世界各国人民的生命财产和经济建设带来了巨大的损失。因此, 研究边坡变形破坏的意义是不言而喻的。



20.3.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

图 20-2 给出了一个边坡的简图，其几何尺寸如图 20-2 所示，单位为 m。

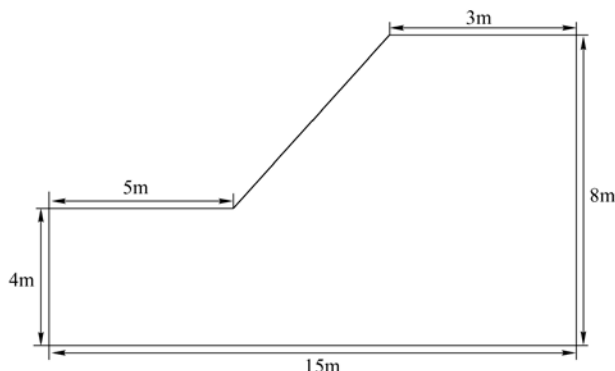


图 20-2 边坡简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用支持 D-P 分析的 4 节点 PLANE42 单元，并设置关键字 K3 为平面应变，材料的应力应变关系为等面积 D-P 圆模型，其材料的各项参数为土的密度 $\rho = 1827 \text{ kg/m}^3$ 、粘聚力 $c = 12000 \text{ Pa}$ 、内摩擦角分别为 $\varphi = 5^\circ$ 和剪胀角为 0° ；弹性模量与泊松比为 $E = 20 \text{ Mpa}$, $\nu = 0.3$ 。设置折减系数为 1.7，根据本章的转换方法，在 ANSYS 中 D-P 的参数为粘聚力为 7998.5591 Pa ，内摩擦角为 $3.337 \ 333 \ 01^\circ$ 。

3. 边界条件

边坡右侧和坡角左侧均为水平约束边界条件，底面为全部固定边界条件。对于这一天然边坡，外载荷仅为重力。

20.3.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“Slope Stability”，单击 OK。

2. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

因为 13.0 版本对单元库有些调整，PLANE42 不能使用 GUI 单元库定义，只能输入单元编号进行定义，其方法为如下 GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的右边下面输入 42，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为平面应变 (Plane strain)。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

操作后弹出一个对话框，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料

属性的对话框, 输入 EX=20E6, PRXY=0.3, 单击 OK, 单击 Density, 输入 DENS=1827; 设置材料的应力应变关系为 D-P 模型, 单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Non-metal Plasticity | Drucker-Prager, 在弹出的对话框中输入粘聚力 (Cohesion) 为 6406.1, 摩擦角 (Fric Angle) 为 3.8518, 单击 OK, 选择 Material | Exit, 推出面板。

3. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=0, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=2, X=15, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=3, X=15, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=4, X=10, Y=8, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=5, X=5, Y=4, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=6, X=0, Y=4, Z=0, 单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

操作后弹出拾取对话框, 用鼠标按顺序拾取关键点 1, 2, 3, 4, 5 和 6, 单击 OK。

4. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set, 在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.2, 单击 OK。

(3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

5. 设置分析类型

(1) 设置静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

(2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出分析选项设置对话框, 激活大变形分析 (Large deform effects), 设置牛顿-拉普森选项 (Newton-Raphson option) 为完全法 (Full N-R), 设置完毕后, 单击 OK。

6. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型的左右边界线 L 和 L2, 单击 Apply, 在弹出对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 UX, 其他保持默认设置, 单击 Apply, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型底边 L1, 单击 OK, 在弹出对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 ALL DOF, 单击 OK。

(2) 定义重力载荷

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Gravity | Global



在弹出的对话框中输入 $ACELY=9.8$ ，单击OK。

7. 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框，单击OK。

8. 后处理

(1) 设置云图字体

GUI: Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Legend Font

弹出字体大小选择对话框，设置字体大小为三号。

(2) 查看 Y 方向位移云图

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of Displacement，在比例因子选项中设置Auto Calculated为自动计算比例，单击OK，效果如图 20-3 所示。

(3) 查看等效塑性应变

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择Nodal Solution | Plastic Strain | von Mises plastic strain，单击OK，如图 20-4 所示。

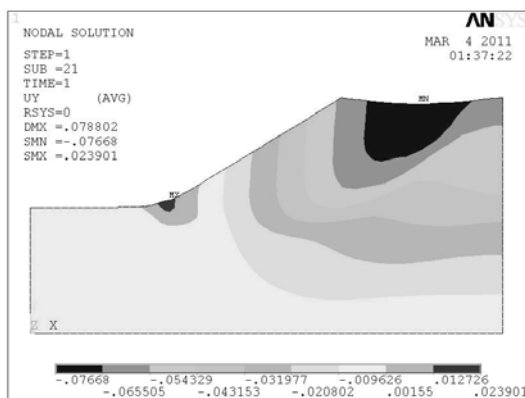


图 20-3 边坡 Y 方向位移云图

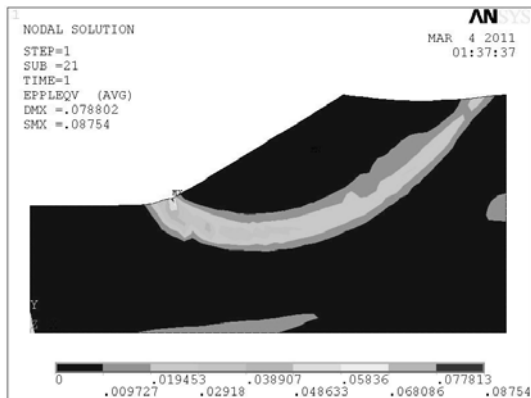


图 20-4 边坡等效塑性应变云图

第 21 章 界面开裂与失效模拟



界面存在于任意两种材料的连接处。复合材料的层之间的结构是一种特殊的界面，因为当这种结构承受特定的外载荷而发生的失效过程呈现出独一无二的特点。通常，界面开裂使用断裂力学的方法，例如节点释放技术。

此外，用户还可以使用粘结区模型去模拟界面开裂和其他的断裂现象。这种方法也适用于模拟各向同性材料的断裂过程，因为断裂现象可以被看成是两个界面的分离过程

21.1 界面开裂的分析

在进行界面开裂和失效模拟之前要把模型分成两个组件或两组单元。在这两组单元之间定义粘结区模型。为更好的在组件之间建立粘结区模型，ANSYS 提供了一系列的单元。界面开裂分析包括的过程，在任意的非线性分析中都有。但这些过程为了更好地模拟界面区的特点需要有特殊的考虑。接下来给出界面开裂分析的总体步骤。

- 1) 建立或输入模型。在界面开裂模拟中对建立和导入模型没有特殊的要求，与其他分析一样。
- 2) 定义单元类型。为了更好地模拟界面区，用户必须定义结构分析单元和相应的界面单元。
- 3) 定义材料属性。使用 TB,CZM 来定义粘结区材料，粘结区的材料可以模拟界面分离。使用 TBOPT 指定类型，使用 TBDATA 输入材料的数据。
- 4) 网格划分。使用 AMESH 或 VMESH 命令为结构划分单元，使用 CZMESH 命令来为粘结区层上划分界面单元。从单元的匹配性来说使用 CZMESH 命令有特殊的限制。在网格划分顺序上，先要划分好实体模型的网格然后才能使用 CZMESH 命令划分界面区模型单元。用户也可以直接使用 EGEN 命令来生成界面单元，对于界面单元，每一个命令都包括了特殊考虑。
- 5) 求解。求解过程中用户需要考虑几种情况。主要集中在界面单元刚度的丢失或者是刚度软化和使用接触单元的界面单元。
- 6) 查看结果。与其他分析的后处理一样。

21.2 模拟开裂的界面单元

ANSYS 提供了如下 4 种类型的单元来模拟界面开裂和失效行为。

- INTER202: 二维 4 节点线性单元。
- INTER203: 二维 6 节点 2 次单元
- INTER204: 三维 16 节点 2 次单元



● INTER205: 三维 8 节点线性单元

21.2.1 单元的定义

一个界面单元由顶部和底部共同构成。图 21-1 给出了 INTER205 单元的几何示意图。这个单元的中板位置由底部和顶部节点的坐标系平均值来确定。界面单元的数值积分在界面单元中板上进行，并且采用高斯积分法则。

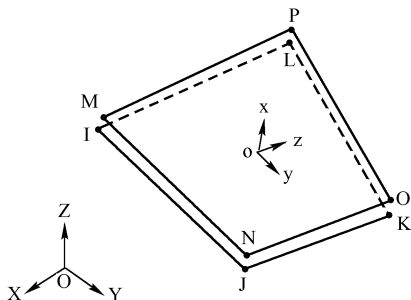


图 21-1 INTER205 单元的几何示意图

21.2.2 单元的选择

对于一个完整的界面，开裂模拟是由界面单元和与界面单元相对应的结构单元组成的，并且要求结构单元与界面单元要相对适应。当用户使用 CZMESH 命令时，恰当的界面单元将根据相邻的结构单元自动被选择。用户也可以手动指定自定义的界面单元。表 21-1 给出了具体的指导。

表 21-1 界面单元和与之相匹配的单元

单元特征	使用的界面单元	相适应的结构单元
二维线性	INTER202	PLANE42, PLANE182
二维二次	INTER203	PLANE82, PLANE183
三维二次	INTER204	SOLID92, SOLID95, SOLID186, SOLID187
三维线性	INTER205	SOLID45, SOLID65, SOLID185, SOLSH190, SOLID272, SOLID273, SOLID285

21.3 定义材料属性

21.3.1 材料的特点

使用 TB 命令族来模拟材料的粘结界面区 (CZM)，并且粘结界面区的界面分离行为是由界面单元来模拟的。界面区是由许多界面单元来表示的。借助于附着力分离定律来表示界面变形的特征，并且变形仅仅发生在粘结区单元的内部，一般性情况下，用户主要关心粘结区的拉伸和剪切变形。此时，材料的表面行为是高度非线性的，因为伴随着界面单元的分离，界面单元的刚度迅速地软化或消失。不能模拟材料的卸载行为。

21.3.2 材料常数

粘结区 (TB,CZM) 使用一个附着力分离定律来定义。

正向附着力定义为：

$$T_n = e\sigma_{\max}\Delta_n e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_i^2} \quad (21-1)$$

切向附着力定义为：

$$T_t = 2e\sigma_{\max} \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t} \Delta_t (1 + \Delta_n) e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (21-2)$$

其中, $T = \frac{\partial \phi(\delta)}{\partial \delta}$ 。

材料常数 $\sigma_{\max}$ 、 $\bar{\delta}_t$ 和 $\bar{\delta}_n$ 在软件里以 C1, C2 和 C3 来输入:

输入形式:

TB,CZM,,,

TBDATA,1,C1,C2,C3

21.4 网格划分和定义边界条件

21.4.1 网格划分

对于界面单元选择的网格划分方法是: 当用户使用 CZMESH 命令产生界面时, 必须把模型定义为两个组件或两组单元, 或者指定一个几何划分点的值。利用一系列的节点使用 E 命令直接产生单元。使用 EGEN 命令从模型中直接产生界面单元。

21.4.2 边界条件

界面开裂和失效过程包含了刚度软化和界面刚度的完全丢失, 这就造成了数值计算不稳定和收敛困难。因此, 用户要施加约束作为边界条件。用力或者压力作为边界条件时, 存在的一个问题就是当模型发生开裂后会发生刚体位移, 并且将导致其他的求解困难。

21.5 求解过程和结果的输出

界面附着分离行为是一种高度非线性的行为。对于这种问题的求解方法, 完全牛顿——拉普森法的求解选项将作为默认求解方法。其他的求解方法对于界面分析是不推荐的。像大多数非线性问题一样, 界面开裂模拟的收敛可以归结特殊到非线性问题求解。ANSYS 提供了广泛综合的求解控制策略, 因此推荐用户使用 ANSYS 的默认求解选项。

在求解界面开裂问题时的一些特殊考虑如下。

- 当承受外部拉载荷的单元突然变化时, 单元将失去刚度或可能引起数值的不稳定。
- 使用 DELTIM 或 NSUBST 命令来控制时间的最小和最大步, 并且要以小的时间步开始, 随后逐渐增大。这样确保关心的力学行为都能包含在求解的结果中。
- 当界面单元承受拉伸应力时, 其法向的刚度与界面的分离量呈指数关系, 即分离量越大, 法向刚度越小。
- 当界面单元承受压缩载荷时, 可以使用接触单元和相应的界面单元来获得更好的穿透控制。



21.6 观察结果

界面开裂分析的结果主要包括位移、应力、应变、结构组件的反力和粘结区域层的信息（如界面拉伸应力和分离量等）。用户可以使用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理 POST26 观察计算的结果。

21.7 实例：功能梯度材料界面开裂分析

21.7.1 工程背景

功能梯度材料(Functional gradient materials, FGM)的出现是现代高科技需求的结果，广泛应用于航空航天、核反应堆、生物医药、国防工业等领域。功能梯度材料的断裂理论研究已成为材料科学的前沿课题。

21.7.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

本实例为两个功能梯度材料粘结在一起，并且其端部存在长度为 A 的初始裂纹，如图 21-2 所示。两种功能梯度材料的长度均为 0.35m ，高度均为 0.016m 。

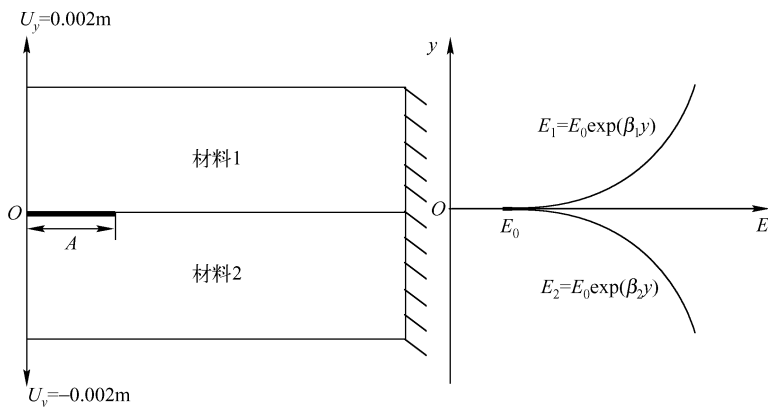


图 21-2 功能梯度材料界面层裂纹模型简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例使用结构单元 PLANE182 模拟功能梯度材料和与之相匹配的界面单元 INTER202 模拟功能梯度材料的界面特性。材料的弹性模量是空间坐标 y 的指数函数，界面上的弹性模量 $E_0 = 2\text{E}11\text{Pa}$ ，功能梯度材料 1 的非均匀参数 β_1 为 12，功能梯度材料 2 的非均匀参数 β_1 为 -12，两种材料的泊松比都为 0.3。

3. 边界条件

本实例模型的边界条件为固定模型的右端，在模型的左端上下施加 0.002m 的位移约束。

21.7.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入“Functionally Graded Materials”，单击 OK。

2. 定义几何参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框的 Selection 中输入 $L=0.35$ ，单击 Accept 完成对模型长度参数的定义，按照此方法继续定义功能梯度材料 1 的宽度 $H1=0.016$ ，功能梯度材料 2 的宽度 $H2=0.016$ ，功能梯度材料界面裂纹长度 $A=0.03$ ，功能梯度材料界面处弹性模量 $E0=2E11$ ，功能梯度材料 1 的材料非均匀参数 $BEITA1=12$ ，功能梯度材料 2 的材料非均匀参数 $BEITA2=-12$ ，功能梯度材料划分的层数 $N=7$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

操作后弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 4node 182 单元，单击 Apply，继续在对话框的左边选择 Cohesive，然后在右边选择二维 4-node 202，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，选择单元类型 1，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为平面应变 (Plane strain)，单击 OK；继续选择单元类型 2，然后单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为平面应变 (Plane strain)，单击 OK，单击 Close。

(3) 定义材料常数

由于模拟功能梯度材料需要划分的层数较多，因此使用传统的 GUI 比较费时，因此本书推荐使用循环命令流，如下：

```
*DO,I,1,N,1
MP,EX,I,E0*EXP(BEITA1*(H2/N*(2*I-1)))
MP,PRXY,I,0.3
*ENDDO
*DO,I,1,N,1
MP,EX,I+N,E0*EXP(BEITA2*(-H1/N*(2*I-1)))
MP,PRXY,I+N,0.3
*ENDDO
```

界面层的本构关系只能通过命令流设置，如下：

```
TB,CZM,2*N+1,,EXPO
TBDATA,1,95E6,0.006e-3,1
```



4. 建立功能梯度材料界面层模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=0, Y=-H1, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=2, X=L, Y=-H1, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=3, X=L, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=4, X=A, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=5, X=0, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=6, X=0, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=7, X=0, Y=H2, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=8, X=L, Y=H2, Z=0, 单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

操作后弹出拾取对话框, 用鼠标按顺序拾取关键点 1, 2, 3, 4 和 5, 单击 Apply, 继续拾取关键点 3, 4, 6, 7 和 8, 单击 OK。

(3) 旋转工作平面

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

设置弹出面板调整度数为 90, 并在 Degrees XY, YZ, ZX Angles 中输入 0, -90, 0, 单击 OK。

(4) 用工作平面剖分面

由于使用 GUI 操作来实现剖分比较费时, 因此本书使用如下命令流:

```
*DO,I,1,N-1,1
wpoff,0,0,H1/N
ASBW,ALL
*ENDDO
wpoff,0,0,-H1/N*(N-1)
*DO,I,1,N-1,1
wpoff,0,0,-H2/N
ASBW,ALL
*ENDDO
```

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置裂纹面的网格划分数量

单击网格划分工具面板上的 Size Controls | Lines | Set, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取裂纹面的两条线 L4 和 L6, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 No.of element divisions 为 6, 单击 OK。

(3) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set, 在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.005, 单击 OK。

(4) 划分功能梯度材料网格

由于本模型划分的层比较多, 用 GUI 操作比较费时, 因此输入如下命令流:

```
*DO,I,1,N,1
```

```

ASEL,S,LOC,Y,H1/N*(I-1),H1/N*I
MAT,I
AMESH,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL
*DO,I,1,N,1
ASEL,S,LOC,Y,-H1/N*I,-H1/N*(I-1)
MAT,I+N
AMESH,ALL
*ENDDO
ALLSEL,ALL

```

(5) 划分界面层网格

1) 选择指定位置的节点。

GUI: Utility Menu | Entities, 弹出拾取实体对话框, 设置选择对象为 Nodes, 选取方式为 By Location, 且选择 X coordinates, 输入 Min 为 A, Max 为 L, 单击 OK。

2) 设置划分属性。单击网格划分面板 Element Attributes | Global | Set, 弹出划分属性对话框设置单元类型为 INTER202, 设置材料号为最后一个 15, 其他保持默认单击 OK。

3) 划分界面单元。由于划分界面单元的命令 CZMESH 没有 GUI 操作, 因此只能输入命令流: CZMESH,,0,Y,0,

这个命令就的意思是在总体笛卡儿坐标系下, 沿着 $y=0$, 且界面单元的法向为 y 方向, 建立界面单元。

4) 选择所有

GUI: Utility Menu | Select | Everything

6. 设置分析类型

(1) 设置新的求解为静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

(2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

在弹出的对话框中设置考虑大变形影响, 牛顿-拉普森选项为 Full N-R, 单击 OK。

7. 定义边界条件

(1) 定义位移约束载荷

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 拾取左端的上节点, 单击 Apply, 在弹出的对话框设置位移约束类型为 UY, 输入 Displacement value 为 0.002, 单击 Apply, 拾取左端的下节点, 单击 Apply, 在弹出的对话框设置位移约束类型为 UY, 输入 Displacement value 为 0.002, 单击 OK。

(2) 定义位移约束载荷

1) 选择指定位置的节点。

GUI: Utility Menu | Entities

操作后弹出拾取实体对话框, 设置选择对象为 Nodes, 选取方式为 By Location, 且选择





X coordinates, 输入 Min 为 L, 单击 OK。

2) 约束右端的所有自由度。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes
弹出拾取对话框, 单击 Pick All, 在弹出的对话框中设置约束类型为 ALL, 输入 Displacement value 为 0, 单击 OK。

3) 选择所有。

GUI: Utility Menu | Select | Everything

8. 定义载荷步

(1) 设定输出所有子步

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File
在弹出的对话框中设置文件写入频率 (File write frequency) 为每一个子步 (Every substep), 单击 OK。

(2) 设置时间和子步选项

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps
在弹出的对话框中输入 TIME 为 1, 子步数量 (Stepped of substeps) 为 200, 其他保持默认, 单击 OK。

9. 开始计算

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

10. 后处理

(1) 查看等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu
弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Plastic Strain | von Mises plastic strain, 单击 OK, 如图 21-3 所示。

(2) 功能梯度材料界面层位移张开量

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu
弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Cohesive | X-Component of interface separation, 单击 OK, 如图 21-4 所示。

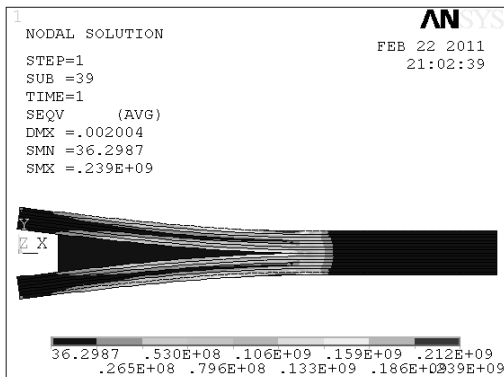


图 21-3 界面裂纹等效应力云图

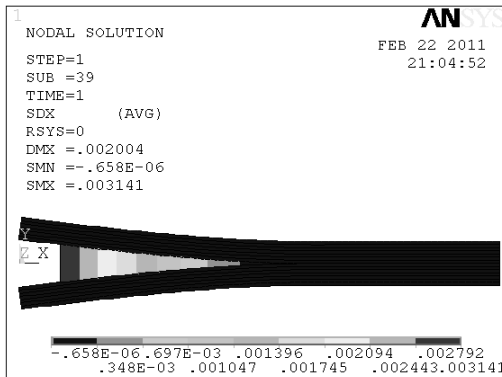


图 21-4 界面层位移张开量

第 22 章 衬垫连接模拟



22.1 引言

在大多数结构装配体中，衬垫接头是必不可少的组件。衬垫作为结构之间的密封件。衬垫作为结构之间的密封件通常都是很薄并且可以使用多种材料。例如钢铁，橡胶和复合材料。从力学角度来看，衬垫的作用就是在组件之间传递力。衬垫的主要变形方向就小。尽管 TB 命令提供了可以考虑

22.2 执行单元组件分析

衬垫分析与任何一个非线性分析的大体步骤基本相似。然而对于衬垫分析这些步骤都有一些特别的考虑。下面将详细讲解每一个步骤的特点和注意事项。

- 1) 建立或输入模型。为了衬垫分析建立模型或输入模型没有什么特别之处。
- 2) 定义单元类型。为了更好地模拟衬垫接头结构，用户必须定义结构单元和相应的界面单元类型。
- 3) 定义材料属性。使用 TB, GASKET 来定义衬垫接头材料。用户可以使用 TB, GASKET 来定义四种材料的性能数据：常规数据，横向剪切刚度，压缩和拉伸。使用 TBOPT, 用户可以指定具体的类型。此时，用户也可以使用 TBDATA 和 TBPT 命令来输入这些数据并可以使用这些数据。用户也可以使用 TBPLLOT 命令来画出大多数衬垫数据。
- 4) 网格划分。使用 AMESH 或 VMESH 对结构进行结构单元划分并且使用 IMESH 命令来划分有些特殊的限制。执行这些命令的顺序也很关键。用户可以使用 VDRAG 命令来划分界面层，也可以通过 EGEN 命令直接生成界面单元。对于界面网格划分这些命令都有些特别的限制，具体的操作在后面的相关章节有相似的介绍。
- 5) 求解。当用户执行衬垫接头分析时，对求解有些特殊的要求。在求解设置中我们主要关心的是衬垫单元的刚度丢失和衬垫单元中使用的接触单元。
- 6) 查看结果。使用 PRESOL, PRNSOL, PLESOL, PLNSOL 或者 ESOL 可以输出应力、总的闭合度、总的非弹性闭合度和热闭合度。

22.3 衬垫单元的构造

衬垫单元的变形主要是厚度方向的变形。使用实体连续单元很难有效地模拟衬垫接头。衬垫单元通过单元的顶面与底面的相对变形量来考虑厚度方向上的变形量。由闭合行为导致的压力可以直接应用到衬垫材料上。



22.3.1 单元的拓扑布局

界面单元是由顶部面和底部面组成的。对于衬垫接头结构。ANSYS 提供了多类型的界面单元。图 22-1 给出了三维 8 节点衬垫单元的几何图。单元的中板位置是由单元底部和顶部的一对节点坐标的平均值确定的。单元的数值积分计算在中面上完成。

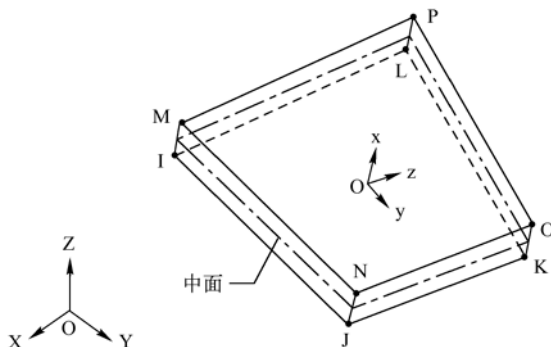


图 22-1 衬垫单元几何图

22.3.2 厚度方向

单元厚度方向被定义为垂直于中面单元积分的方向。厚度的正方向按照对于中面节点处的右手螺旋法则定义。厚度变形通过沿着厚度方向的单元顶面与底面对应节点相对变形来确定。按照 ANSYS 的标记规定，厚度方向被定义为 X 方向。

22.4 界面单元的家族

ANSYS 提供了 4 种类型单元来模拟衬垫材料：INTER192：二维 4 节点线性单元；INTER193：二维 6 节点 2 次单元；INTER194：三维 16 节点 2 次单元；INTER195：三维 8 节点线性单元。二维单元 INTER192 和 INTER193 通过使用单元关键字可以定义多种应力状态。

22.4.1 单元选择

要模拟一个完整衬垫接头的装配体，这其中包括衬垫单元和与之对应的结构单元。这些对应的单元有着相同的特点。表 22-1 给出了单元之间的匹配。

表 22-1 衬垫单元与结构单元的匹配

单元特征	使用的衬垫单元	与之匹配的结构单元
二维线性	INTER192	PLANE42, PLANE182
二维二次	INTER193	PLANE82, PLANE183
三维二次	INTER194	SOLID92, SOLID95, SOLID96, SOLID186, SOLID187
三维线性	INTER195	SOLID45, SOLID62, SOLID65, SOLID185, SOLSH190, SOLID272, SOLID272, SOLID285

22.4.2 应用

基于以下考虑来选择使用线性插值单元还是二次插值单元。

- 由很少的节点组成的模型使用较少的计算资源就能够达到很快的计算效果。
- 如果模型中存在应力梯度变化大的地方就必须使用二次插值单元。
- 如果衬垫接头的闭合是曲线路径，也要使用二次插值单元。
- 带有中间节点的自由网格划分可以产生一个较准确的求解。
- 对于平面应力，平面应变和轴对称结构选择二维单元是非常合适的。

一个很好的例子就是使用二维单元 INTER192 或 INTER193 模拟管线的法兰接触。在这种情况下，衬垫材料特性与几何位置关系不大。三维衬垫的典型结构就是模拟内燃机的汽缸盖与汽缸体的连接。在这种情况下没有所谓好的几何结构，因为衬垫必须在汽缸体与周围充满空洞的两个复杂表面之间形成。衬垫材料的性质在不同的区域是不同的。例如，在汽缸盖发生爆燃区的附近刚度就很大，其他的地方衬垫材料就很柔软。

22.5 材料性质的定义

22.5.1 材料的特点

使用 TB 命令的 GASKET 选项结合界面单元可以模拟衬垫接头的力学行为。衬垫材料通常只承受压缩载荷。承受压缩载荷的材料具有高度非线性特征。当外部压力消失时，衬垫材料也具有复杂的卸载力学行为。GASKET 材料选项允许用户直接输入材料的试验测量的压力闭合曲线数据和多条卸载压力闭合曲线数据。当没有定义卸载曲线，并且结构卸载时，材料的力学行为按照材料的压力曲线变化。作为一个接头结构，它通常情况下是存在初始间隙或是空隙的。另一方面，从建模的角度考虑，它很容易充满在界面网格和其相邻组件间的空间。若只有闭合度小于初始间隙，则没有压力作用在衬垫结构上。也就是当衬垫结构处于拉伸载荷的作用下，将产生一个张开间隙。因此，衬垫接头通常不会有拉伸应力。在衬垫单元中使用应力帽来限制拉伸应力的产生。图 22-2 给出了衬垫材料压力与闭合度（衬垫上下面的相对位移）行为曲线。这个例子给出了沿着加载路径进行了 5 次卸载与再加载的测试来确定材料的卸载刚度。

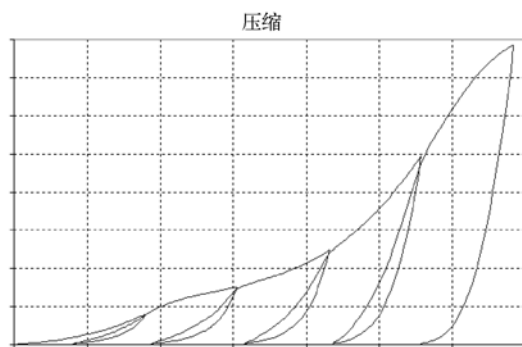


图 22-2 衬垫材料的压力与闭合度的关系曲线



22.5.2 数据输入格式

用户使用 TB,GASKET 来输入材料的各种数据。材料数据主要包括两方面的数据：常规数据与压力和闭合度关系曲线。常规数据定义衬垫材料的初始衬垫间隙，这是为了数值求解稳定的稳态刚度和为了限制衬垫材料产生拉伸的应力帽。压力闭合度数据包括了衬垫压缩（加载）和衬垫拉伸（卸载）。使用 TB 命令确定衬垫材料的特性可以通过如下形式：

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,TBOPT
```

其中，MAT 为材料号；NTEMP 为材料的温度；NPTS 为材料的数据数量；TBOPT 为以下衬垫材料数据的一种；TBOPT=PARA 表示衬垫材料的常规数据；TBOPT=COMP 表示衬垫材料的压缩数据；TBOPT=LUNL 表示衬垫材料的线性卸载数据；TBOPT=NUNL 表示衬垫材料的非线性卸载数据；TBOPT=TSS 表示衬垫材料横向剪切刚度数据。

用户使用 TBDATA 命令输入材料常规参数，使用 TBPT 命令输入衬垫材料的压缩和卸载数据。

1. 定义常规数据（TBOPT=PARA）

衬垫材料的常规数据包括初始间隙，稳定刚度和最大拉伸应力帽。这些参数分别被定义为 C1，C2 和 C3。例如：

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,PARA  
TBDATA,1,C1,C2,C3
```

2. 定义压力数据闭合曲线（TBOPT=COMP）

按照下面的格式来定义衬垫材料的压力闭合度：

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,COMP  
TBPT,,x1,y1  
TBPT,,x2,y2  
TBPT,,xi,yi
```

其中，xi，yi 是一对闭合度与压力值。下面给出了 10 对数据点的压力闭合度的例子。

```
TB,GASKET,1,,10,COMP          !定义压力数据  
TBPT,, 0.20000E-04, 0.54000E+08  
TBPT,, 0.40000E-04, 0.15150E+09  
TBPT,, 0.60000E-04, 0.24900E+09  
TBPT,, 0.78000E-04, 0.30000E+09  
TBPT,, 0.12000E-03, 0.37200E+09  
TBPT,, 0.19000E-03, 0.47400E+09  
TBPT,, 0.28600E-03, 0.58500E+09  
TBPT,, 0.35800E-03, 0.67350E+09  
TBPT,, 0.43200E-03, 0.78000E+09  
TBPT,, 0.50500E-03, 0.89550E+09
```

3. 定义线性卸载数据（TBOPT=LUNL）

衬垫材料的线性卸载是比较简单卸载力学行为。可以定义多条卸载曲线的斜率来适应广泛的卸载行为，例如：

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,LUNL
TBPT,,x1,y1
TBPT,,x2,y2
TBPT,,xi,yi
```

其中, NPTS 是卸载数据的点的个数; x_i 是卸载时的闭合度; y_i 是卸载斜率。下面给出了 3 个数据点线性卸载数据的定义与输入格式的例子:

```
TB,GASKET,1,,3,LUNL      ! 定义线性卸载数据
TBPT,, 0.78000E-04, 0.25100E+12
TBPT,, 0.28600E-03, 0.25500E+12
TBPT,, 0.50500E-03, 0.10600E+13
```

图 22-3 给出了一个线性卸载曲线图。

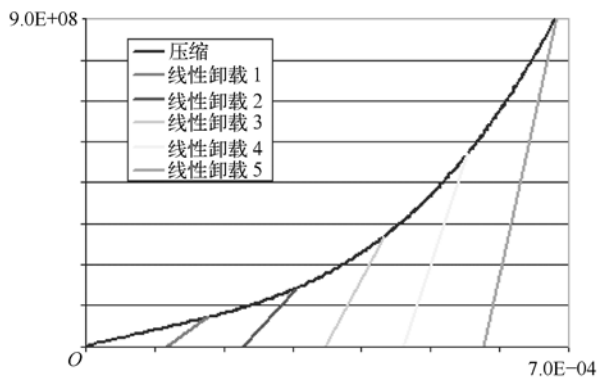


图 22-3 衬垫材料的卸载曲线

4. 定义非线性卸载数据 (TBOPT=NUNL)

衬垫材料的非线性卸载的定义可以适应更广泛的模拟衬垫材料卸载行为。输入格式如下:

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,NUNL
TBPT,,x1,y1
TBPT,,x2,y2

TBPT,,xi,yi
```

其中, x_i , y_i 是一对闭合度与压力值。用户可以定义多条卸载曲线。下面给出一个实例:

```
TB,GASKET,1,,5,NUNL      !定义第一条非线性卸载曲线
TBPT,, 0.78000E-04, 0.30000E+09
TBPT,, 0.66900E-04, 0.24750E+08
TBPT,, 0.63100E-04, 0.82500E+07
TBPT,, 0.54100E-04, 0.15000E+07
```



```
TBPT,, 0.00000E+00, 0.00000E+00
```

```
TB,GASKET,1, ,5,NUNL
```

! 定义第二条非线性卸载曲线

```
TBPT,, 0.28600E-03, 0.58500E+09
```

```
TBPT,, 0.26400E-03, 0.22350E+08
```

```
TBPT,, 0.26100E-03, 0.90000E+07
```

```
TBPT,, 0.25600E-03, 0.15000E+07
```

```
TBPT,, 0.00000E+00, 0.00000E+00
```

```
TB,GASKET,1, ,5,NUNL
```

! 定义第三条非线性卸载曲线

```
TBPT,, 0.50500E-03, 0.89550E+09
```

```
TBPT,, 0.47800E-03, 0.33900E+08
```

```
TBPT,, 0.47500E-03, 0.13500E+08
```

```
TBPT,, 0.46800E-03, 0.15000E+07
```

```
TBPT,, 0.00000E+00, 0.00000E+00
```

22.5.3 与温度相关的数据

按照以下格式来定义与温度相关的衬垫材料性质数据:

```
TB,GASKET,MAT,NTEMP,NPTS,LUNL
```

```
TBTEMP,T1
```

```
TBPT,,x1,y1
```

```
TBPT,,x2,y2
```

```
TBTEMP,T2
```

```
TBPT,,x1,y1
```

```
TBPT,,x2,y2
```

ANSYS 将自动在温度点之间进行线性插值运算, 当温度超过指定的范围后, 软件将使用最靠近外界温度的点。下面列出了几种与温度相关的衬垫材料的数据输入格式的例子:

```
TB,GASKET,1, 3,10,COMP
```

! 定义 3 个温度点的衬垫材料压缩数据, 每个温度点有 3 个数据

```
TBTEMP, 100.000
```

```
TBPT,, 0.20000E-04, 0.54000E+08
```

```
TBPT,, 0.40000E-04, 0.15150E+09
```

```
TBPT,, 0.60000E-04, 0.24900E+09
```

```
TBPT,, 0.78000E-04, 0.30000E+09
```

```
TBPT,, 0.12000E-03, 0.37200E+09
```

```
TBPT,, 0.19000E-03, 0.47400E+09
```

```
TBPT,, 0.28600E-03, 0.58500E+09
```

```
TBPT,, 0.35800E-03, 0.67350E+09
```

```
TBPT,, 0.43200E-03, 0.78000E+09
```

```
TBPT,, 0.50500E-03, 0.89550E+09
```

```
TBTEMP, 200.000
```

```
TBPT,, 0.2000E-04, 0.1800E+08
TBPT,, 0.4000E-04, 0.5050E+08
TBPT,, 0.6000E-04, 0.8300E+08
TBPT,, 0.7800E-04, 0.1000E+09
TBPT,, 0.1200E-03, 0.1240E+09
TBPT,, 0.1900E-03, 0.1580E+09
TBPT,, 0.2860E-03, 0.1950E+09
TBPT,, 0.3580E-03, 0.2245E+09
TBPT,, 0.4320E-03, 0.2600E+09
TBPT,, 0.5050E-03, 0.2985E+09
```

```
TBTEMP, 300.000
TBPT,, 0.2000E-04, 0.9000E+07
TBPT,, 0.4000E-04, 0.2525E+08
TBPT,, 0.6000E-04, 0.4150E+08
TBPT,, 0.7800E-04, 0.5000E+08
TBPT,, 0.1200E-03, 0.6200E+08
TBPT,, 0.1900E-03, 0.7900E+08
TBPT,, 0.2860E-03, 0.9750E+08
TBPT,, 0.3580E-03, 0.1122E+09
TBPT,, 0.4320E-03, 0.1300E+09
TBPT,, 0.5050E-03, 0.1492E+09
```

图 22-4 给出了衬垫材料两个温度下的压缩和卸载曲线。

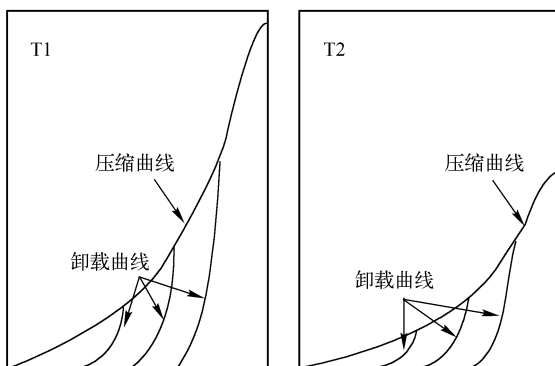


图 22-4 衬垫两个温度下的压缩和卸载曲线

22.5.4 画出衬垫数据曲线

用户可以使用 `TBPLLOT` 命令画出衬垫材料的压缩、线性卸载和非线性卸载数据图。格式如下：

```
TBPLLOT,GASKET,MAT,TBOPT,TEMP,SEGN
```

其中，`TBOPT` 指定衬垫材料数据类型；`TEMP` 指定数据是否与温度相关，或是某一特定温度下的数据。



22.6 划分界面单元

有以下三种方法可以划分界面单元。

- 使用 IMESH 命令划分衬垫层的网格。
- 使用 VDRAG 命令沿着指定路线拖拉生成界面层单元。
- 使用 IMESH 命令划分衬垫层的网格，例如：

```
/prep7
!*+++++
!* 定义单元类型
!*+++++
et,1,187          ! 实体四面体单元 t
et,2,194          !对应得界面层单元
!*+++++
!* 定义参数
!*+++++
EH=1.0
IH=0.1
DX=0
DY=0
DZ=IH
Z1=EH
Z2=Z1+IH
Z3=Z2+EH
!*+++++
!* 定义关键点
!*+++++
k,1,0,0
k,2,1,0
k,3,1,1
k,4,0,1
k,5,0,0,z1
k,6,1,0,z1
k,7,1,1,z1
k,8,0,1,z1
k,9,0,0,z2
k,10,1,0,z2
k,11,1,1,z2
k,12,0,1,z2
k,13,0,0,z3
k,14,1,0,z3
k,15,1,1,z3
k,16,0,1,z3
!*+++++
```

```

!* 建立第一个体模型
!*+++++
v,1,2,3,4,5,6,7,8
!*+++++
!* 建立第二个体模型
!*+++++
v,9,10,11,12,13,14,15,16
!*+++++
!* 建立第中间体模型
!*+++++
v,5,6,7,8,9,10,11,12
!*+++++
!*定义单元尺寸
!*+++++
esize,,4          !
!*+++++
!* 使用单元 1 划分第一个体模型
!*+++++
type,1
mat,1
vmesh,1
!*+++++
!*使用 IMESH 命令生成界面层
!* 使用单元类型 2 (INTER194)
!*+++++
type,2
mat,2
imesh,area,6,7,0,DX,DY,DZ,TOL
!*+++++
!*使用单元类型 1 划分第二个体
!*+++++
type,1
mat,1
vmesh,2
!*+++++
!* 画单元
!*+++++
/view,1 ,1,1,1
epplot
finish

```

22.7 求解过程和结果的输出

衬垫材料行为是高度非线性的。因此程序默认完全牛顿-拉普森法作为计算的工具。不



推荐用户使用其他的求解方法。和其他非线性问题一样，衬垫连接分析的收敛与否取决于具体的问题。程序为衬垫连接问题提供了完备的求解方案，建议使用求解默认选项。

求解衬垫问题需要考虑以下问题。

- 默认情况下，一个零应力帽施加到衬垫单元上。当衬垫单元处于拉伸状态时，它将失去刚度并有时引起数值计算的不稳定。
- 在时间不设置中要设置计算时间步的上限和下限。开始的时候设置为较小的时间步，随后为斜坡形式。这样可以确保感兴趣的模式和材料力学行为都准确地包括在计算中。
- 当使用网格匹配模拟衬垫界面时，最好不包括横向剪切刚度以避免衬垫材料和匹配的组件发生不必要的相交。

与其他非线性分析一样，程序执行一系列的线性近似但并不不断矫正。收敛失败表面结构中的物理结构不稳定，并且导致有限单元法数值计算发生问题。在文件 Jobname.OUT 中存有一些计算的信息，有助于用户修改计算设置。

22.8 观察结果

衬垫连接分析结果主要包含了位移、应力、应变、结构组件的反力和衬垫材料层的信息，如衬垫压力，闭合度等。用户可以使用通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 观察计算的结果。

22.9 实例：螺栓预紧法兰盘衬垫分析

22.9.1 工程背景

法兰、螺栓、垫片及盲板组成的系统是压力容器设计中的重要内容，同时也是设计及使用过程中容易出现问题的部位。详细计算该系统应力分布是提高法兰、螺栓连接设计水平的关键所在。本实例应用三维有限元技术，考虑了大量的接触面、螺栓预紧单元和衬垫单元，准确计算出一套法兰连接的应力分布。

22.9.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

图 22-5 给出了法兰连接的示意图，这个法兰结构包括两个法兰、一个衬垫和四个螺栓，其模型的具体尺寸是：上下法兰的厚度均为 0.01m，衬垫的厚度为 0.002m，法兰盘的内半径为 0.05m，法兰盘的外半径为 0.08m。

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用 SOLID186 单元模拟法兰和螺栓，使用与之相对应的衬垫单元 INTER194 模拟衬垫，使用 PRETS179 单元模拟螺栓的预拉伸应力，螺栓和法兰的接触通过接触向导自动生成。

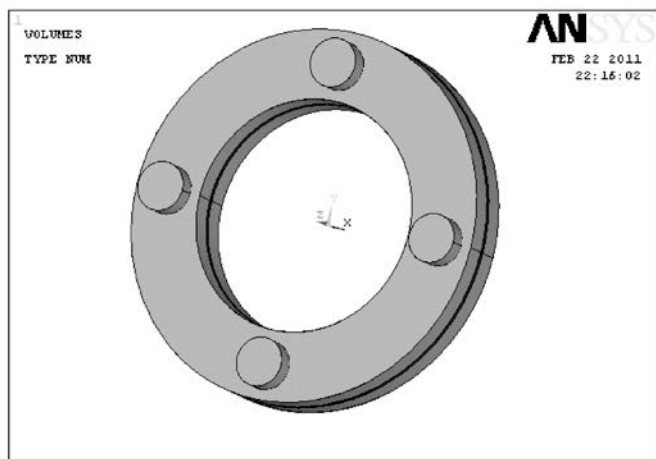


图 22-5 法兰盘衬垫螺栓连接示意图

法兰和螺栓为同一材料，其弹性模量为 $1.05 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比为 0.21。衬垫材料的压力数据为：
 0.508000×10^{-4} , 0.161226×10^7 ; 0.101600×10^{-3} , 0.520884×10^7 ; 0.152400×10^{-3} , 0.113134×10^8 ;
 0.203200×10^{-3} , 0.200499×10^8 ; 0.254000×10^{-3} , 0.259960×10^8 ; 0.304800×10^{-3} , 0.290345×10^8 ;
 0.355600×10^{-3} , 0.357453×10^8 ; 0.406400×10^{-3} , 0.440064×10^8 ; 0.457200×10^{-3} , 0.563189×10^8 ;
 0.508000×10^{-3} , 0.748254×10^8 ; 0.558800×10^{-3} , 0.967287×10^8 ; 0.609600×10^{-3} , 0.129001×10^9 ;
 0.683260×10^{-3} , 0.157147×10^9 。衬垫材料的线性卸载数据： 0.152400×10^{-3} , 2.430000×10^{11} ;
 0.304800×10^{-3} , 3.565000×10^{11} ; 0.406400×10^{-3} , 5.923000×10^{11} ; 0.558800×10^{-3} , 1.088000×10^{12} ;
 0.683260×10^{-3} , 1.490000×10^{12} 。

3. 边界条件

本实例的边界条件为：约束法兰盘内半径的径向和周向位移，四个螺栓的预拉伸力均为 1000N。

22.9.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出一个对话框，在输入栏中输入“Ring Flange”，单击 OK。

2. 定义几何参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框的 Selection 中输入 $H1=0.01$ ，单击 Accept 完成对法兰盘 1 厚度参数的定义，按照此方法继续定义衬垫厚度 $H2=0.002$ ，法兰盘 2 的厚度 $H3=0.01$ ，螺母的厚度 $H4=0.008$ ，法兰盘内半径 $R1=0.05$ ，法兰盘外半径 $R2=0.08$ ，螺栓中心位置 $R3=(R2-R1)/2+R1$ ，螺栓半径 $R4=0.5 \times (R2-R1)/2$ ，螺母半径 $R5=0.7 \times (R2-R1)/2$ 定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete



弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Solid, 然后在右边选择 Brick 20node 186 单元, 单击 Apply, 继续在左边选择 Gasket, 在右边选择三维 16-node194, 单击 OK, 单击 Close。

(2) 定义材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 首先定义母材区 1 的材料常数, 单击 Structural | Liner | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 $EX=1.05E11$, $PRXY=0.3$, 单击 OK。设置材料 2 的应力应变关系: 选择 Material | New Model, 在弹出的对话框中输入 2, 单击 OK。选择 Structural | Specialized Materials | Gasket | Compression, 在弹出的对话框中单击 Add Point, 增加到 13 组数据, 按照给出的数据输入闭合度 (CLOSURE) 和压力 (PRESSURE), 输入完毕后, 继续单击 Linear Unloading, 在弹出的对话框中单击 Add Point, 增加到 5 组数据, 按照给出的数据输入 CLOSURE 和 SLOPE, 单击 OK。

4. 建立模型

(1) 定义圆环体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $RAD1=R1$, $RAD2=R2$, $Z1=0$, $Z2=H1$, 其他保持默认设置, 单击 Apply; 继续输入 $RAD1=R1$, $RAD2=R2$, $Z1=H1$, $Z2=H1+H2$, 其他保持默认设置, 单击 Apply; 继续输入 $RAD1=R1$, $RAD2=R2$, $Z1=H1+H2$, $Z2=H1+H2+H3$, 其他保持默认设置, 单击 OK。

(2) 合并所有项

GUI: Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrl | Merge Items

在弹出的对话框中设置合并项类型 (Type of item to be merge) 为 All, 单击 OK。

(3) 定义圆柱体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $RAD1=R4$, $RAD2=0$, $Z1=0$, $Z2=H1+H2+H3$, 其他保持默认设置, 单击 OK。

(4) 移动圆柱体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取刚建立的圆柱体, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 $DX=R3$, 单击 OK。

(5) 激活总体柱坐标系

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

(6) 复制圆柱体

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取刚移动的圆柱体 4, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=90$, 单击 Apply; 继续拾取圆柱体 4, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=180$, 单击 Apply; 继续拾取圆柱体 4, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=270$, 单击 OK。

(7) 体相减

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取法兰盘和衬垫, 单击 Apply, 拾取圆柱体 4, 单击 Apply; 继续拾取法兰盘和衬垫, 单击 Apply, 拾取圆柱体 5, 单击 Apply; 继续拾取法兰盘和衬垫, 单击 Apply, 拾取圆柱体 6, 单击 Apply; 继续拾取法兰盘和衬垫, 单击 Apply, 拾取圆柱体 7, 单击 OK。

(8) 定义螺栓

1) 定义圆柱体。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $RAD1=R4*0.95$, $RAD2=0$, $Z1=0$, $Z2=H1+H2+H3$, 其他保持默认设置, 单击 Apply; 继续输入 $RAD1=R5$, $RAD2=0$, $Z1=H1+H2+H3$, $Z2=H1+H2+H3+H4$, 其他保持默认设置, 单击 Apply; 继续输入 $RAD1=R5$, $RAD2=0$, $Z1=-H4$, $Z2=0$, 其他保持默认设置, 单击 OK。

2) 把刚建立的圆柱体相加

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取体 4, 5 和 6 单击OK。

(9) 激活总体笛卡儿坐标系

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

(10) 移动螺栓

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取螺栓, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 $DX=R3$, 单击 OK。

(11) 激活总体柱坐标系

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

(12) 移动复制螺栓到指定位置

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取刚移动的螺栓体 7, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=90$, 单击 Apply; 继续拾取螺栓体 7, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=180$, 单击 Apply; 继续拾取螺栓体 7, 单击 Apply, 在弹出的对话框中输入 $DY=270$, 单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set, 在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.005, 单击 OK。

(3) 划分法兰盘 1 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 1 号 SOLID186 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。



- 2) 设置网格划分方式为体扫描。选择划分网格工具面中的 Shape 为 Hex, 方式为 Sweep。
- 3) 划分法兰盘 1 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取法兰盘 1 体 2, 单击 OK。
- (4) 划分衬垫网格
 - 1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 INTER194 单元, 设置材料号 (Material number) 为 2, 其他保持默认值, 单击 OK。
 - 2) 划分衬垫网格
GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Interface Mesh | 三维 Interface
弹出拾取对话框, 拾取法兰盘 1 的上表面 A19, 单击 Apply, 继续拾取法兰盘 2 的下表面 A25, 单击 Apply, 弹出界面网格划分 (Mesh Interface) 设置坐标系 (Coordinate system) 为 0, 即总体笛卡儿坐标系, 设置衬垫的厚度方向厚度 $DZ=H2$, 设置容差 (Tolerance) 为 0.0005, 单击 OK。
 - (5) 划分法兰盘 1 的网格
 - 1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 1 号 SOLID186 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。
 - 2) 设置网格划分方式为体扫描。选择划分网格工具面中的 Shape 为 Hex, 方式为 Sweep。
 - 3) 划分法兰盘 2 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取法兰盘 2 体 3, 单击 OK。
 - (6) 划分螺栓网格
 - 1) 设置网格划分方式为自由网格。选择划分网格工具面中的 Shape 为 Tet, 方式为 Free。
 - 2) 划分四个螺栓网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取四个螺栓, 单击 OK。
 - (7) 定义预拉伸单元
GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Pretension | Pretension Mesh | With Options | Divide at Value | Elements in Volume
拾取螺栓体 4, 单击 Apply, 弹出划分预拉伸截面 (Mesh Pretension Section) 设置截面名称 (Section node) 为 P1, 设置 KDIR 为 Z-axis, 设置坐标值 (Coord value) 为 $(H1+H2+H3)/2$, 单击 Apply; 继续拾取螺栓体 5, 单击 Apply, 在弹出的对话框中设置截面名称 (Section node) 为 P2, 单击 Apply; 继续拾取螺栓体 6, 单击 Apply, 在弹出的对话框中设置截面名称 (Section node) 为 P3, 单击 Apply; 继续拾取螺栓体 7, 单击 Apply, 在弹出的对话框中设置截面名称 (Section node) 为 P4, 单击 OK。

6. 创建接触对

 - (1) 创建接触单元节点组 1
 - 1) 选择面。
GUI: Utility Menu | Select | Entities
弹出选择实体对话框, 设置选取对象为 Areas, 选取方式为 By Num/Pick, 单击 OK, 弹出拾取对话框, 拾取法兰盘 2 的上表面 A48, 单击 OK。

2) 选择面上节点

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Nodes。选取方式为关联于 (Attached to) 所有的面 (Areas, all), 单击OK。

3) 创建接触单元节点组 1

GUI: Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Creat Component

弹出创建组件 (Create Component) 对话框, 设置组件名 (Component name) 为CN1, 单击OK。

(2) 创建接触单元节点组 2

1) 选择面。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Areas, 选取方式为By Num/Pick, 单击OK, 弹出拾取对话框, 拾取法兰盘 1 的下表面A28, 单击OK。

2) 选择面上节点。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Nodes。选取方式为关联于 (Attached to) 所有的面 (Areas, all), 单击OK。

3) 创建接触单元节点组 2。

GUI: Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Creat Component

弹出创建组件 (Create Component) 对话框, 设置组件名 (Component name) 为CN2, 单击OK。

(3) 创建目标单元节点组 1

1) 选择面。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Areas, 选取方式为By Num/Pick, 单击OK, 弹出拾取对话框, 拾取螺栓螺母下表面A50, A54, A64 和A74, 单击OK。

2) 选择面上节点。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Nodes。选取方式为关联于 (Attached to) 所有的面 (Areas, all), 单击OK。

3) 创建接触单元节点组 1。

GUI: Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Creat Component

弹出创建组件 (Create Component) 对话框, 设置组件名 (Component name) 为TN1, 单击OK。

(4) 创建目标单元节点组 2

1) 选择面。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Areas, 选取方式为By Num/Pick, 单击OK, 弹出拾取对话框, 拾取螺栓螺母下表面A70, A80, A53 和A60, 单击OK。





2) 选择面上节点。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Nodes。选取方式为关联于 (Attached to) 所有的面 (Areas, all), 单击OK。

3) 创建接触单元节点组 1。

GUI: Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component

弹出创建组件 (Create Component) 对话框, 设置组件名 (Component name) 为TN2, 单击OK。

(5) 使用接触管理器定义接触单元

1) 单击工具栏中的按钮, 弹出接触向导。

2) 定义接触对。单击接触管理器面板上的接触向导按钮, 弹出接触向导面板, 设置目标面 (Target Surface) 为节点组 (Nodal Component), 并选择 TN1, 单击 Next, 在弹出的对话框中, 设置接触面 (Contact Surface) 为节点组 (Nodal Component), 并选择 CN1, 单击 Next, 在弹出的面板中输入摩擦系数 (Coefficient of Friction) 为 0.25, 单击选项设置 (Optional settings), 弹出接触性质 (Contact Properties) 面板, 选择 Friction, 并设置刚度矩阵 (Stiffness matrix) 为非对称 (Unsymmetric), 单击 OK, 单击 Create。

3) 定义接触对。单击接触管理器面板上的接触向导按钮, 弹出接触向导面板, 设置目标面 (Target Surface) 为节点组 (Nodal Component), 并选择 TN2, 单击 Next, 在弹出的对话框中, 设置接触面 (Contact Surface) 为节点组 (Nodal Component), 并选择 CN2, 单击 Next, 在弹出的面板中输入摩擦系数 (Coefficient of Friction) 为 0.25, 单击选项设置 (Optional settings), 弹出接触性质 (Contact Properties) 面板, 选择 Friction, 并设置刚度矩阵 (Stiffness matrix) 为非对称 (Unsymmetric), 单击 OK, 单击 Create。

7. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

8. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

1) 激活总体柱坐标系。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

2) 拾取法兰盘内径节点。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为Nodes。选取方式为通过位置 (By Location), 具体的位置为X坐标 (X coordinates), 输入Min为R1, 单击OK。

3) 把选中的节点转换到激活坐标系中

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | RotateNode | To Active CS

4) 约束法兰盘内径节点的径向位移和周向位移

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 单击 Pick All, 在弹出的对话框中选中 UX 和 UY, 单击 OK。

5) 选择所有

GUI: Utility Menu | Select | Everything

(2) 定义预拉伸力

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pretnsn Sectn

弹出预拉伸截面载荷设置面板, 选择 P1, 在预拉伸载荷 (Pretension Load) 对话框中, 选择力 (Force) 并输入 1000, 单击 Apply; 按照同样方法设置其他三个预拉伸载荷, 设置完毕后单击 OK。

9. 开始计算

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

10. 后处理

(1) 查看法兰盘等效应力

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 22-6 所示。

(2) 查看螺栓等效应力

1) 选择螺栓体 4。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为 Volumes, 选取方式为 By Num/Pick, 单击 OK, 弹出拾取对话框, 拾取螺栓体 4, 单击 OK。

2) 选取属于螺栓体 4 的单元。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框, 设置选取对象为 Elements。选取方式为关联于 (Attached to) 体 (Volumes), 单击 OK。

3) 查看螺栓体 4 等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 22-7 所示。

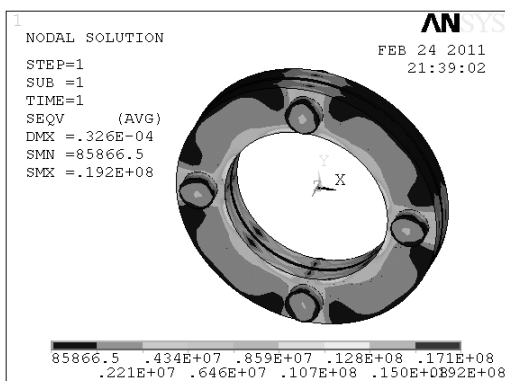


图 22-6 法兰盘的等效应力云图

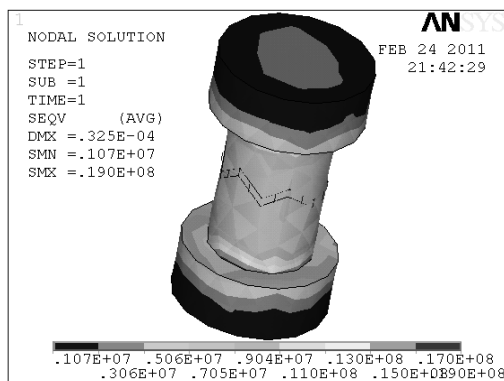


图 22-7 螺栓体的等效应力云图



(3) 查看衬垫的应力和闭合度

1) 选取衬垫单元。

GUI: Utility Menu | Select | Entities

弹出选择实体对话框，设置选取对象为Elements。选取方式通过属性 (By Attributes)，继续选择单元类型号 (Elem type num)，输入 2，单击OK。

2) 查看衬垫的应力。

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择Nodal Solution | Gasket | X-Component of gasket stress，单击OK，如图 22-8 所示。

3) 查看衬垫的闭合度

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框，选择Nodal Solution | Gasket | X-Component of gasket total closure，单击OK，如图 22-9 所示。

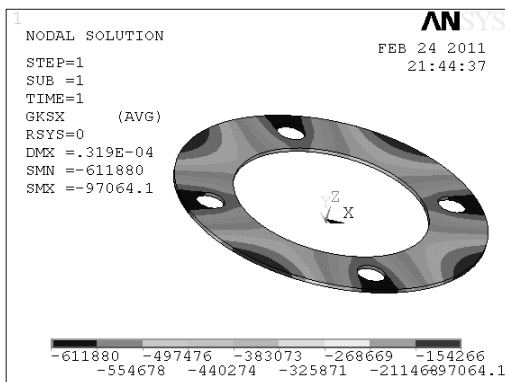


图 22-8 衬垫的应力云图

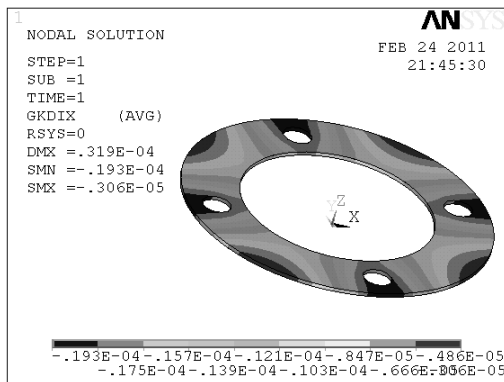


图 22-9 衬垫的闭合度云图

第23章 齿轮分析

23.1 概述

齿轮是最重要的零件之一。它具有功率范围大,传动效率高,传动比正确,使用寿命长等特点,但从零件失效的情况来看,齿轮也是最容易出故障的零件之一。据统计,在各种机械故障中,齿轮失效就占故障总数的60%以上。其中轮齿的折断又是齿轮失效的主要原因之一。

齿轮啮合过程作为一种接触行为,因涉及接触状态的改变而成为一个复杂的非线性问题。传统的齿轮理论分析是建立在弹性力学基础上的,对于齿轮的接触强度计算均以两平行圆柱体对压的赫兹公式为基础,在计算过程中存在许多假设,不能准确反映齿轮啮合过程中的应力以及应变分布与变化。相对于理论分析,有限元法则具有直观、准确、快速方便等优点。

23.2 齿轮模型的术语

如图23-1所示,齿轮上每个凸起的部分称为齿,相邻两齿之间的空间称为齿槽。齿轮各部分的名称及符号规定如下。

1) 齿顶圆:过齿轮各齿顶所做的圆,其直径和半径分别用 d_a 和 r_a 表示。

2) 齿根圆:过齿轮各齿槽底部的圆,其直径和半径分别用 d_f 和 r_f 表示。

3) 分度圆:齿顶圆和齿根圆之间的圆,是计算齿轮几何尺寸的基准圆其直径和半径分别用 d 和 r 表示。

4) 基圆:形成渐开线的圆,其直径和半径分别用 d_k 和 r_k 表示。

5) 齿数 z :即轮齿的个数,它是齿轮计算的主要参数之一。

6) 模数 m :

$$m = p / \pi$$

式中 m 称为齿轮的模数,它等于齿距 p 与圆周率 π 的比值。模数以毫米为单位。模数大,轮齿大,在其他条件相同的情况下,轮齿的承载能力也就大,反之承载能力就小。相互

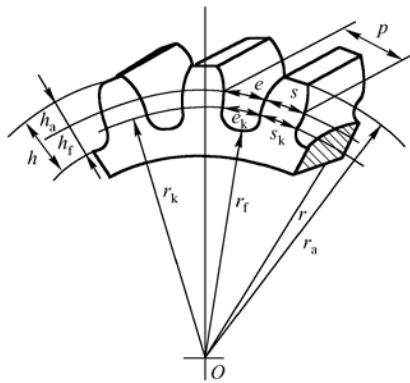


图 23-1 直齿齿轮外轮廓



啮合的两个齿轮，其模数必须相等。

7) 齿顶高：分度圆与齿顶圆之间的径向距离，用 h_a 表示；引入顶高系数 h_a^* ，则 $h_a = h_a^* m$ 。

8) 齿根高：分度圆与齿根圆之间的径向距离，用 h_f 表示；引入顶隙系数 c^* ，则 $h_f = (h_a^* + c^*) m$ 。

9) 齿全高：齿顶圆与齿根圆之间的径向距离，用 h 表示，显然 $h = h_a + h_f$ 。

10) 齿厚：一个轮齿两侧齿廓之间的弧长，用 s_k 表示。

11) 齿槽宽：一个齿槽两侧齿廓之间的弧长，用 e_k 表示。

12) 齿距：圆周上相邻两齿同侧齿廓之间的弧长，用 p_k 表示。显然 $p_k = s_k + e_k$ 。分度圆上的齿厚、齿槽宽及齿距依次用 S 、 e 及 p 表示， $p = s + e$ 。基圆上的齿距又称为基节，用 p_b 表示。

13) 压力角 α

轮齿在分度圆上啮合点 p 的受力方向（即渐开线齿廓曲线的法线方向）与该点的瞬时速度方向（分度圆的切线方向）所夹的锐角 α 称为压力角。我国规定的标准压力角 $\alpha = 20^\circ$ 。

14) 中心距 s

两圆柱齿轮轴线之间的距离称为中心距。装配准确的标准齿轮，其中心距 $s = 1/2(d_1 + d_2) = 1/2 \times m(z_1 + z_2)$ 。

注意：GB 1356-88 规定了 h_a^* 和 c^* 的标准值：1) 正常齿制 当 $m \geq 1\text{mm}$ 时， $h_a^* = 1$ ， $c^* = 0.25$ ；当 $m < 1\text{mm}$ 时， $h_a^* = 1$ ， $c^* = 0.35$ 。

基本参数取标准值，具有标准的齿顶高和齿根高，分度圆齿厚等于齿槽宽的直齿圆柱齿轮称为标准齿轮，不能同时具备上述特征的直齿轮都是非标准齿轮。

表 23-1 模数 m 取值的国家标准

第一系列	0.1	0.12	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1
	1.25	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12
	16	20	25	32	40	50					
第二系列	0.35	0.7	0.9	1.75	2.25	2.75	(3.25)	3.5	(3.75)	4.5	5.5
	(6.5)	7	9	(11)	14	18	22	28	(11)	36	45

注：①优先选用第一系列，括号内的模数尽可能。②对斜齿轮是指法面模数

综上所述，一个标准齿轮的基本参数 z 、 m 、 α 和参数 h_a^* 、 c^* 的值确定后，标准齿轮的主要尺寸和齿廓形状就完全确定了。

一对渐开线齿轮正确啮合的条件是两轮的模数和压角必须分别相等。表 23-2 列出了一对外啮合渐开线直齿轮的几何参数。

表 23-2 外啮合渐开线直齿轮的几何参数

名 称	符号	计 算 公 式
分度圆直径	d	$d_1 = mz_1; d_2 = mz_2$
齿顶高	h_a	$h_a = h_a^* m$
齿根高	h_f	$h_f = (h_a^* + c^*) m$
全齿高	h	$h = h_a + h_f = (2h_a^* + c^*) m$
齿顶圆直径	d_a	$d_{a1} = d_1 + 2h_a = (z_1 + 2h_a^*) m; d_{a2} = d_2 + 2h_a = (z_2 + 2h_a^*) m$
齿根圆直径	d_f	$d_{f1} = d_1 - 2h_f = (z_1 - 2h_a^* - 2c^*) m$ $d_{f2} = d_2 - 2h_f = (z_2 - 2h_a^* - 2c^*) m$
基圆直径	d_k	$d_{k1} = d_1 \cos \alpha = mz_1 \cos \alpha; d_{k2} = d_2 \cos \alpha = mz_2 \cos \alpha$
分度圆齿距	p	$p = \pi m$
分度圆齿厚	s	$s = \pi m / 2$
分度圆齿槽宽	e	$e = \pi m / 2$
中心距	a	$a = 1/2(d_1 + d_2) = 1/2m(z_1 + z_2)$
顶隙	c	$c = c^* m$
基圆齿距	p_b	$p_b = \pi m \cos \alpha$

23.3 渐开线直齿齿轮模型的建立

23.3.1 渐开线的生成原理

在 ANSYS 中进行几何建模，首先需要定义坐标系。ANSYS 提供了直角坐标、极坐标、球坐标三种坐标系可供选用。鉴于渐开线在极坐标中具有最简单的方程形式，便于几何建模，故在 ANSYS 中，首先定义局部坐标系为工作坐标系，建立按如图 23-2 所示的渐开线极坐标方程：

$$\begin{cases} \rho = R_b \cos \alpha \\ \theta = \tan \alpha - \alpha \end{cases} \quad (23-1)$$

其中， α 为渐开线上各点压力角（弧度）； R_b 为渐开线的基圆半径； θ 为渐开线上各点的展角。

利用式（23-1）求解生成关键点的坐标后，直接在 ANSYS 下生成相应的关键点，再利用 ANSYS 中的功能即可生成所需的渐开线。

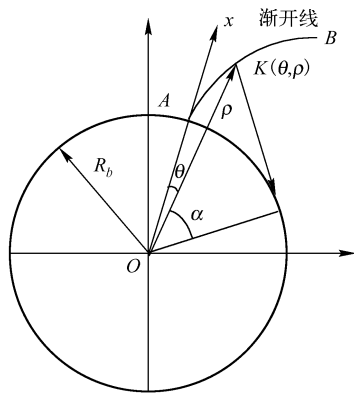


图 23-2 渐开线生成原理图

23.3.2 创建渐开线曲线

在整个的建模过程中渐开线的生成无疑是最难的，但它又是极其重要的一步，渐开线的准确度直接影响后期求解的精确度。ANSYS 的绘图功能不强，不能直接通过 GUI 做出渐开



线, 只能通过 APDL 编制程序创建点, 然后再用 Bsplines 样条曲线连接各点生成渐开线。

23.3.3 生成齿根过渡曲线

齿根过渡曲线原本比较复杂, 不仅与齿轮工作的参数有关, 而且还与刀具齿顶形状等一系列参数有关, 但在这里简化处理。对于齿根圆直径小于基圆直径的齿轮, 做渐开线的切线与基圆相交, 再利用倒角工具对其倒角, 倒角的半径 $r = 0.38m$ 。如果齿根圆的直径大于基圆直径直接倒角, 倒角的半径 $r = 0.38m$ 。

23.3.4 生成完整齿廓线

通过镜像操作 Main | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines 对齿根过渡曲线进行镜像, 在镜像操作中注意要将坐标系旋转 $\theta + 90/z2^\circ$, 见图 23-3。再用半径为齿顶圆半径的圆弧线连接齿顶两点生成完整的齿廓线, 如图 23-3 所示。

图中, r_f 为齿根圆; R 为分度圆; Z 为齿数; θ_k 为分度圆展角。

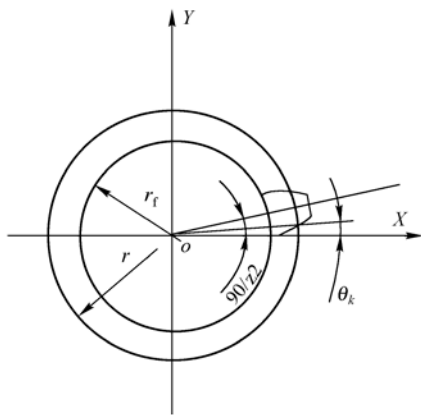


图 23-3 镜像原理图

23.3.5 生成完整齿轮面

将生成的齿廓线进行阵列, 先改变当前坐标为柱坐标系, 选择完整齿廓线, 再通过阵列操作 Main | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines 在弹出对话框中填入齿数和相应的角度, 连接所有的线生成面, 生成完整的齿轮面。

23.4 实例：多齿轮动态接触分析

23.4.1 工程背景

随着齿轮传动向重载、高速、低噪、高可靠性方向发展, 现代齿轮设计对齿轮传动系统的静、动态特性提出了更高的要求。齿轮设计的主要内容之一是强度设计, 而强度设计的重点研究对象是轮齿。因此, 建立比较精确的分析模型, 准确地掌握齿轮应力的分布特点和变化规律具有重要的意义。

23.4.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

表 23-3 和表 23-4 给出了大齿轮和小齿轮的参数, 其中齿厚为 10mm, 根据表中的数据可计算出两个齿轮的中心距离为 81mm。

表 23-3 大齿轮的基本参数

材料	泊松比	弹性模量	密度	模数	齿数	分度圆压力角	齿顶高系数	顶隙系数
45 钢	$\mu=0.3$	206GPa	7850	M=2mm	45	$\alpha=20^\circ$	1	0.25

表 23-4 小齿轮的基本参数

材料	泊松比	弹性模量	密度	模数	齿数	分度圆压力角	齿顶高系数	顶隙系数
45 钢	$\mu=0.3$	206GPa	7850	M=2mm	36	$\alpha=20^\circ$	1	0.25

2. 单元的选择及材料常数

本实例选用 8 节点 SOLID185 单元模拟齿轮，通过接触向导建立齿轮之间的接触对和齿轮的刚性约束，则接触单元和目标单元将自动分配。

3. 边界条件

小齿轮为主动齿轮，约束齿轮内缘的径向位移和轴向位移，大齿轮为被动齿轮，约束径向位移和轴向位移。模拟齿轮组工况为小齿轮均匀转速 0.2rad/s ，大齿轮承受 $1200\text{N}\cdot\text{m}$ 的阻力扭矩，计算时间为 1s 。

23.4.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出一个对话框，在输入栏中输入“Spur Gear Based on ANSYS”，单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框的 Selection 中输入 $M=2\text{E}-3$ ，单击 Accept 完成对齿轮模数参数的定义，按照此方法继续定义 $PI=3.1415$ ，齿厚 $B=10\text{E}-3$ ，小齿轮齿数 $Z1=34$ ，小齿轮的标准压力角 $ALFA1=20/180*PI$ ，齿顶高系数 $Ha=1$ ，定义顶隙系数 $C=0.25$ ，小齿轮分度圆直径 $D1=M*Z1$ ，小齿轮基圆直径 $Dk1=M*Z1*\text{COS}(ALFA1)$ ，小齿轮基圆半径 $Rk1=Dk1/2$ ，小齿轮齿根圆直径 $Df1=D1-2*(Ha+C)*M$ ，小齿轮齿根圆半径 $Rf1=Df1/2$ ，小齿轮齿顶圆直径 $Da1=D1+2*Ha*M$ ，小齿轮齿顶圆半径 $Ra1=Da1/2$ ，小齿轮齿顶压力角 $ALFA\_Ding1=\text{ACOS}(Rk1/Ra1)$ ，小齿轮齿顶展角 $SITA\_Ding1=(\text{TAN}(ALFA\_Ding1)-ALFA\_Ding1)*180/PI$ ，小齿轮分度圆展角 $SITA1=(\text{tan}(ALFA1)-ALFA1)*180/PI$ ，大齿轮齿数 $Z2=45$ ，定义大齿轮的标准压力角 $ALFA2=20/180*PI$ ，大齿轮分度圆直径 $D2=M*Z2$ ，大齿轮基圆直径 $Dk2=M*Z2*\text{COS}(ALFA2)$ ，大齿轮基圆半径 $Rk2=Dk2/2$ ，大齿轮齿根圆直径 $Df2=D2-2*(Ha+C)*M$ ，大齿轮齿根圆半径 $Rf2=Df2/2$ ，大齿轮齿顶圆直径 $Da2=D2+2*Ha*M$ ，大齿轮齿顶圆半径 $Ra2=Da2/2$ ，大齿轮齿顶压力角 $ALFA\_Ding2=\text{ACOS}(Rk2/Ra2)$ ，大齿轮齿顶展角 $SITA\_Ding2=(\text{TAN}(ALFA\_Ding2)-ALFA\_Ding2)*180/PI$ ，大齿轮分度圆展角 $SITA2=(\text{tan}(ALFA2)-ALFA2)*180/PI$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元



GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Solid, 然后在右边选择 Brick 8node 185 单元, 单击 OK。

(2) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 EX=206E9, PRXY=0.3, 单击 OK, 单击 Density, 输入 DENS=7850, 选择 Material | Exit, 退出面板。

4. 建立模型

(1) 定义小齿轮渐开线

把下列命令流输入到命令窗口:

```
ALFA_Dingn1=alfa_ding1/10      !定义压力角份数
*DIM,ALFA,ARRAY,10,1           !定义 10×1 数组 ALFA
*DIM,SITA,ARRAY,9,1            !定义 9×1 数组 SITA
*DIM,R,ARRAY,9,1               !定义 9×1 数组 R
CSYS,1                          !当前坐标系为柱坐标
ALFA(1,1)=0                    !数组数 ALFA(1,1)=0
K,100,Rk1,0                     !生成关键点 100
*DO,I,1,9,1                     !循环生成其他关键点
ALFA(I+1,1)=ALFA(I,1)+ALFA_Dingn1
SITA(I,1)=(TAN(ALFA(I+1,1))-ALFA(I+1,1))*180/PI
R(i,1)=Rk1/COS(ALFA(i+1,1))
/prep7
K,I+100,R(I,1),SITA(i,1)
*ENDDO                          !循环结束生成 9 个关键点
K,110,Ra1,SITA_Ding1           !生成齿顶圆上的关键点
BSPLIN,ALL                      !用样条曲线连接所有点
```

运行命令中会产出如图 23-4 和 23-5 所示的关键点和最后形成的渐开线。

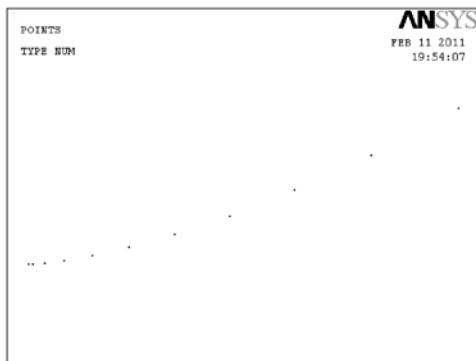


图 23-4 建立渐开线的关键点

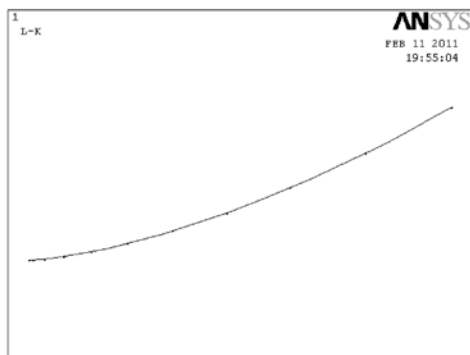


图 23-5 建立的渐开线

(2) 定义小齿轮根部过渡曲线

1) 定义小齿轮齿根圆。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Full Circle

弹出拾取对话框, 在对话框中输入 0, 0, 0, 单击Apply, 继续输入Rf1, 单击OK。

2) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Full Circle

弹出拾取对话框, 拾取关键点 1 和 100, 单击OK。

3) 布尔线相加

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1 和 L6, 单击 OK。

4) 建立齿轮根部过渡曲线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet

弹出拾取对话框, 拾取线 L1 和 L5, 单击 OK。

5) 删除线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Line and Below

弹出拾取对话框, 拾取线 L2, L3, L4 和 L5, 单击 OK。

6) 布尔线相加

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1 和 L6, 单击 OK。

(3) 定义小齿轮齿廓线

1) 定义局部坐标系。

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

弹出拾取对话框, 使用点击任意一点, 单击 OK, 弹出在指定位置创建局部坐标系 (3) 对话框, 输入 XC=0, YC=0, ZC=0, THXY=SIYA1+90/Z1, 单击 OK。

2) 激活局部坐标系。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Specified Coord Sys

在弹出对话框中输入 11, 单击 OK。

3) 映射小齿轮单齿齿形状。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1, 在弹出的对话框中选择 X-Zplane Y。

4) 定义小齿轮齿根圆。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Full Circle

弹出拾取对话框, 在对话框中输入 0, 0, 0, 单击Apply, 继续输入RF1, 单击OK。

5) 定义小齿轮齿顶圆。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Full Circle

弹出拾取对话框, 在对话框中输入 0, 0, 0, 单击Apply, 继续输入RA1, 单击OK。

6) 激活柱坐标系。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

7) 复制一个小齿轮齿形。





GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1 和 L2, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 $DY=360/Z1$, 单击 OK, 如图 23-6 所示。

8) 搭接所有线。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Lines

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

9) 删除线。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Line and Below

弹出拾取对话框, 拾取除图 23-7 中的所有的线, 单击 OK。

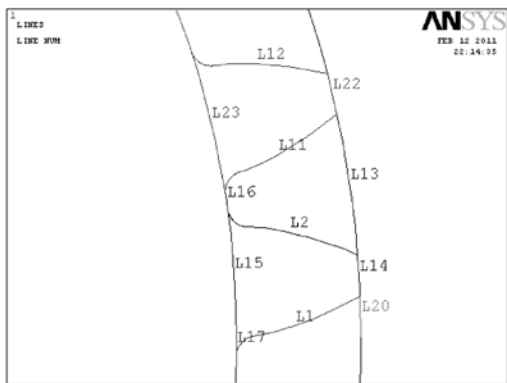


图 23-6 两个齿形图

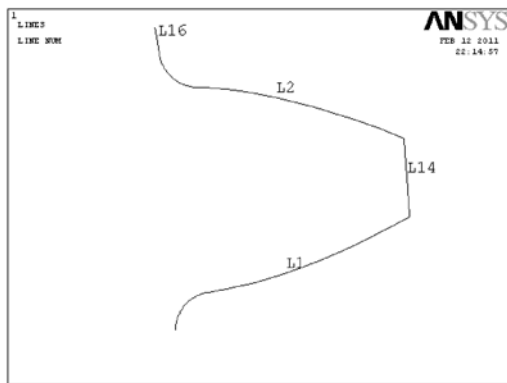


图 23-7 完整的单齿模型

10) 由单齿复制成整个小齿轮轮廓线。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines

弹出拾取对话框, 单击 Pick All, 在弹出的对话框中输入 $ITIME=Z1$, $DY=360/Z1$, 单击 OK。

11) 粘结所有线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Lines

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

(4) 建立小齿轮模型

1) 建立完整小齿轮的面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines

弹出拾取对话框, 选择 Loop, 用鼠标单击齿轮的任意位置的轮廓线, 单击 OK。

2) 建立一个圆面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $RAD1=0.4*RA1$, 其他保持默认值, 单击 OK。

3) 进行面的相减

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas

弹出拾取对话框, 首先拾取完整的齿轮面, 单击 Apply, 然后继续拾取小面 A2, 单击 OK。

4) 由面拉伸成完整的三维齿轮模型

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal
弹出拾取对话框, 拾取齿轮面, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 $DIST=1E-2$, 单击 OK。如图 23-8 所示, 大齿轮按照相同的方法进行建立, 如图 23-9 所示。具体的操作参见视频教程。

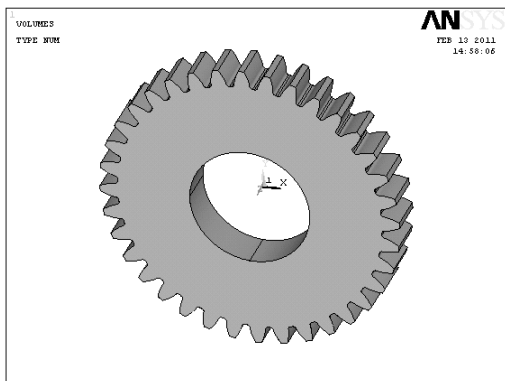


图 23-8 小齿轮实体模型

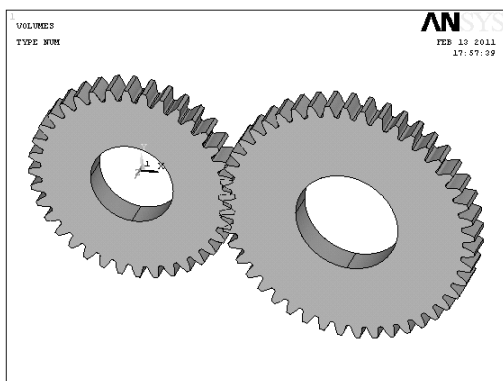


图 23-9 双齿轮实体模型

(5) 调整两个齿轮位置

1) 激活总体坐标系。

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

2) 移动大齿轮。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes

弹出拾取对话框, 拾取大齿轮, 单击 OK, 在弹出对话框中输入 $DX=81E-3$, 这个数值是两个齿轮的中心距, 单击 OK。

3) 激活总体柱坐标系。

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

4) 旋转小齿轮。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move / Modify | Volumes, 弹出拾取对话框, 拾取小齿轮, 单击OK, 在弹出对话框中输入 $DY=3.08$, 单击OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool, 打开网格划分工具面板。

(2) 设置智能划分

勾选划分工具面板上的 Smart Size, 并设置为 8。

(3) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 $SIZE=0.004$, 单击OK。

(4) 通过体扫描划分网格

选择网格划分工具面板中的形状 (Shape) 为 Hex/Wedge, 网格划分方式为 Sweep, 单



击 Sweep。

(5) 定义刚性多点约束

1) 单击图标, 打开接触管理器。

2) 单击接触管理器中的接触向导图标.

3) 按照图 23-10 中设置弹出的对话框。

4) 单击图中的 Next 按钮, 弹出图 23-11 的面板, 并按照其进行设置, 单击 Next。

5) 在弹出的面板中单击 Pick Contact, 弹出拾取对话框, 选择两个小齿轮的内孔的四个面, 单击 OK。

6) 继续单击 Next, 在弹出的面板中选择约束表面类型为刚性约束 (Rigid constraint), 选择目标体的约束自由度 (Constrained DOF set on target) 为 UX, UY, UZ, ROTX 和 ROTY, 如图 23-12 所示, 单击 Create, 创建后的多点约束接触如图 23-13 所示。

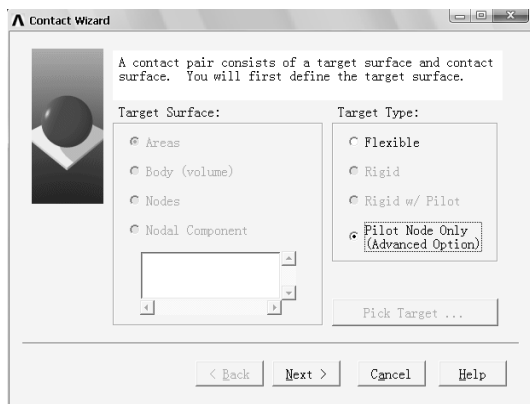


图 23-10 设置接触向导为高级控制节点选项



图 23-11 设置控制节点位置

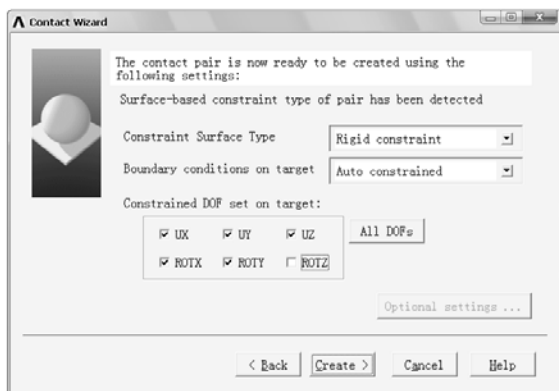


图 23-12 设置多点约束类型

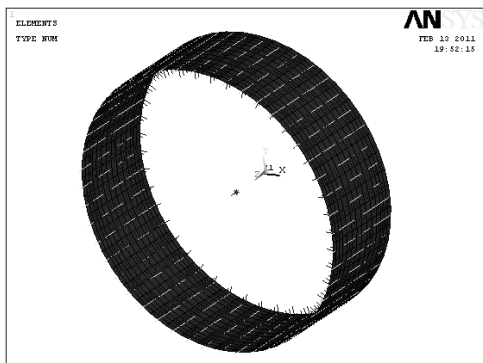


图 23-13 多点约束接触单元

7) 按照同样方法创建大齿轮内孔的多点刚性约束, 但约束类型为分布力, 这样是为了施加扭矩, 具体操作见视频教程。

6. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 **Transient**, 含义为进行瞬态动力学问题求解, 单击 **OK**, 在弹出的对话框中选择 **Full**, 含义为使用完全法计算瞬态动力学, 单击 **OK**。

7. 定义边界条件

(1) 定义加载函数

GUI: **Utility Menu | Parameters | Functions | Define/Edit**

弹出函数编辑器操作面板, 在 **Result(结果)**框后面输入 1200, 完成扭矩的定义。选择函数编辑器中 **File|Save**, 然后输入保存文件的名称为 **NJ**, 单击保存。按照同样方法定义转动位移函数: $0.2 \times \text{TIME}$, 并保存, 文件名为 **RZ**。这一步操作详细操作可以参见本章的视频教程。

(2) 读入函数转化为表格

GUI: **Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read file**

弹出拾取文件对话框, 选择刚才定义的 **NJ** 函数, 单击打开, 在弹出的对话框中的 **Tabel parameter name** 中输入转换后的表格名为 **NJ**, 单击 **OK**。按照同样方法转换函数 **RZ**, 并设置转换的表格名也为 **RZ**。

(3) 定义转角

GUI: **Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes**

弹出拾取对话框, 拾取小齿轮的内径控制节点, 单击 **OK**, 在弹出的对话框中选择自由度类型为 **ROTZ**, 在施加方式中 (**Apply as**) 选择 **Existing table**, 单击 **OK**, 在弹出的对话框中选择 **RZ**, 单击 **OK**。

(4) 定义扭矩

GUI: **Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes**

弹出拾取对话框, 拾取大齿轮的控制节点, 单击 **OK**, 在弹出的对话框中设置 **Direction of force/mom** 为 **MZ**, 含义为施加载荷为 **Z** 方向的扭矩, 施加方式 (**Apply as**) 选择 **Existing table**, 单击 **OK**, 在弹出的对话框中选择 **NJ**, 单击 **OK**。

8. 定义载荷步

(1) 输出所有子步

GUI: **Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File**

在弹出的对话框中选择 **Every substep**, 单击 **OK**。

(2) 定义计算时间和子步数量

GUI: **Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps**

在弹出的对话框中设置计算终止时间 (**Time at end of load step**) 为 1, 计算子步 (**Number of substeps**) 为 10。

最大计算子步 (**Maximum no. of substeps**) 为 10, 最小计算子步 (**Minimum no. of substeps**) 也为 10, 其他保持默认, 单击 **OK**。

9. 开始计算

GUI: **Main Menu | Solution | Current LS**

弹出求解对话框, 单击 **OK**。

10. 后处理

(1) 查看 0.1s 时的等效应力





1) 读入数据。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 0.1, 单击 Read。

2) 查看等效应力。

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 23-14 所示。

(2) 查看 0.5s 时的等效应力

1) 读入数据。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 0.5 的结果, 单击 Read。

2) 查看等效应力

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 23-15 所示。

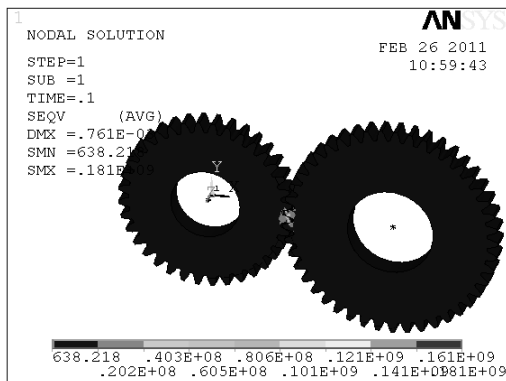


图 23-14 0.1s 时的齿轮等效应力

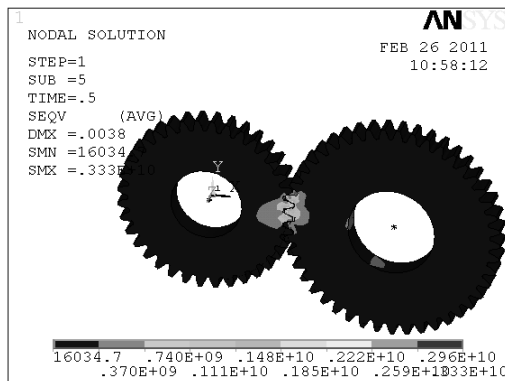


图 23-15 0.5s 时的齿轮等效应力

第 24 章 转子动力学分析

24.1 概述

转子动力学是研究轴向对称结构的旋转过程振动行为的一门科学。例如，发动机、转子、光盘驱动器和涡轮机这些设备。通过研究惯性对结构的影响可以改进设计并且可以降低失效的概率。像燃气轮机这样的高速旋转设备，必须要考虑旋转件的惯性影响以便准确地预测转子的行为。目前，机器向高速、大功率方向发展，圆盘的厚度也增加成为圆柱或锥形，需要采用动平衡的方法消除转子的振动。平衡的理论根据就是转轴的弯曲振动和圆盘的质量以及偏心距的大小的一定的确定关系。对于有些旋转机械，虽然经过动平衡，但是当转速达到某个值的时候，转轴仍可能发生剧烈的振动。发生剧烈振动时的转速就是“临界转速”。临界转速主要是针对轴的横向振动（弯曲振动）而言的。对临界转速的计算和研究就是转子动力学的主要内容之一。本章结合 ANSYS 软件转子动力学求解模块，详细系统地讲解转子动力学问题中从模型的建立、求解到后处理获得临界转速，运动轨迹和稳定性等一系列问题。

24.1.1 通用动力学方程

通用动力学方程：

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{F\} \quad (24-1)$$

其中，[M]、[C]和[K]分别是质量，阻尼和刚度矩阵并且；{f}是外部力矢量。在转子动力学中，这个方程要增加陀螺效应和旋转阻尼，其动力学方程如下：

$$[M]\{\ddot{U}\}+([C]+[G])\{\dot{U}\}+([K]+[B])\{U\}=\{F\} \quad (24-2)$$

此公式适用于在一个固定的参考框架计算转子运动。陀螺矩阵[G]取决于转速，并且对转子动力学计算做主要的贡献。这个矩阵对于转子动力学分析是必不可少的。旋转阻尼矩阵[B]并且也取决于转速。它明显地修改结构刚度，并且能够使结构产生不稳定的运动。

24.1.2 有限单元法模拟转子动力学的优点

传统方法采用集中质量法模拟转动结构。这种方法采用质心来计算转子动力学问题。这种方法的主要缺点是不能准确的计算质量、惯性的大小和位置，从而导致系统的参数的计算不准确。

ANSYS 软件基于有限单元法提供了一种有效计算和分析转子动力学问题的途径，并且计算精度更高，具有以下优点。

- 1) 准确地模拟转子系统质量和惯性。
- 2) 提供了大量能够模拟陀螺效应的单元。



- 3) 可以使用外部的 CAD 软件建立的实体模型。
- 4) 实体单元即可以考虑到转盘的柔性也可以考虑到转盘和轴的耦合振动。
- 5) 在完全法或子结构计算中可以包含转子系统的支撑部件。

24.2 转子动力学分析工具

24.2.1 常用的命令

表 24-1 给出了转子动力学计算中常用的命令。

表 24-1 转子动力学常用的命令

求解命令	
CAMPBELL	准备结果文件,以便为预应力结构生产 Campbell 图
CMOMEGA	为单元组件指定围绕用户定义轴旋转速度。
CORIOLIS	为旋转结构施加陀螺效应,同时也可以施加旋转阻尼影响。
OMEGA	为旋转结构指定围绕总体坐标轴的旋转速度。
SYNCHRO	在同步或异步谱响应结构的指定激励频率
后处理命令(/POST1)	
ANHARM	生成时间-谐振求解模块的动画或是模态振型
PLCAMP	画坎贝尔图
PLORB	显示 轨道运动
PRCAMP	打印坎贝尔图和临界速度
PRORB	输出轨道运动的特点

24.2.2 常用的单元

旋转结构中的单元必须考虑旋转角度中包含的陀螺效应。以下单元为转子动力学分析中常用的单元: BEAM4, PIPE16, MASS21, SHELL63, BEAM188, SHELL181, BEAM189, SOLID45, SOLID95, SOLID185, SOLID186, SOLID187, SOLID272, SOLID273, SHELL281, PIPE288 和 PIPE289。

24.2.3 常用的术语

1. 陀螺效应

所谓陀螺效应,就是旋转着的物体具有像陀螺一样的效应。陀螺有两个特点:进动性和定轴性。简单来说,陀螺效应就是旋转的物体有保持其旋转方向(旋转轴的方向)的惯性。

对于一个绕轴 Δ 旋转的结构,如果在垂直于轴 Δ 施加一个扰动会发生进动且会出现反力矩。这个反力矩就是陀螺力矩。陀螺力矩的轴垂直于旋转轴也垂直于进动轴。这将导致陀螺矩阵耦合了垂直于旋转轴平面上的自由度。这也导致陀螺矩阵为非对称矩阵。

2. 涡动

转子正常的旋转也包含了涡动的概念。例如转子在不平衡力矩作用下, 转轴发生挠曲变形, 转轴以角速度 ω 在空间旋转, 此时转轴的运动实际上是两种运动的合成。一种是转轴绕其轴线的定轴转动, 转动角速度就是旋转速度 ω ; 另一种则是变形的轴线绕其静平衡位置的空间回转, 回转角速度仍然是 ω 。后一种回转运动就是涡动。这就像小孩玩跳绳一样, 转轴的第一种转动犹如跳绳本身旋转, 转轴的第二种转动犹如弓状的跳绳在空间回转, 因此称它为弓状回转, 在这里称为涡动。正常转轴的涡动角速度 Ω 和旋转角速度 ω 相等, 因此称它为同步涡动。凡是同步涡动, 如转轴上某一方向受拉或受压, 则在旋转状态下将始终受拉或受压。但是当转子发生自激振动时, 由于涡动转速与转子转速不符, 将发生异步涡动。如果涡动的运动方向与旋转方向相同, 称为正向涡动 (FW), 反之则为反向涡动 (BW)。不论是正向涡动还是反向涡动, 转轴上某一方向将交替受拉或受压, 即转子在转动状态下转子上高点位置周期性顺转向或逆转向移动。显然, 当涡动速度低于转子转速时, 转子上高位置将逆转向移动, 反之则顺转向移动, 移动速度为 $\omega - \Omega$ 或 $\Omega - \omega$ 。

3. 椭圆轨迹

在大多数情况下, 旋转轴上的节点稳态轨道也叫做轨迹, 且是个椭圆形状。它的特点如下。

1) 在局部坐标系 XYZ 中, x 轴为旋转轴, 在节点 I 处的椭圆由长半轴 A, 短半轴 B 和相位角 ψ (PSI), 定义如图 24-1 所示。

2) φ (PHI) 定义了节点的初始位置。为了比较结构中两个节点的相位, 用户要检查 $\psi + \varphi$ 。YMAX 和 ZMAX 分别是沿着 Y 轴和 Z 轴方向上的最大位移。

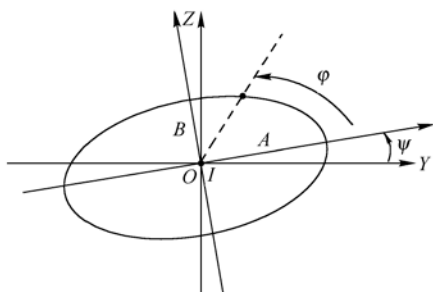


图 24-1 转子的椭圆轨迹图

4. 稳定性

转子保持无横向振动的正常运转状态的性能。若转子在运动状态下受微扰后能恢复原态, 则这一运转状态是稳定的; 否则是不稳定的。转子的不稳定通常是指不存在或不考虑周期性干扰下, 转子受到微扰后产生强烈横向振动的情况。转子稳定性问题的主要研究对象是油膜轴承。油膜对轴颈的作用力是导致轴颈乃至转子失稳的因素。该作用力可用流体力学的公式求出, 也可通过实验得出。一般是通过线性化方法, 将作用力表示为轴颈径向位移和径向速度的线性函数, 从而求出转子开始进入不稳定状态的转速——门限转速。导致失稳的还有材料的内摩擦和干摩擦, 转子的弯曲刚度或质量分布在两个正交方向的不同, 转子与内部流体或与外界流体的相互作用, 等等。有些失稳现象的机理尚不清楚。旋转结构自励的振动在一段时间内会引起振幅的增加, 如图 24-2 所示。

如果没有检查, 旋转结构出现了不稳定状态则能够导致设备的损坏。

旋转结构的不稳定的常见原因有如下几种。

- 轴承特性。
- 内部的旋转阻尼 (材料阻尼)。
- 旋转部分和静态部件之间的接触。

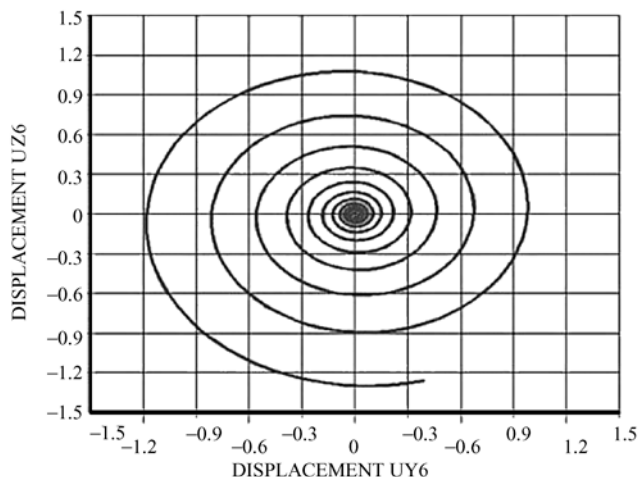


图 24-2 转子中心轨迹图

5. 临界转速

转动系统的转子在运转中都会发生振动，转子的振幅随转速的增大而增大，到某一转速时振幅达到最大值（也就是平常所说的共振），超过这一转速后振幅随转速增大逐渐减少，且稳定于某一范围内，这一转子振幅最大的转速称为转子的临界转速。这个转速等于转子的固有频率，当转速继续增大，接近 2 倍固有频率时振幅又会增大，当转速等于 2 倍固有频率时称为二阶（级）临界转速，依次类推有三阶、四阶。为确保机器在工作转速范围内不致发生共振，临界转速应适当偏离工作转速（例如 10% 以上）。

轴的临界转速决定于轴的横向刚度系数 k 和圆盘的质量 m ，而与偏心距 e 无关。更一般的情况是，临界转速还与轴所受到的轴向力的大小有关。当轴力为拉力时，临界转速提高，而当轴力为压力时，临界转速则降低。

通过执行坎贝尔图分析可以确定临界速度，图中频率曲线与提取转速直线的交点即为临界转速。

24.3 建立转子动力学模型

建立模型的基本方法和网格划分的基本方法在前面已经详细讲解过了，本节将具体讲解与转子动力学相关的知识点。

24.3.1 建立模型

当建立转子动力学分析模型时，最重要的是把旋转部件和不转动部件分开。

- 把旋转速度施加到旋转部件上。
- 确保旋转部件是轴对称的结构。

无论在 ANSYS 里建立模型或从外部的 CAD 软件导入模型，用户需使用 ANSYS 中的组件和选择功能来优化分析。这种情况下，用户要确定转轴、转盘、轴承、支撑结构中哪些需

要定义为组件或装配体。

24.3.2 建立轴承模型

实际转子的支撑不是刚性的，都具有一定的弹性。在 Jeffcott 模型中把支撑处理成刚性，是认为支撑刚度要比转子本身的刚度大得多，以至于支撑在动反力作用下的变形量要比转子的动挠度小得多，在分析转子涡动中可以忽略不计。对于支撑刚度不比转子刚度大得多的情况，自然必须考虑它的影响。在某些动力机械（如大型火力发电机组）系统中，支撑日趋柔软，使得在转子涡动分析中考虑支承弹性越加重要。

考虑支承弹性后，转子的盘心进动轨迹是一个椭圆，出现两个临界 ω_{cx} 和 ω_{cy} 。当转子以这两个临界转速以外的角速度运行时，发生正涡动；在它们之间运动时，发生反涡动。临界转速的大小不仅与转子轴的弯曲刚度有关，而且还取决于支撑特性，尤其在两者的刚度量级接近时。在实际转子的运行中，大多观测到的是正涡动。这是因为支承特性虽然在水平和垂直方向上有差别，但是差别不是很大，故对应的两个临界转速靠得较近。不管接近哪个临界转速运行，都会使转子轴产生很大的动挠度。为了运行安全，不允许转子在这两个临界转速之间停留，而是很快地加速冲过这个区域。因此一般看不到稳态的反涡动，而只看到在这一转速区域之外的正涡动。为了模拟轴承，旋转最合适的单元类型，如表 24-2 所示。

表 24-2 模拟轴承的常用单元特性

	描 述	轴承的刚度阻尼	非线性刚度和组织特性
COMBIN14	单轴弹簧/阻尼	没有	没有
COMBI214	二维弹簧/阻尼	非对称	可以设为转速的函数
MATRIX27	通用刚度和阻尼矩阵	非对称	没有
MPC184	多点约束单元	具备线性对称特性	可以设为位移的函数

1. 使用 COMBIN14 单元

COMBIN14 单元允许在一个方向设置刚度或阻尼特性。下例给出了如何在 X 方向设置轴承的刚度系数 KX 和阻尼系数 CX：

```
KX = 1.e+5      !刚度值
CX = 100        !阻尼值
et,1,combin14
keyopt,1,2,1    !X 方向
r,1,KX,CX
```

指定关键字 KEYOPT (2) 的值来定义激活的自由度。单元操作在节点坐标系中完成。

2. 使用 COMBI214 单元

单元 COMBI214 允许在平面两个垂直方向定义刚度和阻尼特性。下例给出了在 YZ 平面上定义轴承：

```
et,1,combi214
keyopt,1,2,1    ! YZ 平面
```



```
r,1,KYY,KZZ,KYZ,KZY,CYY,CZZ
rmore,CYZ,CZY
```

COMBI214 单元允许用户定义随转速变化的轴承特性。下例给出了 KYY 和 KZZ 随转速变化:

```
et,1,combi214
keyopt,1,2,1           ! YZ 平面
! define table KYY
*DIM,KYY,table,3,1,1,omegs      ! 定义存储 3 个转速的表格
KYY(1,0)= 0, 1000, 2000        ! 3 个旋转速度(rd/s)
KYY(1,1)= 1.e+6, 2.7e+6, 3.2e+6 ! 每一个旋转速度所对应的刚度特性
! define table KZZ
*DIM,KZZ,table,3,1,1,omegs      ! 定义存储 3 个转速的表格
KZZ(1,0)= 0, 1000, 2000        ! 3 个旋转速度(rd/s)
KZZ(1,1)= 1.4e+6, 4.e+6, 4.2e+6 ! 每一个旋转速度所对应的刚度特性
r,1,%KYY%,%KZZ%
```

指定关键字 KEYOPT (2) 的值来定义激活的自由度。单元操作在节点坐标系中完成。

如果 COMBI214 单元的特性随着转速变化而变化, 并且如果使用命令 CMOMEGA 定义组件的转速, 那么就要确定单元是否为合适的旋转组件。

3. 使用 MATRIX27 单元

MATRIX27 单元允许用户定义 12×12 的刚度和阻尼矩阵, 这些矩阵可以是对称或是不对称的实例如下:

```
et,1,matrix27,,2,4,1      ! 不对称刚度矩阵 [K]
et,2,matrix27,,2,5,1      ! 不对称阻尼矩阵 [C]
! 定义刚度矩阵
KXX = 8.e+7                $ KXY = -1.e7    ! $ 标记允许在同一行上使用多个命令
KYY = -6.e+7               $ KYY = 1.e+8
r,1, KXX,KXY               $ rmore,-KXX,-KXY
rmore,KYX,KYY              $ rmore,-KYX,-KYY
*do, ir, 1, 8
    rmore                  ! 定义 0 值
*enddo
rmore,-KXX,-KXY           $ rmore,KXX,KXY
rmore,-KYX,-KYY           $ rmore,KYX,KYY
! define damping matrix
CXX = 8.e+3                $ CXY = -3.e+3
CYX = -3.e+3               $ CYY = 1.2e+4
r,2, CXX,CXY               $ rmore,-CXX,-CXY
rmore,CYX,CYY              $ rmore,-CYX,-CYY
*do, ir, 1, 8
    rmore                  ! 定义 0 值
*enddo
rmore,-CXX,-CXY           $ rmore,CXX,CXY
```

```
rmore,-CYX,-CYY          $ rmore,CYX,CYY
```

4. 使用MPC184 通用铰单元

MPC184 单元是一个具有弹性刚度和阻尼特性的铰单元。使用 TB 命令定义其 6×6 特性矩阵。如下例所示：

```
keyopt,2,4,1              !没有转动
sectype,2,joint,genera
local,11,0,4,0,0,0,0      !铰单元的坐标系形式
secjoin,,11
KYY = 1.e+8
CYY = 1.e+6
KZZ = 1.e+10
CZZ = 1.e+2
tb,join,2,,,stiff
tbdata,7,KYY
tbdata,12,KZZ
tb,join,2,,,damp
tbdata,7,CYY
tbdata,12,CZZ
```

24.3.3 建立模型的其他部件

1. 添加固定部件

模型中固定部件一般为外罩、固定支撑或是法兰。为了添加固定部件，首先对这些部件划分网格。因为旋转速度仅仅施加到结构的旋转部分，所以用户需要基于旋转部件单元创建一个组件。

下例给出了如何创建旋转组件并使用命令 CMOMEGA 把转速施加到组件上：

```
! 创建模型
! 创建旋转组件
esel,,type,,1,2
cm,RotatingPart,elem
allsel
! 在旋转组件上施加转速
cmomega,RotatingPart,1000.
```

2. 把非轴对称部件等效为轴对称质量

如果模型是由非轴对称部件组成的，则用户可以使用以下的方法把它转换为等效轴对称质量：

- 1) 首先使用命令 VSEL 选择非轴对称部件体。
- 2) 键入命令 VSUM，以便输出这些体的总体质量特性。
- 3) 删除这些体。
- 4) 在这些体的重心处定义一个新的质量单元 (MASS21)，使用实常数定义单元的质量



和转动惯量，这种转换是近似的转换为轴对称的模型。例如，如果旋转速度的轴沿着 X 轴，并且质量存在于 Y 和 Z 方向，绕轴的转动惯量 YY 和 ZZ 是相等的。

5) 使用命令 CERIG 在质量单元节点和其余的结构之间定义一个刚性区域。用户通过使用惯性释放计算可以获得更准确的质量、重心和惯性矩。

3. 定义多个转轴

为了定义多个转动部件，首先要对这些部件划分网格。因为每一个部件具有不同的转速，所以用户需要使用单元操作为具有不同转速的部件创建不同的组件。

下例给出了如何创建两个转动组件并使用命令 CMPMEGA 为这些组件定义转速：

```
! 创建模型
!创建第一个转动组件
esel,,type,,1,2
cm,RotatingPart1,elem
! 创建第二个转动组件
esel,inve
cm,RotatingPart2,elem
allsel
!为每一个组件施加转速
cmomega,RotatingPart1,1000.
cmomega,RotatingPart2,3000.
```

24.4 施加载荷和约束

在建立完模型后，用户就可以施加载荷和约束了。通用的操作过程可以参考前面的加载一章。在转子动力分析中，必须施加转速。

在瞬态分析中，通过使用数组参数定义来指定每一个时间步、每一个方向上力的幅值的旋转力。因为在瞬态分析中使用复数表示法，所以旋转载荷使用一个实部分量和一个虚部分量来定义。例如，在 YZ 平面内施加旋转力 F_0 ，且力的转动方向为逆时针（Y 轴到 Z 轴），那么 F_y 的分量分别为，实部 $F_0 \cos \alpha$ ，虚部 $-F_0 \sin \alpha$ ； F_z 的分量分别为，实部 $-F_0 \sin \alpha$ ，虚部 $-F_0 \cos \alpha$ 。其中 F_0 为力的幅值，对于不平衡激励问题，力的幅值等于偏心质量乘以不平衡质量到转轴中心线的距离； α 为力的相位角。

使用命令 SYNCHRO 定义与转速同步或不同步的转动谐响应激励频率。在这种情况下，由不平衡产生的偏心力的幅值由质量乘以偏心质量的半径表示，并且计算中在每一个频率步会自动引入转速的二次方。

24.5 求解转子动力学问题

在建立模型并且施加载荷和约束后，用户就可以开始进行转子动力问题的求解了。在求解中大部分的步骤和方法与其他的问题求解没有区别，但在以下部分也需要注意。

24.5.1 添加阻尼

阻尼会在大多数系统中出现，并且在转子动力学分析中需要设置。轴承是在转子动力学分析中最常见的阻尼来源。

此外，在 ANSYS 中可以添加以下形式的阻尼。

- 1) Alpha 和 Beta 阻尼（瑞雷阻尼）。
- 2) 与材料相关的阻尼，通过命令 MP, DAMP 来定义。
- 3) 材料阻尼常数，通过命令 MP, DAMP 来定义。
- 4) 阻尼比，通过命令 MDAMP 来定义。
- 5) 模态阻尼，通过命令 MDAMP 来定义。
- 6) 单元阻尼。

转动阻尼主要是刚度阻尼 Beta 和与材料相关的阻尼。如果一个组件用这类阻尼模拟并且正在转动，则可以把命令 CORIOLIS 中的 RotDamp 设置为 1 来激活转动阻尼影响。

24.5.2 指定旋转速度并考虑陀螺效应

使用命令 OMEGA 或 CMOMEGA 指定结构的转速。使用命令 OMEGA 定义的转速矢量是沿着总体坐标系轴的方向。使用命令 CORIOLIS 设置陀螺效应。

```
omega,1000.  
coriolis, on,,, on
```

注意：转子动力学分析中，在固定参考系中计算转动惯量的影响，并用命令 CORIOLIS 对其进行相应的参数设置。

不像是命令 OMEGA 那样，命令 CMOMEGA 可以让用户定义的转速矢量与总体坐标系中的 X 轴、Y 轴和 Z 轴无关。例如，用户可以使用两个点来确定转速矢量方向，但转速大小还是一个标量，如下例所示：

```
!为组件 COMPONENT1 定义转速  
!转速为 1000 rd/s  
! 转速矢量方向平行于 Z 轴并且通过点(0.1,0,0)  
cmomega, COMPONENT1, 1000.,,, 0.1, 0, 0, 0.1, 0,1
```

24.5.3 求解随后预应力结构坎贝尔分析

对于预应力结构，需要在分析的静态求解部分设置坎贝尔（Campbell）关键字（CAMPBELL,ON）。在这种情况下修改结果文件以便在与随后的坎贝尔图分析相适应。分别计算静态和模态结果，并且在结果文件中仅保留模态求解的结果。

24.5.4 求解承受同步或不同步力的谐响应问题

为了执行不平衡激励的谐响应分析，不平衡质量的影响由相互垂直于转轴的两个方向的力表示。力载荷施加到转轴上的节点。使用命令 SYNCHRO 去定义与转速同步或不同步的





转动谐响应激励频率

注意：命令 SYNCHRO 中 RATIO 参数在不平衡力的设置中无效。

线性方法可以用于梁模型也用于实体模型。

对于实体模型，用户的分析可能需要一个更精确的测量位移和应力在包含不平衡质量的轮或盘中。在这种情况下，用户可以使用 MASS21 单元模拟不平衡因素执行非线性瞬态分析。

1. 使用 OMEGA 命令确定转速

用户可以使用命令 OMEGA 指定转速。当命令 SYNCHRO 被激活时，则命令 OMEGA 定义转速矢量的方向。转速使用命令 HARFRQ 自动指定。如下所示：

```
harfrq,100          ! 100 Hz
synchro             !转速为 200πrd/s
omega,1,1,1,1       ! 转速的矢量方向且每个方向的值为  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = \frac{100 \times 2 \times \pi}{\sqrt{3}}$ 
```

2. 使用 CMOMEGA 命令确定转速

用户使用命令 CMOMEGA 指定转速。当命令 SYNCHRO 被激活时，命令 CMOMEGA 仅仅定义组件的转速矢量方向。如果有多个组件，则可以使用命令 CMOMEGA 指定它们之间的比值。使用命令 HARFRQ 指定驱动组件的转速，如下例所示：

```
harfrq,100.         !激励频率 100 Hz
synchro,,SPOOL1     !驱动组件为 SPOOL1
cmomega,SPOOL1,1,1,1,1 !定义 SPOOL1 的转速矢量方向
cmomega,SPOOL2,2,2,2,2 !定义 SPOOL2 的转速矢量方向，且二者转速之比为 2
```

24.5.5 选择合适的求解器

1. 模态分析的求解

使用命令 OMEGA 施加转速。

在转子动力学分析中可以使用 DAMP 和 QRDAMP 特征值求解器。在选择特征值求解器之前，应该注意以下事项：

1) 如果用户随后计划执行模态叠加、谐响应或瞬态分析，则选择使用 QRDAMP 求解器。DAMP 求解器不支持模态叠加法。

2) 使用 DAMP 求解器求解完全的系统方程，使用 QRDAMP 求解器求解缩减的系统方程。虽然 QRDAMP 求解器比 DAMP 求解器效率高，但是它只适用于阻尼不重要的情况下。当分析中包含了转动阻尼并且转动结构部件由实体单元组成时，建议使用 DAMP 求解器。在使用 QRDAMP 方法完成复数模态求解以后，复数频率如下所示：

***** DAMPED FREQUENCIES FROM REDUCED DAMPED EIGENSOLVER *****

MODE	COMPLEX FREQUENCY)(HERTZ)			MODAL DAMPING RATIO
1	-0.78052954E-01	49.844724	j	0.15659202E-02
	-0.78052954E-01	-49.844724	j	0.15659202E-02
	(a)	(b)		(c)

其中，(a) 是复数频率中的实部，它显示了这个特定频率下的阻尼以及其稳定性，实部为负值表明转子系统为稳定性质，相反实部为正值表明为不稳定转子系统。(b) 为复数频率中的虚部，它代表了阻尼频率；(c) 为模态阻尼比，它为复数频率的实部与虚部的比值，也可称为复数频率的模。

虽然陀螺效应制造了阻尼矩阵，但这个阻尼矩阵并不耗散能量，因此如果转子系统中没有阻尼存在，则复数频率的实部为 0。如果复数频率对应为刚体模式或是如果阻尼很重要以至于抑制了频率，则复数频率的虚部为 0。在打印输出中，每个模式有两行显示复数频率以及其共轭形式，因为这两个本征都来源于问题。

2. 谐响应分析的求解

转子动力学分析中支持完全法和模态叠加法。如果在分析中使用 SYNCHRO 命令（例如在不平衡响应的计算中），则不能使用模态叠加法。在这种情况下，陀螺矩阵必须在每个频率步处重新计算并且仅仅可以使用完全法求解。

3. 瞬态分析的求解

完全法和基于 QRDAMP 模态分析的模态叠加法适用于转子动力学的瞬态分析。对于完全法要使用带有非对称矩阵的牛顿-拉普森方法。如果转速是变化的，则不能使用模态叠加方法进行求解。在这种情况下，陀螺矩阵需要在每一个时间步重新计算并且仅可使用完全法。

24.6 转子动力学的后处理

在用户完成分析之后，用户将进行结果的分析。这往往涉及到处理从结果文件中的数据和组织以便相关参数和他们之间的关系可用。

24.6.1 处理复数结果

1. In POST1

在完成谐响应分析后，用户可以在通用后处理器中观察激励频率，在完成复数模态分析后可以查看阻尼频率。

使用命令 SET 可以从结果文件读取数据。

具体来说，SET 中的 KIMG 参数用于输出复数结果如下。

- 实部 (KIMG = REAL)。
- 虚部 (KIMG = IMAG)。
- 幅值 (KIMG = AMPL)。
- 相位 (KIMG = PHAS)。

一旦期望的数据存储到数据库中，用户可以使用任何后处理命令去创建图形显示。

2. In POST26

完成谐响应分析之后，时间后处理器允许用户观察指定位置的结果与频率的函数关系。

使用命令 NSOL, ESOL 和 RFORCE 定义变量；使用 ABS, IMAGIN, REALVAR 和 ADD 命令进行变量的运算；使用 PRVAR, PLVAR 和 EXTREM 命令观察变量。

当画复数值的图时，默认情况下 PLVAR 只画幅值。通过使用 PLCPLX 命令，用户可以画相位角、实部或虚部。当列表输出复数值时，默认情况下 PLVAR 命令只列出实部和虚



部。通过使用 PLCPLX 命令，用户可以列出幅值和相位角。

24.6.2 观察运动轨迹

完成模态或谐响应分析之后，在通用后处理器中，可以使用 PLORB 命令去观察系统的运动轨迹。因为对于旋转轴上节点的轨迹只有椭圆轨迹是有效的，所以 PLORB 只对下列线单元有效：BEAM4, PIPE16, BEAM188, BEAM189, REINF264, REINF265, PIPE288 和 PIPE289。

如果模型是实体单元，用户可以在转轴上添加一根无质量的线单元以便计算轨迹特性并输出。下例给出了指定频率下的轨迹，如图 24-3 所示。

```
/POST1
set,1,6      ! 读入载荷步 1,子步 6
plorb
```

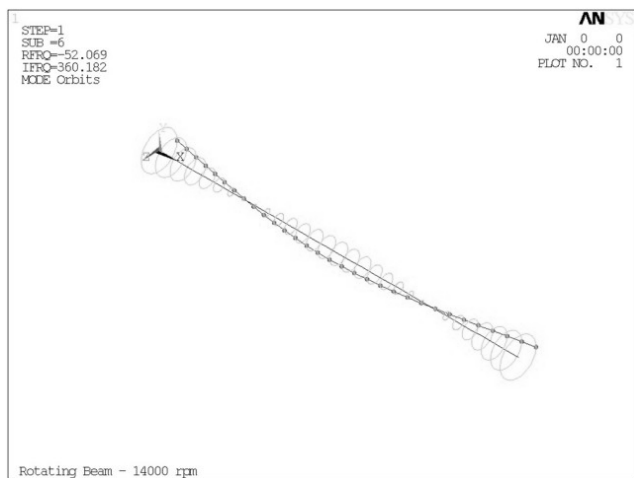


图 24-3 转子系统轨迹图

24.6.3 输出轨迹特性

完成模态或谐响应分析之后，在通用后处理器中，可以使用 PRORB 命令输出系统运动轨迹的特性。因为对于旋转轴上节点的轨迹只有椭圆轨迹是有效的，所以 PRORB 只对下列线单元有效：BEAM4, PIPE16, BEAM188, BEAM189, REINF264, REINF265, PIPE288 和 PIPE289。如果模型是实体单元，用户可以在转轴上添加一根无质量的线单元以便计算轨迹特性并输出。

下例给出了指定频率下的轨迹特性输出：

```
/POST1
set,1,6      ! 读入载荷步 1,子步 6
prorb
```

角度的显示范围为 $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$ 。

24.6.4 动画显示轨迹

在通用后处理后，使用 ANHARM 命令动画显示轨迹和观察涡动。例如：

```
/POST1
set,1,6      ! 读入载荷步 1,子步 6
plnsol,u,sum  ! 指定具体结果的动画
anharm
```

24.6.5 完成瞬态分析后观察轨迹

使用 PLVAR 命令可以画出瞬态分析中的轨迹，如下例所示：

```
/post26
INODE = 12      !关心的节点
nsol,2,INODE,u,y !定义变量 2
nsol,3,INODE,u,z !定义变量 3
/axlab,X,displacement UY !指定 x 轴的标记
/axlab,Y,displacement UZ !指定 y 轴的标记
xvar,2          ! x 轴的数据为变量 2
plvar,3         !在 y 轴上画出变量 3
```

24.6.6 后处理轴承和反力

只有这些力被写进数据库，用户才能处理单元力。在求解中使用 OUTRES 去控制数据库的写入。在求解中使用 OUTPR 命令输出载荷。

下例给出了在通用后处理中输出反力和单元力：

```
/post1
set,last      ! 最后一个载荷步的最后一个子步
!输出反力
force,static  !弹性力 (刚度)
prrfor
force,damp    !阻尼力
prrfor
! 输出单元力
force,static  !弹性力(刚度)
presol,F
force,damp    !阻尼力
presol,F
```

如果用户使用 COMBI214 单元模拟轴承，就可以从单元中提取反力。

瞬态轴承反力是 COMBI214 单元输出的一部分。弹性力（也称弹簧弹力）和阻尼力在沿着主惯性轴的单元上可用。所有计算的力都包括截面效应。

用户在时间历程处理器中可以输出刚度和阻尼轴承力，如下例所示：





```
/post26
!为单元和节点定义参数
BEARING_ELEM = 154
BEARING_NODE1 = 1005
! 定义弹性力为变量 2 和 3
esol,2,BEARING_ELEM,BEARING_NODE1,smisc,1,FE1
esol,3,BEARING_ELEM,BEARING_NODE1,smisc,2,FE2
! 定义阻尼力为变量 4 和 5
esol,4, BEARING_ELEM,BEARING_NODE1,nmisc,5,FD1
esol,5, BEARING_ELEM,BEARING_NODE1,nmisc,6,FD2
! 输出力与时间的函数关系
prvar,2,3,4,5
! 画出力与时间的函数图
plvar,2,3,4,5
```

24.6.7 坎贝尔图

经过多次模态求解后，用户可以画出坎贝尔图，从图中可知。

- 观察转速随频率的变化。
- 检查每一个模式的稳定性和涡动。
- 确定临界转速。

绘制坎贝尔图需要求出多个自转频率值对应的涡动频率，这就要求在求解时，指定不同的自转频率值，反复计算，直到自转频率值与进动频率值相等。在坎贝尔图中进动频率曲线和等转速线交点对应的频率即为临界转速。

24.7 实例：转子-轴承系统的临界转速计算

24.7.1 工程背景

旋转机械被广泛地应用于包括燃气轮机、航空发动机、工业压缩机及各种电动机等机械装置中，而对其动力学特性的研究也形成了一门专门的学科——转子动力学。转子动力学在国内外都是一门非常活跃的学科，每年都有大量的文章发表。转子动力学是研究所有与旋转机械转子及其部件和结构有关的动力学特性，包括动态响应、振动、强度、疲劳、稳定性、可靠性、状态检测、故障诊断和控制等学科。

24.7.2 问题的描述

1 模型的几何参数

图 24-4 给出了转子-轴承问题的力学简图，该系统由两个转盘、四根转轴、两个轴承组成。模型的几何参数如表 24-3 所示。

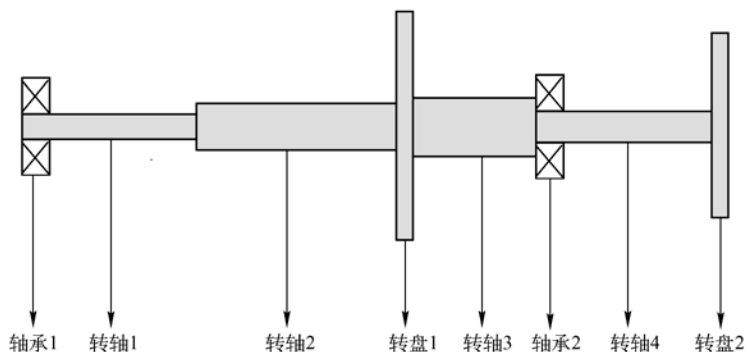


图 24-4 转子轴承系统的力学简图

表 24-3 转子系统的几何参数

转轴 1 长度 L_1	转轴 1 的直径 D_1	转轴 2 的长度 L_2	转轴 2 的直径 D_2
0.7m	0.06m	0.7m	0.09m
转轴 3 的长度 L_3	转轴 3 的直径 D_3	转轴 4 的长度 L_4	转轴 4 的直径 D_4
0.25m	0.13	0.7m	0.07

2. 单元的选择及材料常数

本实例使用MASS21 模拟刚性转盘，使用BEAM188 模拟转轴，使用COMBIN214 模拟轴承。转盘 1 的质量 $M_1=50\text{kg}$ ，极转动惯量 $J_{P1}=4\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，直径转动惯量 $J_{D1}=2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，转盘 2 的质量 $M_2=20\text{ kg}$ ，极转动惯量 $J_{P2}=2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，直径转动惯量 $J_{D2}=1\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。所有转轴材料的弹性模量为 $2.1\text{E}11$ ，泊松比为 0.3，密度为 $7800\text{ kg}/\text{m}^3$ 。轴承平面为Y Z平面，通过设置关键字来实现。只考虑两个方向的轴承刚度，忽略轴承阻尼。轴承 1 的刚度为 $K_{YY1}=1.764\text{E}9$ ， $K_{ZZ1}=1.764\text{E}9$ ；轴承 2 的刚度为 $K_{YY2}=3.264\text{E}9$ ， $K_{ZZ2}=3.264\text{E}9$ 。计算中考虑转轴的材料阻尼，阻尼为 $2\text{E}-5$ 。

3. 边界条件

本转子轴承系统不考虑剪切和扭矩影响，因此约束模型的 X 方向平动位移和转动位移。考虑陀螺效应，转子轴承系统的考察转速分别为：0，2 000，5 000，8 000，9 000，10 000，110 000，单位都为 r/min。在转速输入时，ANSYS 的单位为 rad/s，因此需要转换，转换公式为：

$$f = N \times 2 \times \pi / 60$$

其中， f 为频步； N 为转速。

24.7.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框，在输入栏中输入 Critical Speed，单击 OK。



2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框的 Selection 中输入 $L1=0.7$ ，单击 Accept 完成对转轴 1 的长度参数的定义，按照此方法继续定义转轴 1 的直径 $D1=0.06$ ，转轴 2 的长度 $L2=0.7$ ，转轴 2 的直径 $D2=0.09$ ，转轴 3 的长度 $L3=0.25$ ，转轴 3 的直径 $D3=0.13$ ，转轴 4 的长度 $L4=0.7$ ，转轴 4 的直径 $D4=0.07$ ，转盘 1 的质量 $M1=50$ ，转盘 1 的极转动惯量 $JP1=4$ ，转盘 1 的直径转动惯量 $JD1=2$ ，转盘 2 的质量 $M2=20$ ，转盘 2 的极转动惯量 $JP1=2$ ，转盘 2 的直径转动惯量 $JD1=1$ ，轴承 1 的特性参数： $KYY1=1.764E9$ ， $KZZ1=1.764E9$ ，轴承 2 的特性参数 $KYY2=3.264E9$ ， $KZZ2=3.264E9$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid Mass，然后在右边选择三维 mass 单元，单击 Apply 继续在左边选择 Beam，然后在右边选择 2 node 188，单击 Apply，继续在左边选择 Combination，然后在右边选择二维 Bearing 214，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，选择 COMB214，单击 Options 按钮，设置关键字 K2 为平行于 YZ 平面 (Parallel to YZ plane)。

(3) 定义实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete

在弹出的对话框中单击 Add，在弹出的对话框中选择单元类型 MASS21，单击 OK，在弹出的对话框中输入 $MASSX=M1$ ， $MASSY=M1$ ， $MASSZ=M1$ ， $IXX=JP1$ ， $IYY=JD1$ ， $IZZ=JD1$ ，单击 OK；继续单击 Add，选择单元 MASS21，单击 OK，在弹出的对话框中输入 $MASSX=M2$ ， $MASSY=M2$ ， $MASSZ=M2$ ， $IXX=JP2$ ， $IYY=JD2$ ， $IZZ=JD2$ ，单击 OK；继续单击 Add，选择单元 COMBI214，单击 OK，在弹出的对话框中输入 $K11=KYY1$ ， $K22=KZZ1$ ，单击 OK；继续单击 Add，选择单元 COMBI214，单击 OK，在弹出的对话框中输入 $K11=KYY2$ ， $K22=KZZ2$ ，单击 OK，单击 Close。

(4) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic

又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 $EX=2-1E11$ ， $PRXY=0.3$ ，单击 OK，单击 Density，输入 $DENS=7800$ ；设置材料的阻尼，单击 Damping | constant 在弹出的对话框中输入材料阻尼 $DAMP=2E-5$ ，单击 OK，选择 Material | Exit，退出面板。

4. 定义梁截面形状

GUI: Main Menu | Preprocessor | Sections | Beam | Common Sections

在弹出的 Beam Tool 面板中的输入 $ID=1$ ，在 Sub-Type 选项中选择圆型，输入 $R=D1/2$ ， $N=25$ ， $T=10$ ，单击 Apply；继续输入 $ID=2$ ，输入 $R=D2/2$ ， $N=25$ ， $T=10$ ，单击 Apply；继续输入

ID=3, 输入 $R=D3/2$, $N=25$, $T=10$, 单击Apply; 继续输入ID=4, 输入 $R=D4/2$, $N=25$, $T=10$, 单击OK。

5. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 $NPT=1$, $X=0$, $Y=0$, $Z=0$, 单击 Apply; 继续输入 $NPT=2$, $X=L1$, $Y=0$, $Z=0$, 单击 Apply; 继续输入 $NPT=3$, $X=L1+L2$, $Y=0$, $Z=0$, 单击 Apply; 继续输入 $NPT=4$, $X=L1+L2+L3$, $Y=0$, $Z=0$, 单击 Apply; 继续输入 $NPT=5$, $X=L1+L2+L3+L4+L5$, $Y=0$, $Z=0$, 单击 OK。

(2) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line

弹出拾取对话框, 拾取关键点 1 和 2, 生成线 1, 按照同样的方法拾取关键点 2 和 3, 3 和 4, 4 和 5, 单击 OK。

6. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool。

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中 Global 的 Set, 在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.02, 单击 OK。

(3) 划分转轴 1 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板中的 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 BEAM188 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 设置截面号 (Section number) 为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 划分转轴 1 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取转轴 1 线 L1, 单击 OK。

(4) 划分转轴 2 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 BEAM188 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 设置截面号 (Section number) 为 2, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 划分转轴 2 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取转轴 2 线 L2, 单击 OK。

(5) 划分转轴 3 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板中 Element Attributes 的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 BEAM188 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 设置截面号 (Section number) 为 3, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 划分转轴 3 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取转轴 2 线 L2, 单击 OK。

(6) 划分转轴 4 的网格

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板中 Element Attributes 的 Set, 在弹出的对话框





中设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 BEAM188 单元, 设置材料号 (Material number) 为 1, 设置截面号 (Section number) 为 4, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 划分转轴 1 网格。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取转轴 4 线 L4, 单击 OK。

(7) 定义转盘 1 单元

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板中 Element Attributes 的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 1 号 MASS21 单元, 设置实常数 (Real constant set number) 为 1, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 定义质量单元

设置网格划分实体为 Key Points, 单击网格划分工具面板中的 Mesh, 弹出拾取对话框拾取转盘 1 位置的关键点, 单击 OK。

(8) 定义转盘 2 单元

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板中 Element Attributes 的 Set, 在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 1 号 MASS21 单元, 设置实常数 (Real constant set number) 为 2, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 定义质量单元。设置网格划分实体为 Key Points, 单击网格划分工具面板中的 Mesh, 弹出拾取对话框拾取转盘 1 位置的关键点, 单击 OK。

(9) 定义轴承单元

1) 定义节点。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS

在弹出的对话框中输入 $X=0$, $Y=D1/2*1.5$, $Z=0$, 单击 Apply; 继续输入 $X=L1+L2+L3$, $Y=D3/2*1.5$, $Z=0$, 单击 OK。

2) 提取节点号

在命令窗口中输入:

```
NZ11=NODE(0,0,0)
NZ12=NODE(0,D1/2*1.5,0)
NZ21=NODE(L1+L2+L3,0,0)
NZ22=NODE(L1+L2+L3,D3/2*1.5,0)
```

3) 设置单元属性

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

在弹出的对话框中设置单元类型号 (Element type number) 为 COMBI214, 设置实常数 (Real constant set number) 为 3, 其他保持默认值, 单击 OK。

4) 定义轴承 1 单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Node
弹出拾取对话框, 在对话框中输入 NZ11,NZ12, 单击 OK。按照同样方法定义轴承 2 单元。

7. 设置分析类型

(1) 设置模态分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Modal 含义为进行静力学问题求解。

(2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出模态分析 (Model Analysis) 对话框, 设置模态提取方法为 QR Damped; 在 No. of modes to extract 选项中设置模态提取阶 20, 在 NMODE No. of modes to expand 选项中设置模态提取阶数为 20, 单击 OK, 保持弹出 Block Lanczos 方法对话框的默认设置, 单击 OK。

8. 定义边界条件

(1) 定义绕转轴的平动位移和转动位移

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 单击 Pick All, 在弹出的对话框中选择 UX 和 ROTX, 单击 OK。

(2) 固定轴承

GUI: GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框, 输入 NZ12, NZ22, 单击 OK, 在弹出的对话框中选择 All。

(3) 考虑陀螺效应

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Angular Veloc | Coriolis

在弹出的对话框中设置陀螺效应 (Coriolis) 为 ON, 坐标参考系 (Reference) 为固定坐标系 (Stationary), 单击 OK。

(4) 定义转速

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Angular Veloc | Global

在弹出对话框中输入绕 X 轴的旋转速度 (DOMGX) 为 0。

9. 开始计算

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。求解完毕后, 继续设置转速为 $2\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解; 继续设置转速为 $5\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解; 继续设置转速为 $8\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解; 继续设置转速为 $9\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解; 继续设置转速为 $10\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解; 继续设置转速为 $11\,000 \times 2 \times 3.14\,15/60$, 然后再求解。

10. 后处理

为了获得坎贝尔图, 在命令窗口输入:

```
PRCAMP,,1,RPM
PLCAMP,,1,RPM
```

命令运行后, 弹出如下图, 从图中可以得到同步转动时的临界转速。为了获得准确的临界转速, 在命令窗口输入:

```
*GET,CRIC1,CAMP,1,VCRI,,,
```



```
*GET,CRIC2,CAMP,2,VCRI,,  
*GET,CRIC3,CAMP,3,VCRI,,  
*GET,CRIC4,CAMP,4,VCRI,,  
*GET,CRIC5,CAMP,5,VCRI,,
```

GUI: Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data

打开标量参数列表，从图 24-5 可以看到该转子-轴承系统在给定转速范围内，共有 5 个临界转速，分别是：1 513.5 转/分、1 871.5 转/分；3 215.9 转/分，4 305.8 转/分和 7 500.9 转/分。

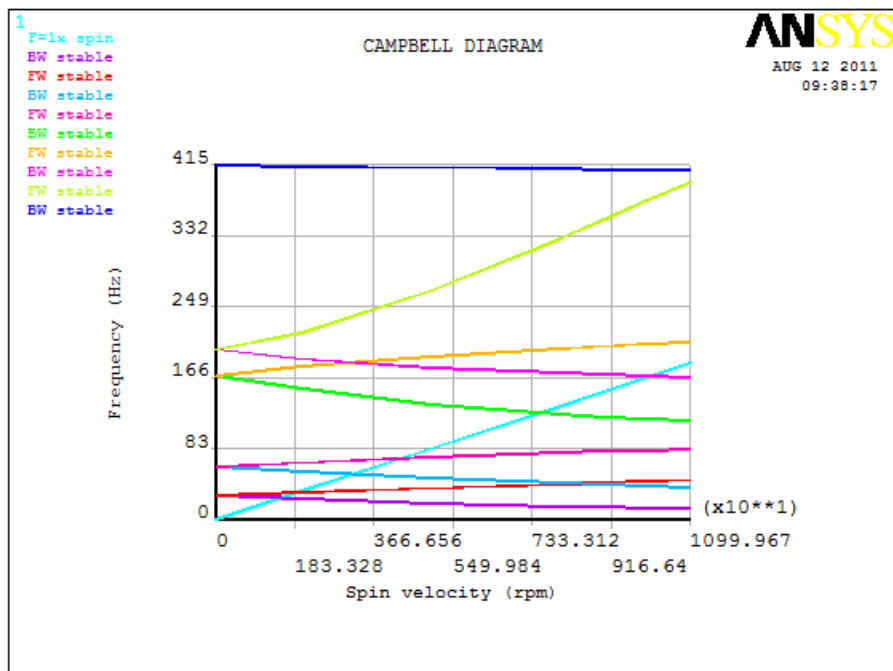


图 24-5 转子-轴承系统的坎贝尔图

第 25 章 焊接工程问题分析



25.1 焊接工程的意义

焊接结构一个很明显的特点是有较大的焊接应力和变形。由于焊接生产中，绝大部分焊接方法都采用局部加热，所以不可避免地将产生焊接应力和变形。焊接应力和变形不但可能引起热裂纹、冷裂纹、脆性断裂等工艺缺陷，而且在一定条件下将影响结构的承载能力，如强度，刚度和受压稳定性。除此以外还将影响到结构的加工精度和尺寸稳定性。因此，在设计和施工时充分考虑焊接应力和变形这一特点是十分重要的。可见，对焊接应力和变形进行计算和分析有着很重要的现实意义。而焊接过程中局部集中的热输入，使焊件形成非常不均匀、不稳定的温度场。温度场不仅直接通过热应变，而且还间接通过显微组织变化引起相应变决定焊接残余应力。因此，温度场的分析是焊接应力和变形分析前提。

随着计算机软、硬件的发展，有限元法已广泛应用于焊接热传导、焊接热弹塑性应力和变形分析的研究。使用性广泛的有限元程序软件如：ANSYS, MARC, ADINA 等等，这为研究人员提供了很好的模拟计算工具。本章详细介绍 ANSYS 在焊接工程中的应用，主要包括焊接过程的模拟及焊接接头的强度的有限元评定方法。

25.2 焊接过程有限元分析的特点

采用空间和时间有限元（包括有限差分法）模拟焊接时材料和构件的热和力学（弹性-粘塑性）行为，分析焊接残余应力和变形，并采用弹性构件分析同样程度的细节，在超级计算机时代也是难以解决的任务。焊接过程的有限元分析有下述特点。

- 1) 焊接接头模型应该是三维的，以便反映内部和表面的不同冷却条件。
- 2) 由于快速加热和冷却，模拟的过程是高度瞬态的，具有与位置和时间相关的极不相同的梯度场。
- 3) 由于材料的热——力行为，模拟的过程是高度非线性的，并与温度密切相关。
- 4) 局部材料的瞬态行为取决于局部热的历史和力学的应力应变历史。
- 5) 焊接材料熔敷以及凝固后改变构件的连接状况；
- 6) 临界情况下可能发生的缺陷和裂纹，使连续介质的概念受到怀疑。

在工业生产和加工过程中阻碍焊接过程有限元分析应用的另一个问题是，在分析前需要确定众多的材料性能参数与温度的关系；而目前高温下只有零星的数据。

如果在模型中某些问题起主导作用就不用考虑上述所有要点，这时只在有限元模型中研究主要的影响参数，有限元方法就可以给出贴切的实际结果。比如在热应力计算过程中就可以忽略高温相变问题；这就涉及到模型简化问题。



25.3 焊接过程有限元模型的简化

焊接是一个牵涉到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程。焊接现象包括焊接时的电熔、传热过程、金属的熔化和凝固、冷却时的相变、焊接应力与变形等。

影响焊接应力应变的因素有焊接温度场和金属显微组织，而焊接应力应变场对温度场和显微组织的影响却很小，所以在分析时，一般仅考虑单向耦合问题，即焊接温度场和金属显微组织对焊接应力应变场的影响，而不考虑应力场对它们的影响。因此在 ANSYS 软件里模拟焊接过程可以采用间接法进行求解。此外，金属相变对焊接温度场有影响，但影响不是很大，因为考虑相变潜热对其温度场的影响较容易，所以本章考虑它对温度场的影响。

25.4 焊接温度场的分析理论

焊接时，由于焊件是局部受热的，焊件中存在很大的温度差，因此，不管是焊件内部还是焊件与周围介质之间都会发生热能的流动。根据传热学的理论，热的传递不外乎传导、对流和辐射三种基本形式。

对于焊接过程来讲，以哪一种传热方式为主呢？根据研究的结果认为，在熔焊的条件下，由热源传热给焊件的热量，主要是以辐射和对流为主，而母材和焊条（焊丝）获得热能后，热的传播则是以热传导为主。焊接传热过程所研究的内容主要是焊件上的温度分布及其随时间的温度变化问题，因此，研究焊接温度场，应以热传导为主，适当考虑辐射和对流的作用。

25.4.1 焊接过程的有限元基本方程

焊接是一个局部快速加热到高温，并随后快速冷却的过程。随着热源的移动，整个焊件的温度随时间和空间急剧变化，材料的热物理性能也随温度剧烈变化，同时还存在熔化和相变时的潜热现象。因此，焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。

非线性瞬态热传导问题的控制方程为：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q} \quad (25-1)$$

式中， c 为材料比热容； ρ 为材料密度； λ 为导热系数； T 为温度场分布函数； $\dot{Q}$ 为内热源； t 为传热时间。这些参数中 λ 、 ρ 、 c 都随温度变化。

焊接温度场的计算通常用到以下两类边界条件。

- 1) 已知边界上的热流密度分布。
- 2) 已知边界上的物体与周围介质间的热交换。

25.4.2 非线性瞬态热传导的有限元分析

由于焊接温度场的分析是典型的非线性瞬态热传导问题，而这类问题的求解特点是在空间域内用有限单元网格划分，而在时间域内则用有限差分网格划分。

瞬态热传导过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热传导可以表达为

(以矩阵形式表示):

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (25-2)$$

式中, $[K]$ 为传导矩阵, 包含热系数、对流系数及辐射和形状系数; $[C]$ 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加; $\{T\}$ 为节点温度向量; $[T]$ 为温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流率向量, 包括热生成;

因为焊接过程中材料热性能随温度变化, 如 $K(T)$, $C(T)$ 等, 边界条件随温度变化, 含有非线性单元, 考虑辐射传热等原因会导致瞬态传热方程具有非线性, 所以非线性热分析的热平衡方程为:

$$[C(T)]\{T\} + [K(T)][T] = \{Q(T)\} \quad (25-3)$$

25.5 焊接应力和变形的分析理论

由于高度集中的瞬时热输入, 在焊接过程中和焊接后将产生相当大的焊接应力和变形。焊接应力和变形计算以焊接温度场的分析为基础, 同时考虑焊接区组织转变对应力应变场带来的影响。目前, 研究焊接应力和变形的理论很多, 如热弹塑性分析、固有应变法、粘弹塑性分析、考虑相变与热应力耦合效应等。热弹塑性分析是在焊接热循环过程中通过一步步跟踪热应变行为来计算热应力和应变的, 该方法需要采用有限元计算方法在计算机上实现。热弹塑性问题是一个热力学问题。作为热力学系统的焊接材料, 其自由能密度不仅与应变有关, 而且还与温度有关。也就是说, 力学平衡方程中有与温度有关的项。从能量上看, 输入的热能在使焊接材料温度上升的同时, 还由于结构的膨胀变形做功而消耗一部分。这时, 在热传导平衡方程中, 要增加与应力有关的项。因此, 严格地说, 温度场与应力场是相互耦合的。不过这种耦合效果除个别特殊情况外, 一般都很小, 而且焊缝附近的温度变化很大, 材料的各种物理性能也相应变化很大, 这种影响与上述耦合效应相比要大得多。所以就焊接的热弹塑性而言, 使用间接耦合法计算应力场和温度场是合适的。

在热弹塑性分析时有如下一些假定:

- 1) 材料的屈服服从米赛斯 (Von Mises) 屈服准则。
- 2) 塑性区内的行为服从塑性流动准则和强化准则。
- 3) 弹性应变、塑性应变与温度应变是不可分的。
- 4) 与温度有关的力学性能、应力应变在微小的时间增量内线性变化。

25.6 计算模型

25.6.1 焊接热源模型

对于大部分焊接而言, 焊接热源是实现焊接过程的基本条件。由于焊接热源的局部集中热输入, 致使焊件存在十分不均匀、不稳定的温度场, 进而导致焊接过程中和焊后出现较大的焊接应力和变形。因此, 焊接热源模型是否选取适当, 对焊接温度场和应力变形的模拟计



算精度，特别是在靠近热源的地方，会有很大的影响。在焊接过程的数值模拟研究中，人们提出了一系列的热源计算模式，下面简要加以介绍。

1. 高斯函数分布的热源模型

焊接时，电弧热源把热能传给焊件是通过一定的作用面积进行的，这个面积称为加热斑点。加热斑点上热量分布是不均匀的，中心多而边缘少。费里德曼将加热斑点上热流密度的分布近似地用高斯数学模型来描述，距加热中心任一点 A 的热流密度可表示为如下形式：

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (25-4)$$

式中， q_m 为加热斑点中心最大热流密度， R 为电弧有效加热半径； r 为 A 点距离电弧加热斑点中心的距离。对于移动热源

$$q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q \quad (25-5)$$

这种热源模型在用有限元分析方法计算焊接温度场时应用较多。在电弧挺度较小、对熔池冲击力较小的情况下，运用这种模型能得到较准确的计算结果。

2. 半球状热源模型和椭球状热源模型

对于高能束焊接（如激光焊、电子束焊等），必须考虑其电弧穿透作用。在这种情况下半球状热源模型比较合适。半球状热源分布函数为：

$$q(r) = q_m \frac{6Q}{\pi^{3/2} R^3} \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (25-6)$$

这种分布函数也有一定局限性，因为在实践中，熔池在激光焊等情况下不是球对称的，为了改进这种模式，人们提出了椭球状热源模型。椭球状热源分布函数可表示为：

$$q(r) = q_m \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2} abc} \exp\left[-3\left(\left(\frac{x^2}{a^2}\right) + \left(\frac{y^2}{b^2}\right) + \left(\frac{z^2}{c^2}\right)\right)\right] \quad (25-7)$$

3. 双椭球状热源模型

用椭球状热源分布函数计算时发现在椭球前半部分温度梯度不像实际中那样陡变，而椭球的后半部分温度梯度分布较缓。为克服这个缺点，提出了双椭球状热源模型，这种模型将前半部分作为一个 $1/4$ 椭球，后半部分作为另一个 $1/4$ 椭球。设前半部分椭球能量分数为 f_1 ，后半部分椭球能量分数为 f_2 ，且 $f_1 + f_2 = 2$ ，则在前半部分椭球内热源分布为

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi^{3/2} abc} \exp\left[-3\left(\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right)\right] \quad (25-8)$$

在后半部分椭球内热源分布为

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi^{3/2} abc} \exp\left[-3\left(\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right)\right] \quad (25-9)$$

此两式中的 a 、 b 、 c 可取不同的值，它们相互独立。在焊接不同材质时可将双椭球分成 4 个 $1/8$ 的椭球瓣，每个可对应不同的 a 、 b 、 c 。

25.6.2 热源模型的选取

通常解析方法较简单,意义明确,容易计算,但由于其假设太多,难以提供在焊接热影响区的精确计算结果,而且考虑不到电弧力对熔池的冲击作用。采用有限元和有限差分法,应用高斯分布的表面热源分布函数计算,可以引入材料性能的非线性,可进一步提高高温区的准确性,但仍未考虑电弧挺度对熔池的影响。从球状、椭球到双椭球热源模型,每一种方案都比前一种更准确,但也伴随着计算量的增加,使这些热源分布函数更利于应用有限元法或差分法在计算机上进行计算,而且实践也证明能得出较满意的模拟结果。对于通常的焊接方法如手工电弧焊、钨极氢弧焊,采用高斯分布的函数就可以得到较满意的结果。对于电弧冲击力效应较大的焊接方法,如熔化极氢弧焊和激光焊,常采用双椭球形分布函数。为求准确,还可将热源分成两部分,采用高斯分布的热源函数作为表面热源,焊件熔池部分采用双椭球形热源分布函数作为内热源。

在计算时,由于焊缝的对称性,一般只考虑计算一半区域,除上表面外,其他表面设为绝热边界,辐射和对流可直接计算,也可通过改变材料物理性能如表面的热传导系数等间接运算。

25.6.3 材料物理性能参数的影响

金属材料的物理性能参数如比热、导热系数、弹性模量、屈服应力等一般都随温度的变化而变化,是非线性的。当温度范围变化不大时,可采用材料物理性能参数的平均值进行计算。但在焊接过程中,焊件温度变化十分剧烈,如果不考虑材料的物理性能参数随时间的变化,那么计算结果就会产生很大的偏差。所以在焊接温度场和应力场的模拟计算中必须要给定材料的各项物理性能参数随温度的变化值。但是,许多材料的物理性能参数在高温特别是接近熔化状态时还是空白,某些材料仅有室温数据,而高温性能参数对焊接过程和计算过程均有较大影响,这会给模拟计算带来很大的困难。当然,通过实验和线性插值的方法可以获得高温时的一些数据,但有时处理不当,就会导致计算不收敛或结果不准确。例如,焊接时熔池金属处于熔化状态,其屈服极限和弹性模量是没有实际物理意义的,但焊接过程的数值模拟计算是基于弹塑性理论的,这些参数必须为非零值,若参数取得过小会导致计算收敛困难,并且即使收敛也会使计算时间大幅度增加,参数取得偏大又会影响结果的准确性。

25.6.4 边界换热系数

焊件的边界由于与外界存在温度差而与周围介质换热,其中包括对流和辐射换热。实验表明,在焊接时热能的损失主要通过辐射,而对流作用相对较小温度越高则辐射换热作用越强烈。一般辐射与对流换热计算方式不同。为了计算方便,考虑总的换热系数。这样,因边界换热而损失的热能可表示为:

$$q_s = \beta(T - T_a) \quad (25-10)$$

式中, T 为焊件表面温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; T_a 为周围介质温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; β 为表面换热系数,单位 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

严格地说,对流换热系数还与焊件的部位有关,因为周围气体流动特性不一样。但要测出不同部位的对流换热系数是很困难的,这里不予考虑。此外,和材料的其他物理性能参数一样,换热系数也随温度的变化而变化。在计算时,必须给定随温度变化的表面换热系数值。



25.6.5 相变潜热

焊接过程中, 母材熔化时, 由固态变为液态, 要吸收能量; 反之熔池凝固时由液态变成固态, 要放出热量。所以在计算温度场时, 要考虑熔池相变潜热对温度场的影响, 否则计算结果会有较大偏差。对于固态相变, 由于其潜热一般比固液相变潜热小很多, 通常将其忽略。但在高强钢焊接时必须考虑其影响。对固液相变潜热处理通常采取的方法有修正比热法、热焙法和温度回升法, 这里做简要介绍。利用等效比热法通过材料的比热容量的迅速上升或下降的变化来计算潜热对结构热焓值的影响。等效比热法按下式计算:

$$\begin{cases} C_e = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \\ C_p = C_e + C \end{cases} \quad (25-11)$$

25.7 ANSYS焊接模拟过程

25.7.1 焊接过程温度场模拟分析

1. 网格划分

ANSYS 提供两种网格划分方式:自由网格和映射网格。自由网格对单元形状没有限制, 生成的单元也不规则。映射网格则要求一定规则的形状, 且映射面只包含四边形或三角形, 映射体网格只包含六面体单元。映射网格生成的单元比较规则, 有利于载荷的施加和收敛的控制。在有限元分析中, 一般来说, 增加划分网格的密度可以提高计算结果的精确性, 但网格密度的增加意味着计算量的增大, 计算成本会上升。同时网格的密度也不能无限制的上升, 一般以保证计算结果的精度在用户控制的范围即可。在实际应用, 一般对最感兴趣的区域采用较密的网格, 远离这个区域可以用较稀疏的网格。在焊接过程中, 焊缝和热影响区的温度梯度变化很大, 所以该部分要采用加密的网格;而远离焊缝的区域, 温度梯度变化相对较小, 可以采用相对稀疏的网格。要获得一个良好的瞬态焊接温度场, 一般来说焊缝处的单元网格应控制在 2mm 以下。对于三维规则的模型, 一般先建立一个二维的映射网格, 在通过拉伸的方法获得排列规则的六面体单元, 这有利于载荷的施加。

2. 载荷施加和求解

热分析的载荷主要有温度、对流、热流密度和生热率。对于焊接热源载荷, 在 ANSYS 中可以用热流密度或生热率两种形式加载。对于表面堆焊问题, 忽略熔敷金属的填充作用时, 将热源以热流密度的形式施加载荷, 可以得到比较满意的结果。但对于开坡口的焊缝或添角焊缝等, 应将热源作为焊缝单元内部生热处理, 以生热率的形式施加载荷, 同时考虑金属的填充作用, 运用生死单元技术, 逐步将填充焊缝转化为生单元参与计算。

(1) 设定载荷步选项

在瞬态分析中, 施加的载荷是随时间变化的。对于每一个载荷步, 必须定义载荷值和时间值, 以及载荷的增加方式(渐变或阶越)。在非线性分析中, 每一个载荷步需要多个子步, 具体设置参看热分析一章。

为了保证计算的稳定性和收敛性,可以做如下设置:

- 采用 Full Newton Raphson (牛顿-拉普森) 方法, 每进行一次平衡迭代, 就修正一次刚度矩阵, 同时激活自适应下降功能;
- 打开自动时间步长;
- 打开时间步长预测;

时间步长的设置通常对计算精度有很大影响, 步长越小, 计算越精确, 但过小的时间步长需要很大的计算机容量和很长的计算时间。在焊接过程中一般时间步长应控制在 0.2s 左右, 在冷却过程中, 可逐步增大时间步长。

(2) 边界条件的设置

进行加载时, 高斯热源以热流密度的形式作用于焊件表面, 但同时还存在对流, 如果在同一平面上加两种不同性质的载荷, 后加的载荷会覆盖前面的载荷。所以在加载表面生成表面效应单元, 热流密度加在焊件平面节点上, 对流作为边界条件加在表面效应单元上。

(3) 热源的移动

热源移动可以采用两种方法实现:

- 利用 ANSYS 参数设计语言 APDL 编写子程序, 依次读取所要加载表面的节点坐标, 利用 ANSYS 数组和函数功能, 定义好相应节点位置的面载荷值, 然后通过循环语句在节点上施加面载荷。具体做法是: 沿焊接方向将焊缝长度 L 分为 N 段, 将各段的后点作为热源中心, 加载高斯分布的热源, 每段加载后进行计算, 每一个载荷的加载时间为 L/N 。当进行到下一段加载计算时, 须消除上一段所加的高斯热流密度, 而且上一次加载计算的温度值作为下一段加载的初始值。如此依次循环即可模拟热源的移动, 实现焊接瞬态温度场的计算。
- 利用 ANSYS 软件的函数加载功能, 在每个载荷步内, 以热源中心点为中心, 按高斯热源的变化在面上加载, 随着热源的移动每个载荷步内的 (也相应地改变, 这样通过控制, 使其随时间变化, 也就是随载荷步变化, 就可以模拟热源的移动。

(4) 冷却过程的计算

冷却阶段的计算比加热阶段简单。因为加热阶段已经检验过焊接温度场的各影响因素, 并进行修正, 而且冷却阶段温度梯度较加热时小, 采用加热阶段相同的时间步长为载荷步时, 计算比较容易收敛, 所以不必要进行检验各种影响因素。因为进行加热时定义的对流等边界条件还存在, 所以只需要命令 ANTYPE, REST 定义进行瞬态分析的下一步载荷步, 定义载荷步 i , 以及相应的载荷步时间, 删除内热源, 即可计算, 该过程可以手动完成, 也可以在这个过程定义循环进行计算。最后保存计算结果, 它的功能主要在进行焊接应力场计算时, 从保存的 *.rth 文件中读取节点温度, 并且当结构单元转化为热单元时, 可以从后处理中通过节点温度的大小来控制单元的“生死”以及改变单元属性。

3. 温度场后处理

进行焊接温度场模拟的精度判断:

(1) 温度场准稳态为随着热源的移动, 热源周围的温度分布很快变为恒定的, 位于热源中心的观察者, 当热源移动时, 不会注意到它周围的温度变化。在后处理时, 通过判断热源在不同时间时的温度场, 可判断是否为准稳态。如果是准稳态, 则说明网格和载荷步划分得够细, 达到计算的精度要求。如果不是准稳态, 则需要修改网格和载荷步再重新计算。





(2) 根据焊接温度场的特点, 通过焊接热后方的温度场, 与数值解进行比较, 可先后判断导热系数入是否合理, 如不合理则到前处理修改导热系数入, 然后重新计算。如果合理则进行冷却阶段的计算。上面提到的焊接温度场模拟的精度判断, 以及整体的判断计算过程是不是真的达到模拟的要求, 都离不开后处理。ANSYS 以及其他的通用有限元软件都提供可视化的后处理功能。后处理提供云图、动画等较直观的结果显示, 并且在云图上还可以点取一些点并显示它的数值大小。另外一个较强大的功能是可以通过路径输出结果, 即按某一规律变化定义一系列点或者单击所要选取的点, 那么这些有规律变化点的结果通过曲线或云图显示, 对于看某条曲线上的计算结果很方便。同时还可以剖开物体查看物体内部节点的计算结果。同时通过后处理, 可以通过动画显示焊接过程温度的变化, 更直观的了解焊接热源的移动过程。同时通过焊接温度场的计算结果控制单元的“生死”, 以及材料属性的变化还需要通过温度场后处理进行控制。

25.7.2 焊接过程应力应变场的模拟分析

1. 焊接应力场的计算方法

在 ANSYS 软件中, 计算焊接应力场的方法分为直接法和间接法。直接法是使用具有温度和位移自由度的耦合单元, 同时分析得到热分析和结构应力分析的结果。间接法是首先进行热分析, 然后将求得的节点温度作为体载荷施加在结构应力分析中。由于单元开发技术上的原因, 直接法可供选用的单元较少, 而且在分析过程中, 需要同时进行温度场计算和应力应变计算。需要指出的是, 进行温度场计算是对标量计算, 计算耗用的时间相对进行矢量计算的应力应变过程要少得多。所以直接法计算周期较长, 不够灵活。间接法可以先分析温度场, 温度场模拟准确之后, 保存温度场结果, 再分析应力应变, 如果应力应变结果不理想, 不必要进行温度场分析, 修改力学性能参数和优化载荷步等即可再进行应力应变计算。这样可以节省大量的时间。所以选用间接法进行计算较为合理、高效。

ANSYS 间接法的主要步骤如下。

1) 首先进行热分析。可以使用热分析的所有功能, 包括热传导、对流、辐射、表面效应单元等, 进行瞬态热分析。注意划分单元时充分考虑结构分析的要求, 在应力集中的地方网格要划得细一些。

2) 重新进入前处理, 将热单元转化为相应的结构单元。相应的命令为 ETCHG, TTS。

3) 设置结构分析的材料属性 (包括热膨胀系数) 以及前处理细节;

4) 读入热分析的节点温度, 命令为 LDREAD 输入或选择热分析的结果文件名为 *.rth。

5) 设置参考温度, 即设置构件加热初始温度 (均匀的温度)。

6) 进行求解、后处理。

2. 焊接应力场的分析

在焊接瞬态温度场计算完成的前提下, 并且检验符合要求后, 可以进行应力场的模拟计算。重新进入前处理 PREP7, 读入温度场模型, 把热单元转化为结构单元。这是进行应力热应变和残余应变计算的前提。接着定义弹性模量、热膨胀系数、泊松比等随温度变化的材料力学参数值。此外, 还应指定塑性分析选项为双线性等向强化 (BISO), 并定义随温度变化的屈服应力和切变模量值。

3. 定义边界条件和施加载荷

定义边界条件主要是约束焊接构件的自由度,这要根据具体情况而定。加载位移边界条件既要防止在有限元计算过程中产生刚体位移,又不能严重阻碍焊接过程中的应力自由释放和自由变形(无外约束情况下)。定义参考温度,如焊前没有预热,则为室温,反之为预热温度。

施加载荷时,读入温度场的节点温度与相应的时间点或载荷步长。多个载荷步的计算可通过循环实现。

4. 求解计算

焊接属于大应变问题,设定分析选项时,打开大变形和大应变选项。此外,采用完全牛顿-拉普森方法进行平衡迭代并激活自适应下降功能、打开自动时间步长以加快计算收敛。

5. 焊缝金属熔敷及凝固的模拟

在 ANSYS 中实现对焊缝熔敷及凝固的模拟通常有两种方法:改变单元属性法和生死单元法。一般来说像平板堆焊等没有填充金属的焊接方法采用前者,开坡口有填充金属的焊接方法采用后者。下面分别简要介绍这两种方法。

1) 改变单元属性法:开始计算前,先定义焊缝金属的材料属性,使它屈服极限和弹性模量都很低,且不随温度变化,在程序计算过程中,判断焊缝单元是否超过力学熔点,如果有,则改变单元属性,使它的屈服极限和弹性模量随温度变化,使得在高温时低,在低温时高。在该过程中,因为结构单元没有温度场结果,要到温度场读取结果,所以首先选取焊缝单元,并转化结构单元为热单元,在温度场后处理器中读取节点温度值,判断焊缝单元中是否有超过力学熔点的单元;如果有,则选中这些单元,再转换为结构单元,并改变这些单元材料属性。该过程可通过循环语句实现自动控制。如果想要结果更精确,可以判断单元温度是否超过熔点,但是由于焊缝区域温度梯度很大,在单元划分得不是很细的情况下,单元不一定完全超过熔点。为了使计算更容易收敛,还可以定义比力学熔点更低的温度进行判断。值得注意的是,进行分析时,结构分析过程采用的文件名要和温度场计算相同,这样才能在结构单元转化为热单元时读取单元节点温度。

2) 生死单元法:在焊接开始前把焊缝单元“杀死”,并在每一步热应力计算时,将对应的温度场的计算结果进行选择,超过熔点熔化的单元令其“死掉”,而低于熔点的单元和超过熔点未熔化的单元将其“激活”,其过程和改变单元属性基本上没太大的区别,这就是用“生死”单元模拟焊接问题。使用该功能时,应该注意其过程中的细节部分,一般情况下,程序“杀死”和“激活”单元是一个一个进行的,在“杀死”和“激活”单元时,如果要把所选中的单元全部“杀死”和“激活”,则应选用牛顿-拉普森方法计算瞬态问题,并且注意当用节点温度来选取单元时,如果选取单元没选上,这时程序忽略该选取单元的命令,而执行下一条命令,这样会杀死或激活别的不应该“杀死”或“激活”的单元。

25.8 实例:三维平板堆焊焊接的残余应力分析

25.8.1 工程背景

随着现代工业的发展,焊接技术正渗透到桥梁、汽车、船舶、电力、石油、石化以及航



航空航天等各个领域，焊接结构不断向着大型化、精密化和高参数化方向发展，操作条件也越来越苛刻，同时对焊接结构产品的质量要求也越来越高，尤其是对焊接残余应力的要求更为苛刻。

25.8.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

模型尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 6\text{mm}$ ，电弧在钢板中间沿直线运动，因此在计算时取模型的一半进行研究。其一半模型的简图如图 25-1 所示。

2. 单元的选择及材料常数

本实例采用间接法计算薄板的残余热应力问题，使用 SOLID70 进行热计算，在热计算中采用拉伸单元方法，因此还要使用平面热单元 PLANE55；使用 SOLID185 进行应力计算。为了保证计算精度在靠近焊缝采用加密网格，网格大小控制在 1.2mm ，在远离焊缝处采用较疏的网格。热源模型采用高斯热源，其焊接参数如下：电弧电压 $U=15\text{V}$ ；焊接电流 $I=160\text{A}$ ；焊接速度 $v=10\text{m/s}$ ；焊接热效率 $\eta=0.7$ ；电弧有效加热半径 $R=7\text{E}-3\text{m}$ 。焊接材料为低碳钢其，材料性能如表 25-1 所示，各参数的单位均为国际单位。

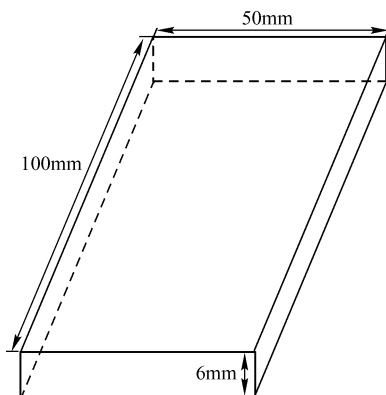


图 25-1 平板焊接模型简图

表 25-1 焊件的材料性能参数

温度 $T(^{\circ}\text{C})$	20	250	500	750	1000	1500	1700	2500
导热系数 ($\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	50	47	40	27	30	35	45	50
密度 (Kg/m^3)	7820	7700	7610	7550	7490	7350	7300	7090
比热容 ($\text{J/Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	460	480	530	675	670	660	780	820
泊松比	0.28	0.29	0.31	0.35	0.4	0.49	0.5	0.5
膨胀系数 ($\text{m}/^{\circ}\text{C}$)	1.1E-5	1.22E-5	1.39E-5	1.48E-5	1.34E-5	1.33E-5	1.32E-5	1.31E-5
弹性模量 (Pa)	2.05E11	1.87E11	1.5E11	0.7E11	0.2E11	2E3	1.5E3	1E3
屈服应力 (Pa)	220e6	175e6	80E6	40e6	10E6	1E-5		

3. 边界条件

热计算时：焊件的初始温度为 20°C ，焊件的上下两个面和周围的三个面为对流换热，其对流系数为 30，焊件的对称面绝热。应力计算时：在有限元计算中加载位移边界条件，是为了防止计算中产生刚性位移，但所加的位移约束又不能严重阻碍焊接过程中应力的自由释放和自由变形。约束的形式因结构的不同而有所区别。本文为平板堆焊，采用的约束为焊件底面的一个边在 Y 方向和 Z 方向的约束。本实例的计算终止时间为 1100s，此时的平板已经冷却至室温，所以此时的热应力即是残余应力。

25.8.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname, 弹出一个对话框, 在输入栏中输入“welding Stress”, 单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 在弹出对话框的 Selection 中输入 $L=0.1$, 单击 Accept, 完成对焊件长度参数的定义, 按照此方法继续定义焊件的宽度 $W=0.1$, 焊件的高度 $H=0.006$, 焊接电压 $U=20$, 焊接电流 $I=160$, 焊接速度 $V=0.01$, 焊接热效率 $YITA=0.7$, 电弧有效加热半径 $R=0.007$, 电弧热功率 $Q=U \times I \times YITA$, 加热斑点中心最大热流密度 $Q_m=3/3.1415/R^2 \times Q$, 定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Thermal Solid, 然后在右边选择 Quad 4node 55 单元, 单击 Apply, 继续在对话框左边选择 Thermal Solid, 在右边选择 Brick 8node 70, 单击 OK。

(2) 定义材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出一个对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T8, 然后根据材料表每一列分别输入 $T1=20$, $EX=2.05E11$, $PRXY=0.28$; $T2=200$, $EX=1.87E11$, $PRXY=0.29$; $T3=500$, $EX=1.5E11$, $PRXY=0.31$; $T4=750$, $EX=7E10$, $PRXY=0.35$; $T5=1000$, $EX=2E10$, $PRXY=0.4$; $T6=1500$, $EX=2E3$, $PRXY=0.49$; $T7=1700$, $EX=1.5E3$, $PRXY=0.5$; $T7=2500$, $EX=1E3$, $PRXY=0.5$, 单击 OK, 设置材料的应力应变关系为双线性等向强化, 单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Rate Independent | Mises Plasticity | Bilinear, 弹出一个输入材料属性的对话框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T6, 然后根据材料表每一列分别输入 $T1=20$, $Yield\ Stss=2.2E8$, $Tang\ Mod=0$; $T2=250$, $Yield\ Stss=1.75E8$, $Tang\ Mod=0$; $T3=500$, $Yield\ Stss=8E7$, $Tang\ Mod=0$; $T4=750$, $Yield\ Stss=4E7$, $Tang\ Mod=0$; $T5=1000$, $Yield\ Stss=1E7$, $Tang\ Mod=0$; $T6=1500$, $Yield\ Stss=1E-5$, $Tang\ Mod=0$, 单击 OK, 设置材料的密度, 单击 Structural | Density, 弹出一个输入材料属性的对话框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T8, 然后根据材料表每一列分别输入 $T1=20$, $DENS=7820$; $T2=200$, $DENS=7700$; $T3=500$, $DENS=7610$; $T4=750$, $DENS=7550$; $T5=1000$, $DENS=7490$; $T6=1500$, $DENS=7350$; $T7=1700$, $DENS=7300$; $T8=2500$, $DENS=7090$, 单击 OK, 设置材料的比热, 单击 Thermal | Specific Heat, 弹出一个输入材料属性的对话框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T8, 然后根据材料表每一列分别输入 $T1=20$, $C=460$; $T2=200$, $C=480$; $T3=500$, $C=530$; $T4=750$, $C=675$; $T5=1000$, $C=670$; $T6=1500$, $C=660$; $T7=1700$, $C=780$; $T7=2500$, $C=820$, 单击 OK, 设置热膨胀系数, 单击 Structural | Thermal Expansion | Secent Coefficiemt | Isotropic, 出一个输入材料属性的对话框



框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T8, 然后根据材料表每一列分别输入 T1=20, ALPX=1.1E-5; T2=200, ALPX=1.22E-5; T3=500, ALPX=1.39E-5; T4=750, ALPX=1.48E-5; T5=1000, ALPX=1.34E-5; T6=1500, ALPX=1.33E-5; T7=1700, ALPX=1.32E-5; T8=1700, ALPX=1.31E-5, 单击 OK, 设置热传导系数, 单击 Thermal | Conductivity, 弹出一个输入材料属性的对话框, 连续单击 Add Temperature 一直增加到 T8, 然后根据材料表每一列分别输入 T1=20, KXX=50; T2=200, KXX=47; T3=500, KXX=40; T4=750, KXX=27; T5=1000, KXX=30; T6=1500, KXX=35; T7=1700, KXX=40; T7=2500, KXX=55, 单击 OK。

4. 建立焊件模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=0, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=2, X=0, Y=L, Z=0, 单击 Apply; 单击 Apply; 继续输入 NPT=3, X=-W/2*0.15, Y=L, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=4, X=-W/2*0.3, Y=L, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=5, X=-W/2*0.5, Y=L, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=6, X=-W/2, Y=L, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=7, X=-W/2, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=8, X=-W/2*0.5, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=9, X=-W/2*0.3, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=10, X=-W/2*0.15, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=11, X=0, Y=0, Z=H, 单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

弹出拾取对话框, 用鼠标按顺序拾取关键点 1, 2, 3 和 10, 单击 Apply, 继续拾取关键点 10, 3, 4 和 9, 单击 Apply, 继续拾取关键点 9, 4, 5 和 8, 单击 Apply, 继续拾取关键点 8, 5, 6 和 7, 单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板中的 Size Controls 中的 Global 的 Set, 在弹出的对话框中的 SIZE 选项输入 0.0012, 单击 OK。

(3) 划分靠近焊缝的面 A1

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾 A1 面, 单击 OK。

(4) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板中的 Size Controls 中的 Global 的 Set, 在弹出的对话框中的 SIZE 选项输入 0.0025, 单击 OK。

(5) 划分面 A2

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾 A2 面, 单击 OK。

(6) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板中的 Size Controls 中的 Global 的 Set, 在弹出的对话框中的 SIZE

选项输入 0.005, 单击 OK。

(7) 划分面 A3

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾 A3 面, 单击 OK。

(8) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板中的 Size Controls 中的 Global 的 Set, 在弹出的对话框中的 SIZE 选项输入 0.0065, 单击 OK。

(9) 划分面 A4

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾 A4 面, 单击 OK。

(10) 由面网格拉伸成体网格

1) 设置单元拉伸选项

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Elem Ext Opts

弹出单元拉伸设置对话框, 设置单元类型号 (Element type number) 为 2 号 SOLID70; 设置拉伸单元尺寸选项 (Element sizing options for extrusion) 中的单元拉伸数量 (No.Elem.divs) 为 4, 单击 OK。

2) 拉伸面 A1。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal

弹出拾取对话框, 拾取面 A1, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 DIST=H, 单击 OK。

3) 拉伸面 A2。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal

弹出拾取对话框, 拾取面 A2, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 DIST=H, 单击 OK。

4) 拉伸面 A3。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal
弹出拾取对话框, 拾取面 A3, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 DIST=H, 单击 OK。

5) 拉伸面 A4。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal,
弹出拾取对话框, 拾取面 A1, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 DIST=H, 单击 OK。

(11) 合并

GUI: Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Item

在弹出的对话框中设置 Type of item to be merge 为 All, 单击 OK。

6. 进行瞬态热分析

(1) 分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Transient, 单击 OK, 含义为进行瞬态热分析问题求解, 保持弹出对话框的默认设置, 默认设置为完全法, 单击 OK。

(2) 定义高斯热源

1) 定义高斯热源函数。

GUI: Utility Menu | Parameters | Functions | Define/Edit

弹出定义函数面板, 在面板的 Resule 中输入 $Qm * \exp(-3 * (\{X\}^2 + (\{Y\} - V * \{TIME\})^2) / R^2)$ 。





2) 保存函数并命名函数名为gaosi。选择函数编辑器面板 (Function Editor) 上的File | Save, 输入保存文件名为gaosi, 单击保存。

3) 退出函数编辑器。

选择函数编辑器面板的File | Exit。

4) 读入函数。

GUI: Solution | Define Loads | Apply | Functions | Read File

弹出选择函数文件对话框, 选择gaosi.func, 单击打开, 弹出函数加载 (Function Loader) 对话框, 在表格函数名 (Table parameter name) 中输入gaosi, 在常数数值 (Constant Values) 中输入 $Q_m=Q_M$, $V=V$, $R=R$, 单击OK。

(3) 定义边界条件

1) 定义初始温度。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Uniform Temp

弹出均匀温度设置对话框, 输入 20, 单击OK。

2) 定义对流换热系数。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Convection | On Areas

弹出拾取对话框, 拾取除对 A6、A5 和 A10 的所有的面, 单击 OK, 弹出在面上施加对流换热系数对话框, 设置对流换热系数 (Film coefficient) 为 30, 外界空气温度 (Bulk temperature) 为 20, 单击 OK。

3) 加载热源。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Heat Flux | On Areas

弹出拾取对话框, 拾取面 A5 和 A10, 单击 OK, 在弹出对话框中设置施加热流密度方式 (Apply HFLUX on areas as a) 为表格 (Existing table), 单击 OK, 在弹出对话框中选择 GAOSI, 单击 OK。

(4) 设置载荷步

1) 输出所有结果。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Output Ctrl | DB/Results File

在弹出对话框中设置输出每一个子步 (Every substep), 单击 OK。

2) 设置计算时间和子步。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

在弹出的对话框中输入 $TIME=L/V$, $NSUBST=50$, Maximum no of substeps=50, Minimum no of Substeps=50, 单击 OK。

3) 写入文件。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

在弹出的对话框中输入 1, 单击OK。

4) 设置计算时间和子步。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

在弹出的对话框中输入 $TIME=20$, $NSUBST=20$, Maximum no of substeps=20, Minimum

no of Substeps=20, 单击 OK。

5) 写入文件。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

在弹出的对话框中输入 2, 单击OK。

6) 设置计算时间和子步。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

在弹出的对话框中输入 TIME=50, NSUBST=30, Maximum no of substeps=30, Minmum no of Substeps=30, 单击 OK。

7) 写入文件。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

在弹出的对话框中输入 3, 单击OK。

8) 设置计算时间和子步。

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time and Substps

在弹出的对话框中输入 TIME=1100, NSUBST=105, Maximum no of substeps=105, Minmum no of Substeps=105, 单击 OK。

9) 写入文件。

GUI: Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File

在弹出的对话框中输入 4, 单击OK。

(5) 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | From LS Files

在弹出的对话框中输入 LSMIN=1, LSMAX=4, 单击 OK。

7. 进行瞬态应力分析

(1) 由热分析转为结构分析

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Switch Elem Type

在弹出的对话框中设置 Thermal to Struc, 单击 OK。

(2) 设置分析类型

1) 设置分析为瞬态动力学。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Transient, 含义为进行瞬态问题求解, 单击 OK, 在弹出的对话框中选择完全法 (Full), 不勾选 LUMPM, 表示计算中使用协调一致质量矩阵, 单击 OK。

2) 设置分析选项。

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出分析选项设置对话框, 激活大变形分析 (Large deform effects), 设置牛顿-拉斐森 (Newton-Raphson option) 为完全法 (Full N-R), 设置完毕后, 单击OK。

(3) 定义载荷

1) 设置参考温度

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Reference Temp





在弹出的对话框中输入 20，单击 OK。

2) 设置对称位移约束。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Areas

弹出拾取对话框，拾取对称面 A6，单击 OK。

3) 设置位移约束。

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框，拾取线 L13, L10, L7 和 L4，单击 Apply，在弹出的对话框中选择 UY，单击 Apply；继续拾取线 L1，单击 Apply，在弹出的对话框中选择 UZ，单击 OK。

(4) 开始求解。

由于要读入大量的数据，因此采用命令流很方便，具体的操作参见视频教程，命令流如下：

```
*DO,I,1,50
LDREAD,TEMP,,,0.2*I,'weldingstress','rth','' !读入热分析的计算结果
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,0.2*I
DELTIM,0.2,0.075,0.2,1
SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,20
LDREAD,TEMP,,,10+I*0.5,'weldingstress','rth',''
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,10+I*0.5
DELTIM,0.5,0.5,1,1
SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,30
LDREAD,TEMP,,,20+I,'weldingstress','rth',''
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,20+I
DELTIM,1,1,1,1
SOLVE
*ENDDO
*DO,I,1,105
LDREAD,TEMP,,,50+10*I,'weldingstress','rth',''
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,50+10*I
DELTIM,10,10,10,1
SOLVE
*ENDDO
```

8. 后处理

(1) 查看 0.2s时的等效应力

1) 读入数据。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 0.2 的结果, 单击 Read。

2) 查看等效应力。

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 25-2 所示。

(2) 查看 5s 时的等效应力

1) 读入数据。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 5 的结果, 单击 Read。

2) 查看等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 25-3 所示, 由图中可知, 应力约等于 0 的地方, 即为焊接熔池。

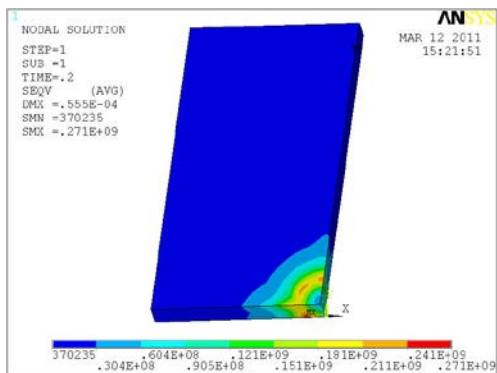


图 25-2 焊件的 0.2s 时的等效应力

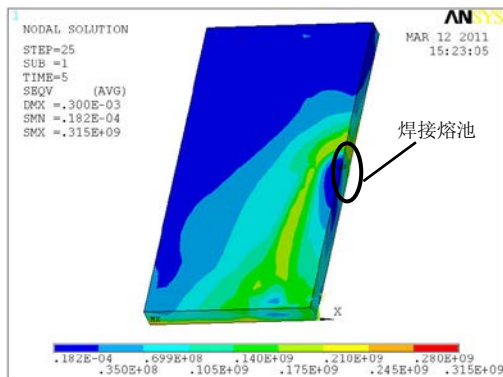


图 25-3 焊件 5s 时的等效应力

(3) 查看 10s 时的等效应力

1) 读入数据

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 10 的结果, 单击 Read。

2) 查看等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 25-4 所示。

(4) 查看焊件的焊接残余应力

1) 读入数据。

GUI: Main Menu | General Postproc | Read Results | By Pick

在弹出的对话框中选择 Time 为 1100 的结果, 单击 Read。



2) 查看等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 25-5 所示。

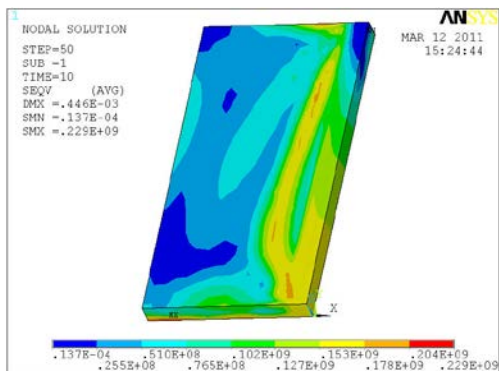


图 25-4 焊件的 10s 时的等效应力

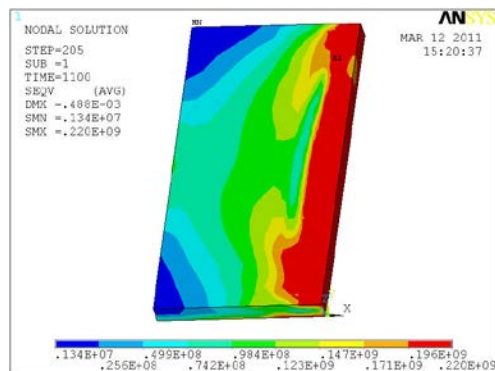


图 25-5 焊件残余应力

第 26 章 优 化 设 计



26.1 优化设计的基本概念

优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术。所谓“最优设计”，指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且所需的支出如重量、面积、体积、应力、费用等最小。也就是说，最优设计方案就是一个最有效的方案。

设计方案的任何方面都是可以优化的，比如说：尺寸如厚度、形状如过渡圆角的大小、支撑位置、制造费用、自然频率、材料特性等。实际上，所有可以参数化的 ANSYS 选项都可以进行优化设计。

在介绍优化设计过程之前，我们先给出一些基本的定义：设计变量、状态变量、目标函数、合理和不合理的设计、分析文件、迭代、循环、设计序列等。下面来看一个典型的优化设计问题，模型简图如图 26-1。

在以下的约束条件下找出如下矩形截面梁的最小重量。

- 总应力 σ 不超过 $\sigma_{\max} [\sigma_n, \sigma_{\max}]$ 。
- 梁的变形 δ 不超过 $\delta_{\max} [\delta_n, \delta_{\max}]$ 。
- 梁的高度 h 不超过 $h_{\max} [h_n, h_{\max}]$ 。

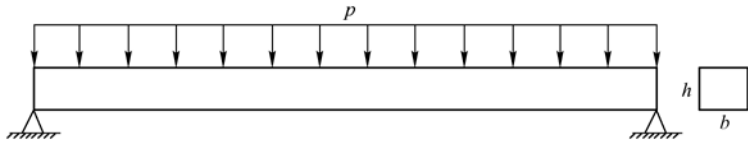


图 26-1 梁的优化设计示例

设计变量 (DV_s) 为自变量，优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限，它定义了设计变量的变化范围。在以上的问题里，设计变量很显然为梁的宽度 b 和高度 h 。 b 和 h 都不可能为负值，因此其下限应为 $b > 0$ ， $h > 0$ ，而且， h 有上限 $h_{\max}$ 。ANSYS 优化程序允许定义不超过 60 个设计变量。

状态变量 (SV_s) 是约束设计的数值。它们是“因变量”，是设计变量的函数。状态变量可能会有上下限，也可能只有单方面的限制，即只有上限或只有下限。在上述梁问题中，有两个状态变量：总应力 σ 和梁的位移 δ 。在 ANSYS 优化程序中用户可以定义不超过 100 个状态变量。

目标函数是要尽量减小的数值，它必须是设计变量的函数。也就是说，改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在以上的问题中，梁的总重量应该是目标函数。在 ANSYS 优化程序中，只能设定一个目标函数。



设计变量、状态变量和目标函数总称为优化变量。在 ANSYS 优化中, 这些变量是由用户定义的参数来指定的。用户必须指出在参数集中哪些是设计变量, 哪些是状态变量, 哪是目标函数。

设计序列是指确定一个特定模型的参数的集合。一般来说, 设计序列是由优化变量的数值来确定的, 所有的模型参数组成了一个设计序列。

一个合理的设计是指满足所有给定的约束条件的设计。如果其中任一约束条件不被满足, 设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计。如果所有的设计序列都是不合理的, 那么最优设计是最接近于合理的设计, 而不考虑目标函数的数值。

分析文件是一个 ANSYS 的命令流输入文件, 包括一个完整的分析过程(前处理, 求解, 后处理)。它必须包含一个参数化的模型, 用参数定义模型并指出设计变量、状态变量和目标函数。由这个文件可以自动生成优化循环文件(Jobname.LOOP), 并在优化计算中循环处理。

一次循环指一个分析周期。最后一次循环的输出存储在文件 Jobname.OPO 中。优化迭代是产生新的设计序列的一次或多次分析循环。一般来说, 一次迭代等同于一次循环。但对于一阶方法, 一次迭代代表多次循环。

优化数据库记录当前的优化环境, 包括优化变量定义、参数、所有优化设定以及设计序列集合。该数据库可以存储(在文件 Jobname.OPT), 也可以随时读入优化处理器中。

26.2 优化设计的步骤

共有两种方法实现 ANSYS 优化设计: 批处理方法和通过 GUI 交互式地完成。这两种方法的选择取决于用户对于 ANSYS 程序的熟悉程度和是否习惯于图形交互方式。

如果对于 ANSYS 程序的命令相当熟悉, 就可以选择用命令输入整个优化文件并通过批处理方式来进行优化。对于复杂的需用大量机时的分析任务来说(如非线性), 这种方法更有效率。

而另一方面, 交互方式具有更大的灵活性, 而且可以实时看到循环过程的结果。在用 GUI 方式进行优化时, 首要的任务是建立模型的分析文件, 然后优化处理器所提供的功能都可以交互式的使用, 以确定设计空间, 便于后续优化处理的进行。这些初期交互式的操作可以帮助用户缩小设计空间的大小, 使优化过程得到更高的效率。

优化设计通常包括以下几个步骤, 这些步骤根据用户所选用优化方法的不同(批处理 GUI 方式)而有细微的差别。

26.2.1 生成分析文件

分析文件生成是 ANSYS 优化设计过程中的关键部分。ANSYS 程序运用分析文件构造循环文件, 进行循环分析。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的任意分析类型。

在分析文件中, 模型的建立必须是参数化的(通常是优化变量为参数), 结果也必须用参数来提取(用于状态变量和目标函数)。优化设计中只能使用数值参数。

用户的任务是建立分析文件并保证其正确性。分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简

练的，不是必须的语句应当从分析文件中省略掉。只有在交互过程中希望看到的显示[EPLODT 等]可以包含在分析文件中，或者将其定位到一个显示文件中[SHOW]。请注意分析文件是要多次执行的，与优化分析本身无关的命令都会不必要地耗费机时，降低循环效率。

建立分析文件有两种方法：① 用系统编辑器逐行输入；② 交互式地完成分析，将 ANSYS 的 LOG 文件作为基础建立分析文件。

1. 参数化建立模型

用设计变量作为参数建立模型的工作是在 PREP7 中完成的。在给定的梁的例子中，设计变量是 B（梁的宽度）和 H（梁的高度），因此单元的实参是由 B 和 H 来表示的：

```
/PREP7
!初始化设计变量:
B=2.0
H=3.0
ET,1,BEAM3           !二维梁单元
AREA=B*H             !梁的横截面面积
IZZ=( B*( H**3))/12  !绕 Z 轴的转动惯量
R,1,AREA,IZZ,H       !以设计变量表示的单元实参
!模型的其他部分
MP,EX,1,30E6         !杨氏模量
N,1                  !节点
N,11,120
FILL
E,1,2                !单元
EGEN,10,1,-1
FINISH               !退出 PREP7
```

前面提到，可以对设计的任何方面进行优化：尺寸、形状、材料性质、支撑位置、所加载荷等，唯一的要求就是将其参数化。

设计变量（例如 B 和 V）可以在程序的任何部分初始化，一般是在 PREP7 中定义的。这些变量的初值只是在设计计算的开始用得到，在优化循环过程中会被改变。

2. 求解

求解器用于定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定载荷步，完成有限元计算。分析中所用到的数据都要指出：缩减法分析中的主自由度，非线性分析中的收敛准则，谐波分析中的频率范围等。载荷和边界条件也可以作为设计变量。

梁的例子中，SOLUTION 部分的输入大致如下：

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC        !静力分析(默认)
D,1,UX,0,,11,10,UY   !UX=UY=0, 梁两端节点固定
SFBEAM,ALL,1,PRES,100 !施加压力
SOLVE
FINISH               !退出 SOLUTION
```




这一步骤不仅限于一次分析过程，例如，可以先进行热分析再进行应力分析。

3. 参数化提取结果

在本步中，提取结果并赋值给相应的参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。提取数据的操作用*GET 命令（Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data）实现。通常用 POST1 来完成本步操作，特别是涉及到数据的存储、加减或其他操作时。

在梁的例子中，梁的总重量是目标函数。因为重量与体积成比例，那么减小总体积就相当于减小总重量。因此可以选择总体积为目标函数。在本例中，状态变量选择为总应力和位移。这些参数可以用如下方法定义：

```
/POST1
SET,...
NSORT,U, Y           !以 UY 为基准对节点排序
*GET,DMAX,SORT,,MAX   !参数 DMAX=最大位移
!线单元的推导数值由 ETABLE 得出
ETABLE,VOLU,VOLU      !VOLU=每个单元的体积
ETABLE,SMAX_I,NMISC,1 !SMAX_I=每个单元 I 节点处应力的最大值
ETABLE,SMAX_J,NMISC,3 !SMAX_J=每个单元 J 节点处应力的最大值
!
SSUM                  !将单元表中每列的数据相加
*GET,VOLUME,SSUM,,ITEM, VOLU !参数 VOLUME=总体积
ESORT,ETAB,SMAX_I,,1 !按照单元 SMAX_I 的绝对值大小排序
*GET,SMAXI,SORT,,MAX  !参数 SMAXI=SMAX_I 的最大值
ESORT,ETAB,SMAX_J,,1 !按照单元 SMAX_J 的绝对值大小排序
*GET,SMAXJ,SORT,,MAX  !参数 SMAXJ=SMAX_J 的最大值
SMAX=SMAXI | SMAXJ    !参数 SMAX=最大应力值
FINISH
```

4. 准备分析文件

到此为止，已经对于分析文件的基本需求做了说明。如果是用系统编辑器来编辑的批处理文件，那么简单地存盘进入第二步即可。如果是用交互方式建模的话，用户必须在交互环境下生成分析文件。可以通过两种方式完成本步操作：数据库命令流文件或程序命令流文件。

数据库命令流文件：可以通过 LGWRITE 命令生成命令流文件。LGWRITE 将数据库内部的命令流写到文件 Jobname.LGW 中。内部命令流包含了生成当前模型所用的所有命令。

程序命令流文件：Jobname.LOG 包含了交互方式下用户输入的所有命令。如果用 Jobname.LOG 作为分析文件，用户必须用系统编辑器删除文件中所有不必要的命令。因为交互方式下所有的操作都记录在 LOG 文件中，编辑工作会比较烦琐。而且，如果分析是在几个过程中完成的，就必须将几个 LOG 文件合在一起编辑生成一个完整的分析文件。

26.2.2 建立优化过程中的参数

在完成了分析文件的建立后，就可以开始优化分析了。如果是在系统中建立的分析文件，就要重新进入 ANSYS。如果在交互方式下进行优化，最好从分析文件中建立参数到 ANSYS 数据库中来。

做这一步有两个好处。初始参数值可能作为一阶方法的起点，而且，对于各种优化过程来说，参数在数据库中可以在 GUI 下进行操作，便于定义优化变量。建立数据库参数可以选择下列任意一种方法。

- 读入与分析文件相联的数据库文件 (Jobname.DB)。这样可以在 ANSYS 中建立整个模型的数据库。读入数据库文件可以用如下方法。

命令: RESUME

GUI: Utility Menu | File | Resume Jobname.db

- 将分析文件直接读入 ANSYS 进行整个分析。这样将重新建立整个数据库，但对于大模型来说要耗费大量的机时。要读入分析文件，可以选择下列方法。

命令 /INPUT

GUI: Utility Menu | File | Read Input from

- 仅从存储的参数文件中读参数到 ANSYS 中，读入参数可以用下列方法。

命令: PARRES

GUI: Utility Menu | Parameters | Restore Parameters

- 重新定义分析文件中存在的参数。不过，这样做需要知道分析文件中定义了那些参数。用以下方式。

命令: *SET or “=” command

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

可以选择使用以上任意一种方式，然后用 OPVAR 命令 (GUI: Main Menu | Design Opt | Design Variables) 来指定优化变量。

注：在优化过程中，ANSYS 数据库不一定要同分析文件一致。模型的输入是在优化循环过程中由分析文件中自动读入的。

26.2.3 指定分析文件 (OPT)

以下的步骤是由 OPT 处理器来完成的。首次进入优化处理器时，ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列 1。这些参数值假定是一个设计序列。进入优化处理器可以用如下方式。

命令: /OPT

GUI: Main Menu | Design Opt

在交互方式下，用户必须指定分析文件名。这个文件用于生成优化循环文件 Jobname.LOOP。分析文件名无默认值，因此必须输入。指定分析文件名，可以用下列方式。

命令: OPANL

GUI: Main Menu | Design Opt | Assign

在批处理方式下，分析文件通常是批命令流的第一部分，从文件的第一行到命令/OPT 第一次出现。在批处理方式中，默认的分析文件名是 Jobname.BAT。因此，在批处理方式下通常不用指定分析文件名。但是，如果出于某种考虑将分析文件分成两个部分（一个用于分析，另一个用于整个优化分析），那么就必须在进入优化处理器后指定分析文件 (OPANL)。



注意：在分析文件中，/PREP7 和/OPT 命令必须出现在行的第一个非零字符处。这一点在生成优化循环文件时很关键。

26.2.4 声明优化变量

声明优化变量，即指定哪些参数是设计变量，哪些参数是状态变量，哪个参数是目标函数。以上提到，允许有不超过 60 个设计变量和不超过 100 个状态变量，但只能有一个目标函数。声明优化变量可以用如下的方法。

命令：OPVAR

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Variables

Main Menu | Design Opt | State Variables

Main Menu | Design Opt | Objective

设计变量和状态变量可以定义最大和最小值。目标函数不需要给定范围。每一个变量都有一个公差值，这个公差值可以由用户输入，也可以选择由程序计算得出。

如果用 OPVAR 命令定义的参数名不存在，ANSYS 数据库中将自动定义这个参数，并将初始值设为零。

用户可以在任意时间简单地通过重新定义参数的方法来改变已经定义过的参数，也可以删除一个优化变量（OPVAR, Name, DEL）。这种删除操作并不真正删除这个参数，而是不将它继续作为优化变量而已。

26.2.5 选择优化工具或优化方法

ANSYS 程序提供了一些优化工具和方法，默认方法是单次循环。指定后续优化的工具和方法用下列命令。

命令：OPTYPE

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

优化方法是使单个函数（目标函数）在控制条件下达到最小值的传统化的方法。有两种方法是可用的：零阶方法和一阶方法。除此之外，用户可以提供外部的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法。使用其中任何一种方法之前，必须先定义目标函数。

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。因为求最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出。但是，必须要指定设计变量。下面是可用的优化工具。

- 单步运行：实现一次循环并求出一个 FEA 解。可以通过一系列的单次循环，每次求解前设定不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。
- 随机搜索法：进行多次循环，每次循环设计变量随机变化。用户可以指定最大循环次数和期望合理解的数目。本工具主要用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。
- 等步长搜索法：以一个参考设计序列为起点，本工具生成几个设计序列。它按照单一步长在每次计算后将设计变量在变化范围内加以改变。对于目标函数和状态变量的整体变化评估可以用本工具实现。

- 乘子算法：这是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组合的设计序列。这种技术与称之为经验设计的技术相关，后者使用二阶的整体和部分因子进行分析。主要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。
- 最优梯度法：对用户指定的参考设计序列，本工具计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度。使用本工具可以确定局部的设计敏感性。
- 用户提供的优化工具：可以用外部过程（USEROP）替代 ANSYS 优化工具。用户可以通过 USEROP 过程将自己的方法和工具补充进去。

26.2.6 指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，比如最大迭代次数等。所有这些控制参数的设定都在如下的同一个路径下。

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

以下列出设定控制参数的命令。

(1) 设定零阶方法的控制参数

命令: OPSUBP 和 OPEQN

(2) 设定一阶方法的控制参数

命令: OPFRST

(3) 设定随机搜索法的控制参数

命令: OPRAND

(4) 设定等步长搜索法的控制参数

命令: OPSWEEP

(5) 设定乘子算法的控制参数

命令: OPFACT

(6) 设定最优梯度法的控制参数

命令: OPGRAD

(7) 设定用户优化工具的控制参数

命令: OPUSER

程序还提供了几个总体控制来设定优化过程中数据的存储方法。

(8) 指定优化数据的存储文件名（默认为 Jobname.OPT）

命令: OPDATA

GUI: Main Menu | Design Opt | Controls

(9) 激活详细的结果输出

命令: OPPRNT

GUI: Main Menu | Design Opt | Controls

(10) 确定最佳设计系列的数据是否存储

命令: OPKEEP

GUI: Main Menu | Design Opt | Controls

用户还可以控制几个循环特性，包括分析文件在循环中如何读取。可以从第一行读取（默认），也可以从第一个/PREP7 出现的位置开始读取；设定为优化变量的参数可以忽略



(默认), 也可以在循环中处理。而且, 用户可以指定循环中存储哪种变量: 只存储数值变量还是存储数值变量和数组变量。这个功能可以在循环中控制参数的数值 (包括设计变量和非设计变量)。用下列方法设定这些循环控制特性。

命令: OPLOOP

GUI: Main Menu | Design Opt | Controls

注意: OPLOOP 命令中的 Parms 变量控制在循环中存储哪个参数。在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不设置, 除非是数组变量在分析文件外定义, 而在循环中需要保存的情况。

26.2.7 进行优化分析

所有的控制选项设定好以后, 就可以进行分析了。可以用下列方法开始分析。

命令: OPEXE

GUI: Main Menu | Design Opt | Run

在 OPEXE 执行时, 优化循环文件 (Jobname.LOOP) 会根据分析文件生成。这个循环文件对用户是透明的, 并在分析循环中使用。循环在满足下列情况时终止: 收敛; 中断 (不收敛, 但最大循环次数或是最大不合理的数目达到了); 分析完成。

当循环因为模型的问题中断时, 优化处理器将进行下一次循环。如果是在交互方式下, 程序将显示一个警告信息并询问是继续还是结束循环。如果是在批处理方式下, 循环将自动继续。NCNV 命令 (GUI: Main Menu | Solution | Nonlinear | Criteria to Stop) 是控制非线性分析的, 在优化循环中将被忽略。中断循环的设计序列是存盘的, 但参数的数据有可能非常大, 不符合实际情况。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件 (Jobname.OPT) 中。最多可以存储 130 组这样的序列。如果已经达到了 130 组序列, 那么其中数据最 “不好” 的序列将被删除。

/OPT	!进入优化处理器
OPANL,...	!分析文件名(批处理方式不需要)
! 声明优化变量	
OPVAR,B,DV,,5,16.5	!B 和 H 为设计变量
OPVAR,H,DV,,5,8	
OPVAR,DMAX,SV,-0.1,0	!DMAX 和 SMAX 为状态变量
OPVAR,SMAX,SV,0,20000	
OPVAR,VOLUME,OBJ	!VOLUME 为目标函数
!指定优化类型和控制	
OPTYPE,SUBP	!零阶方法
OPSUBP,30	!最大迭代次数
OPEXE	!开始优化循环

不同的优化过程可以系列地完成。比如, 可以在零阶方法的分析结束后再做等步长搜索。下面的命令对最佳设计序列做等步长搜索:

OPTYPE,SWEEP	!扫描评估工具
OPSWEEP,BEST,5	!最佳设计序列每个设计变量 5 次评估
OPEXE	!开始优化循环

26.2.8 查看设计序列结果

优化循环结束以后，可以用本部分介绍的命令或相应的 GUI 路径来查看设计序列。这些命令适用于任意优化方法和工具生成的结果。

列出指定序列号的参数值。

命令：OPLIST

GUI：Main Menu | Design Opt | Design Sets | List

可以选择列出所有参数的数值，也可以只列出优化变量。

用图显示指定的参数随序列号的变化，可以看出变量是如何随迭代过程变化的。该过程可以用以下方法实现。

命令：PLVAROPT

GUI：Main Menu | Design Opt | Design Sets | Graphs/Tables

将图的 X 轴由序列号换成别的参数的方法如下。

命令：XVAROPT

GUI：Main Menu | Design Opt | Design Sets | Graphs/Tables

对于 PLVAROPT 和 PRVAROPT 操作，设计序列将自动按照 XVAROPT 中的参数以升序排列。

对于等步长搜索、乘子和梯度工具有一些特别的查看结果的方法。对于等步长搜索，用 OPRSW 命令列出结果，用 OPLSW 命令图示结果。对于乘子工具，用 OPRFA 命令列出结果，用 OPLFA 命令图示结果。对于梯度工具，用 OPRGR 命令列出结果，用 OPLGR 命令图示结果。

另一个得到优化数据的方法是用 STATUS 命令（GUI：Main Menu | Design Opt | Status）。在优化处理器中使用本命令，将得到另外一些关于当前优化任务的信息，如分析文件名、优化技术、设计序列数、优化变量等。用 STATUS 命令可以方便地查看优化环境，验证需要的设定是否全部输入优化处理器。

除了查看优化数据，用户可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。默认情况下，最后一个设计序列的结果存储在文件 Jobname.RST(或.RTH 等，视分析类型而定)中。如果在循环运行前将“OPKEEP”设为“ON”，最佳设计序列的数据也将存储在数据库和结果文件中。“最佳结果”在文件 Jobname.BRST(BRTH 等)中，“最佳数据库”在文件 Jobname.BDB 中。

26.2.9 操作设计序列

查看数据以后，可能需要对其做一些操作。例如，在随机搜索后，用户可能希望将所有的不合理设计序列删除，以合理的设计序列为数据点来进行后面的优化。这里提供了几种改变设计序列的方法。

(1) 用下列命令选择最佳设计序列或所有合理的序列



命令: OPSEL

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | Select/Delete

(2) 删除指定范围内的设计序列

命令: OPDEL

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | Select/Delete

对于这两个命令, 剩余设计序列的原始序列号将不变。下列命令也可以对设计序列进行操作。

(3) 将两个现存的序列相加形成一个新的设计序列 (可以有比例系数)

命令: OPADD

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | Combine

(4) 用当前的参数值 (没有在分析循环中运行) 生成一个新的设计序列

命令: OPMAKE

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | Create

26.2.10 多层优化计算

在很多情况下要做多于一次优化计算的分析。比如, 在一次优化后没有找到需要的优化结果, 或是用一种优化工具开始计算然后做随后的优化分析。从第一次较少次数的循环中得到的结果可以作为修改设计空间并进行以后优化分析的依据。

如果用户在同一次 ANSYS 运行中执行所有的优化, 这个过程是很顺利的。在一次执行以后, 用户可以重新定义所有的优化变量, 然后开始下一步分析。用下列命令开始下一步分析。

命令: OPEXE

GUI: Main Menu | Design Opt | Run

如果在执行完一次优化以后退出了 ANSYS, 可以重新开始执行优化分析。

要重新开始优化分析, 通过如下命令读入优化数据库文件 (Jobname.OPT)。

命令: OPRESU

GUI: Main Menu | Design Opt | Opt Database | Resume

数据读入后, 指定优化类型、控制等, 然后开始循环。用下列方法开始循环。

命令: OPEXE

GUI: Main Menu | Design Opt | Run

标准的重新启动大致如下:

/OPT	
OPRESU, ...	!读入文件(默认为 Jobname.OPT)
OPSEL,10	!选择 10 个最佳设计
OPTYPE, ...	!指定优化工具或方法
.....	!指定其他优化输入
OPEXE	!开始优化循环

注意: 除了优化数据外, ANSYS 工作文件名将存储在优化数据库文件中 (Jobname.OPT)。

因此,如果优化数据文件被读入,该文件名将覆盖当前的文件名[/FILENAME]。

在交互方式下可以用 OPRESU 命令读入批处理方式下生成的优化数据,这样便于交互地查看批处理优化的数据。

如果在读入数据前优化数据库中有数据的话,应当首先清除优化数据库。在这个过程中,所有的设置将恢复其默认值,所有的设计序列将被删除。用下列方式清除数据库。

命令: OPCLR

GUI: Main Menu | Design Opt | Opt Database | Clear & Reset

因为 ANSYS 数据库是不受 OPCLR 命令影响的,所以在读入一个新的优化数据库前应清除 ANSYS 数据库。用下列方法清除 ANSYS 数据库:

命令: /CLEAR

GUI: Utility Menu | File | Clear&Start New

与 OPRESU 命令相对应的是 OPSAVE 命令 (GUI: Main Menu | Design Opt | Save),其功能是将优化数据写入指定的文件中(默认为 Jobname.OPT)。优化数据在每次优化循环结束的时候自动存储,但用户也可以随时用 OPSAVE 命令存储优化数据。

26.3 优化技术

理解计算机程序的算法总是很有用的,尤其是在优化设计中。在这一部分中,将提供对下列方法的说明:零阶方法、一阶方法、随机搜索法、等步长搜索法、乘子计算法和最优梯度法。

26.3.1 零阶方法

零阶方法之所以称为零阶方法是由于它只用到因变量而不用到它的偏导数。在零阶方法中有两个重要的概念:目标函数和状态变量的逼近方法,由约束的优化问题转换为非约束的优化问题。

1. 逼近方法

本方法中,程序用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间的关系。这是通过用几个设计变量序列计算目标函数然后求得各数据点间最小平方实现的。该结果曲线(或平面)叫做逼近。每次优化循环生成一个新的数据点,目标函数就完成一次更新。实际上是逼近被求解最小值而并非目标函数。

状态变量也是同样处理的。每个状态变量都生成一个逼近并在每次循环后更新。

用户可以控制优化近似的逼近曲线。可以指定线性拟合,平方拟合或平方差拟合。默认情况下,用平方差拟合目标函数,用平方拟合状态变量。用下列方法实现该控制功能。

命令: OPEQN

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

OPEQN 同样可以控制设计数据点在形成逼近时如何加权。

2. 转换为非约束问题

状态变量和设计变量的数值范围约束了设计,优化问题就成为约束的优化问题。ANSYS 程序将其转化为非约束问题,因为后者的最小化方法比前者更有效率。转换是通过



对目标函数逼近加罚函数的方法计入所加约束的。

搜索非约束目标函数的逼近是在每次迭代中用 Sequential Unconstrained Minimization Technique(SUMT) 实现的。

3. 收敛检查

在每次循环结束时都要进行收敛检查。如果当前的、前面的或最佳设计是合理的而且满足下列条件之一，问题就是收敛的。

- 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数容差。
- 最后两个设计之间的差值应小于目标函数容差。
- 从当前设计到最佳合理设计所有设计变量的变化值应小于各自的容差。
- 最后两个设计所有设计变量的变化值应小于各自的容差。

用下列方法指定目标函数和设计变量容差。

命令: OPVAR

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Variables

Main Menu | Design Opt | Objective

收敛并不代表实际的最小值已经得到了，只说明以上四个准则之一满足了。因此，用户必须确定当前设计优化的结果是否足够。如果不足的话，就要另外做附加的优化分析。

有时候求解过程会在收敛前终止，这是因为发生下列情况之一。

- 指定的循环次数达到了。
- 连续的不合理设计达到了指定的值 (OPSUBP 命令的 NINFS 域、默认值为 7)。

4. 零阶方法的特殊问题

由于目标函数和状态变量都是使用逼近的，因此优化设计和逼近数值具有同样的精确度。下面给出了一些得到较好的逼近的建议。

1) 对于零阶方法，优化处理器开始通过随机搜索建立状态变量和目标函数的逼近。由于是随机搜索，收敛的速度可能很慢。用户有时可以通过给出多个合理的起始设计来加速收敛，只简单地运行一系列的随机搜索并删除所有不合理的设计。用下列方法之一运行随机搜索。

命令: OPTYPE, RAND

GUI: Main Menu | Design Opt | method/Tool

用下列方法删除所有不合理设计:

命令: OPSEL

GUI: Main Menu | Design Opt | Select/Delete

也可以运行多次单独的循环，并在每次运行前指定新的设计变量序列来生成起始设计序列。用下列方法实现。

命令: OPTYPE, RUN

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

注意: 做一些小的设计分析将有利于收敛。但如果设计之间差别不大，也就是说设计数据点“堆积”在一起时，用户就要指定优化处理器沿一个指定的路径分析，以避免丢掉好的设计。

2) 如果零阶方法生成了许多不合理的设计, 可能说明状态变量的近似不能良好地反映状态变量的实际情况。在这种情况下, 可以处理如下。

- 增加连续不合理设计的允许值, 然后进行附加的零阶方法分析。用下列方法实现。

命令: OPSUBP, NINFS

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

- 在连续的逼近中不断地选择最佳设计, 可以得到更好的曲线拟合。用下列方法实现。

命令: OPSEL

GUI: Main Menu | Design Opt | Select/Delete

- 在状态变量逼近时选择交叉项。用下列方法实现。

命令: OPEQN, KFSV

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

26.3.2 一阶方法

同零阶方法一样, 一阶方法通过对目标函数添加罚函数将问题转换为非约束的。但是, 与零阶方法不同的是, 一阶方法将真实的有限元结果最小化, 而不是对逼近数值进行操作。

一阶方法通过求解因变量的偏导数来进行优化。在每次迭代中, 梯度计算(用最大斜度法或共轭方向法)确定搜索方向, 并用线搜索法对非约束问题进行最小化。

因此, 每次迭代都由一系列的子迭代(其中包括搜索方向和梯度计算)组成。这就使得一次优化迭代有多次分析循环。

OPFRST 命令(GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool)有两个输入域可以用来改善一阶方法的收敛。用户可以指定计算梯度的设计变量范围变化程度, 也可以指定线搜索步长的范围。一般来说, 这两个输入值的默认数值就足够了。

1. 收敛检查

一阶方法在收敛或中断时结束。如果当前的设计序列满足下面任意一种情况, 程序就判断为收敛。

1) 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数容差。

2) 从当前设计到前面设计目标函数的变化值应小于容差。

同时要求最后的迭代使用最大斜度搜索, 否则要进行附加的迭代。

用下列方法指定目标函数容差。

命令: OPVAR

GUI: Main Menu | Design Opt | Objective

问题在收敛之前可能中断。在用 OPFRST 命令 NITR 域指定的最大迭代次数达到的情况下出现。

2. 一阶方法的特殊情况

与零阶方法相比, 一阶方法计算量大且结果精确。但是, 精确度高并不能保证最佳求解。下面是一些注意点。

1) 一阶方法可能在不合理的设计序列上收敛。这时可能是找到了一个局部最小值, 或是不存在合理设计空间。如果出现这种情况, 可以使用零阶方法, 因其可以更好地研究整个设计空间。



2) 一阶方法更容易获得局部最小值。这是因为一阶方法从设计空间的一个序列开始计算求解, 如果起点很接近局部最小值, 就会选择该最小值而找不到全局最小值。

3) 目标函数容差过紧将会引起迭代次数过多。

26.3.3 随机搜索法

对于随机搜索法(OPTYPE, RAND), 程序完成指定次数的分析循环, 并在每次循环中使用随机搜索变量值。用户可以用 OPRAND 命令(GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool) 指定最大迭代次数和最大合理设计数。如果给出了最大合理设计数, 在达到这个数值时循环将终止, 而忽略最大迭代次数是否达到。

随机搜索法往往作为零阶方法的先期处理。它也可以用来完成一些小的设计任务。例如可以做一系列的随机搜索, 然后通过查看结果来判断当前设计空间是否合理。

26.3.4 等步长搜索法

等步长搜索法[OPTYPE, SWEEP]用于在设计空间内完成扫描分析。将生成 $n \times \text{NSPS}$ 个设计序列, n 是设计变量的个数, NSPS 是每个扫描中评估点的数目(由 OPSWEEP 命令指定)。对于每个设计变量, 变量范围将划分为 NSPS-1 个相等的步长, 进行 NSPS 次循环。设计序列中设计变量的参考值用 OPSWEEP 命令的 Dset 指定(GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool)。

26.3.5 乘子计算法

乘子计算法工具[OPTYPE, FACT]用二阶技术生成设计空间上极值点上的设计序列数值、这个二阶技术在每个设计变量的两个极值点上取值。可以用 OPFACT 命令(GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool) 指定是完成整体的还是部分的评估。对于整体评估, 程序进行 2^n 次循环, n 是设计变量的个数。1/2 部分的评估进行 $2^{n/2}$ 次循环, 以此类推。

26.3.6 最优梯度法

最优梯度法[OPTYPE, GRAD]计算设计空间中某一点的梯度。梯度结果用于研究目标函数或状态变量的敏感性。用下列方式指定在哪个设计序列计算梯度:

命令: OPGRAD

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

本工具做的循环次数等于设计变量的数目。

26.4 选择优化变量注意事项

26.4.1 选择设计变量

设计变量往往是长度、厚度、直径或模型坐标等几何参数、其值必须为正。关于设计变量要记住的几点如下。

- 使用尽量少的设计变量。选用太多的设计变量会使得收敛于局部最小值的可能性增

加，在问题是高度非线性时甚至会引起不收敛。

- 设计变量合并不能用于设计变量是真正独立的情况下。
- 为设计变量定义一个合理的范围（OPVAR 命令中的 MIN 和 MAX）。范围过大可能不能表示好的设计空间，而范围过小可能排除了好的设计。
- 选择可以提供实际优化设计的设计变量。

26.4.2 选择状态变量

状态变量通常是控制设计的因变量数值。状态变量的例子有应力，温度，热流率，频率，变形，吸收能，消耗时间等。状态变量必须是 ANSYS 可以计算的数值；实际上任何参数都能被定义为状态变量。选择状态变量的一些要点如下。

- 在定义状态变量（OPVAR 命令）时，在 MIN 域中输入空值表示无下限。同样，在 MAX 域中输入空值表示无上限。
- 选择足够约束设计的状态变量数。如在应力分析中，只选择最大应力数值为状态变量不好，因为在不同的循环中，最大应力位置是变化的。同样也要避免另一个极端，如选择每个单元中的应力都为状态变量。
- 在零阶方法中，如果可能的话，选择与设计变量为线性或平方关系的参数为状态变量。
- 如果状态变量有上下限时，给定一个合理的限制值（OPVAR 命令的 MIN 和 MAX 域）。应避免过小的范围，因为此时合理设计可能不存在。
- 如果要指定相同的约束数值（如频率为 386.4Hz），定义两个相同数值的状态变量将实际值包含起来，如下所示：

```
*GET,FREQ,ACTIVE,,SET,FREQ      !参数 FREQ 等于计算频率
FREQ1=FREQ
FREQ2=FREQ
...
/OPT
OPVAR,FREQ1,SV,,387              !上限 FREQ1=387
OPVAR,FREQ2,SV,386              !下限 FREQ2=386
```

合理区域现为 386~387，但每个状态变量有足够宽的范围以加速逼近。

- 在定义参数前用选择功能避免在奇异点处（如集中载荷）附近选择状态变量。

26.4.3 选择目标函数

目标函数是设计要最小化或最大化的数值。选择目标函数要记住以下几点。

- ANSYS 程序总是最小化目标函数。如果要最大化数值 x ，就将问题转化为求数值 $x1=C-x$ 或 $x1=1/x$ 的最小值，其中 C 是远大于 x 的数值。定义 $C-x$ 的方法比用 $1/x$ 的方法要好，因为后者是反比关系，在零阶方法中不能得到准确的逼近。
- 目标函数值在优化过程中应为正值，因为负值将会引起数据问题。为了避免负值出现，可以将一个足够大的正值加到目标函数上。



26.5 实例：高速转盘的动力学优化设计

26.5.1 工程背景

高速转盘普遍存在严重的振动问题。振动不仅会产生噪音污染、缩短转盘的使用寿命、降低转盘的工作可靠性，还会加剧转盘的变形失效，甚至引起安全事故。因此在实际使用过程中，高速转盘的振动和稳定性问题是一个不容忽视的普遍存在的问题，有必要对其进行优化。

26.5.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

图 26-2 给出了高速转盘的模型简图，各尺寸如图所示，具体数值如表 26-1 所示。

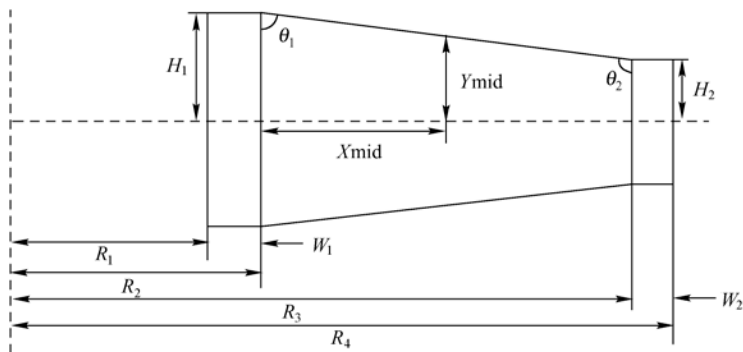


图 26-2 高速转盘简图

表 26-1 高速转盘的几何参数

R_1	W_1	H_1	R_4	W_2	H_2	θ_1	θ_2
0.12m	0.015m	0.045	0.25	0.01	0.015	90	90

2. 单元的选择及材料常数

本实例选择平面单元 PLANE182，并设置关键字为轴对称。高速转盘的材料：弹性模型为 2E11Pa，泊松比为 0.3，密度为 7200Kg/m³。

3. 边界条件

本模型由于对称计算时取图中模型的上半部分，静力学分析时在中心线施加对称位移约束，模态分析时为了提取高速转盘的弯曲模态，在中心线施加位移反对称约束。高速转盘的转速为 8000r/min。

4. 优化参数

(1) 设计变量

本实例设置高速转盘轮毂和轮缘中间部分的样条曲线两端切线与竖直线的夹角 θ_1 、 θ_2 和

高速转盘中间坐标 X_{mid} 与 Y_{mid} 为设计变量, 优化范围分别为 70, SEITA1, 90, 70, SEITA2, 90, 0.03, X_{mid} , 0.08, 0.03, X_{mid} , 0.08。

(2) 状态变量

本实例设置高速转盘的最大等效应力为 230MPa, 转盘最低固有频率大于 2500Hz。

(3) 目标函数

由于对于高速转盘类零部件, 一般采用等应力设计, 因此本实例设置高速转盘的等效应力标准差为目标函数。

26.5.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

操作后弹出一个对话框, 在输入栏中输入 “Optimal Design of Disk”, 单击 OK。

2. 定义几何参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 $\pi=3.1415$, 单击 Accept 完成对圆周率参数的定义, 按照此方法继续定义转盘内半径 $R1=0.12$, 转盘轮毂厚度 $W1=0.015$, 转盘轮毂边缘到轴心的距离 $R2=R1+W1$, 转盘轮毂高度 $H1=0.05$, 转盘边缘到轴心的距离 $R4=0.25$, 转盘轮缘厚度 $W2=0.01$, 转盘轮缘到轴心的距离 $R3=R4-W2$, 转盘轮缘高度 $H2=0.02$, 转盘轮廓线切角 $SEITA1=90$, 转盘轮廓线切角 $SEITA2=90$, 转盘中间 X 坐标 $X_{mid}=(R3-R2)/2$, 转盘中间 Y 坐标 $Y_{mid}=(H1+H2)/2$, 定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框, 单击 Add, 在弹出对话框的左边选择 Solid, 然后在右边选择 Quad 4node 182 单元, 单击 OK。

(2) 定义单元属性

单击单元类型面板 Element Types 的 Options 按钮, 在弹出的对话框中设置单元关键字 K3 为轴对称 Axisymmetric, 单击 OK, 单击 Close。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 $EX=3E11$, $PRXY=0.3$, 单击 OK, 单击 Structural | Density 设置材料密度, 在弹出的对话框中设置密度 (DENS) 为 7200, 选择 Material | Exit, 退出面板。

4. 建立模型

(1) 定义矩形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By 2 Corners

在弹出的对话框中输入 $X=R1$, $Y=0$, $Width=W1$, $Height=H1$, 单击 Apply; 继续输入 $X=R3$, $Y=0$, $Width=W4$, $Height=H2$, 单击 OK。

(2) 定义关键点



GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 $NPT=10$, $X=R2+X_{mid}$, $Y=Y_{mid}$, $Z=0$, 单击 OK。

(3) 激活总体柱坐标系

GUI: Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical

(4) 定义样条曲线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options |

Spline thru KPs

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取关键点 K3、K10 和 K8, 即轮毂右顶点关键点、转盘中间位置关键点和轮缘左顶点关键点, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 $XV1=1$, $YV1=90+SEITA1$, $ZV1=0$, $XV6=0$, $YV6=90-SEITA2$, $ZV6=0$, 单击 OK。

(5) 激活总体笛卡儿坐标系

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

(6) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord

弹出拾取对话框, 拾取关键点 K2 和 K5, 即轮毂右下点和轮缘左下点, 单击 OK。

(7) 通过线定义面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L9, L2, L10 和 L8, 单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Preferences | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板 Size Controls 中的 Global | Set, 在弹出的对话框中输入 $SIZE=0.003$, 单击 OK。

(3) 进行网格划分

选择网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

6. 静力学分析

(1) 设置分析类型

1) 定义静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

在弹出的对话框中设置 PETRES 为 Prestress ON, 含义为预应力分析, 单击 OK。

(2) 定义边界条件

1) 定义对称边界条件

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement |

Symmetry B.C. | On Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1, L5 和 L10, 即转盘的对称线, 单击 OK。

2) 定义转速

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Angular Veloc | Global

在弹出的对话框中输入 $OMEGY=2*\pi*8500/60$, 因为 ANSYS 转速的单位是 Hz, 所以需进行转换。

(3) 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

(4) 进入后处理提取参数

提取参数使用命令流比较方便, 如下:

```
NSORT,S,EQV
*GET,smax,SORT, ,MAX           !提取模型中最大等效应力并赋予参数 SMAX

*GET,NELEM,ELEM,,COUNT, , ,  !提取模型单元的数量并赋予参数 NELEM
ETABLE,eseqv,S,EQV             !使用单元表定义单元等效应力
*DIM,sarray,ARRAY,NELEM,1,1, , !定义维数为 NELEM,1,1 数组
!求模型中单元等效应力之和
SUM=0
*DO,I,1,NELEM,1
*GET,sarray(I),ELEM,I,ETAB,ESEQV
SUM=sarray(I)+SUM
*ENDDO
!求模型中单元平均应力
MS=SUM/NELEM
!求模型等效应力的标准差并赋予参数 SD
SD=0
*DO,I,1,NELEM,1
SD=(sarray(I)-MS)**2+SD
*ENDDO
SD=SQRT(SD/(NELEM-1))
```

7. 模态求解

(1) 设置分析类型

1) 定义模态分析分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Modal, 含义为进行模态问题求解。

2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

在弹出的对话框中勾选模态求解方法为 Block Lanczos, 提取阶数 (No. of modes to extract) 为 3, 扩展模态阶数 (NMODE No. of modes to expand) 为 3, 并勾选预应力选项 (PSTRES), 单击 OK, 保持弹出对话框的默认值, 单击 OK。



(2) 定义边界条件

1) 删除对称位移约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Delete | All Load Data | All Loads & Opts

2) 定义转盘对称线为反对称约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Antisymm B.C. | On Lines

弹出拾取对话框, 拾取线 L1, L5 和 L10, 即转盘的对称线, 单击 OK。

(3) 求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

(4) 提取固有频率

提取参数使用命令流比较方便, 如下:

```
*GET,FREQ1,MODE,1,FREQ
```

```
*GET,FREQ2,MODE,2,FREQ
```

```
*GET,FREQ3,MODE,3,FREQ
```

8. 优化设计

(1) 整理出命令流并复制到 ANSYS 的工作目录

本实例设置命令流文件名为 OPT.txt。

(2) 读入 OPT.txt

GUI: Utility Menu | File | Read Input from, 在工作目录中选中 OPT.txt。

(3) 指定分析文件

GUI: Main Menu | Design Opt | Analysis File | Assign

弹出选择文件对话框, 单击 Browse, 选择文件 OPT.MAC, 单击 OK。

(4) 定义设计变量

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Variables

弹出定义设计变量对话框, 单击 Add, 在弹出的对话框中选择 NAME 中的 SEITA1, 同时设置 MIN=70, MAX=90, 单击 Apply; 继续选择 NAME 中的 SEITA2, 同时设置 MIN=70, MAX=90, 单击 Apply; 继续选择 NAME 中的 XMID, 同时设置 MIN=0.03, MAX=0.08, 单击 Apply; 继续选择 NAME 中的 YMID, 同时设置 MIN=0.03, MAX=0.08, 单击 OK, 单击 Close。

(5) 定义状态变量

GUI: Main Menu | Design Opt | State Variables

弹出定义状态变量对话框, 单击 Add, 在弹出的对话框中, 选择 NAME 中的 FREQ2, 同时设置 MIN=2500, 单击 Apply; 继续选择 NAME 中的 SMAX, 同时设置 MAX=230E6, 单击 OK, 单击 Close。

(6) 定义目标函数

GUI: Main Menu | Design Opt | Objective

弹出定义目标函数对话框, 单击 Add, 在弹出的对话框中, 选择 NAME 中的 SD, 单击 OK, 单击 Close。

(7) 定义优化方法

GUI: Main Menu | Design Opt | Method/Tool

弹出指定优化方法 (Specify Optimization Method) 面板, 选择随机优化方法 (Random Designs), 单击OK, 在弹出的对话框中设置最大迭代次数 (Maximum iterations) 为 50, 单击OK。

(8) 查看优化结果

1) 查看最优设计。

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | List

弹出列举设计序列对话框, 选择最优序列 (BEST Set), 单击OK。

2) 查看设计变量与目标函数的曲线

GUI: Main Menu | Design Opt | Design Sets | Graphs/Tables

在弹出的对话框中选择XVAROPT中的XMID, 选择Y-variable params中的SD, 单击Apply, 如图 26-3 所示; 继续选择XVAROPT中的SEITA1, 选择Y-variable params中的SD, 单击OK, 如图 26-4 所示。

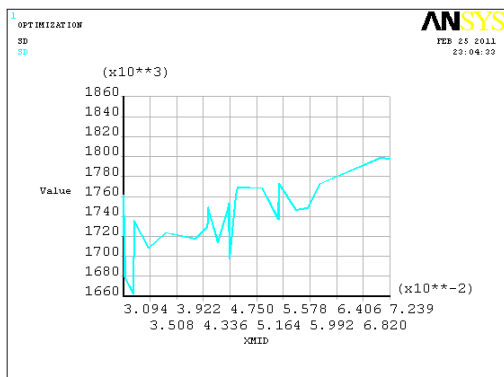


图 26-3 目标函数与XMID关系曲线

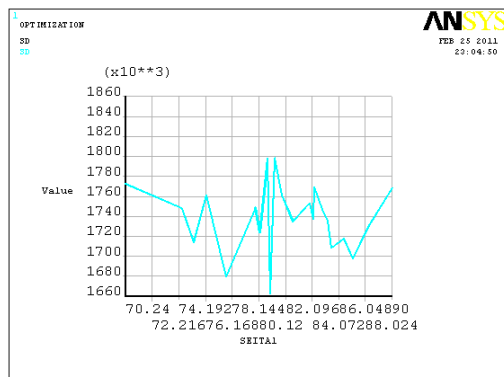


图 26-4 目标函数与SEITA1 关系曲线



第 27 章 拓 扑 优 化

27.1 拓扑优化的基本概念

ANSYS 提供拓扑优化技术，用于确定系统的最佳几何形状，其原理是使系统材料发挥最大利用率，同时确保诸如整体刚度、自振频率等在满足工程要求的条件下获得极大或极小值。目前，拓扑优化主要应用于线性静力分析和模态分析中。

与传统的优化设计不同的是，拓扑优化不需要给出参数和优化变量的定义。目标函数、状态变量和设计变量都是预定义好的。用户只需给出结构的参数（如材料特性、模型、载荷等）和要省去的材料百分比。

27.2 拓扑优化的步骤

27.2.1 定义拓扑优化问题

定义拓扑优化问题同定义其他线性、弹性结构问题做法一样。用户需要定义材料特性（杨氏模量和泊松比），选择合适的单元类型生成有限元模型，施加载荷和边界条件做单载荷步或多载荷步分析。

27.2.2 选择单元类型

拓扑优化功能可以使用二维平面单元、三维体单元和壳单元。要使用这个功能，模型中只能有下列单元类型。

- 二维实体单元：PLANE182 和 PLANE183。
- 三维实体单元：SOLID186 和 SOLID187。
- 壳单元：SHELL93。

二维单元用于平面应力问题或轴对称问题。

27.2.3 指定优化和非优化的区域

只有单元类型为 1 的单元才能做拓扑优化，对于单元类型编号等于或大于 2 的单元网格部分不进行拓扑优化。可以使用这种限制控制模型优化和非优化的部分。例如，如果要保留接近圆孔部分或支架部分的材料，将这部分单元类型号指定为 2 或更大即可：

```
ET,1,SOLID92  
ET9,2,SOLID92  
...
```

```

TYPE,1
VSEL,S,NUM,,1,,2    !用这些单元划分的实体将被优化
VMESH,ALL
TYPE,2
VSEL,S,NUM,,3        !用这些单元划分的实体将保持原状
VMESH,ALL

```

用户可以使用 ANSYS 的选择和修改命令控制单元划分和类型号定义。

27.2.4 定义载荷工况

拓扑优化只能基于线性结构静力分析或模态分析，其他分析类型暂时还不支持。针对这两种分析类型，ANSYS 实际提供的拓扑优化为基于线性结构静力分析的最大静态刚度拓扑优化设计和基于模态分析的最大动态刚度优化设计，同时需要达到体积最小化目的。

1. 线性结构静力分析

基于线性结构静力分析的最大静态刚度拓扑优化设计，是将结构柔度作为优化目标或优化约束条件（TOCOMP，TOVAR）。此时，必须在拓扑优化循环中执行线性结构静力分析，并且可以是基于单载荷工况求解进行拓扑优化，或是基于多载荷工况求解进行的拓扑优化。

用户可以在单载荷工况和多载荷工况下做拓扑优化。单载荷工况是最简便的。然而要在几个独立的载荷工况中获得一个优化结果时，那么用户必须用到写载荷工况和求解功能。在定义完每个载荷工况后，用户要用 LSWRITE 命令将数据写入文件，然后用 LSSOLVE 命令求解载荷工况的集合。

例如，下面的输入演示如何将三个载荷工况联合，进行拓扑优化分析。

```

D,10,ALL,0,,20,1      !定义第一个载荷工况的约束和载荷
NSEL,S,LOC,Y,0
SF,
ALLSEL
LSWRITE,1              !写第一个载荷工况
DDEL,                  !删除所有载荷与边界条件，开始定义第二个载荷工况
SFDEL,
NSEL,S,LOC,X,0,1
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
F,212,FX
LSWRITE,2              !写第二个载荷工况
...
LSWRITE,3              !写第三个载荷工况
...
FINISH
/SOLUTION
TOPDEF,10,3            !定义优化的参数
LSSOLVE,1,3,1          !在拓扑优化前做所有 3 个载荷工况求解
TOCOMP,MCOMP,MULTIPLE,3 !定义加权多柔度函数 MCOMP
                        !即同时考虑 3 个工况条件下的综合柔度

```



TOVAR,MCOMP,OBJ	!定义 MCOMP 为拓扑优化目标
TOVAR,VOLUME,CON,,10	!定义 VOLUME 为拓扑优化约束参数
TODEF	!初始化拓扑优化
TOLOOP,20	!求解并执行拓扑优化

2. 模态分析

当把固有频率作为拓扑优化的目标函数时 (TOFREQ, TOVAR), 则在优化循环中必须执行模态分析。用户使用 MODOPT 命令来指定模态分析中提取频率的数量, 利用 MXPAND 命令指定扩展模态的数量。在设置模态求解选项时一定要设置单元求解选项为 yes。

下面是基于模态分析的拓扑优化过程命令示例。在使用 TOLOOP 命令时, 只需要 ANTYPE 命令就可以, MODOPT 和 MXPAND 命令的作用由 TOLOOP 命令替代。在拓扑优化中只有 Block Lanczos 求解方法才能和 TOLOOP 命令一起使用。

/SOLUTION	
ANTYPE,MODAL	!设置分析类型为模态分析
FINISH	
TOFREQ,MFREQ,RECIPROCAL,3	!为拓扑优化定义频率倒数函数 MFREQ
TOVAR,MFREQ,OBJ	!定义函数 MFREQ 作为拓扑优化的目标函数
TOVAR,VOLUME,CON,,50	!定义 VOLUME 作为拓扑优化的约束
TODEF,1,0D-4	!拓扑优化初始化, 设置精度为 1.0d-4
TOLOOP,20	!求解 3 阶自然频率和相应的模态振型并执行拓扑优化

27.2.5 定义和控制优化过程

拓扑优化过程包含 4 个步骤: 定义拓扑优化函数, 定义拓扑优化目标函数和约束条件, 初始化拓扑优化和执行拓扑优化。第 4 步即执行拓扑优化, 有两种方式进行: 控制并执行每一次迭代或自动进行多次迭代。

ANSYS 有 7 个命令定义和执行拓扑优化: TOFREQ, TOCOMP, TOVAR, TOTYPE, TODEF, TOEXE 和 TOLOOP。TOCOMP 和 TOFREQ 命令用于定义拓扑优化函数; TOVAR 命令用于定义拓扑优化的目标函数和约束条件; TOTYPE 命令用于定义拓扑优化求解时所用的方法; TODEF 命令用于在拓扑优化过程中定义收敛公差及初始化; TOEXE 执行一次拓扑优化迭代; TOLOOP 执行多次拓扑优化迭代。

注意: 当用户定义好拓扑优化参数后, 执行一次或多次拓扑优化迭代前, 必须先对问题进行求解 (SOLVE)。如果不对问题进行求解, 当执行一个拓扑优化步时, 程序将弹出错误信息。TOLOOP 命令用于执行求解。

1. 定义优化函数

首先要在拓扑优化问题中定义优化函数。在线性结构分析中使用 TOCOMP 命令为单一或多载荷工况定义柔度函数。与此相反, TOFREQ 命令是为了定义固有频率类型函数。对于每一个拓扑函数, 一定要指定一个唯一的参考名称。使用 TOCOMP, RefName 或 TOFREQ,RefName 命令删除一个拓扑优化函数。

下面给读者做详细解释定义拓扑优化函数。首先, 进行最基本的拓扑优化。此时只能进

行基于载荷工况的刚度最大化拓扑优化（不能进行基于频率和多载荷工况的拓扑优化）。

GUI: Main Menu | Topological opt | set Up | Basic opt

弹出基本拓扑优化（Basic Topological optimization）对话框，设置选项分别为：Load case number，输入拓扑优化基于的静力求解载荷工况号；Percent volume reduct'n，输入结构体积缩减百分数。

第二种方法，高级的拓扑优化方法。

GUI: Main Menu | Topological Opt | Advanced Opt | Topo Function

利用其下级子菜单进行拓扑优化设计，并且允许选用 ANSYS 提供的所有拓扑优化方法。各种拓扑优化方法的具体意义参见下面的解释。

1 Loadcase compl: 选择该项表示基于 1 个静力求解载荷工况的拓扑优化函数进行优化分析，单击 OK 则弹出第二层对话框，其中 Function name 项输入指定的参考函数名（以下相同），Load case number 项输入载荷工况编号，然后单击 OK。

N Loadcase compl: 选择该项表示基于 N ($N \geq 2$) 个静力求解载荷工况加权求和的拓扑优化函数进行优化分析，单击 OK 则弹出第二层对话框，Function name 项输入函数名，Number of load cases 项输入参与加权求和的载荷工况总数，Array of weight factor 项选择 Yes 表示所有求和项的加权系数均取 $1/\text{NUMLC}$ （工况总数的倒数），默认设置为 NO 表示多载荷工况的加权系数由预先定义好的数组给定，此时单击 OK 弹出第二层对话框，选中 Array of weight factors 列表中的权系数数组，单击 OK。

Single frequency: 选择该项表示基于单个模态结果的拓扑优化函数进行优化分析，单击 OK 则弹出第二层对话框，Function name 项输入函数名，Mode number 项输入指定用于拓扑优化的模态频率编号，然后单击 OK。

N freq weighted: 选择该项表示基于 N ($N \geq 2$) 阶模态频率加权求和函数进行拓扑优化分析，单击 OK 则弹出第二层对话框，Function name 项输入函数名，Number of modes 项输入参与加权求和的模态频率总数，Frequency weights 项选择 Yes 表示所有求和项的加权系数均取 $1/\text{NFREO}$ （模态总数的倒数），默认设置为 NO 表示多模态频率的加权系数由预先定义好的数组给定，此时单击 OK 弹出第二层对话框，选中 Array of weight factors 列表中的权系数数组，单击 OK。

N freq reciprocal: 选择该项表示基于前 N 阶模态频率与指定目标平均频率差的倒数加权求和函数进行拓扑优化分析，单击 OK 按钮则弹出第二层对话框，Function name 项输入函数名，Number of modes 项输入参与加权求和的模态频率总数，Mean freq target value 项输入指定的平均频率目标值，Frequency weights 项选择 Yes 表示所有求和项的加权系数均取 $1/\text{NFREO}$ （模态总数的倒数），默认设置为 NO 表示多模态频率的加权系数由预先定义好的数组给定，此时单击 OK 则弹出第二层类似的对话框，选中 Array of weight factors 列表中的权系数数组，单击 OK。

N freq Euclidean: 选择该项表示选择基于前两阶或更多阶模态结果的欧几里得准则函数进行拓扑优化分析，单击 OK 按钮则弹出第二层对话框，Function name 项输入函数名，Number of modes 项输入参与欧几里得准则函数的模态频率总数，Array of target freq's 项是选择预先定义的存储目标频率值的数组（维数大于等于参与优化的模态频率总数），在 Select existing array 列表中选择目标频率存储数组，单击 OK 按钮。



定义完拓扑优化函数后，如果需要进一步确认定义的所有拓扑优化函数，可以利用列表方式显示当前定义的所有拓扑优化函数，

命令：TOLIST

GUI: Main Menu | Topological Opt | Advanced Opt | List Functions

2. 定义目标函数和约束条件

下一步就是为拓扑优化指定目标函数和约束条件。ANSYS 程序提供一个专门用于预定义总体积的拓扑函数，即 **VOLUME**，它既可用于目标函数，也可以用于约束条件。另外，目标函数和约束条件必须按照表 27-1 所示进行匹配才有效。

表 27-1 允许定义的目标函数和约束条件组合

目标函数	有效约束
单柔度 (TOCOMP)	体(VOLUME)
多柔度(OCOMP)	体(VOLUME)
单频率(TOFREQ)	体(VOLUME)
加权平均频率(TOFREQ)	体(VOLUME)
倒数平均频率(TOFREQ)	体(VOLUME)
欧几里德范数频率(TOFREQ)	体(VOLUME)
体(VOLUME)	单柔度(VOLUME)，允许定义多种约束
体(VOLUME)	多柔度(VOLUME)

首先定义拓扑优化的目标函数，并且必须在定义拓扑优化约束条件之前先行定义。

GUI: Main Menu | Topological Opt | Advanced Opt | Topo Objective

在弹出的对话框中选择 Name of objective func 列表中的函数之一，然后单击 OK。

定义一个或多个拓扑优化约束条件。

GUI: Main Menu | Topological Opt | Advanced Opt | Topo | TopoConstraints

其下有 3 个子菜单，分别如下。

By Percentage: 按照缩减百分数定义约束条件。选择该子菜单项，从 Name of constraint func 函数列表中选中一个已定义的函数，单击 OK，弹出对话框中，在 Percent volume reduct'n 项输入函数缩减的百分数数值，单击 QK。

By Value: 指定函数的取值范围，即上下限定义约束条件。选择该子菜单项弹出对话框，从 Name of constraint func 函数列表中选中一个已定义的函数，在 Minimum value desired 项输入函数取值范围的下限，在 Maximum value desired 项输入函数取值范围的上限，单击 OK。

Delete: 删除已定义的约束条件。选择该子菜单项弹出对话框，从 Name of constraint 函数列表中选中一个已定义的函数，单击 OK 删除它。

如果需要改变已定义的目标函数和约束条件，进行重定义即可。

下面是一个单柔度极小化的拓扑优化实例，显示如何定义目标函数和约束条件，目标是使体积减小 50%。

TOCOMP,COMP,SINGLE,1 !为拓扑优化函数 COMP 定义单柔度(工况 1)

TOVAR,COMP,OBJ !为拓扑优化定义柔度函数 COMP 作为目标函数

TOVAR,VOLUME,CON,,25 !将预定义总体积函数 VOLUME 作为拓扑优化约束条件
!并指定减 25%的体积
TODEF,1.0d-4 !定义优化收敛精度为 1.0d-4
TOLOOP,10,1 !设置进行 10 次拓扑优化自动迭代计算

如果需要了解拓扑优化定义函数的状态以及结果信息，如最终体积、迭代数和收敛状态等，可采用如下方法。

命令：TOSTAT

GUI: Main Menu | Topological Opt | Advanced Opt | Status
Main Menu | Topological Opt | Status

3. 求解和开始优化

定义完优化参数后，就可以求解了。用户必须在执行拓扑优化之前求解问题。

命令：SOLVE

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Current LS

注意：实际进行拓扑优化分析的过程中，并不需要真正进入求解器进行静力或模态频率求解。在定义拓扑优化函数的过程中已经明确规定求解是单步求解还是多步求解，在接下来的执行单次拓扑优化迭代计算或自动执行多次拓扑优化迭代计算中，程序会自动执行相应的静力或频率求解计算。

在设定完拓扑优化后，用户可以选择求解方法去求解优化问题。

命令：TOTYPE,

GUI: Main Menu | Topological Opt | Run

在弹出的对话框进行如下设置。

Solution approach: 选择拓扑优化的计算方法，程序提供了两种方法：一是 Optimality，即优化准则法（Optimality Criteria: OC）；二是 Sequential，即和连续凸函数寻优法（Sequential Convex Programming: SCP）。OC 方法只用于以体积作为约束条件的问题；SCP 方法可用于所有目标函数和约束条件的匹配问题。

Convergence tolerance: 拓扑优化计算时，程序终止优化迭代的收敛精度准则值，默认是 0.0005。

自动执行多次迭代拓扑优化求解（TOLOOP 命令），需要设置如下选项。

Number of iterations: 指定拓扑优化循环迭代的总次数，默认是 1，表示执行单次迭代拓扑优化，设置为大于或等于 2 时表示执行多次迭代拓扑优化求解，但每次设置的最大迭代次数不能超过 100。

Plot density@each iter: 设置在优化迭代过程中是否每次迭代时重新刷新拓扑优化密度分布显示图形结果，设置为 Yes 表示每次迭代刷新显示，设置为 Na 则表示不刷新显示。

最后，单击 OK，开始执行拓扑优化迭代求解。

注意：该步骤所定义的内容不会存入到 ANSYS 数据库中，当利用 RESUME 命令重新恢复已有数据库后，如果需要执行下一个拓扑优化，那么必须重新执行拓扑优化的所有过程，如定义优化函数、目标函数、约束条件和初始化拓扑优化设置，即重新执行以上所有步骤。





该步骤首先进行静力或模态频率求解，然后进行初始化拓扑优化设置，包括拓扑优化方法的选择和收敛精度的设置。

4. 执行单次迭代

定义好优化参数后，可以执行一次单步拓扑优化迭代计算，之后就可以查看迭代收敛状态，并绘制或列表显示当前的拓扑优化结果，还可以继续进行其他拓扑优化迭代计算，直至获得自己希望的拓扑优化结果。

执行单步拓扑优化迭代计算，ANSYS 并没有提供直接的菜单路径供使用，只能使用 TOEXE 命令进行。TOEXE 命令进行拓扑优化的主要优点是用户可以设计自己的迭代宏，进行自动拓扑优化循环过程，并绘制所需的过程参数和结果参数的图形。

下面的例子说明了如何在拓扑优化中每次执行一次迭代：

```
TOCOMP,COMP,SINGLE,1    !为拓扑优化函数 COMP 定义单柔度(工况 1)
TOVAR,COMP,OBJ          !为拓扑优化定义柔度函数 COMP 并作为目标函数
TOVAR,VOLUME,CON,,25    !将预定义总体积函数 VOLUME 作为拓扑优化约束并指定减少
                        ! 25%的体积
TOTYPE,OC               !使用 OC 作为优化的方法
TODEF,1.0d-4            !设置迭代计算精度为 1.0d-4
/SOLUTION
SOLVE                   !执行第一次应力分析
TOEXE                   !执行第一次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1                  !进入后处理器
PLNSOL,TOPO             !画出优化结果
*GET,TOPSTAT,TOPO,,CONV !读取拓扑收敛状态
*STAT,TOPSTAT           !列表
/SOLUTION
SOLVE                   !执行第二次应力分析
TOEXE                   !执行第二次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1
```

下面是另一个实例，演示执行单步拓扑优化迭代计算的过程，是每次进行单步拓扑优化迭代，进行一个频率极大化的问题。

```
TOFREQ,FREQ1,SINGLE,1    !为拓扑优化函数 FREQ1 定义单频率
TOVAR,FREQ1,OBJ         !为拓扑优化定义单频函数 FREQ1 作为目标函数
TOVAR,VOLUME,CON,,25    !预定义总体积函数 VOLUME 作为拓扑优化约束并指定减少
                        !25%的体积
TOTYPE,SCP              !使用 SCP 作为优化的方法
TODEF,1.0d-4            !指定终止迭代收敛精度为 1.0d-4
/SOLUTION
ANTYPE,MODAL            !选择模态分析
MODOPT,LANB,1           !指定模态分析选项:选择 Block Lanczos 求解器(默认)
```

	!提取第一阶模态
MXPAND,1,,,YES	!扩展第一阶模态，并计算单元结果
SOLVE	!执行模态分析
TOEXE	!执行第一次拓扑迭代
FINISH	
TOPLOT,0	!绘制拓扑优化计算结果
*GET, TOPSTAT, TOPO, , CONV	!读取拓扑收敛状态值
*STAT, TOPSTAT	!列表显示拓扑收敛状态值
/SOLUTION	
SOLVE	!执行第二次模态分析
TOEXE	!执行第二次拓扑优化
FINISH	
TOPLOT,0	

5. 自动执行多次迭代

定义好优化参数后，可以自动执行多次拓扑优化迭代，之后就可以查看迭代收敛状态，并绘制或列表显示当前的拓扑优化结果。还可以继续进行其他拓扑优化迭代计算，直至获得理想的拓扑优化结果。

ANSYS 提供自动执行多次拓扑优化迭代计算命令 **TOLOOP**，它实际是一个 ANSYS 的宏命令。

GUI: Main Menu | Topological Opt | Run

需要设置两个宏命令参数：迭代次数和选择是否每次迭代绘制拓扑密度分布图。在实际迭代优化过程中，每次迭代优化执行一次 **LSSOLVE**；命令、一次 **TOEXE** 命令、一次 **PLNSOL** 命令以及一次 **TOPO** 显示（选项）命令。当迭代计算的收敛值达到指定的收敛精度或最大迭代次数达到指定的优化迭代总次数时，拓扑优化计算将终止迭代计算。

下面的例子说明了如何使用 **TOPITER** 宏执行多次迭代：

...	!定义并写第一个载荷工况
LSWRITE	!写出第一个载荷工况求解文件
...	!定义并写第二个载荷工况
LSWRITE	
...	!定义并写第三个载荷工况
LSWRITE	
...	
TOPDEF,80,3,.001	!80%体积减少，3 个载荷工况 0.001 为收敛公差
...	
/DSCALE,,OFF	!关闭形状改变
/CONTOUR,,3	!每次显示 3 个轮廓数值
TOPITER,20,1	!最大 20 次迭代。每次迭代求解并绘出结果

每次迭代执行一次 **LSSOLVE** 命令，一次 **TOPEXE** 命令和一次 **PLNSOL**，**TOPO** 显示命令。当收敛公差达到（用 **TOPDEF** 定义）或最大迭代次数（用 **TOPITER** 定义）达到时优化迭代过程终止。



27.2.6 查看结果

拓扑优化求解结束后，所有的拓扑优化结果存储在 ANSYS 的结果文件 Jobname.rst 中。

可以直接在拓扑优化求解器环境中利用提供的专用拓扑优化结果处理菜单进行拓扑优化结果处理，也可以利用 ANSYS 的通用后处理器（POST1）进行拓扑结果后处理。

下面的命令是一个拓扑优化后处理的实例，演示如何绘制或列表显示伪密度、绘制目标函数和约束函数随迭代变化的曲线、列表显示目标函数和约束函数随迭代变化的数值：

```
/POST1           !进入 POST1 后处理器
TOPLOT,1         !绘制单元伪密度
PLNS,TOPO        !绘制节点伪密度
TOGRAPH,OBJ      !绘制拓扑目标函数随迭代变化的曲线
TOGRAPH,CON,VOLUME !绘制拓扑约束函数 VOLUME 随迭代变化的曲线
TOPRINT,OBJ      !列表显示拓扑目标函数随迭代变化的数值列表
TOPRINT,CON      !列表显示拓扑约束函数 VOLUME 随迭代变化的数值列表
```

下面是一个单元表处理拓扑优化结果的标准实例：

```
ETABLE,EDENS,TOPO !定义拓扑优化伪密度单元表
PLETAB,EDENS      !绘制拓扑优化伪密度单元表
PRETAB,EDENS      !列表显示拓扑优化伪密度单元表
ESEL,S,ETAB,EDENS,0.9,1.0 !选择伪密度为 0.9~1.0 的单元
EPLOT             !绘制选中的单元
```

下面是一个利用*GET 命令读取最后一次拓扑优化迭代的目标函数或约束条件值的标准实例。

```
*GET,TOPCV,TOPO,,CONV !如果 TOPCV=1(收敛)
*GET,TITER,TOPO,,ITER !TITER 代表迭代的次数
*GET,TOBJ,TOPO,ITER-1,TOHO !TOBJ 代表最后一次迭代的目标函数值
*GET,TCON,TOPO,ITER-1,TOHC,1 !TCON 代表最后一次迭代的约束函数值
*STAT
```

基于模态频率的拓扑优化分析，特别是当使用 weighted（频率加权）、reciprocal（频率倒数）或 Euclidean（欧几里德）方法时，应当利用*GET 命令检查收敛时结构的真实频率值，并在 POST1 通用后处理中观察各阶模态振型。

下面是一个查看拓扑优化迭代收敛时的结构真实频率值的标准实例。

```
*GET,FREQ1,MODE,1,FREQ ! 第 1 阶基频
*GET,FREQ2,MODE,2,FREQ ! 第 2 阶基频
```

27.3 实例：自行车车架的拓扑优化

27.3.1 工程背景

车架是自行车的骨架和主体，它的强度、刚度和重量直接影响整辆自行车的承载能力和

轻便程度。随着自行车产业的发展,先后出现了各种结构形状的车架:例如左右两二三角形车架,1个四边形和1个二三角形车架,1根弯杠和1个二三角形车架。本实例使用 ANSYS 寻求为了在较轻重量的前提下获得自行车车架的最大强度和刚度。

27.3.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

本实例的模型为一长方形,长为 1.2m,宽为 0.6m。

2. 单元的选择及材料常数

本实例需要定义编号为 1, 2 的两种单元,单元 1 用于进行拓扑优化的区域,单元 2 用于不进行拓扑优化的区域,其单元类型均选择 8 节点 PLANE82 单元。材料的弹性模量为 2E11Pa,泊松比为 0.3。

3. 边界条件

首先将模型上需要安装车把、后轮、鞍座和脚蹬处的单元类型由单元 1 改为单元 2,即改为不进行拓扑优化的单元;然后在模型的左上角施加完全约束,在右下角即安装前叉和后轮的部位施加 Y 方向的约束;最后在模型上安装鞍座的部位施加 X 方向的力(人体对鞍座向后的摩擦力) F_x 为 15N,施加 Y 负方向的力(人体对鞍座的压力) F_y 为 500 N,在模型上安装脚蹬的部位施加 X 负方向的力(人体对脚蹬向前的蹬力) F_x 为 15N,施加 Y 负方向的力(人体对脚蹬向下的蹬力) F_y 为-50 N。

27.3.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出对话框,在输入栏中输入“Topology Optimization Design of Bicycle Frame”,单击 OK。

2. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框,单击 Add,在弹出对话框的右下角输入 82,单击 OK。

(2) 定义材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出对话框,首先定义母材区 1 的材料常数,单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic,又弹出一个输入材料属性的对话框,输入 EX=2E11,PRXY=0.3,单击 OK。

3. 建立焊接接头的模型

(1) 定义矩形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 X1=0, X2=1.2, Y1=0, Y2=0.6,单击 Apply;继续输入 X1=0, X2=0.03, Y1=0.57, Y2=0.6,单击 Apply;继续输入 X1=28*0.03, X2=30*0.03, Y1=0.57, Y2=0.6,单击 Apply;继续输入 X1=18*0.03, X2=20*0.03, Y1=0.57, Y2=0.6,单击 Apply;继续输入 X1=39*0.03, X2=40*0.03, Y1=0, Y2=0.03,单击 OK。

(2) 进行面相减

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas



弹出拾取对话框，拾取大面 A1，单击 Apply，拾取小面 A2，单击 Apply；继续拾取大面，单击 Apply，拾取小面 A3，单击 Apply；继续拾取大面，单击 Apply，拾取小面 A4，单击 Apply；继续拾取大面，单击 Apply，拾取小面 A5，单击 OK。

(3) 定义矩形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 $X1=0$ ， $X2=0.03$ ， $Y1=0.57$ ， $Y2=0.6$ ，单击 Apply；继续输入 $X1=28*0.03$ ， $X2=30*0.03$ ， $Y1=0.57$ ， $Y2=0.6$ ，单击 Apply；继续输入 $X1=18*0.03$ ， $X2=20*0.03$ ， $Y1=0.57$ ， $Y2=0.6$ ，单击 Apply；继续输入 $X1=39*0.03$ ， $X2=40*0.03$ ， $Y1=0$ ， $Y2=0.03$ ，单击 OK。

(4) 粘结所有面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Areas

弹出拾取对话框，单击 Pick All。

4. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 划分需要优化区域

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板的 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中选择材料号为 1，其他保持默认值，单击 OK。

2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.003，单击 OK。

3) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取面 A1，单击 OK。

(3) 划分需要非优化区域

1) 设置单元属性。选择网格划分工具面板的 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中选择材料号为 2，其他保持默认值，单击 OK。

2) 单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，拾取四个小面：A6，A7，A8 和 A9，单击 OK。

5. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static，含义为进行静力学问题求解。

6. 定义边界条件

(1) 施加位移约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes

弹出拾取对话框，拾取模型的左上角节点，单击 Apply，在弹出的对话框中选择 All DOF，单击 Apply；继续拾取右下角即安装前义和后轮的部位节点，单击 Apply，在弹出的对话框中选择 UY，单击 OK。

(2) 施加集中力

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes

弹出拾取对话框，拾取安装鞍座的部位节点，单击 Apply，在弹出对话框中设置力的方

向 (Direction of force/mom) 为 FX, 并输入其值 15, 单击 Apply; 继续拾取安装鞍座的部位节点, 单击 Apply, 在弹出对话框中设置力的方向 (Direction of force/mom) 为 FY, 并输入其值 -500, 单击 Apply; 继续拾取安装脚蹬的部位节点, 单击 Apply, 在弹出对话框中设置力的方向 (Direction of force/mom) 为 FX, 并输入其值 -15, 单击 Apply; 继续拾取安装脚蹬的部位节点, 单击 Apply, 在弹出对话框中设置力的方向 (Direction of force/mom) 为 FY, 并输入其值 -50, 单击 OK。

7. 进入拓扑优化模块求解

(1) 定义拓扑优化函数

GUI: Main Menu | Topological Opt | Set Up | Advanced Opt | Topo Function

弹出拓扑优化函数面板, 选择单一工况 (1 LoadCase compl) 单击 OK, 在弹出的对话框中选择函数名称 (Function name) 为 TF, 单击 OK。

(2) 定义目标函数

GUI: Main Menu | Topological Opt | Set Up | Advanced Opt | Topo Objective

在弹出的对话框中选择 TF, 单击 OK。

(3) 定义约束条件

GUI: Main Menu | Topological Opt | Set Up | Advanced Opt | TopoConstraint | By Percentage

弹出拓扑优化约束对话框, 选择 VOLUME, 单击 OK, 输入体积减少百分比为 70%, 单击 OK。

(4) 开始拓扑优化运算

GUI: Main Menu | Topological Opt | Run

弹出拓扑优化面板, 设置求解方法为 Optimality, 收敛容差 (Convergence tolerance) 为 0.0001, 迭代数量 (Number of iterations) 为 35, 单击 OK。

(5) 画位密度图

GUI: Main Menu | Topological Opt | Plot Densities

如图 27-1 所示。

(6) 查看目标函数与迭代数目关系

GUI: Main Menu | Topological Opt | Graph History

在弹出的对话框中选择目标函数 (Objective func), 单击 OK, 如图 27-2 所示。

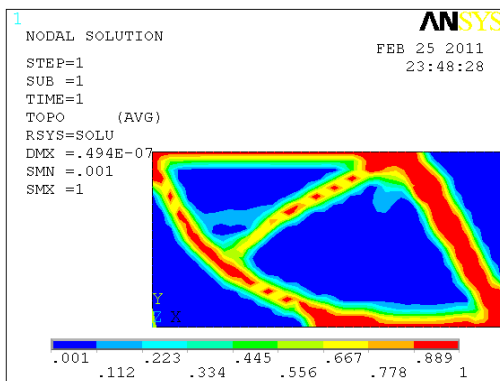


图 27-1 车架拓扑优化的伪密度

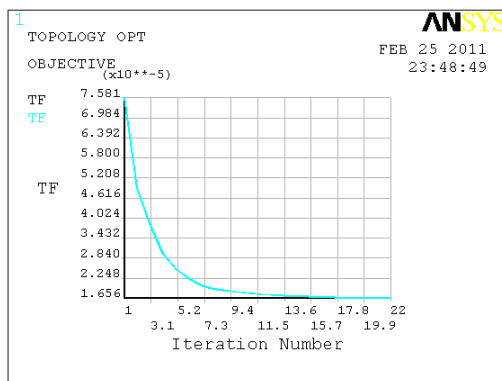


图 27-2 目标函数和迭代关系图



第 28 章 疲劳分析

28.1 疲劳的基本概念

疲劳是指结构在低于静态极限强度载荷的重复载荷作用下，出现断裂破坏的现象。例如一根能够承受 300 kN 拉力作用的钢杆，在 200 kN 循环载荷作用下，经历 1 000 000 次循环后亦会破坏。导致疲劳破坏的主要因素如下。

- 载荷的循环次数。
- 每一个循环的应力幅。
- 每一个循环的平均应力。
- 存在局部应力集中现象。

真正的疲劳计算要考虑所有这些因素，因为在预测其生命周期时，它计算“消耗”的某个部件是如何形成的。

28.1.1 ANSYS 程序处理疲劳问题的过程

ANSYS 疲劳计算以 ASME 锅炉和压力容器规范 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code) 第三节 (和第八节第二部分) 作为计算的依据，采用简化了的弹塑性假设和 Miner 累积疲劳准则。

除了根据 ASME 规范所建立的规则进行疲劳计算外，用户也可编写自己的宏指令，或选用合适的第三方程序，利用 ANSYS 计算的结果进行疲劳计算。

ANSYS 程序的疲劳计算能力如下。

- 对现有的应力结果进行后处理，以确定体单元或壳单元模型的疲劳寿命耗用系数 (fatigue usage factors)，用于疲劳计算的线单元模型的应力必须人工输入。
- 可以在一系列预先选定的位置上，确定一定数目的事件及组成这些事件的载荷，然后把这些位置上的应力储存起来。
- 可以在每一个位置上定义应力集中系数和给每一个事件定义比例系数。

28.1.2 基本术语

位置 (Location): 在模型上储存疲劳应力的节点。这些节点是结构上某些容易产生疲劳破坏的位置。

事件 (Event): 在特定的应力循环过程中，在不同时刻的一系列应力状态。

载荷 (Loading): 事件的一部分，是其中一个应力状态。

应力幅: 两个载荷之间应力状态之差的度量。程序不考虑应力平均值对结果的影响。

28.2 疲劳分析的步骤

28.2.1 进入POST1 和恢复数据库

依照下列步骤进行疲劳分析：

(1) 进入 POST1

命令：POST1

GUI: Main Menu | General Postproc

(2) 把数据库文件 (Jobname.DB) 读入到内存中 (如果所要做的疲劳计算是正在进行的 ANSYS 计算过程的继续, 则 Jobname.DB 文件已在内存中)。结果文件 (Jobname.RST) 必须已经存在并将其读入内存。

命令：RESUME

GUI: Utility Menu | File | Resume from

28.2.2 建立疲劳计算的规模、材料疲劳性质和疲劳计算的位置

1. 定义位置、事件和载荷的最大数目

默认情况下, 疲劳计算最多包括 5 个节点位置, 10 个事件, 每个事件中 3 个载荷。如果需要, 可以通过下面的命令来设置较大的规模 (即较多的位置、事件和载荷)。

命令：FTSIZE

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Size Settings

2. 定义材料的疲劳性质

为了计算各种耗用系数, 以及为了包含简化弹塑性效应, 必须定义材料的疲劳性质。在疲劳计算中, 感兴趣的材料性质有如下几种。

S-N 曲线: 应力幅 $[(S_{\max}-S_{\min})/2]$ -疲劳循环次数的关系曲线。ASME S-N 曲线考虑了最大平均应力的影响。如果需要, 应把输入的 S-N 曲线进行调节以便考虑平均应力强度效应。如果不输入 S-N 曲线, 那么对于各种可能的应力状态的组合, 应力幅将降序排列, 但不计算耗用系数。

命令：FP

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | S-N Table

Sm-T 曲线: 设计应力强度值—温度曲线。如要考虑检查应力范围是否进入塑性, 就必须定义该曲线。

命令：FP

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | Sm_T Table

弹塑性材料参数 M 和 N (应变强化指数)。只在需要使用简化的弹塑性准则时, 才输入 M、N。这些参数可以从 ASME 规范中获得。

命令：FP

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | Elas-plas Par

下述例子说明了用于输入疲劳材料性质的 FP 命令的使用方法：



```
!定义 S-N 数据表
FP,1,10,30,100,300,1000,10000 ! 允许的循环次数, N
FP,7,100000,1000000 ! "
FP,21,650,390,240,161,109,59 ! 交变应力强度范围
FP,27,37,26
! Define the Sm-T table:
FP,41,100,200,300,400,500,600 ! 温度, deg F
FP,47,650,700,750,800 ! "
FP,51,20,20,20,18.7,17.4,16.4 !设计应力强度值
FP,57,16.1,15.9,15.5,15.1 !Sm(=2/3*Sy o 或! 1/3 *Su)
! 定义弹塑性参数:
FP,61,1.7,.3 ! M 和 N
```

3. 定义应力位置和应力集中系数

下面的选项允许用户显式地定义疲劳计算中关心的节点位置、该位置的应力集中系数,以及在该位置的一个短的标题(可用 20 个字母)。

命令: FL

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Stress Locations

注意: 不是所有的疲劳分析都需要使用 FL 命令。如果使用 FS、FSNODE 或 FSSECT 等命令(见下), 则疲劳节点位置是自动定义的。假使在建模时包含有足够细的网格, 则所计算的应力是准确的, 因此不必指定应力集中系数 SCFs (但是如果考虑表面影响、尺寸影响和腐蚀影响, 则仍然需要指定 SCFs)。在计算疲劳时如果只需要考察一个位置, 则可以省略标题。假使定位明确, 或是不需要应力集中系数和标题, 则可完全不使用 FL 命令。

这里给出了在一个圆柱筒分析中应用 FL 命令的例子, 如图 28-1 所示。整体坐标 Y 轴为旋转轴。在不同壁厚交界处的外壁给出了应力集中系数 SCFs (针对轴向线性应力)。

```
FL,1,281,,Line 1 at inside
FL,2,285,,1.85,,Line 1 at outside
FL,3,311,,Line 2 at inside
FL,4,315,,2.11,,Line 2 at outside
```

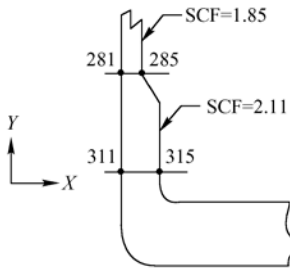


图 28-1 圆柱壁上的应力集中系数

28.2.3 储存应力、指定事件循环次数和比例因子

1. 储存应力

为了进行疲劳计算, 程序必须知道每一个位置上不同事件和载荷时的应力, 以及每一个事件的循环次数。可采用下列选项来储存每一个位置、事件和载荷组合情况下的应力: 人工储存应力; 从 (Jobname.RBT) 文件中取得节点应力; 横截面应力。

注意: 程序从不假定存在 0 应力条件。如果一定要考虑零应力条件, 就必须在每一个事件中明确地输入何处产生零应力。

下面这些命令列示意地说明了怎样储存应力，在某些情况下，用户或许更愿意用 LCASE 命令而不用 SET 命令。

手工存储应力：FS。

从 Jobname.RST 中获得节点应力：SET, FSNODE。

横截面处的应力：PATH, PPATH, SET, FSSECT（横截面处的计算也需要从 Jobname.RST 文件中获取数据）。

在一个事件中，用户可以用多种方法来存储应力，下面详细阐述这些方法的用法。

（1）人工储存应力

用户可以人工存储应力和温度（不是直接从 Jobname.RST 的结果文件取得）。在这种情况下，实际并没有将 POST1 的疲劳模块作为后处理器，而是仅仅作为疲劳计算器使用。线单元（如梁单元）的应力必须人工输入，因为这里疲劳模型不能从 jobname.RST 文件中获取数据。

命令：FS

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Specified Val

下面的例子说明用上述命令输入的方式：

```
FS,201,1,2,1,-2.0,21.6,15.2,4.5,0.0,0.0
FS,201,1,2,7,450.3
```

在这个例子中，只输入了总应力（1~6 项）和温度。如果还要输入线性化应力，它们将紧随在温度后面，即 8~13 项。

注意：对只有轴向应力的梁单元，只需输入一个应力分量（SX），其余各项为空。

（2）从结果文件中提取应力

使用这个选项时，用户就生成了要储存的含有 6 个应力分量的一个节点矢量，这些应力分量可以直接在结果数据库文件中保存。

注意：在执行 FSNODE 命令之前，必须使用 SET 命令，可能还有 SHELL 命令。SET 命令从数据库的 Jobname.RST 文件中读取某一特殊载荷子步下的结果，SHELL 命令可选择从壳单元的顶面、中面或底面读取结果（默认是从顶面读取结果）。

命令：FSNODE

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File

下面给出用 FSNODE 命令在一个事件的一个节点位置输入应力结果的例子，如图 28-2 所示。

```
SET,1          !读取第一个载荷步的结果
FSNODE,123,1,1 !节点 123 初的应力矢量被指定为事件 1，载荷 1
SET,2          !为载荷步 2 定义数据组
FSNODE,123,1,2 !事件 1 载荷 2
SET,3          !载荷步 3
FSNODE,123,1,3 !事件 1，载荷 3
```



(3) 横截面处的应力

本选项计算和存储截面路径（它是由以前的 `PATH` 和 `PPATH` 命令定义的）末端的线性应力。因为通常线性应力计算是在能代表两个表面的最短距离的线段上进行的，因此，只需在两个表面上各取一个点来描述 `PPATH` 命令中的路径。这一步骤将从计算结果的数据库中获得应力；因此必须在 `SET` 命令之前使用 `FSSECT` 命令。用 `FSSECT` 命令储存的应力分量可用 `FS` 命令修正。

命令: `FSSECT`

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | At Cross Sect

下面这个例子介绍了 `FSSFCT` 输入命令的用法，如果未用 `FL` 命令来指定节点位置，在本例中，`FSSFCT` 命令会自动为两个路径节点指定位置，编号为 391 和 395，如图 28-3 所示。

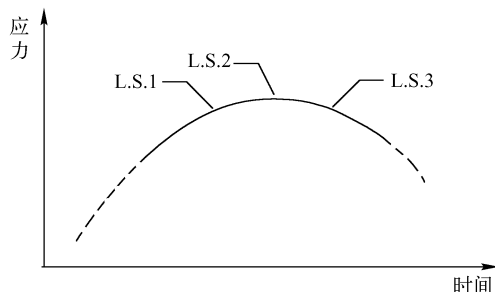


图 28-2 一事件中的 3 个载荷

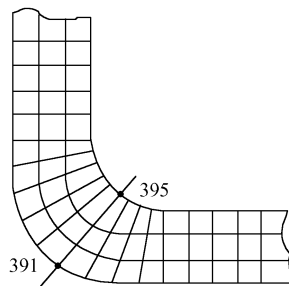


图 28-3 在执行 `FSSECT` 命令前用 `PPATH` 命令识别面节点

```
PATH,Name,2      ! 用两个面节点来定义路径
PPATH,1,391
PPATH,2,395
SET,1
FSSECT,,1,1      ! 储存节点 391 和 395 处的应力
```

2. 列表、显示或删除储存的应力

用下列选项对储存的应力进行列表、绘图或删除。

(1) 列出每一个位置、每一个事件、每一种载荷或每一种应力状态下的储存应力

命令: `FSLIST`

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | List Stresses

(2) 对某一位置和事件，以载荷号的函数来显示应力项

命令: `FSPLOT`

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Plot Stresses

(3) 删除储存在某一位置、事件和载荷下的应力状态

命令: `FSDELE`

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Dele Stresses

(4) 删除某一位置上的所有应力

命令: `FL`

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Stress Locations

(5) 删除在某一事件中各种载荷下的所有应力

命令: FE

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Erase Event Data

3. 设定事件重复次数和比例系数

本选项确定事件重复次数（事件的所有位置上的所有载荷）。也可对该事件中构成载荷的所有应力施加比例系数。

命令: FE

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Assign Events

下面给出该步骤的一个例子:

```
FE,1,-1      !删除事件 1 中用过的所有参数和疲劳应力
FE,2,100,1.2 !指定事件 2, 3, 4 出现 100 次
*REPEAT,3,1  !比例为 1.2
FE,5,500     !指定事件 5 出现 500 次
```

4. 获得准确的耗用系数

结构常常承受各种最大和最小应力，它们发生的顺序是未知的（甚至是随机的）。因此，为了获得一个合理的疲劳耗用系数，用户必须注意精确计算任何可能应力范围的重复次数。

ANSYS 程序自动计算所有可能的应力范围，同时采用通常所知道的“雨流”法记数，跟踪这些应力发生的次数。在选定的节点位置，对所有事件进行搜索，以寻找产生最大应力幅的载荷对（应力矢量）。记录这些应力幅的重复次数，同时包含这些载荷的事件的剩余重复次数随之减少。最终至少有一个事件在某一位置被“用光”，而属于这一事件的其他应力状态，在随后的过程中将被忽略。这一过程一直进行着，直到所有的应力幅及重复次数都被计算后结束。

注意：通常容易误用疲劳模块的记数功能。如果需要使疲劳计算得到正确的耗用系数，就必须小心地设计好事件。

设计组合事件时遵循下列规则。

1) 理解 ANSYS 的内部逻辑记数算法。

2) 由于在三维应力状态，很难预测哪一个载荷步具有极值应力，因此可以对每一个事件采用多个载荷群，以便成功获得极值应力。

3) 如果在某一给定的事件中，只包含一个极值应力，则将获得一个较保守的结果。如果在一个事件中引入不止一个极值应力，则有时将产生不保守的结果。考虑下面由两个有细微差别的循环组成的载荷历程。

载荷循环 1: 做 500 次循环, $S_x = +50.0 \sim -50.1$ ksi。

载荷循环 2: 做 1000 次循环, $S_x = +50.1 \sim -50.0$ ksi。

显然这是应力幅为 50 ksi 的 1500 次循环。然而，如果不小心把这些载荷划分成两个事件，则将导致不正确的记数结果。该结果如下。

事件 1 载荷 1: $S_x = 50.0$, 500 次循环

载荷 2: $S_x = -50.1$



事件 2 载荷 1: $S_x = 50.1$, 1000 次循环

载荷 2: $S_x = -50.0$

可能的应力幅是:

- a. 从 E1,L1 到 E1,L2: 50.05 ksi;
- b. 从 E1,L1 到 E2,L1: 0.05 ksi;
- c. 从 E1,L1 到 E2,L2: 50.00 ksi;
- d. 从 E1,L2 到 E2,L1: 50.10 ksi;
- e. 从 E1,L2 到 E2,L2: 0.05 ksi;
- f. 从 E2,L1 到 E2,L2: 50.05 ksi。

把这些应力幅从大到小排列:

- d. 从 E1,L2 到 E2,L1: 50.10 ksi;
- a. 从 E1,L1 到 E1,L2: 50.05 ksi;
- f. 从 E2,L1 到 E2,L2: 50.05 ksi;
- c. 从 E1,L1 到 E2,L2: 50.00 ksi;
- b. 从 E1,L1 到 E2,L1: 0.05 ksi;
- e. 从 E1,L2 到 E2,L2: 0.05 ksi。

则记数将如此:

- d. 从 E1,L2 到 E2,L1 500 次循环 - E1 和 E2 用去 500 次循环;
- a. 从 E1,L1 到 E1,L2 0 次循环 - E1 已用光;
- f. 从 E2,L1 到 E2,L2 500 次循环 - E2 又用去 500 次循环;
- c. 从 E1,L1 到 E2,L2 0 次循环 - 两个事件都用光;
- b. 从 E1,L1 到 E2,L1 0 次循环 - 两个事件都用光;
- e. 从 E1,L2 到 E2,L2 0 次循环 - 两个事件都用光。

上面记录了 50 ksi 应力幅的 1000 次循环, 而不是已知的 1500 次循环。这个错误的结果是由于不恰当的事件组合导致的。

假使载荷被描述为各自分离的事件 (如 E1,L1 = | E1; E1,L2 = | E2; E2,L1 = | E3; E2,L2 = | E4), 则将得到下列的记数范围:

- d. 从 E2 到 E3 的 500 次循环, 用去 500 次循环;
- a. 从 E1 到 E2 的 0 次循环, 因为 E2 “用光”了;
- f. 从 E3 到 E4 的 500 次循环, E3 又用去 500 次循环, E4 用去 500 次循环;
- c. 从 E1 到 E4 的 500 次循环, E4 又用去 500 次循环;
- d. 从 E1 到 E3 的 0 次循环, 因为 E3 “用光”了;
- e. 从 E2 到 E4 的 0 次循环, 因为 E2 和 E4 都“消耗完”了。

上述情况恰当地记录了累积疲劳损伤, 即 50 ksi 应力幅的 1500 次循环。

4) 相反, 对每一个最大和最小应力条件应用分离的事件, 则将使记录变得太保守。在这种情况下, 应小心地选择应被一起记数的载荷, 将它们划分为同一事件。下面的示例说明一些事件如何才能够包括多个极值应力条件。

考虑如下的由两个载荷循环组成的载荷历程。

载荷循环 1: $S_x = +100.1 \sim +100.0$ ksi, 做 500 次循环;

载荷循环 2: $S_x = +50.1 \sim +50.0$ ksi, 做 1000 次循环;

显然这些循环的最不利组合为以大约 25 ksi 的应力幅做 500 次循环。

在本例中, 如果将载荷划分为两个事件, 则产生了 25 ksi 范围内进行 500 次循环的正确记录。如每一个载荷作为一个独立的事件, 将产生一种过于保守的记录, 形成 25 ksi 应力幅的 1000 次循环。

28.2.4 激活疲劳计算

现在有了位置、应力、事件及所有指定的材料参数, 可在指定位置执行疲劳计算。位置的确定可用节点本身, 也可用位置编号。

命令: FTCCALC

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Calculate Fatig

28.2.5 查看计算结果

疲劳计算结果被输出在输出窗口。如果用户将输出转向[/OUTPUT]到文件中 (如 Jobname.OUT), 就可打开该文件查看结果。

命令: *LIST

GUI: Utility Menu | List | Files | Other | Jobname.OUT

如果用户已输入 S-N 曲线, 则所有部位的应力幅 (从大到小排列) 与相应的事件/载荷、使用循环次数、允许循环次数、温度和阶段耗用系数一起以表格形式输出。随后输出累积寿命耗用系数。

正如前面提到的, FTCCALC 输出时, 将对任一给定的应力幅显示相应的事件和载荷, 这些信息能帮助分离出那些引起最大的疲劳损伤的事件与载荷。

修正事件的一个方便的方法是把所有的疲劳数据写入 Jobname.FATG 文件中 (它可以在执行 FTCCALC 命令前或后做)。写入 Jobname.FATG 文件的数据是疲劳模块的命令流。可通过编辑 Jobname.FATG 文件 (文本文件) 来修改事件, 然后用/INPUT 命令重新读入被修改的疲劳命令。

命令: FTWRITE

GUI: Main Menu | General postproc | Fatigue | Write Fatig Data.

28.3 实例: 压力容器的疲劳分析

28.3.1 工程背景

在常规设计中, 压力容器是按照静载荷的条件来考虑的, 即认为容器中所受的应力是不随时间而变化的。实际上压力容器在交变载荷作用下进行运转的情况是非常普遍的。例如, 频繁的间隙操作及开、停车等造成工作压力和各种载荷的变化; 运行时出现的压力波动; 运行时出现的周期性温度变化; 在正常的温度变化时, 压力容器及受压部件的膨胀或收缩受到了约束, 外加的交变机械载荷等都将使压力容器中应力随着时间呈周期变化。



28.3.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

某压力容器平板封头与筒体连接区结构如图 28-4 所示。筒体内径 $R=1.1\text{m}$ ，筒体厚度 $T_2=0.018$ ，筒体长度 $H=0.5$ ，平板封头厚度 $T_1=0.065\text{m}$ ，外出过渡圆弧半径 $R_1=0.015\text{m}$ ，内侧应力释放槽圆弧半径 $R_2=0.015\text{m}$ 。

2. 单元的选择及实常数

本实例采用 PLANE183 单元，并设置单元关键字为轴对称算法，材料的弹性模量为 $2.1\text{E}11\text{Pa}$ ，泊松比为 0.3。材料的 S-N 数据表如表 28-1 所示。

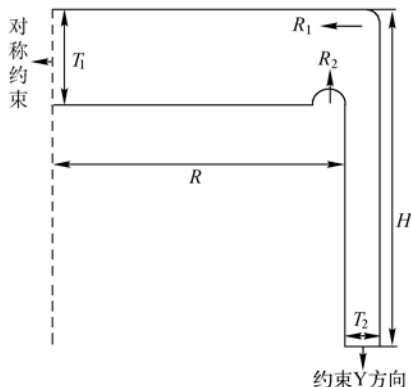


图 28-4 压力容器简图

表 28-1 材料的 S-N 数据表

S (MPa)	3950	2800	5E1	1E2	2E2	5E2	1E3	2E3
N	1E1	2E1	1850	1414	1069	724	572	441
S (MPa)	331	262	214	159	138	114	93.5	81.2
N	5E3	1E4	2E4	5E4	2E5	5E5	7E5	2.5E6

3. 边界条件

模型的位移约束：在平板封头对称面施加对称约束，筒体端部施加轴向 Y 方向的位移约束。压力容器内表面承受的工作压力为 2.1MPa ，最高工作压力为 2.8MPa 。

28.3.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出对话框，在输入栏中输入 “Fatigue analysis of pressure vessel”，单击 OK。

2. 定义参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框中的 Selection 中输入 $R=0.5$ ，单击 Accept 完成对筒体内径的定义，按照此方法继续定义筒体厚度 $T2=0.022$ ，筒体长度 $H=0.5$ ，平板封头厚度 $T1=0.065$ ，平板封头外侧过渡圆弧半径 $R1=0.012$ ，平板封头内侧应力释放槽圆弧半径 $R2=0.012$ ，标准工作压力 $P1=2.1\text{E}6$ ，最高工作压力 $P2=2.8\text{E}6$ ，压力循环次数 $N=2\text{E}4$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 8 node 183 单元，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为轴对称 (Axisymmetric)。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出对话框, 单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框, 输入 EX=2.1E11, PRXY=0.3, 单击 OK, 选择 Material | Exit, 退出面板。

4. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 NPT=1, X=0, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=2, X=R-R2, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=3, X=R, Y=0, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=4, X=R, Y=-(H-T1), Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=6, X=R+T2, Y=T1, Z=0, 单击 Apply; 继续输入 NPT=7, X=0, Y=T1, Z=0, 单击 OK。

(2) 定义线

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord

弹出拾取对话框, 按顺序拾取关键点 1 和 2, 2 和 3, 3 和 4, 4 和 5, 5 和 6, 6 和 7, 单击 OK。

(3) 定义线圆角

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet

弹出拾取对话框, 拾取线 L5 和 L6, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 RAD=R1, 单击 OK。

(4) 由线定义面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines

弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

(5) 定义圆面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle

在弹出的对话框中输入 WP X=R-R2, WP Y=0, Radius=R2, 单击 OK。

(6) 进行布尔减法

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas

弹出拾取对话框, 拾取压力容器面, 单击 Apply, 拾取刚建立的小圆面, 单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global 的 Set, 在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.005, 单击 OK。

(3) 划分网格

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 单击 Pick All。

6. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis, 在弹出的对话框中选 Static, 含义为进行静力学问题求解。





7. 定义边界条件

(1) 定义对称位移约束

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型平板封头对称面的线 L7, 单击 OK。

(2) 定义轴向约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型的底端线 L4 单击 OK, 在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 UY, 其他保持默认设置, 单击 OK。

(3) 定义压力

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines

弹出拾取对话框, 拾取压力容器内侧的线 L13, L10, L14 和 L3, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 Load PRES value=P1, 单击 OK。

8. 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

9. 后处理

(1) 查看等效应力

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 28-5 所示。

(2) 查看最大等效应力的节点号

GUI: GUI: Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution

在弹出的对话框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK。通过列表可知, 模型的最大等效应力为 $0.30168\text{E}+09\text{Pa}$, 发生的位置为 204 号节点, 如图 28-6 所示, 这也是最容易发生疲劳的位置, 因此在疲劳分析中选择此节点作为疲劳分析的位置。

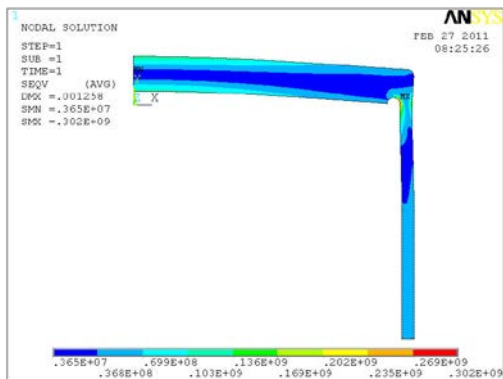


图 28-5 压力容器等效云图

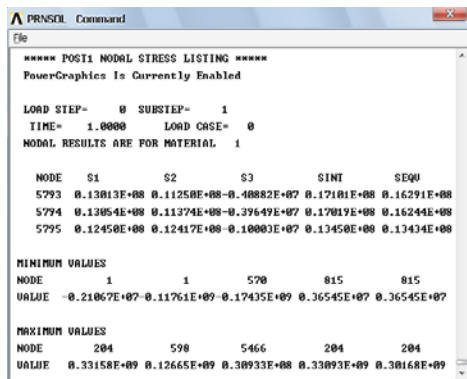


图 28-6 等效应力列表

10. 疲劳分析

本次疲劳分析为两个事件，即考察压力容器承受最大工作压力的安全性和最大循环工作次数和压力容器承受正常工作压力的安全性和最大循环工作次数。

(1) 疲劳分析设置

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Size Settings

在弹出的对话框中输入最大疲劳分析位置数 (Max. no of fatigue loc's) 为 1, 最大疲劳分析事件数 (Max. no of fatig event's) 为 2, 每个事件中的最大载荷数 (Max. no. of loadings in each event) = 2。单击 OK。

(2) 定义材料的 S-N 数据表

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | S-N Table

在弹出的对话框中, 输入循环次数 N 为 1E1, 2E1, 5E1, 1E2, 2E2, 5E2, 1E3, 2E3, 5E3, 1E4, 2E4, 5E4, 2E5, 5E5, 7E5, 2.5E6; 输入应力为 3950E6, 2800E6, 1850E6, 1414E6, 1069E6, 724E6, 572E6, 441E6, 331E6, 262E6, 214E6, 159E6, 138E6, 114E6, 93.5E6, 81.2E6, 定义完毕后, 单击 OK。

(3) 设置第一事件疲劳分析

1) 指定节点存储指定应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Specified Val

在弹出的对话框中输入存储应力节点号 (Node no.for strs storage) 为 204, 事件数 (Event number) 为 1, 载荷数 (Loading number) 为 1, 其他保持默认, 单击 OK, 保持弹出对话框的默认值, 单击 OK。

2) 在指定节点处存储来源结果文件的应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File, 在弹出的对话框中输入存储应力的节点号 (Node no. for strs storage) 为 204, 事件数 (Event number) 为 1, 载荷数 (Loading number) 为 2。

3) 为第一事件指定数据

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Assign Events

在弹出的对话框中输入参考事件号 (NEV) 为 1, 循环次数 (CYCLE) 为 N, 应力比例系数 (FACT) 为 P2/P1, 单击 OK。

(4) 设置第二事件疲劳分析

1) 指定节点存储指定应力。

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Specified Val

在弹出的对话框中输入存储应力节点号 (Node no.for strs storage) 为 204, 事件数 (Event number) 为 1, 载荷数 (Loading number) 为 1, 其他保持默认, 单击 OK, 保持弹出对话框的默认值, 单击 OK。

2) 在指定节点处存储来源结果文件的应力。

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File

在弹出的对话框中输入存储应力的节点号 (Node no. for strs storage) 为 204, 事件数 (Event number) 为 2, 载荷数 (Loading number) 为 2。

3) 为第一事件指定数据





GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Assign Events

在弹出的对话框中输入参考事件号 (NEV) 为 1, 循环次数 (CYCLE) 为 N, 应力比例系数 (FACT) 为 1, 单击 OK。

(5) 开始疲劳计算

GUI: Main Menu | General Postproc | Fatigue | Calculate Fatig

保持弹出对话框的默认值, 单击 OK。图为疲劳计算结果, 由结果可知, 压力容器在最大工作压力下只能承受 0.1802E5 次循环使用, 因此循环 2E4 后会发生疲劳失效, 疲劳耗损系数为 1.11001; 压力容器在标准压力下能承受 0.4422E5 次循环使用, 因此循环 2E4 后不会发生疲劳失效, 疲劳耗损系数为 0.45233, 如图 28-7 所示。

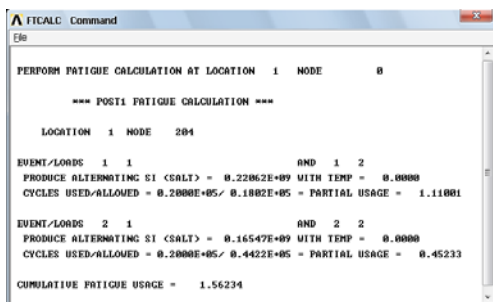


图 28-7 疲劳计算结果

第 29 章 自适应网格划分



29.1 网格自适应划分的概念

ANSYS 程序提供了近似的技术自动估计特定分析类型中因为网格划分带来的误差。通过这种误差估计，程序可以确定网格是否足够细。如果不够的话，程序将自动细化网格以减少误差。这一自动估计网格划分误差并细化网格的过程就叫做自适应网格划分，然后通过一系列的求解过程使得误差低于用户指定的数值或直到用户指定的最大求解次数。

29.2 自适应网格划分的先决条件

ANSYS 软件中包含一个预先写好的宏（ADAPT.MAC）用来完成自适应网格划分的功能。用户的模型在使用这个宏之前必须满足一些特定的条件。在一些情况下，不满足要求的模型也可以用修正的过程完成自适应网格划分。

- 标准的 ADAPT 过程只适用于单次求解的线性静力结构分析和线性稳态热分析。
- 模型最好应该使用一种材料类型，因为误差计算是根据平均节点应力进行的，在不同材料过渡位置往往不能进行计算。而且单元的能量误差是受材料弹性模量影响的。因此，在两个相邻单元应力连续的情况下，其能量误差也可能由于材料特性不同而不一样。在模型中同样应该避免壳厚突变，这也可能造成在应力平均时发生问题。

29.3 自适应网格划分的基本过程

进行自适应网格划分的基本过程包括如下步骤。

- 1) 像其他线性静力分析或稳态热分析一样，先进入前处理器（/PREP7 或 Main Menu | Preprocessor）。然后指定单元类型、实参和材料特性，要满足上面提到的条件。
 - 2) 用实体建模过程建立模型，用可以划分网格的面或体建模。用户不需指定单元大小也不用划分网格，ADAPT 宏会自动划分网格。
 - 3) 在 PREP7 中或在 SOLUTION(/SOLU 或 Main Menu | Solution)中指定分析类型、分析选项、载荷和载荷步选项。在一个载荷步中仅施加实体模型载荷和惯性载荷（加速度、角加速度和角速度）。通过 ADAPTBC.MAC 用户子程序可以施加有限单元载荷、固连和约束方程。通过 ADAPTSOL.MAC 用户子程序可以加入多个载荷步。
 - 4) 如果在 PREP7 中，退出前处理器。
 - 5) 用下列方法激活自适应求解。
- 命令：ADAPT



GUI: Main Menu | Solution | Solve | Adaptive Mesh

可以在热或结构分析中使用 ADAPT 宏，但不能在一次自适应分析中同时进行这两种不同类型的计算。在自适应网格划分的迭代过程中，单元的大小将做调整（在 FACMIN 和 FACMX 指定的范围内）以减小或增加单元能量误差，直到误差满足指定的数值（或指定的最大求解次数）为止。

6) 当自适应网格计算收敛时，程序自动将单元形状检查打开[SHPP,ON]。然后返回 SOLUTION 或初始状态，这取决于激活 ADAPT 的状态。接下来可以进入 POST1 用标准操作进行后处理。

29.4 修改基本过程

29.4.1 选择自适应性

如果用户清楚某个部分网格划分的误差相对影响较小时（如应力水平较低且变化较小），可以将这些区域从自适应网格划分中排除以加快分析速度。同样，用户也许想将接近应力奇异点的部分（如集中载荷）排除掉。选择逻辑操作可以解决这类问题，如图 29-1 所示。

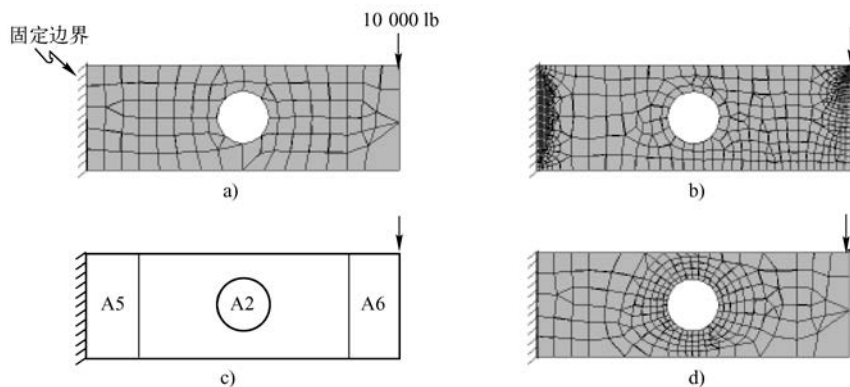


图 29-1 选择自适应能改进有应力集中的模型

- a) 初始网格 b) 划分所有面网格，靠近载荷和约束处的节点密度较大
c) 不选择面 5 和 6，对面 2 使用 ADAPT 命令开始划分网格 d) 不选择面 5 和 6 的网格

如果用户选择了一个关键点集，ADAPT 宏仍将包含进所有的关键点（在选择的和未选择的关键点都做网格改动），除非将 ADAPT 命令（GUI: Main Menu | Solution | Solve | Adaptive Mesh）中 KYKPS 设为 1。

如果用户选择了一个面或体集，ADAPT 宏将只在选择的区域调整网格大小。此时必须在激活 ADAPT 宏之前在 PREP7 中对整个模型进行网格划分。

29.4.2 通过用户子程序定制ADAPT宏

标准的 ADAPT 宏并不能满足特定的分析需要。例如，用户可能想同时对面和体进行网格

划分,这在标准宏当中是不可行的。对于这种或其他一些类似情况,可以对 ADAPT 宏进行修改使之适用于特定的分析。ANSYS 程序用宏这种方式完成自适应网格划分,本身就使得用户可以对其进行相应的修改以适应不同的要求。方便的是,用户不用总是通过修改 ADAPT 代码的方式来定制宏。宏的三个部分可以用用户子程序的方法来修改,这个方法将 ADAPT 宏和用户文件分开,用户可以生成子程序,由 ADAPT 宏来调用。这三个部分是:网格划分命令序列、边界条件命令序列和求解命令序列。相应的用户子程序名为 ADAPTMESH.MAC、ADAPTBC.MAC 和 ADAPTSOL.MAC。下面看一下这三个子程序的功能。

1. 生成用户网格划分子程序 (ADAPTMESH.MAC)

默认情况下,如果模型中包含一个或多个体时,ADAPT 宏将只对体划分网格而不对面进行划分。如果当前选择集中没有体,宏才对面进行划分。如果要同时对面和体进行划分,就要生成用户子程序 ADAPTMESH.MAC 来提供相应的操作。在重新划分网格之前要清楚所有这些实体中划分过网格的实体。子程序大致如下:

```
C*** Subroutine ADATMESH.MAC-Your name-Job Name-Data Created
TYPE,1                !指定划分网格的单元类型属性
ACLEAR,3,5,2          !清除本程序中要重新划分网格的面和体的网格
VCLEAR,ALL
AMESH,3,5,2           !对面 3 和 5 划分网格(ADAPT 不对其他面划分网格)
TYPE,2                !改变单元类型,划分体
VMESH,ALL              !对所有体划分网格
```

2. 生成用户边界条件子程序 (ADAPTBC.MAC)

ADAPT 宏在每次求解循环时都要清除并重新划分网格,因此模型的节点和单元也要不断地改变。这就使得所有的有限单元载荷、自由度固连、约束方程等施加在节点和单元的边界条件都不能使用。如果要包含这些有限单元约束,就要使用用户子程序,ADAPTBC.MAC。在这个子程序中,可以选择节点然后定义有限单元载荷、自由度固连和约束方程。下面是一个 ADAPTBC.MAC 的例子:

```
C*** Subroutine ADAPTBC.MAC-Your name-Hob Name-Data CReated
NSEL,S,LOC,X,0        !选择 X 坐标为 0 的节点
D,ALL,UX,0            !令选择的所有节点 UX 为 0
NSEL,S,LOC,Y,0        !选择 Y 坐标为 0 的节点
D,ALL,UY,0            !令选择的所有节点 UY 为 0
NSEL,ALL              !选择所有节点
```

3. 生成用户求解子程序 (ADAPTSOL.MAC)

ADAPT 宏中的求解命令序列很简单:

```
/SOLU
SOLVE
FINISH
```

这个默认的命令序列只能求解单个载荷步。用户可以将其他的命令序列加入用户子程序 ADAPTSOL.MAC 中。



4. 关于用户子程序的一些其他说明

用户可以像生成其他文件一样生成这些子程序。就是说可以用 APDL 语言的*CREATE 命令 (Utility Menu | Macro | Create Macro) 和 APDL 的*END 命令, 也可以用外部的文件编辑器。当 ADAPT 宏调用这些子程序时, 软件先搜索 ANSYS 根目录, 再搜索用户根目录, 最后是当前目录。因此, 要确保其他目录中不包括与所用文件同名的文件。解释行 (C***) 会在输出文件中出现, 可以通过它来检查是否使用了正确的文件。另外, 通过在运行 ADAPT 宏之前用/PSEARCH,OFF (Utility Menu | Macro | Macro Search Path) 指定软件只搜索 ANSYS 根目录和用户当前目录可以从某种程度上减少文件混用的可能。不管这些子程序在什么位置, 它们都能被找到, 除非将 ADAPT 命令的 KYMAC 选项设为 1。

29.4.3 定制ADAPT宏

有些情况下用户需要修改 ADAPT 宏但不能通过单独的用户子程序的方式, 那么就需要直接修改 ADAPT 宏的主体。但是, 因为某些原因, 不推荐直接对 ADAPT 宏进行修改, 例如, 别的用户和自己同时使用一个软件, 在调用 ADAPT 宏时会发现宏被修改了。因此, 在 ANSYS 安装中支持一个宏的复制文件 UADAPT.MAC, 便于用户修改。

如果对 UADAPT.MAC 文件进行了修改, 建议对修改后的文件取一个新的文件名。然后在调用时输入这个文件名。要知道的是, 如果新文件名是一个 “unknown command”, ANSYS 将搜索上级目录, 然后是登录的目录, 最后是工作目录, 直到找到这个宏为止。如果修改的宏只能被一个用户使用, 那么存储的位置应在用户登录目录的层次之下 (不能等于或高于这个目录层次)。这样, 存储的低层次的文件可以通过*USE 命令 (GUI: Utility Menu | macro | Execute Data Block) 来调用。

29.5 自适应网格划分的注意事项

下面的建议可能有助于自适应网格划分的使用。

不需指定初始网格大小, 但指定大小可能有利于自适应收敛。如果用户指定了关键点网格大小, ADAPT 宏在第一次循环时使用这个值, 然后在随后的循环中进行调整。用下列命令指定单元大小。

命令: KESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Keypoints | All KPs

如果定义了线分段数或大小比例, ADAPT 宏将在每次循环中都使用这个数值而不做改变。如果没有定义任何形式的网格份数, 在初始网格划分时将使用默认的网格大小 (参见 SMRTSIZE 和 DESIZE 命令)。用下列方法指定线分段数或大小比例。

命令: LESIZE

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines

- 映射网格划分适用于二维实体和三维壳单元。但面的映射划分效果不明显。
- 映射网格划分适用于三维实体。对体进行映射划分比自由划分效果要好得多。
- 总体上说, 在自适应网格中有中间节点的单元比线性单元要好。
- 不要用集中载荷或尖角等引起奇异性的结构, 因为此时 ADAPT 在这些奇异点处能量

值将不收敛。如果模型中有集中载荷时，将其用施加在一个小面上的压力等效，或通过选择将奇异部分排除在自适应网格划分之外。

- 在许多情况下，用一系列相对小的区域替代少数几个大的区域将得到更好的网格划分。
- 如果最大响应位置已知或事先可以推测，就在附近放置一个关键点。
- 如果是在交互方式下运行 ADAPT，而 ANSYS 在没有提示出错信息时突然退出，可以在 Jobname.ADPT 文件中查看自适应网格划分部分以确定出错原因。同样，在批处理方式下运行 ADAPT 时，可以看 Jobname.ADPT 确定出错原因。
- 如果模型中有些区域有过度的扭曲时，在网格划分中就会出错。在这种情况下，用 KESIZE 命令中的 SIZE 区域指定扭曲区域附近关键点的最大单元长度。同时，ADAPT 命令中的 FACMX 将设为 1，阻止过度扭曲部分单元大小增加。
- 应当存储结果文件（Jobname.RST 或 Jobname.RTH）。在 ADAPT 运行过程中程序如果发生中断，结果文件中将保存 ADAPT 过程已完成求解的内容。
- 在自适应网格运行之前应输入 SAVE 命令（GUI：Utility Menu | File | Save as Jobname.db）。在程序出错中断时，可以用 Jobname.db 重新启动计算。

29.6 实例：应力集中模型的自适应计算

29.6.1 工程背景

应力集中是工程实际遇到的普遍问题，实际构件在使用过程中，在应力集中处往往会形成裂纹源而造成疲劳断裂，为此需要进行计算。为了计算的经济性，ANSYS 的自适应网格划分功能就非常有用。

29.6.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

本实例的模型如图 29-2 所示，为一个带圆孔的薄钢板，钢板的长度为 1.2m，宽度为 0.4m，厚度为 0.008m，圆孔的半径为 0.04m，圆孔中心距离固定端 0.7m，距离钢板底边 0.2m。

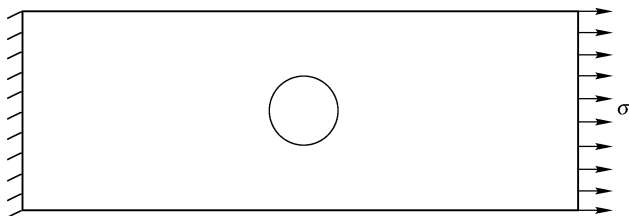


图 29-2 应力集中模型简图

2. 单元的选择及材料常数

本实例采用 8 节点 PLANE183，单元模拟薄钢板，并设置关键字为带厚度的平面应力计算模型。材料的弹性模量为 2.08E11Pa，泊松比为 0.28。

3. 边界条件

模型的左端完全约束，在模型的右端施加拉应力 σ 为 40MPa。



29.6.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出对话框，在输入栏中输入“Adapt”，单击 OK。

2. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的左边选择 Solid，然后在右边选择 Quad 8node 183 单元，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为带厚度的平面应力 (Plane strs w/thk)。单击 OK。

(3) 定义实常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete

在弹出的对话框中单击 Add，在弹出的对话框中选择单元类型 PLANE782，单击 OK，在弹出的对话框中输入 0.005。

(4) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出对话框，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic, 又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 EX= 2.08E11, PRXY=0.28, 单击 OK。

3. 建立模型

(1) 建立矩形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

在弹出的对话框中输入 X1=0, X2=1.2, Y1=0 和 Y2=0.4, 单击 OK。

(2) 建立圆形

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle

在弹出的对话框中输入 WP X=0.7, WP Y=0.2, Radius=0.04, 单击 OK。

(3) 进行布尔减法

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas

弹出拾取对话框，拾取矩形，单击 Apply，然后拾取圆形，单击 OK。

4. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

打开网格划分工具面板。

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.06, 单击 OK。单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮，弹出拾取对话框，单击 Pick All。

5. 设置分析类型

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

6. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型的左 L4, 单击 Apply, 在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 ALL, 其他保持默认设置, 单击 OK。

(2) 定义拉伸应力

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines

弹出拾取对话框, 拾取模型右端线 L2, 单击 OK, 在弹出的对话框中输入 Load PRES value = $-40E6$, 单击 OK。

7. 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | Solve | Adaptive Mesh

弹出自适应网格划分求解器, 在求解器中输入求解次数 (Number of solutions) 为 7, 能量误差 (STARGT) 为 3%, 最小单元改变因子 (Min.size change factor) 为 0.1, 最大单元改变因子 (Max.size change factor) 为 5, 单击 OK。

8. 后处理

(1) 查看等效应力

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress, 单击 OK, 如图 29-3 所示。

(2) 查看位移

GUI: Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

弹出节点求解数据 (Contour Nodal Solution Data) 对话框, 选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum, 在比例因子选项中设置 Auto Calculated 为自动计算比例, 单击 OK, 如图 29-4 所示。

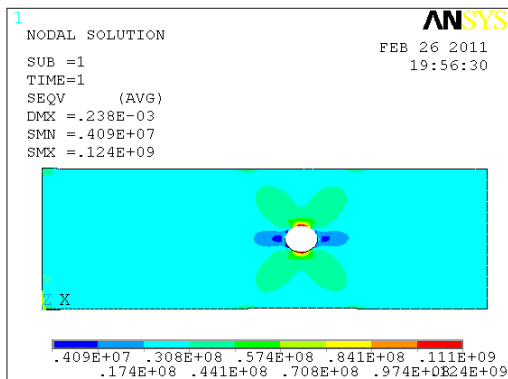


图 29-3 模型的等效应力云图

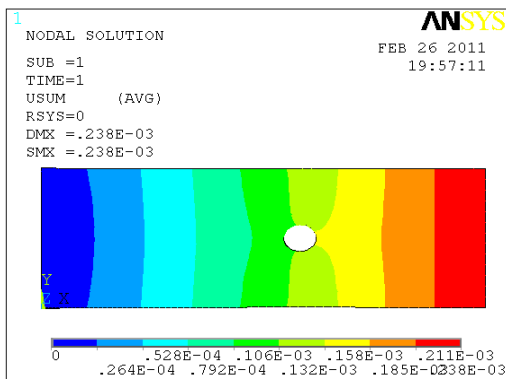


图 29-4 模型的位移云图



第 30 章 可靠性分析

30.1 基于有限元的概率设计简介

概率设计技术用来评估输入参数的不确定性对于系统输出的影响行为及其特性。概率设计主要应用于两种情况：一是关心系统的可靠性，二是用户对产品质量和可靠性的满意程度。通常情况下，可靠性是个重要问题，因为产品或零件的失效都会带来一系列的经济损失，甚至给人身带来伤害。由于完全意义上的安全在物理上和经济上都是不可行的，因此概率设计的作用就是帮助用户做出合理的设计，避免高成本的设计和过于保守的加工手段（即过高的加工精度和质量控制等）。保证产品质量是要达到或超过客户对于产品的预期。对于质量好的产品，用户很少遇到产品不能完成预期的功能的情况。通常情况下，这些“失效”的事情都是由于设计中的不确定性引起的。利用概率设计方法可以帮助用户确定“失效”情况发生的可能性，这样就使得用户可以改进设计直到满足用户可以接受的“极限”即可。

在确定性的有限元分析中，有限元问题的所有参数都是确定不变的，如几何结构拓扑形状和尺寸是确定的，材料属性是确定的，载荷也是确定的，计算得出的结果参数（如结构变形、应力分布等）也是确定的。有限元的概率设计技术是针对有限元分析过程中的某些不确定性的输入参数（如模型材料、尺寸等）对分析结果参数（如变形、应力等）的影响方式和影响程度。

考虑实际工程中的不确定因素，有限元分析的任何一个方面或输入数值都是一个离散性分布的参数，即某种程度上都是具有不确定性的。对于材料来说，试样和试样之间材料特性不会完全相同。对于同批生产的机械来说，几何尺寸、加工误差、材料、承受的实际工作载荷等都不可能完全一样，而是离散变化的。为了研究不确定因素对产品性能和质量的影响，必须利用概率设计技术进行研究分析，如果将有限元分析技术与概率设计技术相结合，就是基于有限元的概率设计，即 ANSYS 程序提供的 PDS 技术。

对于概率设计问题，不确定性参数采用某种概率密度函数进行描述，如几何尺寸或加工误差等服从正态分布，相同牌号的材料其弹性模量数值大致符合高斯分布，且标准方差在 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ 之间，零件的几何尺寸都有一定的公差范围，施加的载荷也应该是一种分布。在有限元分析中的输入数据几乎都是不确定的，每个数据都有一定的不确定性。在有限元分析的过程中，将问题的某些输入参数描述成服从某种概率密度分布的不确定性变量，并经过大量的采样点计算统计分析出系统响应参数的分布特性、影响关系和影响程度等。ANSYS 的 PDS 技术正是解决这类问题的新型有限元分析技术。

ANSYS 提供的基于有限元的概率设计系统（PDS）的主要应用方向如下所示。

- 当有限元模型的输入参数不确定时，有限元结果的不确定程度有多大？响应参数的置信度有多高？响应参数包括 ANSYS 计算的所有结果项，如温度、应力、位移等。

- 输入参数的不确定性决定响应参数的不确定性，目标产品满足设计要求的概率有多大？工作失效的概率有多大？
- 在所有不确定性的输入参数中哪个参数的不确定性对于响应参数的影响程度最大，或者说对于目标产品最容易引起其工作失效？响应参数对输入参数变化的灵敏度有多大？



30.2 可靠性分析术语

在学习基于有限元的概率设计技术之前，先学习相关的概念和术语，为后面的学习打下基础。下面结合如图 30-1 所示承受雪载的梁，说明ANSYS基于有限元的概率设计中的基本概念和术语。该问题的目标是确定梁承受不均匀雪载条件下最大挠度的离散程度。假设雪载沿梁的长度方向线性分布，起点数值为 H_1 ，终点数值为 H_2 。梁的材料特性弹性模量等的均值和标准方差也是已知的。表 30-1 给出了可靠性分析的常用术语

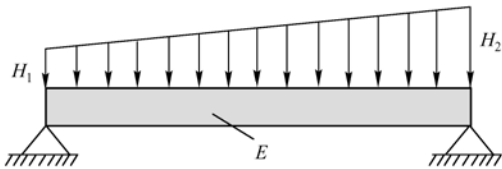


图 30-1 承受雪载的梁

表 30-1 PDS 术语

PDS 术语	定义和说明
随机输入参数 (RVs)	1. 是指直接影响分析结果的输入数据 2. 在概率设计过程中，RVs 是随机参数，通常称为设计驱动参数，直接影响分析结果。必须为它们指定统计分布类型（如正态分布、均匀分布等）以及该分布类型的特征参数值 3. 在梁的例子中，H_1、H_2和弹性模量E是随机输入参数。H_1和H_2不能是负数，并且雪比较小的情况要比雪很多的情况多，所以假定雪载的分布服从指数或对数正态分布，H_1和H_2的数值都相对较小
相关性 (Correlation)	1. 是指两个（或更多个）随机输入参数之间存在统计上的关联性 2. 在梁的例子中，梁的一端堆满雪而另一端没有雪的可能性几乎没有，H_1和H_2并不是完全独立的，而是雪多的时候两个数值都大一些，而雪少的时候两个数值都小一些，即两者具有一定的相关性，但两者之间没有直接的数值依赖性存在，而是两个高度之间存在一个确定性的趋势；很显然，两个高度之间的数值在任何时候不可能出现太大的差异 3. 注意：数值依赖性是指两者之间存在数学描述关系，例如一个真正相关性是一个参数值增加一倍之后，另一个参数值也跟着增加一倍
随机输出变量(RPs)	1. 是指有限元分析的结果 2. RPs 一定是 RV 的函数，也就是说当改变随机输入参数的数值时必将改变随机输出参数的值。在梁的例子中，梁的最大挠度就是一个随机输出参数
概率设计参数	1. 随机输入参数和随机输出参数统称为概率设计参数。 2. 在 ANSYS 概率设计系统(PDS)中，必须指定模型中哪些参数是 RV 哪些是 RP，并且最多可以定义 5000 个 RV 和 RP
样本	1. 组特定的参数值序列。代表一个特定的模型结构 2. 一个样本就是一系列确定的随机输入参数值。在梁的例子中，测出给定梁的弹性模量和两端雪载的大小，那么这 3 个确定的数据就构成了一个样本 3. 可以认为样本就是一台虚拟样机，每个加工出的零件组成一个样本，因为可以测量每台特定虚拟样机的各项特征参数，如材料、几何特性等，并得到每项参数的确定数值 4. 但是，在统计理论中样本具有更广泛的意义和用法，如任何物理特性单次测量值都是一个样本。其实，概率分析是由随机输出参数统计计算出来的随机输出参数的数据也称为样本
仿真	1. 特定概率设计中所需的所有样本统称为一个仿真，即所有可能情况样本的全集 2. 每个仿真中包含确定实际状况时(带有所有不确定性和数值离散性)，零件行为动作的所有信息，因而所有样本代表了某种行为特性的仿真



(续)

PDS 术语	定义和说明
分析文件	1. 是一个 ANSYS 的输入文件, 它包含一个完整的分析过程, 如前处理、求解和后处理等 2. 必须包含参数化自动建模过程, 代表有限元分析的所有输入和输出项, 将可能被定义成随机输入参数和随机输出参数
循环或仿真循环	1. 执行一次完整分析过程的分析命令流文件 2. 每次循环中, 概率设计系统 (PDS) 使用一个样本中的随机输入参数 RVs 执行用户指定的分析过程。PDS 会自动记录每个循环中的随机输出参数值 RPs
循环文件	1. 是概率设计循环文件 (Jobname!OOP), 它是 ANSYS 自动根据分文件生成的文件 2. PDS 利用该文件进行概率设计循环
概率设计模型	1. 是指一个 (以分析文件形式存在的) 确定性的概率设计模型, 包括该模型的所有定义和设置。模型一般包括以下部分: 随机输入参数 (RVs), 相关性, 随机输出参数 (RPs)。概率设计分析方法和相关参数等供选择性的设置选项 2. 改变概率模型中的任何部分, 将会得到完全不同的概率设计结果。例如, 修改分析文件时结果数值和数量都会出现变化; 增加或减少随机输入参数或改变它们的分布函数时, 相当于换成求解另外一个完全不同的概率设计问题, 自然结果也完全不一样。但是, 若增加一个随机输出参数, 概率设计的问题其实是一样的, 只是获得了更多的结果信息而已
均值	1. 是一个数据分布度最参数, 代表随机参数或统计分布函数的大量离散数据最可能出现的数值 2. 在数学上, 均值是一系列数据的算术平均值, 也称做期望值, 代表数据点分布的重心点
概率设计数据库	1. 概率设计数据库包括: 随机输入参数 (RVs); 随机输入参数中的相关性; 随机输出参数 (RPs); 概率设计方法的设置; 被执行的概率分析以及存储其结果的各种文件使用哪个概率设计分析中的哪个输出参数来拟合响应表面、拟合中所使用的回归模型、拟合结果等 2. 数据库可以被存储到 Jobname.Pf7S, 并可以在任意时刻重新读入 AJISYS 系统中。概率设计的结果并不存储在这个数据库中, 而是单独存储在其他文件中。拟合响应表面的样本既不存储在数据库中, 也不存储在其他文件中, 这是由于这些信息可以很快重新生成 (文件存储占用大量硬盘空间, 而且读取文件数据的时间也并不比重新生成相同数据所需的时间短)
中间值	1. 是一个统计数值, 有 50% 的数据比其小, 有 50% 的数据比其大 2. 对于对称分布函数 (高斯分布、均匀分布等), 其中间值和均值完全相同, 而对于非对称分布函数, 两者的数值是不一样的
标准方差	1. 是相对均值的波动幅度的度量值, 主要用于衡量随机输出变量或统计分布函数的离散范围大小 2. 标准方差越大, 数据的离散范围就越大, 出现偏离均值距离越大的数值的可能性就越大
结果序列	1. 是指特定概率设计仿真循环过程中所获得结果的总称 2. 结果序列包括所有概率设计循环中的所有随机输入参数值和所有随机输出参数值 3. 每个结果序列被指定一个对应的唯一的标识字
响应面序列	1. 是指由拟合计算 (即回归分析) 所得的响应表面和概率设计中利用响应表面获得结果组成的总称 2. 每个响应表面序列被指定对应唯一的标识字
远程主机	1. 是局域网络中用于网络并行计算中执行概率设计分析的计算机 2. 一台远程主机可以有多个 CPU, 在并行计算过程中用户可以启动远程主机上的多 CPU 进行计算

注意: 分析文件必须以单独方式存在, 概率设计数据库并不是 ANSYS 模型数据库文件的一部分。

30.3 随机输入参数类型

30.3.1 高斯正态分布

如图 30-2 所示是高斯正态分布, 其特征参数是: 均值 μ ; 标准方差 σ 。

在统计学中, 高斯正态分布是最常用也是最基本的分布函数。用于描述多数物理现象中测量数据的离散性。严格地说, 不管输入变量的分布如何, 经过线性系统运行后, 只要样本

数目足够大，其输出变量肯定服从正态分布。

30.3.2 截断高斯分布

如图 30-3 所示是截断高斯分布，其特征参数是：均值 μ （标准高斯分布相同）；标准方差 σ （标准高斯分布相同）；截断下限 $x_{\min}$ ；截断上限 $x_{\max}$ 。

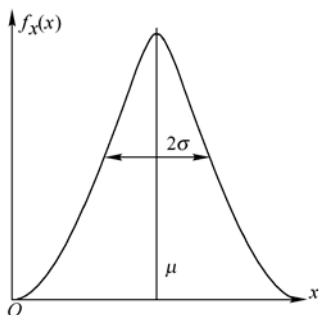


图 30-2 高斯正态分布

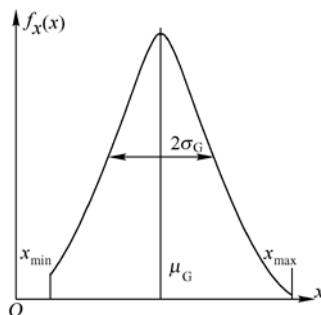


图 30-3 截断高斯分析

在统计学中，截断高斯分布主要用于描述实际物理现象服从高斯分布，极限值具有一定限制或通过质量控制手段将样本测得数值规定在一个范围内的测量数据。常用于描述材料的特性或几何公差等。

30.3.3 对数正态分布

在统计学中，对数正态分布也是一个最基本、最常用的分布函数，常用于描述很多物理现象中测量数据的离散性，它要求数据的对数服从正态分布。对数正态分布在处理大量数据误差叠加效果的物理现象中非常有效，也可以处理两个或多个服从对数正态分布的随机因素叠加问题。经常用于描述寿命分布，如几乎总是利用其描述材料承受交变载荷直至出现低周疲劳破坏时应变幅值的离散情况。

1. 对数正态分布 1 (LOG1)

如图 30-4 所示是 LOG1 分布，其特征参数是：均值 μ ，标准方差 σ 。

ANSYS 的概率设计系统自动计算对数均值 ξ 和对数偏差 δ ：

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left[\frac{\lambda \ln(x) - \xi}{\delta} \right]^2\right]$$

$$\delta = \sqrt{\lambda n \left[\left[\frac{\sigma}{\mu} \right]^2 + 1\right]} ; \quad \xi = \lambda n(u) - 0.5\delta$$

2. 对数正态分布 2 (LOG2)

如图 30-5 所示是 LOG2 分布，其特征参数是：对数均值 ξ ，对数方差 δ 。

标准方差函数：

$$f(x, \xi, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \xi}{\delta} \right]^2\right]$$

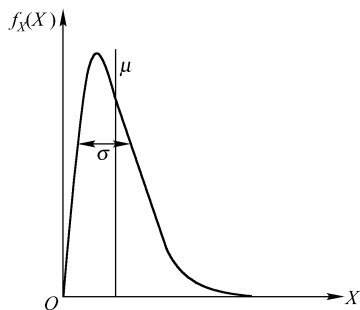


图 30-4 对数正态分布 1

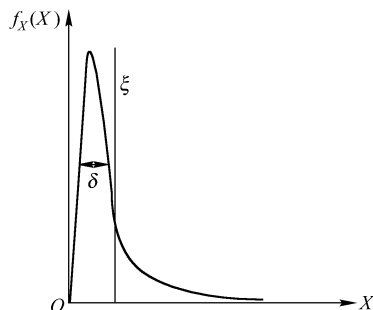


图 30-5 对数正态分布 2

30.3.4 三角分布

如图 30-6 所示是三角分布，其特征参数是：最小值 $X_{\min}$ ；最可能值 X_{mlv} ；最大值 $X_{\max}$ 。

在统计学中，当随机变量的实际数据并不知道时常采用三角分布。三角分布经常用于将专家的意见转换成数学模型，主要用于描述载荷参数的离散性。不考虑要建立模型的随机变量本身，设计人员总是可以研究“有千分之一可能性的最大载荷是多少”等问题，也可以将计算机程序得到的随机参数数据的预计值输入模型。

30.3.5 均匀分布

如图 30-7 所示是均匀分布，其特征参数是：截断下限 $X_{\min}$ ，截断上限 $X_{\max}$ 。

在统计学中，当只知道最小值和最大值时均匀分布是最基本的分布函数。经常用于描述几何公差，也用于描述随机数据在各间距上分布基本一致的情况。当不了解实际工程的情况如何时，也往往使用均匀分布。

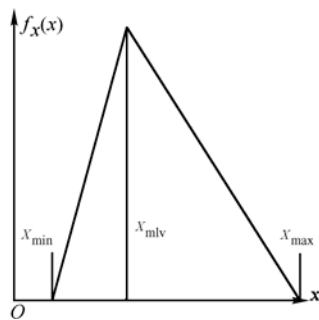


图 30-6 三角分布

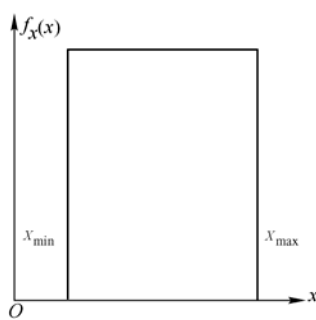


图 30-7 均匀分布

30.3.6 指数分布

如图 30-8 所示是指数分布，其特征参数是：衰减系数 λ ，下限 $X_{\min}$ 。

在统计学中，当实际物理因素造成随机输入参数增加而概率密度函数单调递减时，一般使用指数分布。指数分布经常用于描述随时间变化的效应，如描述在固定比例下不相关时间发生的间隔时间，非常广泛地用于系统可靠性和与寿命相关的系统可靠性问题。另外，它也用于处理无冗余系统的寿命分布。对于机械零件来说，疲劳往往是限制寿命的主要因素，通

过指数分布可以排除是否是疲劳引起的。在实际情况下，零件往往在疲劳之前就应该被更换掉，但指数分布在确定更换零件的时间分布上仍然是非常具有参考意义的。

30.3.7 Beta分布

如图 30-9 所示是 Beta 分布。其特征参数是：形状参数 r ；形状参数 t ；下限 $X_{\min}$ ；上限 $X_{\max}$ 。

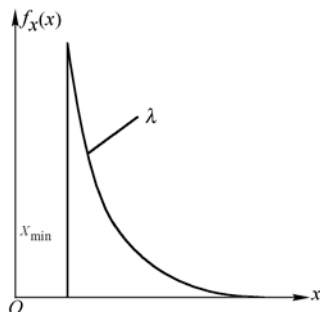


图 30-8 指数分布

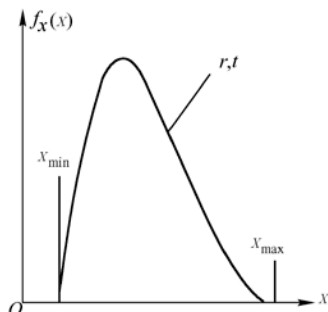


图 30-9 Beta 分布

在统计学中，Beta 分布对于有固定边界的随机变量来说非常适用。如果是随机变量，则都是基于均匀分布的线性系统运算，那么输出结果通常是服从 Beta 分布的。例如，公差和装配问题，单个零件的公差遵循均匀分布，然后组装成装配件，装配件的总体公差应该是单个零件公差的加减关系（线性操作），此时总体公差应该用 Beta 分布来描述。另外，Beta 分布还可以用于描述单个零件的尺寸，均匀分布是 Beta 分布的特殊形式。

30.3.8 伽玛分布

如图 30-10 所示是伽玛分布，其特征参数是：衰减系数 λ ；幂指数 k 。

在统计学中，伽玛分布是一个与时间密切相关的分布函数，即在假设事件发生遵循一定速率的情况下，用于描述发生 K 次事件的时间分布。同样，该方法也用于确定具有备用件的系统失效时间。

30.3.9 威布尔分布

如图 30-11 所示是威布尔分布，其特征参数是：威布尔特性值 X_{chr} ；威布尔指数 m ；最小值 $X_{\min}$ ；特殊情况是当 $X_{\min} = 0$ ，是等同于两参数威布尔分布。

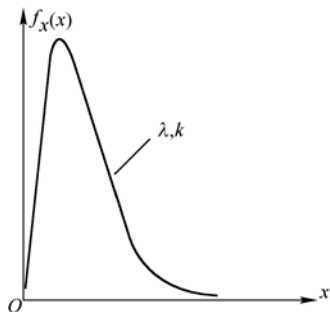


图 30-10 伽马分布

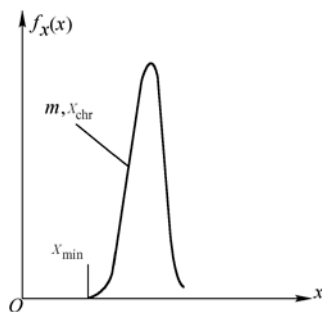


图 30-11 威布尔分布



其中，瑞利分布是威布尔分布的特例，其 $m=2$ ， $\alpha = X_{\text{chr}} - X_{\text{min}}$ 。在统计学中，该分布主要用于描述强度或与强度相关的寿命参数的离散性，而且它是脆性很强的材料的强度和寿命参数的标准分布。

30.4 概率设计方法

30.4.1 蒙特卡罗模拟技术

1. 蒙特卡罗模拟技术概述

蒙特卡罗模拟技术是概率分析中最常用的传统方法，它能清楚地模拟实际问题的真实行为特征。一个仿真循环代表一个加工制造的零件，该零件承受一个特定系列的载荷和边界条件的作用。在 ANSYS 中，蒙特卡罗模拟技术可以选择直接抽样法或拉丁方法进行抽样处理。

在实际零部件产品制造中，当加工完一个零件后就可以测量它的几何尺寸和所有材料特性（直接在零件上测试材料特性会破坏零件，所以实际情况一般不会直接在零件上测量）。接着，当开始使用零件进行工作时，就可以测量出它的工作载荷（要实际测得工作载荷通常也不是很容易进行的）。无论如何至少需要一个加工制造的零件并投入使用，该零件的所有输入参数都具有确定的数值（它们都是可以实际测量得到的）。同样，对于下一个制造加工的零件，同样可以重复上述过程。此时，如果将当前零件与前一个零件的参数进行比较，将会发现它们之间是存在细微差别的，这就说明输入参数其实是离散性分布的。蒙特卡罗模拟技术就是用于模拟这种制造过程中，批量生产零件各种参数的随机性问题。

其优点如下。

- 1) 基于上述理由，蒙特卡罗模拟是概率设计基准和有效性验证的惟一适合的方法。
- 2) 蒙特卡罗模拟过程中，每个独立循环仿真是毫不相关、完全独立的，任何一组仿真循环也完全与其他组仿真循环结果毫不相关。正因如此，蒙特卡罗模拟非常适合于采用并行计算方法。

2. 直接抽样

直接蒙特卡罗抽样（简称直接抽样法）是蒙特卡罗模拟技术中最常用的基本方法，可以直接用于模拟各种工程的真实过程，非常便于理解和使用。此时，可以模拟零件在现实中的任何行为，一个仿真循环代表该零件在某个特定载荷系列作用下的行为。

直接抽样方法并不是最有效的方法，其缺点之一是需要大量的循环，因此效率不高。但是，该方法还是被广泛接受并得到使用，特别用于抽样基准和有效性验证方面，但就其缺点需要做大量的仿真循环，有些时候不容易做到。

该方法的另外一个缺点是，对抽样过程没有“记忆”功能。例如，假设有两个随机输入参数 X 和 XZ ，服从均匀分布，分布范围为 $0 \sim 1$ 。利用该方法生成 15 个样本，可能会得到两个（或更多）集中的数据，如图 30-12 所示，特别是圆圈标注的两个数据。一旦出现随机输入参数采样点的集中问题，如样本中数据分布并不均匀地分布于整个输入参数的空间上，那些集中的数据点在仿真循环中相当于重复计算，此时并不能提供任何更多的有效参考价值。

使用直接蒙特卡罗模拟技术，选择菜单 Main Menu | Prob Design | Prob Method | Monte

Carlo Sims，再选择直接抽样法，该方法需要指定随机输入参数的样本种子值、指定仿真循环的次数和循环终比（均值和标准方差精度等）准则。

3. 拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样（简称 LHS 抽样法）技术比直接抽样法更先进、更有效。LHS 抽样法和直接抽样方法的唯一区别是，LHS 抽样法具有抽样“记忆”功能，可以避免直接抽样法数据点集中而导致的仿真循环重复问题。同时，它强制抽样过程中抽样点必须离散分布于整个抽样空间，如图 30-13 所示。正因如此，在一般情况下相同问题要得到相同精度的结果，LHS 抽样法比直接抽样法要少 20%~30% 的仿真循环次数（至于循环次数的多少，不是人为指定的，而是由问题本身决定的）。

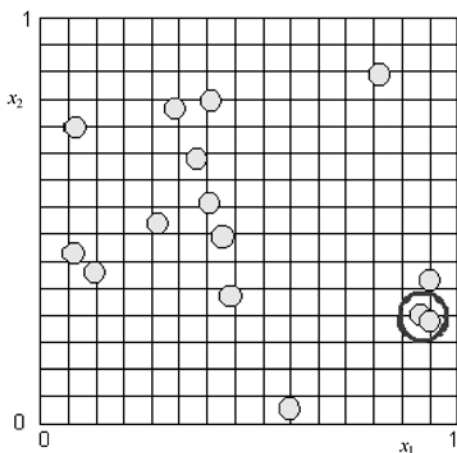


图 30-12 x_1 和 x_2 有两个非常接近的样本数据点

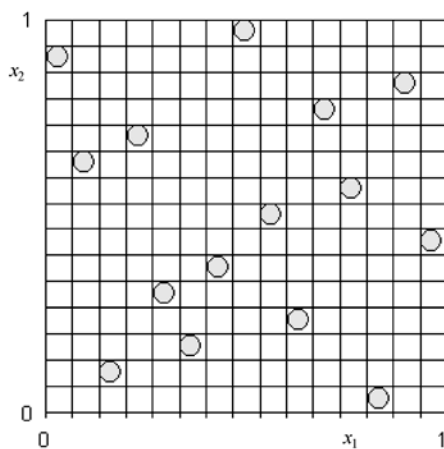


图 30-13 x_1 和 x_2 的样本数据点分布比较合理

使用 LHS 抽样法，选择菜单 Main Menu | Prob Design | Prob Method | Monte Carlo Sims，再选择 LEIS 抽样法。该方法需要指定仿真循环次数、重复次数、样本分布位置、终止循环的准则（均值和标准方差精度）和随机输入参数样本种子值。

4. 用户定义抽样

用户定义抽样意味着样本由用户自己提供，ANSYS 程序并不根据问题进行样本自动计算。用户自定义方法必须准备一个抽样数据文件，它包含所需的样本，其内容格式是一个二维数值矩阵，列数据代表定义的随机变量数目，行数据代表需要的循环次数。数据必须是 ASCII 码格式，具体格式要求如下。

- 列分隔符可以使用空格、逗号、分号和制表符（按〈Tab〉键得到）。
- 多个连续的空格和制表符当做一个分隔符处理。
- 不允许出现多个逗号和分号连续，例如两个逗号之间如果没有数据（即空白）则当做空列读入，从而会导致出错提醒。
- 文件的第一行必须包含一个求解标识字，并且第一行不允许出现其他数据，否则将会导致出错。如果没有求解标识字，同样会导致出错。
- 求解标识字仅相当于占用一个字符位置。为了保持一致性，在 PDEXE 命令中必须使用相同的求解标识字，如果不一致则在后处理时总是使用 PDEXE 命令中使用的求解标识字。PDS 系统并不检查用户指定文件中的求解标识字，并假定其总是与 PDEXE



中的求解标识字自动保持一致。

- 文件的第二行必须包含数据列的头。前三列的头分别是 ITER、CYCL 和 LOOP；后续列的头是各个随机变量的名称。其他数据不允许出现在这一行，否则会导致出错。当无关数据列的头出现时也会导致出错。
- 文件中的随机变量名称必须与 GUI 菜单系统中定义的随机变量名称保持一致。
- 第四列到第 n 列是任意排序的。ANSYS PDS 根据第二行中的随机变量名称确定随机变量数据的所在列位置。
- 第三行及其后续行要包含迭代数、周期数和仿真循环数，然后是该循环下的随机变量数值。迭代数、周期数和仿真循环数必须分别位于第一、第二和第三列。迭代数和周期数供 ANSYS PDS 内部使用，此时通常填写 1。循环数是一个从 1 到总循环数递增的数字。其他数据不能包含在这一行中，否则将会导致出错。当所需数据不全时，也会导致出错。
- 随机变量数值必须与第二行中随机变量名称一一对应。
- 必须至少包含一行随机变量数据。

PDS 读入指定抽样文件时，首先检查该指定的文件是否存在，然后检查它的完整性和有效性。有效性检查的依据是各随机变量的分布函数类型和最小、最大边界等。当文件中随机变量数据不符合规定时，将会出错并提供错误信息。如果参数没有范围限制，那么任意数值都可以接受，例如高斯分布。除了 ANSYS PDS 进行的这些检查之外，用户还要确保抽样数据与分布函数的一致性。如下列数据所示是一个基于 3 个随机变量 X1、X2 和 X3 的抽样自定义文件的实例，总共需要进行 100 次仿真循环。

USERSAMP

ITER	CYCL	LOOP	X1	X2	X3
1	1	1	1.619379209e+000	2.364528435e-001	1.470789050e+000
1	1	2	2.237676559e-001	5.788049712e-001	1.821263115e+000
1	1	3	7.931615474e+000	8.278689033e-001	2.170793522e+000
..	..	..	...	...	...
..	..	..	...	...	...
1	1	98	1.797221666e+000	3.029471373e-001	1.877701081e+000
1	1	99	1.290815540e+001	9.271606216e-001	2.091047328e+000
1	1	100	4.699281922e+000	6.526505821e-001	1.901013985e+000

使用 LHS 抽样法，选择菜单 Main Menu | Prob Design | Prob Method | Monte Carlo Sims，再选择用户自定义抽样法。

30.4.2 响应面法

1. 响应面法概述

响应面法中可以选择三种方法:中心合成设计、Box-Behnken 矩阵法和用户指定法。

响应面法假设随机输入变量对于随机输出变量的影响可以用数学函数来表达。因此，响应面法在随机输入变量空间中定位采样点，使得近似函数最有效:通常，函数是一个二次多项式，那么拟合函数可以表示为:

$$\hat{Y} = c_0 + \sum_{i=1}^{NRV} c_i X_i + \sum_{i=1}^{NRV} \sum_{j=1}^{NRV} c_{ij} X_i X_j$$

其中, c_0 为常数项, c_i 、 $i=1L \ NRV$ 为线性项系数, c_{ij} 、 $j=1L \ NRV, j=iL \ NRV$ 为二次项系数。为得到这些系数要使用回归分析, 通常是用最小二乘法来确定。

因此, 响应面法包含两个步骤:

- 1) 进行仿真循环计算对应随机输入变量空间样本点的随机输出变量的数据。
- 2) 进行回归分析确定近似函数。

响应面法的基本思路是, 一旦确定了这个近似函数, 就可以用它来代替循环去处理有限元模型。要进行有限元分析可能需要几分钟或几小时的计算时间, 而计算近似函数只需要几分之一秒的时间。因此, 使用近似函数, 就可以对响应参数进行成千上万次的计算。

对于工程分析来说, 通常二次项就够用了。例如, 评价热应力、弹性模量和热膨胀系数对热应力的影响是线性的, 在平方近似中使用混合项就可以模拟。但是, 有些情况下二次近似是不够的, 例如, 有限元结果是用来计算零件的寿命, 在这种情况下, 寿命通常是输入变量的指数关系, 因此使用二次近似就不行了。但是, 如果使用对数变换后, 这些数据就可以用二次近似来模拟了。ANSYS PDS 提供了几个变换函数, 可以用于响应变量, 对数变换函数是其中之一。

假设近似函数是符合要求的, 那么响应面法有如下优势。

- 通常比蒙特卡罗模拟技术需要的循环次数少。
- 可以进行非常低概率的分析, 这是蒙特卡罗模拟技术一般不能实现的, 除非蒙特卡罗模拟技术进行非常大量的分析循环。
- 拟合系数表示近似函数的可靠程度, 或者说表示与实际响应数值的近似程度。拟合系数能够在近似函数精度较差时提醒用户需要重新定义。
- 单个循环之间是互相独立的 (一个循环的结果不会影响另外一个), 这使得响应面法非常适合于并行处理。

响应面法有如下缺点。

- 需要的循环次数取决于随机输入变量的个数。如果有很多随机输入变量 (几百个或几千个), 那么使用响应面法就不太现实了。
- 不适用于随机输出变量与随机输入变量的函数不平滑的情况, 例如, 当随机输入变量变化不大的情况下随机输出变量的数值有了一个突变, 这通常在模型中有不稳定的情况时 (如失稳) 出现。同样, 当模型中有变化很大的非线性 (如理想弹塑性材料) 时也会出现这种情况。如果进行接触分析, 随机输入变量很小的变化都可能改变接触状态, 这样在使用响应面法时可能会遇到问题。

注意: 要使用响应面法, 随机变量间的函数关系必须是光滑连续的。如果不满足这个情况, 不要使用这种方法。

2. 中心合成设计抽样

中心合成设计抽样 (简称 CCD 抽样) 包括一个中心点、 N 个轴线点和位于 2^{N-f} 阶乘





个 N 维超立方体的顶点。这里, N 是随机输入变量的数目, f 是中心合成设计阶乘因子表达式中的一个参数, 当为 0 时称做完全分解设计, 为 1 是半分解设计, 其他依次类推。随着随机输入变量数目的增加, PDS 将会逐步增大阶乘因子参数 f , 这样始终确保仿真循环数目总是合理的。程序总是自动计算阶乘因子 f 的数值, 所以 V 分解设计总是需要的, 并且由于其近似函数的二次项之间并不存在任何界限和关联, 从而确保在评估二次项系数时获得非常合理的精度。

如图 30-14 所示是一个有 3 个随机输入变量的 CCD 抽样样本点位置示意图。

使用响应面法中的中心合成设计抽样, 选择菜单 Main Menu | Prob Design | Prob Method | Response Surface, 选择 Centrl Composite 选项。

3. Box-Behnken 矩阵抽样

Box-Behnken 矩阵抽样包括一个中心点和 N 维超立方体的每边中心点。如图 30-15 所示是 3 个随机输入变量的 Box-Behnken 矩阵抽样样本点位置示意图。

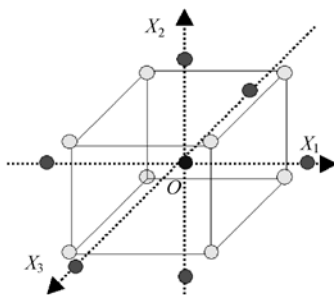


图 30-14 有 3 个随机输入变量的 CCD 抽样样本点位置示意图

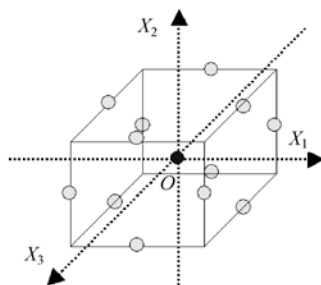


图 30-15 有 3 个随机输入变量的 Box-Behnken 抽样样本点位置示意图

使用响应面法中的中心合成设计抽样, 选择菜单 Main Menu | Prob Design | Prob Method | Response Surface, 选择 Box-BehnkenMtrx 选项。

下面给出一个实例, 通过实例可以帮助读者掌握可靠性分析的流程和注意事项。

30.5 实例：路基可靠性分析

30.5.1 工程背景

路基的沉降计算和预测在道路工程中有着十分重要的意义, 解决软基路堤沉降问题, 是高速公路设计与施工的关键所在。土体是在人力无法控制的条件下形成的, 其性质表现出很大的变异性。大量试验、统计表明, 土体参数的变异系数远比一般的人工材料大。在地基沉降计算方面, 概率分析方法可以较好地反映地基土的不确定性。目前地基沉降可靠度分析方法主要有两类: 一是直接法进行的沉降可靠度分析, 但过于简单; 二是基于随机有限元的地基沉降概率计算方法, 理论比较复杂, 不易掌握。所以, 如何把现有的有限元软件用于路基沉降的可靠度计算是很有实际意义的。

30.5.2 问题的描述

1. 模型的几何尺寸

路基模型如图 1 所示，上部分为路堤，下部分为路基，模型尺寸如图 30-16 所示。

2. 单元的选择及材料常数

采用 ANSYS 的 4 节点 PLANE42 单元模拟，考虑其大变形影响。使用完全牛顿-拉弗森算法。不考虑土体的排水固结，按总应力法计算。采用 Drucker-Prager 模型描述土体的非线性。模型计算材料参数见表 30-2。

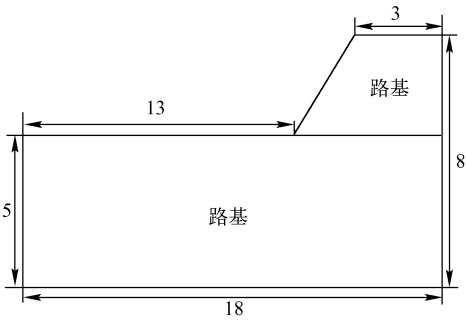


图 30-16 路基模型简图

表 30-2 路基模型材料常数

	ρ	E	ν	c	φ	φ_f
路堤	2110 kg/m ³	3.5E7Pa	0.3	110KPa	30	0
路基	1900 kg/m ³	3E6Pa	0.35	30KPa	25	0

考虑密度与弹性模量的随机性，设密度和弹性模量均服从正态分布。基本随机变量见表 30-3。采用 ANSYS 软件的蒙特卡罗模拟方法进行可靠度计算，进行 200 次循环计算进行可靠性分析。

表 30-3 路基沉降随机变量分布表

随机变量	分布类型	均值	方差
路堤的弹性模量	高斯正态分布	3.5E7Pa	2E5
路堤的密度	高斯正态分布	2110 kg/m ³	80
路基的弹性模量	高斯正态分布	3E6Pa	1E5
路基的密度	高斯正态分布	1900 kg/m ³	50

3. 边界条件

边坡右侧和坡角左侧均为水平约束边界条件，底面为全部固定边界条件。对于本实例路基，外载荷仅为重力。

30.5.3 GUI操作

1. 定义文件名

GUI: Utility Menu | File | Change Jobname

弹出对话框，在输入栏中输入“Deformation Reliability of Road”，单击 OK。

2. 定义几何参数

GUI: Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters

在弹出对话框的 Selection 中输入 L=18，单击 Accept 完成对路基下底面宽度参数的定义，按照此方法继续定义路基高度 H=5，路堤高度 H1=3，路基上底面宽度 L1=13，路堤顶半宽 L2=3，路堤弹性模型 ET=3.2E7，路堤密度 ROUT=2110，路基弹性模量 EJ=3E6，路基



密度 $ROUJ=1900$ ，定义完毕后单击 Close。

3. 定义单元和材料常数

(1) 定义单元

因为 ANSYS 13.0 版本对单元库有些调整，PLANE42 不能使用 GUI 单元库定义，只能输入单元编号进行定义，其方法如下

GUI: Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

弹出对话框，单击 Add，在弹出对话框的右边下面输入 42，单击 OK。

(2) 定义单元关键字

在单元类型对话框中，单击 Options 按钮，设置关键字 K3 为平面应变 (Plane strain)。

(3) 定义单元材料常数

GUI: Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

弹出对话框，单击 Structural | Linear | Elastic | Isotropic，又弹出一个输入材料属性的对话框，输入 $EX=EJ$ ， $PRXY=0.3$ ，单击 OK，单击 Density，输入 $DENS=ROUT$ ；设置材料的应力应变关系为 D-P 模型，单击 Structural | Nonlinear | Inelastic | Non-metal Plasticity | Drucker-Prager，在弹出的对话框中输入粘聚力 (Cohesion) 为 $110E3$ ，摩擦角 (Fric Angle) 为 30，单击 OK，按照同样的方法定义路基的材料模型，定义完毕后，选择 Material | Exit，退出面板。

4. 建立模型

(1) 定义关键点

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

在弹出的对话框中输入 $NPT=1$ ， $X=0$ ， $Y=0$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=2$ ， $X=L$ ， $Y=0$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=3$ ， $X=L$ ， $Y=H$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=4$ ， $X=L$ ， $Y=H+H1$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=5$ ， $X=L-L2$ ， $Y=H+H1$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=6$ ， $X=L1$ ， $Y=H$ ， $Z=0$ ，单击 Apply；继续输入 $NPT=7$ ， $X=0$ ， $Y=H$ ， $Z=0$ ，单击 Apply，单击 OK。

(2) 通过关键点建立面

GUI: Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

弹出拾取对话框，拾取关键点 1、2、3、6 和 7，单击 Apply；继续拾取关键点 3、4、5 和 6，单击 OK。

5. 网格划分

(1) 打开网格划分工具面板

GUI: Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

(2) 设置单元尺寸

选择网格划分工具面板的 Size Controls 中的 Global 的 Set，在弹出的对话框的 SIZE 选项中输入 0.3，单击 OK。

(3) 划分路堤网格

1) 设置单元属性

选择网格划分工具面板的 Element Attributes 中的 Set，在弹出的对话框中设置材料号 (Material number) 为 1，其他保持默认值，单击 OK。

2) 划分路堤网格

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取路堤面 A2, 单击 OK。

(4) 划分路堤网格

1) 设置单元属性

选择网格划分工具面板的 Element Attributes 中的 Set, 在弹出的对话框中设置材料号 (Material number) 为 2, 其他保持默认值, 单击 OK。

2) 划分路堤网格

单击网格划分工具面板中的 Mesh 按钮, 弹出拾取对话框, 拾取路基面 A1, 单击 OK。

6. 设置分析类型

(1) 设置静力学分析

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis

在弹出的对话框中选中 Static, 含义为进行静力学问题求解。

(2) 设置分析选项

GUI: Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options

弹出分析选项设置对话框, 激活大变形分析 (Large deform effects), 设置牛顿-拉普森 (Newton-Raphson option) 为完全法 (Full N-R), 设置完毕后, 单击OK。

7. 定义边界条件

(1) 定义位移约束

GUI: Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Lines

弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型的左右边界线 L2 和 L5, 单击 Apply, 在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 UX, 其他保持默认设置, 单击 Apply, 弹出拾取对话框, 用鼠标拾取模型底边 L1, 单击 OK, 在弹出的对话框中的 DOFs to be constrained 的选项中选择 ALL DOF, 单击 OK。

(2) 定义重力载荷

GUI: Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Gravity | Global

在弹出的对话框中输入 ACELY=9.8, 单击OK。

8. 开始求解

GUI: Main Menu | Solution | Current LS

弹出求解对话框, 单击 OK。

9. 后处理

在后处理阶段, 需要提取路基最大沉降量。

GUI: Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data

在弹出的对话框左边选择 Results data, 在右边选择 Global measres, 单击 OK, 在弹出的对话框左边选择 DOF solution, 在右边选择 UY, 输入参数名 UMAX, 设置提取最小值 (Minimum), 单击 OK。

10. 进入可靠性分析模块

1) 整理出命令流, 并设置扩展名为.txt, 并复制到 ANSYS 的工作目录, 本实例设置命令流文件名为 Reliability.txt。





2) 读入 Reliability. txt。

GUI: Utility Menu | File | Read Input from

在工作目录中选入 Reliability. txt。

3) 指定分析文件。

GUI: Main Menu | Design Opt | Analysis File | Assign

弹出选择文件对话框，单击Browse，选择文件 Reliability. txt，单击OK。

4) 定义设计变量。

GUI: Main Menu | Prob Design | Random Input

弹出定义设计变量对话框，单击 Add，在弹出的对话框中，选择 NAME 中的 ET，单击 OK，在弹出的对话框中输入均值（Mean value）为 $3.5E7$ ，方差（Standard deviation）为 $2E5$ ，单击 OK；继续单击 Add，选择 NAME 中的 EJ，单击 OK，在弹出的对话框中输入均值（Mean value）为 $3E6$ ，方差（Standard deviation）为 $1E5$ ，单击 OK；继续单击 Add，选择 NAME 中的 ROUT，单击 OK，在弹出的对话框中输入均值（Mean value）为 2110，方差（Standard deviation）为 80，单击 OK；继续单击 Add，选择 NAME 中的 ROUJ，单击 OK，在弹出的对话框中输入均值（Mean value）为 1900，方差（Standard deviation）为 50，单击 OK，单击 Close。

5) 查看随机输入参数。当定义好随机输入参数后，可以使用ANSYS提供的显示工具来验证，如绘制单独的RV通过询问得到特定的参数信息等，绘制随机输入参数的概率密度函数和分布函数。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Definitns | Plot

在弹出的对话框中选择 ET，单击 Apply，如图 30-17 所示；继续选择 ROUJ，单击 OK，如图 30-18 所示。

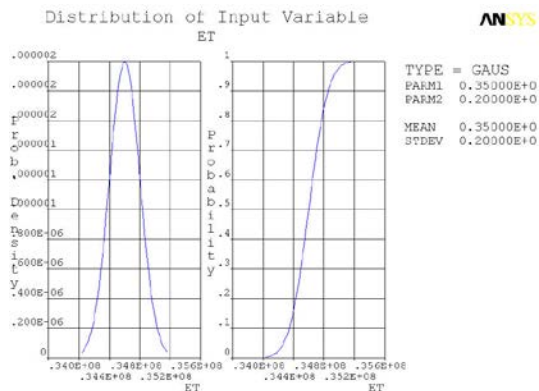


图 30-17 ET 的分布曲线

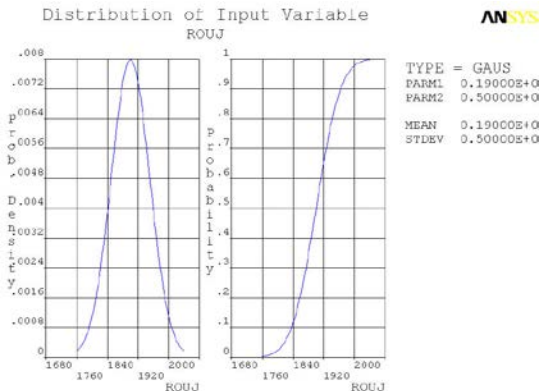


图 30-18 ROUJ 的分布曲线

6) 定义随机输入参数之间的相关性系数。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Definitns | Correlation

弹出的对话框中选择 ET 和 EJ，单击 OK，在弹出的对话框中输入 0.6，单击 OK。

7) 指定随机输出参数。定义完随机输入参数和它们的相关性后，接着定义随机输出参数。随机输出参数（RP）是用户感兴趣的结果参数。为了指定随机输出参数可用下面方法。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Definitns | Random Output

在弹出的对话框中, 单击 Add, 在弹出的对话框 Name 中选择 UMIN, 单击 OK, 单击 Close。

8) 选择概率分析方法。在 ANSYS 的 PDS 中, 可以选择几种概率设计方法。首先, 选择两种基本选项之一: 蒙特卡罗模拟技术(默认)或响应面法。蒙特卡罗模拟技术又包括拉丁超立方方法(默认)和直接蒙特卡罗抽样方法。响应面法包括中心合成设计法和 Box-Behnken 矩阵法。蒙特卡罗模拟技术和响应面法都允许用户自定义选项。

注意: 要使用响应面法, 随机输出参数与相应随机输入参数的函数关系必须是连续且较光滑的。如果这个条件不满足的话、不要使用响应面法。

本实例选用蒙特卡罗模拟方法:

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Method | Monte Carlo Sims

在弹出的对话框中选择拉丁超立方方法(Latin Hypercube), 单击 OK, 在弹出的对话框中输入模拟次数(Number of Simulations)为 200, 其他保持默认值, 单击 OK。

9) 开始计算

GUI: Main Menu | Prob Design | Run | Exec Serial | Run Serial

在弹出的对话框中输入运算求解保存的文件名为 R, 单击 OK。

10) 查看可靠性计算结果

① 路基最大沉降量的随机值。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Results | Statistics | Sampl History

在弹出的对话框中选择输出变量 UMIN, 单击 OK, 如图 30-19 所示。

② 路基最大沉降的柱状图

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Results | Statistics | Histogram

在弹出的对话框中选择输出变量 UMIN, 单击 OK, 如图 30-20 所示。

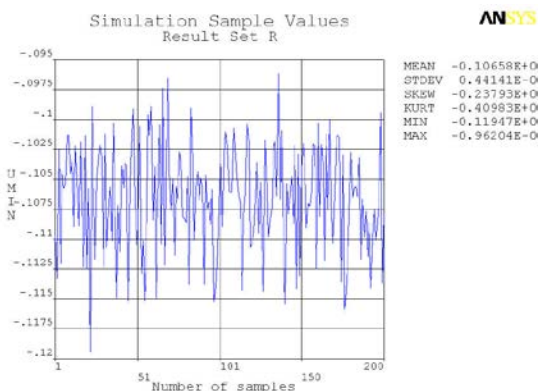


图 30-19 路基最大沉降量的随机值

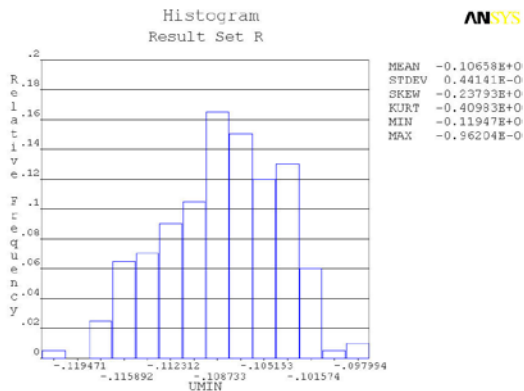


图 30-20 路基最大沉降量的柱状图

③ 路基最大沉降的概率分布图。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Results | Statistics | CumulativeDF

在弹出的对话框中选择输出变量 UMIN, 并且设置最大数据点 Maximum no.points 为 200, 单击 OK, 如图 30-21 所示。



④ 路基最大沉降对随机输入变量的敏感性。

GUI: Main Menu | Prob Design | Prob Results | Trends | Sensitivities

在弹出的对话框中选择输出变量 UMIN，单击 OK，如图 30-22 所示。

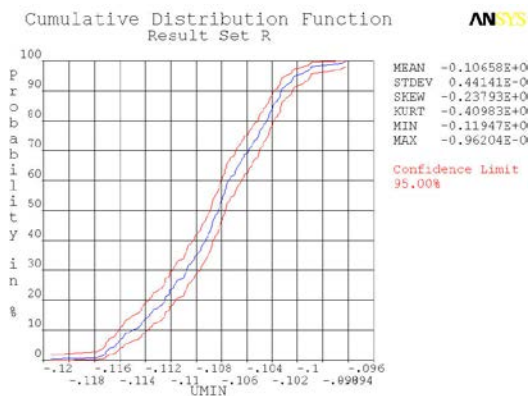


图 30-21 路基最大沉降量的概率分布

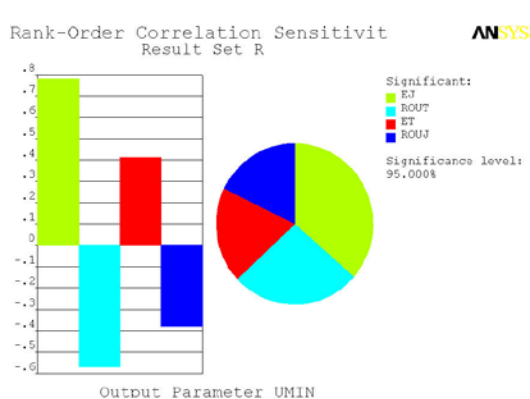


图 30-22 路基最大沉降量对随机输入变量的敏感性

附录



附录A 获取函数

获取函数	提取值
实体状态:	
NSEL(N)	节点 N 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
ESEL(E)	单元 E 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
KSEL(K)	关键点 K 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
LSEL(L)	线 L 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
ASEL(A)	面 A 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
VSEL(V)	体 V 的状态(-1=未被选择, 0=未定义, 1=被选择)
选择下一个实体:	
NDNEXT(N)	选择节点编号大于 N 的下一个节点
ELNEXT(E)	选择单元编号大于 E 的下一个单元
KPNEXT(K)	选择关键点编号大于 K 的下一个关键点
LSNEXT(L)	选择线编号大于 L 的下一条线
ARNEXT(A)	选择面编号大于 A 的下一个面
VLNEXT(V)	选择体编号大于 V 的下一个体
定位:	
CENTRX(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 X 坐标值
CENTRY(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Y 坐标值
CENTRZ(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Z 坐标值
NX(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
NY(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
NZ(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
KX(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
KY(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
KZ(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
LX(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0)处的 X 坐标值
LY(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0)处的 Y 坐标值
LZ(L,LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC (0.0 to 1.0)处的 Z 坐标值
就近定位:	
NODE(X,Y,Z)	距点 (X,Y,Z) 最近的被选择的节点的编号 (在当前激活坐标系中; 符合条件的关键点中编号最小者)
KP(X,Y,Z)	距点 (X,Y,Z) 最近的被选择的关键点的编号 (在当前激活坐标系中; 符合条件的关键点中编号最小者)



(续)

获 取 函 数	提 取 值
距离:	
DISTND(N1,N2)	节点 N_1 和节点 N_2 之间的距离
DISTKP(K1,K2)	关键点 K_1 和关键点 K_2 之间的距离
DISTEN(E,N)	单元 E 的质心和节点 N 之间的距离, 质心由单元上选择的节点确定
角度:	
ANGLEN(N1,N2,N3)	两条线之间的夹角 (由三个节点确定, 其中 N_1 为顶点), 单位默认为弧度
ANGLEK(K1,K2,K3)	两条线之间的夹角 (由三个关键点确定, 其中 K_1 为顶点), 单位默认为弧度
离某实体最近:	
NNEAR(N)	最接近节点 N 的节点
KNEAR(K)	最接近关键点 K 的关键点
ENEARN(N)	最接近节点 N 的单元, 单元位置由选择的节点确定
面积:	
AREAND(N1,N2,N3)	由节点 N_1 、 N_2 和 N_3 围成的三角形的面积
AREAKP(K1,K2,K3)	由关键点 K_1 、 K_2 和 K_3 围成的三角形的面积
ARNODE(N)	与节点 N 相连的被选择单元在节点 N 上分配的面积。对于二维平面实体, 返回与节点 N 相连边界的面积; 对于轴对称实体, 返回与节点 N 相连边表面的面积; 对于三维体实体, 返回与节点 N 相连面的面积
法向:	
NORMNX(N1,N2,N3)	节点 N_1 、 N_2 和 N_3 确定平面的法线与X轴的夹角的余弦值
NORMNY(N1,N2,N3)	节点 N_1 、 N_2 和 N_3 确定平面的法线与Y轴的夹角的余弦值
NORMNZ(N1,N2,N3)	节点 N_1 、 N_2 和 N_3 确定平面的法线与Z轴的夹角的余弦值
NORMKX(K1,K2,K3)	关键点 K_1 、 K_2 和 K_3 确定平面的法线与X轴的夹角的余弦值
NORMKY(K1,K2,K3)	关键点 K_1 、 K_2 和 K_3 确定平面的法线与Y轴的夹角的余弦值
NORMKZ(K1,K2,K3)	关键点 K_1 、 K_2 和 K_3 确定平面的法线与Z轴的夹角的余弦值
关联:	
ENEXTN(N,LOC)	与节点 N 相连的单元。若有很多单元与节点 N 相连, 则由 LOC 定位。列表结束时返回零
NELEM(E,NPOS)	单元 E 中在 NPOS (1-20)位置上的节点号
表面:	
ELADJ(E,FACE)	与单元 E 的某个表面号 (FACE) 邻近的单元。面号与面载荷关键号相同。仅仅考虑那些有相同维数和形状的单元。若邻近的单元多于一个, 则返回-1, 若无邻近单元, 返回 0
NDFACE(E,FACE,LOC)	单元 E 的某个表面 (FACE) 上的 LOC 处的节点。面号与面载荷关键号相同。LOC 指表面上的节点位置 (对于 IJLK 表面, LOC=1 指节点 I, 2 指节点 J 等)
NMFACE(E)	包含选定节点的单元 E 的表面号。面号输出就是面载荷关键号。如果一个面上出现多个载荷关键号 (例如线单元和面单元), 该面上的最小载荷关键号将被输出
ARFACE(E)	对于二维平面实体和三维体实体, 返回包含选定节点的单元 E 的表面面积。对于轴对称单元, 返回总面积 (360°)
自由度结果:	
UX(N)	节点 N 在 X 向的结构位移
UY(N)	节点 N 在 Y 向的结构位移
UZ(N)	节点 N 在 Z 向的结构位移
ROTX(N)	节点 N 绕 X 向的结构转角
ROTY(N)	节点 N 绕 Y 向的结构转角
ROTZ(N)	节点 N 绕 Z 向的结构转角
TEMP(N)	节点 N 上的温度

附录B ANSYS有限元网格划分的基本原则

1. 网格数量

网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小。一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加，所以在确定网格数量时应权衡两个因素综合考虑。

图 B-1 中的曲线 1 表示结构中的位移 u 随网格数量收敛的一般曲线，曲线 2 代表计算时间随网格数量的变化。可以看出，网格较少时增加网格数量可以使计算精度明显提高，而计算时间不会有大的增加。当网格数量增加到一定程度后，再继续增加网格时精度提高甚微，而计算时间却有大幅度增加。所以应注意增加网格的经济性。实际应用时可以比较两种网格划分的计算结果，如果两次计算结果相差较大，可以继续增加网格，相反则停止计算。

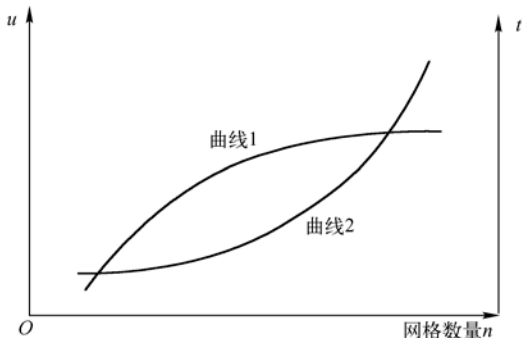


图 B-1 位移精度和计算时间随网格数量的变化

在决定网格数量时应考虑分析数据的类型。在静力分析时，如果仅仅是计算结构的变形，网格数量可以少一些。如果需要计算应力，则在精度要求相同的情况下应取相对较多的网格。同样在响应计算中，计算应力响应所取的网格数应比计算位移响应多。在计算结构固有动力特性时，若仅仅是计算少数低阶模态，可以选择较少的网格，如果计算的模态阶次较高，则应选择较多的网格。在热分析中，结构内部的温度梯度不大，不需要大量的内部单元，这时可划分较少的网格。

2. 网格疏密

网格疏密是指在结构不同部位采用大小不同的网格，这是为了适应计算数据的分布特点。在计算数据变化梯度较大的部位（如应力集中处），为了较好地反映数据变化规律，需要采用比较密集的网格。而在计算数据变化梯度较小的部位，为减小模型规模，则应划分相对稀疏的网格。这样，整个结构便表现出疏密不同的网格划分形式。下面通过实例给出网格疏密对计算精度的影响。

图 B-2 是中心带圆孔方板的对称模型，其网格划分反映了疏密不同的划分原则。小圆孔附近存在应力集中，采用了比较密的网格。板的四周应力梯度较小，网格分得较稀。其中图 B-2 在缺口处网格划分较疏；而图 B-4 在缺口处的网格划分较密。其应力计算结果：图 B-4 在缺口处的计算精度高于图 B-2 中的有限元模型计算的结果，如图 B-3 及图 B-5 所示。由



此可见，不同的地方应该采用不同的网格划分。因此，网格数量应增加到结构的关键部位，在次要部位增加网格是不必要的，也是不经济的。

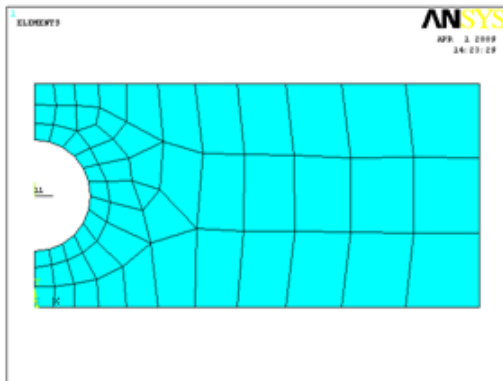


图 B-2 较粗网格的有限元模型

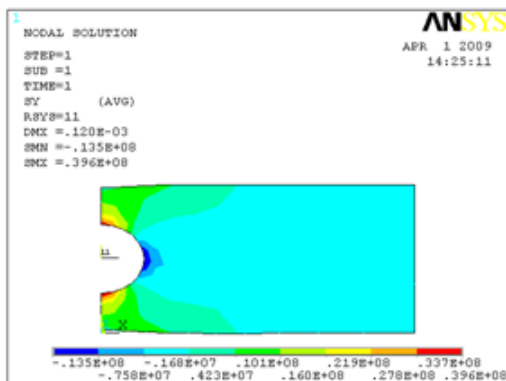


图 B-3 网格对应得环向应力云图

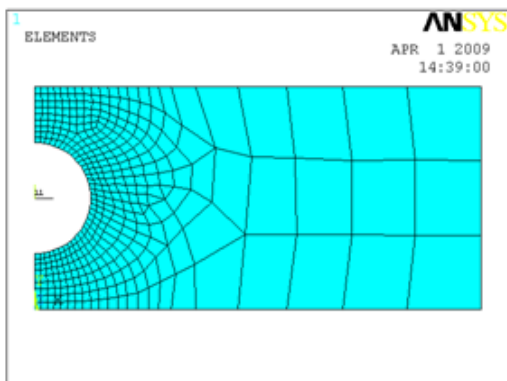


图 B-4 缺口处较细网格

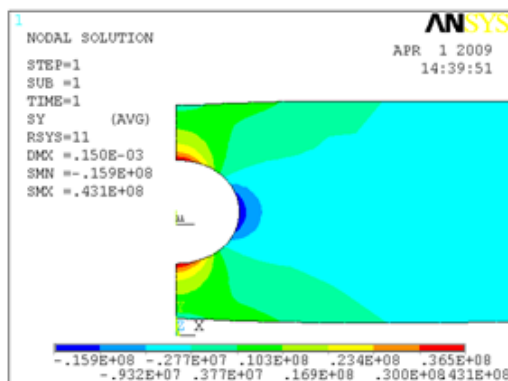


图 B-5 较密网格所得的环向应力云图

划分疏密不同的网格主要用于应力分析（包括静应力和动应力），而计算固有特性时则推荐采用较均匀的网格形式。这是因为固有频率和振型主要取决于结构质量分布和刚度分布，不存在类似应力集中的现象，采用均匀网格可使结构刚度矩阵和质量矩阵的元素不致相差太大，可减小数值计算误差。同样，在结构温度场计算中也推荐采用均匀网格。

3. 单元阶次

许多单元都具有线性、二次和三次等形式，其中二次和三次形式的单元称为高阶单元。选用高阶单元可提高计算精度，因为高阶单元的曲线或曲面边界能够更好地逼近结构的曲线和曲面边界，且高次插值函数可更高精度地逼近复杂场函数，所以当结构形状不规则、应力分布或变形很复杂时可以选用高阶单元。但高阶单元的节点数较多，在网格数量相同的情况下由高阶单元组成的模型规模要大得多，因此在使用时应权衡考虑计算精度和时间。

图 B-6 中的有限元模型采用了 8 节点的单元，图 B-2 中的单元采用了 4 节点的单元，从其计算结果中可以看出，高阶单元在应力集中处即使采用了较粗糙的网格划分，也可以计算得到较精确的应力值，如图 B-7 所示。因此，在有应力集中和刚度突变的地方，应该采用

高阶单元来对其进行网格划分。

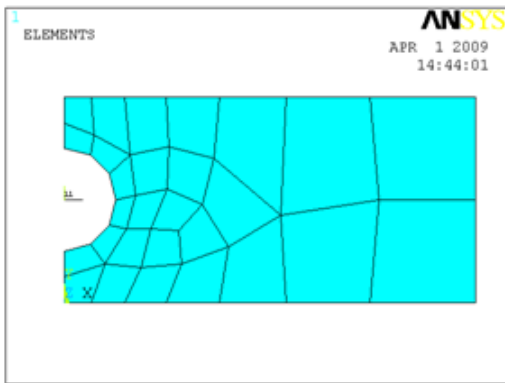


图 B-6 高阶单元的有限元网格

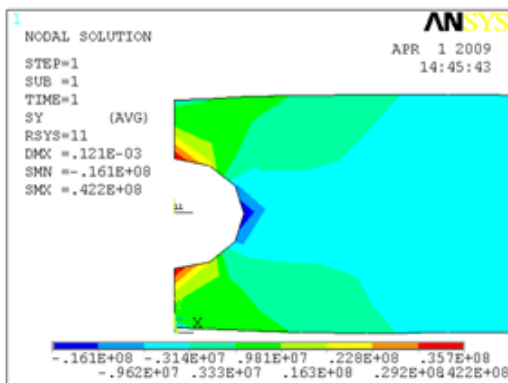


图 B-7 高阶单元的计算结果

增加网格数量和单元阶次都可以提高计算精度。因此在精度一定的情况下，用高阶单元离散结构时应选择适当的网格数量，太多的网格并不能明显提高计算精度，反而会使计算时间大大增加。为了兼顾计算精度和计算量，同一结构可以采用不同阶次的单元，即精度要求高的重要部位用高阶单元，精度要求低的次要部位用低阶单元。不同阶次单元之间或采用特殊的过渡单元连接，或采用多点约束等式连接。

4. 网格质量

网格质量是指网格几何形状的合理性。质量好坏将影响计算精度。质量太差的网格甚至会中止计算。直观上看，网格各边或各个内角相差不大、网格面不过分扭曲、边节点位于边界等分点附近的网格质量较好。网格质量可用细长比、锥度比、内角、翘曲量、拉伸值、边节点位置偏差等指标度量。划分网格时一般要求网格质量能达到某些指标要求。在重点研究的结构关键部位，应保证划分高质量网格，即使是个别质量很差的网格也会引起很大的局部误差。而在结构次要部位，网格质量可适当降低。当模型中存在质量很差的网格（称为畸形网格）时，计算过程将无法进行。网格分界面和分界点，结构中的一些特殊界面和特殊点应分为网格边界或节点以便定义材料特性、物理特性、载荷和位移约束条件。即应使网格形式满足边界条件特点，而不应让边界条件来适应网格。常见的特殊界面和特殊点有材料分界面、几何尺寸突变面、分布载荷分界线（点）、集中载荷作用点和位移约束作用点等。

单元的质量和数量对求解结果和求解过程影响较大，如果结构单元全部由等边三角形、正方形、正四面体、立方六面体等单元构成，则求解精度可接近实际值，但由于这种理想情况在实际工程结构中很难做到。因此根据模型的不同特征，设计不同形状种类的网格，有助于改善网格的质量和求解精度。单元质量评价一般可采用以下几个指标。

1) 单元的边长比、面积比或体积比以正三角形、正四面体、正六面体为参考基准。理想单元的边长比为 1，可接受单元的边长比的范围是：线性单元长宽比小于 3，二次单元小于 10。对于同形态的单元，线性单元对边长比的敏感性较高阶单元高，非线性比线性分析更敏感。

2) 扭曲度：单元面内的扭转和面外的翘曲程度。

3) 疏密过渡：网格的疏密主要表现为应力梯度方向和横向过渡情况，应力集中的情况



应妥善处理,而对于分析影响较小的局部特征应分析其情况,如外圆角的影响比内圆角的影响小得多。

4) 节点编号排布:节点编号对于求解过程中的总体刚度矩阵的元素分布、分析耗时、内存及空间有一定的影响。合理的节点、单元编号有助于利用刚度矩阵对称、带状分布、稀疏矩阵等方法提高求解效率,同时要注意消除重复的节点和单元。

5. 位移协调性

位移协调是指单元上的力和力矩能够通过节点传递相邻单元。为保证位移协调,一个单元的节点必须同时也是相邻单元的节点,而不应是内点或边界点。相邻单元的共有节点具有相同的自由度性质。否则,单元之间须用多点约束等式或约束单元进行约束处理。

附录C 有限元收敛速度和精确估计

单元的插值函数是完备而协调的,当单元尺寸不断缩小而趋于零时,有限元解将趋于真正解。在有些情况下,如果用于有限元场函数近似解的多项式展开能精确地拟合真正解,则在有限数目的单元划分(甚至仅仅是一个单元)的条件下,也能得到精确的解答。例如真正解是二次函数,若有限元的插值函数也包括了二次的完全多项式,则有限元解就能得到精确的解答。

以上论述可以帮助我们决定有限元解的收敛速度。因为精确解总可以在域内一点 i 的邻域内展开为一个多项式,例如平面问题中的位移 u 可以展开为

$$u = u_i + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i \Delta x + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_i \Delta y + \dots \quad (\text{C-1})$$

如果在尺寸为 h 的单元内,有限元解采用 p 阶完全多项式,则它能局部地拟合上述Taulor展开式直到 p 阶。由于 Δx , Δy 是 h 的量级,所以位移解 u 的误差是 $O(h^{p+1})$ 。例如平面问题采用3节点三角形单元,插值函数是线性的,即 $p=1$,所以 u 的误差是 $O(h^2)$,并可预计收敛速度也是 $O(h^2)$ 的量级,也就是说将有限元网格进一步细分,使所有单元尺寸减半,则 u 的误差是前一次网格划分误差的 $(1/2)^2=1/4$ 。

类似的论证可以用于应变,应力以及应变能等误差和收敛速度的估计。例如应变是由位移的 m 阶导数给出的,则它的误差是 $O(h^{p-m+1})$,当平面问题采用3节点三角形单元时, $p=m=1$,则应变的误差估计是 $O(h)$ 。

在上面的讨论中,虽然形式上对误差做出了量级上的估计,但实际上并不能对有限元解的误差做出具体的估计。而后者往往是实际分析工作所需要的。

为此,一般可以通过如下两种途径来解决。

1) 选择一个已知解析解的相同类型的问题,求解域尽可能和实际分析的问题相近,并采用相同形式的单元和差不多的网格划分,用此问题有限元解的误差可以估计实际问题的误差。

2) 利用以上讨论中关于收敛速度的量级估计,采用外推的方法求解校正的解答。因此,如第一次网格划分的解答是 u_1 ,然后将各单元尺寸减半作为第二次的网格划分,得到解答为 u_2 。若已知收敛速度是 $O(h^r)$,则可由下式得到外推精确解 u :

$$\frac{u_1 - u}{u_2 - u} = \frac{O(h^r)}{O((h/2)^r)} \quad (\text{C-2})$$

若是平面问题采用 3 节点三角形单元, 则 $r=2$, 上式可写成:

$$\frac{u_1 - u}{u_2 - u} = \frac{O(h^2)}{O((h/2)^2)} = 4 \quad (\text{C-3})$$

即可得到精确解。应该指出, 上述讨论仅是以精确解足够光滑为前提的一种定性估计。对于几何形状、材料、载荷有突变的情况, 以及网格不均匀、单元形状畸变的情况, 问题将复杂化, 上述定性估计将难以应用。

需要注意的是, 以上所讨论的误差仅是离散误差, 即一个连续的求解域被划分成有限个单元, 由单元的试探函数近似整体域的场函数所引起的误差。另一主要误差是计算机有限的有效位数所引起的, 它包含舍入误差。

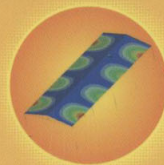
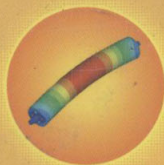
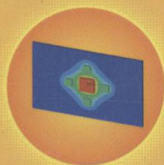
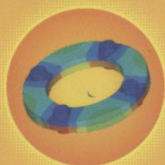
差和截断误差。前者带有概率的性质, 主要靠增加有效位数 (如采用双精度计算) 和减少运算次数 (如采用有效的计算方法和合理的程序结构) 来控制。后者除与有效位数直接有关外, 还与结构的性质有密切的关系。例如结构在不同方向的刚度相差过于悬殊, 可能使最后的代数方程组成为病态, 从而使解答的误差很大, 甚至导致求解失败。

ISBN 978-7-111-35546-5

策 划: 丁 诚

封面设计:  子时文化
ZiShi Culture

有限元分析 —— ANSYS 13.0 从入门到实战



SolidWorks系列

AutoCAD系列

Pro/E系列

UG系列

CATIA系列

MATLAB系列

ANSYS系列

Mastercam系列

>>>> ANSYS 系列已出版 <<<<

- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

上架建议: 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-35546-5



9 787111 355465 >

地址: 北京市百万庄大街22号

电话服务

社服中心: (010)88361066

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

邮政编码: 100037

网络服务

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

定价: 79.00 元(含1DVD)