

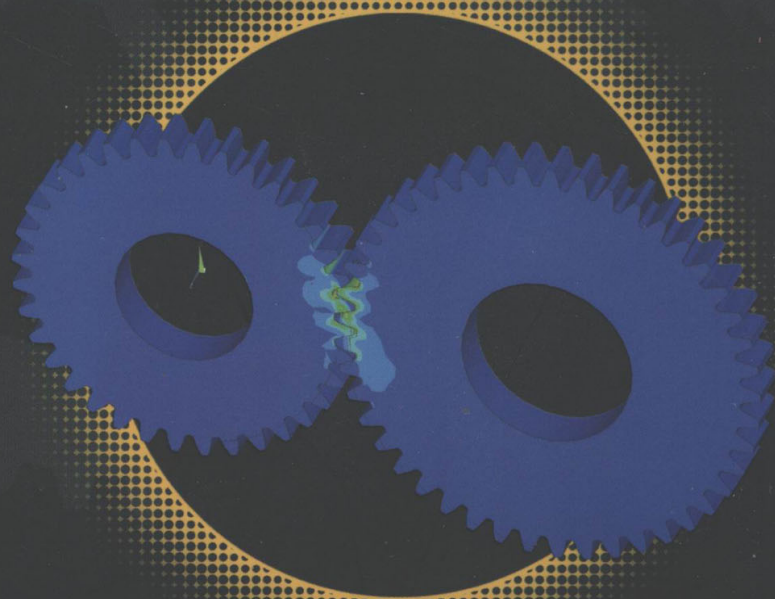


CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

有限元分析—— ANSYS 13.0 从入门到实战

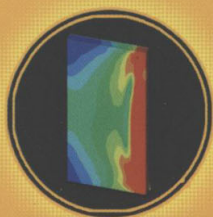
◎ 张洪才 何波 编著

- 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	体扫掠生成网格	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
19.2.1 符号与单位.....	333	第20章 边坡稳定性分析.....	358
19.2.2 热分析经典理论回顾.....	333	20.1 边坡稳定性分析概述.....	358
19.2.3 热传递的方式.....	334		
19.2.4 稳态热分析.....	334		
19.2.5 瞬态热分析.....	334		
19.2.6 热辐射.....	335		
19.2.7 线性与非线性.....	336		
19.2.8 边界条件和初始条件.....	336		
19.2.9 热分析误差估计.....	336		

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 生成完整齿轮廓面.....	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 单元的拓扑布局.....	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 动力学优化设计.....	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体。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_{xz} 来表示。其中， σ_x , σ_y , σ_z 为正应力； τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} 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。

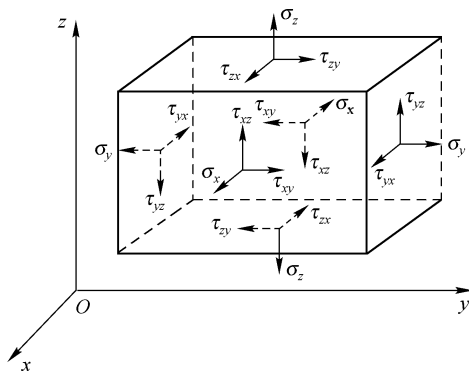


图 1-1 应力与应变分量

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

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

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。

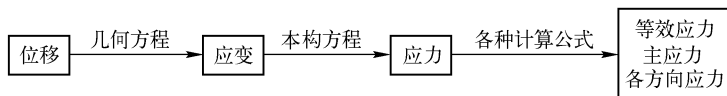


图 1-2 ANSYS 计算的基本方法

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 SOLID186 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。