



CAD/CAM/CAE工程应用丛书

ANSYS系列

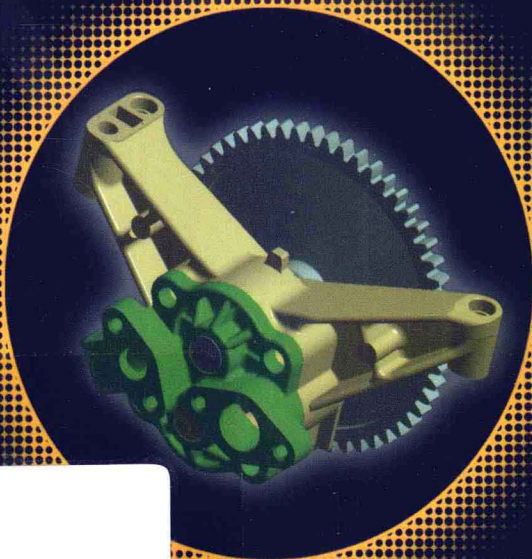
# ANSYS 14.0

## 理论解析与 工程应用实例

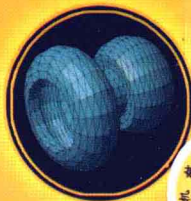
张洪才 等编著

### 本书核心内容包含

- 线弹性静力学分析
- 梁结构分析
- 壳结构分析
- 非线性分析
- 屈曲分析
- 接触分析
- 装配体分析
- 阻尼分析
- 模态分析
- 瞬态动力学分析
- 谐响应分析
- 谱分析
- 热分析
- 断裂力学分析
- 裂纹扩展模拟
- 转子动力学分析



附赠超值 DVD 光盘  
范例素材 + 视频讲解



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列

# ANSYS 14.0 理论解析与 工程应用实例

张洪才 等编著



机械工业出版社

本书全面介绍了有限元方法、单元、模型的建立、网格划分、加载、求解、后处理、线弹性静力学分析、梁结构分析、壳结构分析、非线性分析、屈曲分析、接触分析、装配体分析、阻尼分析、模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析、热分析、断裂力学分析、裂纹扩展模拟和转子动力学分析等内容。全书围绕 ANSYS 软件的功能进行讲解，并给出了大量具有工程背景的实例。

本书配套光盘提供了共 44 个实例的视频教程和 ANSYS 实例文件。

本书可作为高等学校理工类高年级本科生或硕士研究生学习 ANSYS 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，同时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

ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例 / 张洪才等编著. —北京: 机械工业出版社, 2012.10

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列)

ISBN 978-7-111-40337-1

I. ①A… II. ①张… III. ①有限元分析—应用程序 IV. ①0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 265553 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: 张淑谦

责任编辑: 张淑谦 李 宁

责任印制: 乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013 年 1 月·第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·34.5 印张·853 千字

0001-4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40337-1

ISBN 978-7-89433-210-3 (光盘)

定价: 89.80 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

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、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计, 而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发, 以保持自己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、空调系统布线图、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, 经过 40 多年的发展, 其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 软件是一个集结构、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 ISO9001 质量认证的分析设计类软件。ANSYS 软件广泛应用于核工业、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等领域。ANSYS 14.0 是目前最新的 ANSYS 版本。ANSYS 14.0 不仅为当前的商业应用提供了新技术, 而且在放大工程、模拟最复杂的工程产品和高性能计算 (HPC) 等方面取得了显著进步。

本书从有限元理论、软件操作、工程设计经验和分析技巧 4 个方面全方位, 详细地介绍了 ANSYS 的使用和解决工程实际问题的分析方法。本书内容全面新颖, 理论与实践操作有机结合, 并能做到以理论指导软件操作, 让用户不但知道如何操作, 而且知道为什么这样操作。本书实例工程背景强, 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 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。

本书几乎涵盖了 ANSYS 应用的所有分析类型, 使读者阅读完本书就能够使用 ANSYS 进行产品分析。本书编写时采用了目前最新的版本, 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。

本书共 23 章, 主要介绍有限元方法、单元、模型的建立、网格划分、加载、求解、后处理、线弹性静力学分析、梁结构分析、壳结构分析、非线性分析、屈曲分析、接触分析、装配体分析、阻尼分析、模态分析、瞬态动力学分析、谐响应分析、谱分析、热分析、断裂力学分析、裂纹扩展模拟和转子动力学分析。

本书共 44 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, 如过盈装配、裂纹扩展、装配体分析、转子动力学分析, 并配有详细的讲解视频教程, 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, 同时还能够领会到实际工程问题的分析思路, 并能解决相关领域的问题。

本书适合于初级、中级用户入门与提高阶段使用。本书主要由长春装甲兵技术学院张洪才编著, 其中第 20~22 章由沈阳工程学院孙长青编写, 参加本书编写的还有长春装甲兵技术学院的王海鹏、王芳、刘宪伟、金顶云、魏建辉、丰吉贺、郑振铎和高嘉英。编者长期从事 CAE 的研究工作, 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, 难免在写作方式和内容上存在疏漏之处, 恳请读者批评指正, 如有问题可以发邮件到 [zafansys@163.com](mailto:zafansys@163.com), 以便能促进作者技术的提高。

编著者



## 目 录

出版说明

前言

第 1 章 有限元方法与 ANSYS .....	1	2.4.2 根据模型的几何形状选择 .....	46
1.1 有限元方法的基本原理 .....	1	2.4.3 根据模型的维数选择 .....	47
1.2 ANSYS 14.0 的新功能 .....	1	2.4.4 选择单元的阶数 .....	47
1.2.1 接触分析的改进 .....	2	第 3 章 模型的建立 .....	48
1.2.2 单元和非线性计算 .....	2	3.1 坐标系 .....	48
1.2.3 线性动力学 .....	3	3.1.1 坐标系简介 .....	48
1.2.4 材料模型与断裂力学 .....	3	3.1.2 坐标系定义 .....	48
1.3 ANSYS 分析范例 .....	4	3.1.3 坐标系的激活 .....	51
1.3.1 范例问题描述 .....	4	3.2 自下向上建模 .....	51
1.3.2 命令流 .....	4	3.2.1 关键点 .....	51
第 2 章 单元 .....	6	3.2.2 线 .....	52
2.1 单元插值和形函数 .....	6	3.2.3 面 .....	53
2.2 单元的形状检查 .....	6	3.2.4 体 .....	53
2.2.1 概述 .....	6	3.3 自上向下建模 .....	54
2.2.2 长宽比检查 .....	7	3.3.1 定义面 .....	54
2.2.3 偏差角检查 .....	8	3.3.2 定义体 .....	55
2.2.4 平行偏差检查 .....	8	3.4 建立有限元模型 .....	56
2.2.5 最大顶角检查 .....	9	3.4.1 节点 .....	56
2.2.6 雅可比比率检查 .....	10	3.4.2 单元 .....	57
2.2.7 翘曲系数检查 .....	12	3.5 导入 CAD 模型 .....	59
2.3 常用单元简介 .....	14	3.6 参数化建模 .....	60
2.3.1 结构质量单元 .....	14	3.6.1 参数化建模概念 .....	60
2.3.2 结构杆单元 .....	15	3.6.2 使用参数 .....	60
2.3.3 结构实体单元 .....	17	3.6.3 APDL 中控制程序 .....	64
2.3.4 结构壳体单元 .....	24	3.7 布尔运算 .....	66
2.3.5 热质量单元 .....	27	3.7.1 交运算 .....	66
2.3.6 热杆单元 .....	28	3.7.2 加运算 .....	67
2.3.7 热实体单元 .....	31	3.7.3 减运算 .....	68
2.3.8 热壳体单元 .....	36	3.7.4 分割运算 .....	69
2.3.9 梁单元 .....	37	3.7.5 搭接运算 .....	69
2.3.10 弹簧单元 .....	40	3.7.6 互分运算 .....	70
2.4 单元的选择流程 .....	45	3.7.7 粘接运算 .....	71
2.4.1 设置单元筛选菜单 .....	45	第 4 章 网格划分 .....	72

4.1 网格划分的指导思想 .....	72	6.1 选择求解器 .....	105
4.2 网格划分工具 .....	72	6.2 求解器的类型 .....	105
4.3 网格划分尺寸控制 .....	74	6.2.1 稀疏矩阵直接法求解器 .....	105
4.3.1 智能网格尺寸控制 .....	74	6.2.2 预条件共轭梯度法求解器 .....	106
4.3.2 人工网格尺寸控制 .....	76	6.2.3 雅可比共轭梯度法求解器 .....	106
4.3.3 裂纹尖端网格尺寸控制 .....	79	6.2.4 不完全乔里斯基共轭梯度法 求解器 .....	106
4.4 网格划分器 .....	79	6.2.5 二次最小残差求解器 .....	107
4.4.1 三角形表面网格划分 .....	80	6.3 在某些类型结构分析使用特殊 求解控制 .....	107
4.4.2 四边形表面网格划分 .....	80	6.3.1 使用简化求解菜单 .....	107
4.4.3 四面体单元网格划分功能 .....	81	6.3.2 使用“求解控制”对话框 .....	107
4.4.4 控制四面体单元的改进 .....	81	6.4 获得解答 .....	109
4.5 网格划分流程 .....	81	6.5 求解多载荷步 .....	109
4.5.1 设置单元属性 .....	81	6.5.1 使用多步求解法 .....	109
4.5.2 设置单元尺寸 .....	82	6.5.2 使用载荷步文件法 .....	109
4.5.3 选择网格划分方法 .....	82	<b>第 7 章 后处理</b> .....	111
4.5.4 检查网格 .....	84	7.1 后处理功能概述 .....	111
4.5.5 修改网格 .....	85	7.1.1 ANSYS 的后处理类型 .....	111
<b>第 5 章 加载</b> .....	86	7.1.2 结果文件 .....	111
5.1 载荷的概念 .....	86	7.1.3 后处理可用的数据类型 .....	111
5.2 载荷步、子步和平衡迭代 .....	87	7.2 通用后处理器 .....	112
5.3 跟踪中时间的作用 .....	87	7.2.1 数据文件选项 .....	112
5.4 阶跃与斜坡载荷 .....	88	7.2.2 查看结果总汇 .....	113
5.5 定义载荷 .....	88	7.2.3 读入结果 .....	113
5.5.1 自由度约束 .....	89	7.2.4 图形显示结果 .....	115
5.5.2 对称与反对称约束 .....	89	7.2.5 列表显示结果 .....	118
5.5.3 施加力载荷 .....	91	7.2.6 查询结果 .....	119
5.5.4 施加表面载荷 .....	91	7.2.7 输出选项 .....	120
5.5.5 施加体积载荷 .....	93	7.2.8 单元表 .....	122
5.5.6 施加惯性载荷 .....	95	7.2.9 路径查看 .....	126
5.5.7 施加轴对称载荷和反作用力 .....	96	7.2.10 载荷工况 .....	128
5.5.8 施加表格型载荷 .....	97	7.3 时间-历程后处理器 .....	130
5.5.9 施加函数型载荷 .....	98	7.3.1 时间-历程变量观察器 .....	130
5.6 设置载荷步选项 .....	100	7.3.2 进入时间-历程后处理器 .....	132
5.6.1 通用选项 .....	100	7.3.3 定义变量 .....	132
5.6.2 动力学分析选项 .....	102	7.3.4 处理变量并进行计算 .....	133
5.6.3 非线性选项 .....	103	7.3.5 变量的评价 .....	134
5.6.4 输出控制 .....	103	7.3.6 POST26 的其他功能 .....	135
5.7 创建多载荷步文件 .....	104		
<b>第 6 章 求解</b> .....	105		

第 8 章 线弹性静力学分析.....	137	10.3.2 定义层数据 .....	161
8.1 静力学分析概述 .....	137	10.3.3 覆盖程序计算的截面属性 .....	161
8.2 线弹性静力学分析基本理论 .....	137	10.3.4 指定可变厚度的壳体 .....	161
8.2.1 结构矩阵的导出 .....	137	10.3.5 设置截面属性点 .....	161
8.2.2 线弹性静力学求解原理 .....	139	10.3.6 把面与截面相关联 .....	162
8.3 线弹性静力学分析步骤 .....	142	10.3.7 壳截面工具 .....	162
8.3.1 建立有限元模型 .....	142	10.4 如何定义变截面壳体 .....	164
8.3.2 激活静力学分析 .....	142	10.5 壳体结构分析工程实例 .....	164
8.3.3 设置“求解控制”对话框 .....	142	第 11 章 非线性分析 .....	167
8.3.4 施加载荷 .....	143	11.1 非线性分析种类 .....	167
8.3.5 求解 .....	144	11.1.1 几何非线性 .....	167
8.3.6 观察结果 .....	145	11.1.2 材料非线性 .....	167
8.4 线弹性静力学工程实例 .....	145	11.1.3 状态非线性 .....	167
第 9 章 梁结构分析.....	148	11.2 几何非线性 .....	168
9.1 概述 .....	148	11.2.1 几何非线性的类型 .....	168
9.2 梁横截面概述 .....	148	11.2.2 几何非线性基本理论 .....	168
9.3 理解创建梁横截面 .....	149	11.2.3 几何非线性分析中的应变种类 .....	170
9.3.1 定义梁横截面并关联 截面 ID 号 .....	149	11.2.4 几何非线性的输入与输出 .....	171
9.3.2 定义梁横截面几何尺寸并设置 截面属性点 .....	149	11.3 材料非线性 .....	172
9.3.3 使用 BEAM188 或 BEAM189 单元 模拟线模型 .....	150	11.3.1 材料非线性的概念 .....	172
9.4 创建梁横截面 .....	150	11.3.2 弹塑性理论基础 .....	173
9.4.1 使用梁工具去创建普通横截面 .....	151	11.3.3 常用的弹塑性模型定义方法 .....	178
9.4.2 使用用户定义网格建立自定义 横截面 .....	155	11.3.4 粘塑性理论基础 .....	184
9.4.3 创建具有网格加密和多种材料特性的 自定义截面 .....	156	11.3.5 粘塑性材料模型的定义方法 .....	186
9.4.4 定义复合截面 .....	156	11.3.6 蠕变理论基础 .....	186
9.4.5 定义渐变式梁 .....	157	11.3.7 蠕变模型的实验数据拟合方法 .....	190
9.5 管理横截面和用户网格库 .....	157	11.3.8 超弹材料理论基础 .....	193
9.6 梁结构分析工程实例 .....	158	11.3.9 超弹材料实验数据拟合 .....	198
第 10 章 壳结构分析 .....	160	11.4 求解非线性方程 .....	201
10.1 概述 .....	160	11.4.1 非线性方程求解方法 .....	201
10.2 理解壳体横截面 .....	160	11.4.2 非线性收敛准则 .....	203
10.3 创建壳体横截面 .....	160	11.4.3 预测器 .....	205
10.3.1 定义壳体横截面并关联一个截面 ID 号 .....	161	11.4.4 自适应下降 .....	206
		11.4.5 线性搜索 .....	206
		11.4.6 弧长法 .....	207
		11.5 非线性静态分析步骤 .....	210
		11.5.1 建立有限元模型 .....	210
		11.5.2 激活静力学分析 .....	210
		11.5.3 设置“求解控制”对话框 .....	210



11.5.4	设置分析选项	217	13.3.1	面-面接触单元简介	247
11.5.5	定义载荷	219	13.3.2	建立几何模型并划分网格	247
11.5.6	设置载荷步选项	219	13.3.3	识别接触对	247
11.5.7	求解	220	13.3.4	指定接触面和目标面	248
11.5.8	后处理	220	13.3.5	定义目标面	249
11.6	非线性分析工程实例	220	13.3.6	定义柔体的接触面	253
11.6.1	悬臂板的大变形分析	220	13.3.7	接触和目标面的几何修正	255
11.6.2	钓鱼竿的非线性分析	222	13.3.8	设置实常数和单元关键字选项	257
11.6.3	压力容器的弹塑性分析	225	13.3.9	控制刚性目标面的运动(刚体- 柔体接触)	276
11.6.4	循环载荷作用的力学响应分析	226	13.3.10	为变形体时间必要的 边界条件	278
11.6.5	螺栓的应力松弛分析	230	13.3.11	定义求解和载荷步选项	278
<b>第 12 章</b>	<b>屈曲分析</b>	<b>232</b>	13.3.12	求解	278
12.1	屈曲分析的类型	232	13.3.13	观察结果	278
12.1.1	非线性屈曲分析	232	13.4	热接触模拟	279
12.1.2	特征值屈曲分析	233	13.4.1	热接触行为与接触状态	279
12.2	非线性屈曲分析	233	13.4.2	自由热表面	280
12.2.1	施加载荷增量	233	13.4.3	目标面上的温度	280
12.2.2	自动时间步长功能	233	13.4.4	模拟热传导	280
12.2.3	不收敛解	234	13.4.5	模拟对流	281
12.2.4	施加初始缺陷或扰动	234	13.4.6	模拟辐射	281
12.2.5	注意事项	235	13.4.7	模拟摩擦生热	282
12.3	后屈曲分析	235	13.4.8	模拟外部热通量	282
12.4	特征值(线性)屈曲分析 步骤	236	13.5	接触分析工程实例	283
12.4.1	基本理论	236	13.5.1	过盈装配分析	283
12.4.2	特征值屈曲分析的步骤	237	13.5.2	滚压成型分析	285
12.5	屈曲分析工程实例	240	13.5.3	橡胶圆筒的大变形接触分析	289
12.5.1	超长杆的特征值屈曲分析	240	13.5.4	平面拉弯成型分析	291
12.5.2	薄壁圆筒的特征值屈曲分析	241	13.5.5	圆柱滚子轴承的接触分析	294
12.5.3	铰接薄壳的后屈曲分析	242	13.5.6	球体与平面的接触分析	297
<b>第 13 章</b>	<b>接触分析</b>	<b>245</b>	13.5.7	橡胶密封圈分析	299
13.1	概述	245	13.5.8	螺栓连接有限元分析	301
13.2	接触问题分类	245	<b>第 14 章</b>	<b>装配体分析</b>	<b>306</b>
13.2.1	面-面接触单元	246	14.1	概述	306
13.2.2	点-面接触单元	246	14.2	实体-实体和壳体-壳体的 装配体	307
13.2.3	三维线-线接触	246	14.3	壳体-实体的装配体	308
13.2.4	线-面接触	246	14.4	基于面的约束	310
13.2.5	点-点接触单元	247			
13.3	面-面接触分析	247			

14.4.1 定义基于面的约束 .....	311	16.3.5 非对称法 .....	330
14.4.2 定义影响范围 (PINB) .....	312	16.3.6 阻尼法 .....	330
14.4.3 基于面约束的自由度 .....	312	16.3.7 QR 阻尼法 .....	330
14.4.4 指定一个局部坐标系 .....	312	16.4 模态分析基本流程 .....	330
14.4.5 分布力约束的几点说明 .....	313	16.4.1 建立有限元模型 .....	330
14.4.6 刚性面约束的几点说明 .....	314	16.4.2 划分网格 .....	331
14.4.7 模拟梁-实体的装配体 .....	314	16.4.3 激活模态求解 .....	331
14.5 模拟刚体 .....	314	16.4.4 设置模态分析选项 .....	331
14.6 发现过度约束并消除 .....	315	16.4.5 定义载荷 .....	334
14.7 使用内部 MPC 的限制和注意 事项 .....	315	16.4.6 设置载荷步选项 .....	334
14.8 装配体分析工程实例 .....	316	16.4.7 求解 .....	334
14.8.1 轴-支撑结构装配体分析 .....	316	16.4.8 观察结果 .....	334
14.8.2 壳体-实体装配体分析 .....	317	16.5 缩减法模态分析 .....	336
<b>第 15 章 阻尼分析</b> .....	<b>320</b>	16.5.1 程序选择主自由度 .....	336
15.1 ANSYS 支持的阻尼类型 .....	320	16.5.2 用户选择主自由度 .....	336
15.2 瞬态分析和模态分析支持的 阻尼类型 .....	320	16.5.3 选择主自由度的总体建议 .....	337
15.2.1 基本理论 .....	320	16.6 预应力模态分析 .....	337
15.2.2 输入方法 .....	321	16.7 大变形预应力模态分析 .....	338
15.3 谐响应分析支持的阻尼类型 .....	321	16.8 模态分析工程实例 .....	338
15.3.1 基本理论 .....	321	16.8.1 齿轮装配体模态分析 .....	338
15.3.2 输入方法 .....	322	16.8.2 多材料的复模态分析 .....	343
15.4 模态叠加法支持的阻尼类型 .....	324	16.8.3 旋转叶片的预应力模态分析 .....	345
15.4.1 基本理论 .....	324	<b>第 17 章 瞬态动力学分析</b> .....	<b>349</b>
15.4.2 输入方法 .....	325	17.1 瞬态动力学分析的概念 .....	349
15.5 瑞雷阻尼 .....	326	17.2 瞬态动力学的理论基础 .....	349
<b>第 16 章 模态分析</b> .....	<b>327</b>	17.2.1 假设和限制 .....	349
16.1 模态分析的概念 .....	327	17.2.2 求解瞬态动力学方程的基本 方法 .....	349
16.2 模态分析基本理论 .....	327	17.2.3 积分时间步长选取准则 .....	353
16.2.1 无阻尼模态分析理论 .....	327	17.2.4 自动时间步长 .....	355
16.2.2 有阻尼模态分析理论 .....	328	17.3 完全法瞬态动力学分析步骤 .....	355
16.2.3 重复的固有频率 .....	328	17.3.1 建立有限元模型 .....	355
16.2.4 复数特征解 .....	328	17.3.2 激活完全法求解瞬态动力学 .....	356
16.3 模态计算方法 .....	329	17.3.3 设置初始条件 .....	356
16.3.1 分块 Lanczos 法 .....	329	17.3.4 设置“求解控制”对话框 .....	358
16.3.2 子空间法 .....	329	17.3.5 设置分析选项 .....	360
16.3.3 PowerDynamics 法 .....	329	17.3.6 施加载荷 .....	361
16.3.4 缩减法 .....	330	17.3.7 设置载荷步选项 .....	361
		17.3.8 求解 .....	361

17.3.9 观察结果 .....	361	分析 .....	377
17.4 缩减法瞬态动力学分析		17.7.3 滑动摩擦接触分析 .....	379
步骤 .....	362	第 18 章 谐响应分析 .....	383
17.4.1 建立有限元模型 .....	362	18.1 谐响应分析的概念 .....	383
17.4.2 激活缩减法求解瞬态动力学 ..	362	18.2 谐响应分析理论基础 .....	383
17.4.3 设置分析选项 .....	363	18.3 完全法谐响应分析步骤 .....	384
17.4.4 定义主自由度 .....	363	18.3.1 建立有限元模型 .....	384
17.4.5 定义间隙条件 .....	363	18.3.2 激活谐响应分析 .....	384
17.4.6 定义初始条件 .....	364	18.3.3 设置谐响应分析选项 .....	385
17.4.7 定义载荷 .....	365	18.3.4 定义载荷 .....	386
17.4.8 定义载荷步 .....	365	18.3.5 定义载荷步 .....	387
17.4.9 求解 .....	368	18.3.6 求解 .....	388
17.4.10 观察结果 .....	368	18.3.7 观察结果 .....	388
17.4.11 扩展求解 .....	368	18.4 缩减法谐响应分析 .....	388
17.4.12 观察已扩展解的结果 .....	370	18.4.1 建立有限元模型 .....	388
17.5 模态叠加法瞬态动力学分析		18.4.2 激活谐响应分析 .....	388
步骤 .....	370	18.4.3 设置缩减法求解 .....	388
17.5.1 建立有限元模型 .....	370	18.4.4 定义主自由度 .....	389
17.5.2 进行模态分析 .....	370	18.4.5 定义载荷 .....	389
17.5.3 激活模态叠加法求解瞬态		18.4.6 定义载荷步 .....	389
动力学 .....	371	18.4.7 求解 .....	389
17.5.4 设置分析选项 .....	371	18.4.8 观察缩减法求解的结果 .....	389
17.5.5 定义间隙条件 .....	371	18.4.9 扩展求解 .....	390
17.5.6 定义初始条件 .....	372	18.4.10 观察已扩展解的结果 .....	391
17.5.7 定义载荷 .....	372	18.5 模态叠加法谐响应分析 .....	392
17.5.8 定义载荷步 .....	372	18.5.1 建立有限元模型 .....	392
17.5.9 求解 .....	372	18.5.2 获取模态分析解 .....	392
17.5.10 观察结果 .....	372	18.5.3 激活谐响应分析 .....	392
17.5.11 扩展求解 .....	372	18.5.4 设置模态叠加法求解 .....	392
17.6 有预应力瞬态动力学分析 .....	372	18.5.5 定义载荷 .....	393
17.6.1 有预应力的完全法瞬态动力		18.5.6 定义载荷步 .....	393
学分析 .....	372	18.5.7 开始求解 .....	394
17.6.2 有预应力的缩减法瞬态动力		18.5.8 扩展模态叠加解 .....	394
学分析 .....	373	18.5.9 观察结果 .....	394
17.6.3 有预应力的模态叠加法瞬态动力		18.6 有预应力的谐响应分析 .....	394
学分析 .....	373	18.6.1 有预应力的完全法谐响应	
17.7 瞬态动力学分析工程实例 .....	373	分析 .....	394
17.7.1 破碎锤的瞬态动力学分析 .....	373	18.6.2 有预应力的缩减法谐响应	
17.7.2 冲击载荷作用悬臂梁的阻尼振动		分析 .....	394



18.6.3 有预应力的模态叠加法谐响应分析 .....	395	19.5.8 处理多个 PSD 激励 .....	420
18.7 谐响应分析工程实例 .....	395	19.5.9 设置输出控制项 .....	421
18.7.1 碟片弹簧的谐响应分析 .....	395	19.5.10 开始求解 .....	421
18.7.2 扭杆的谐响应分析 .....	397	19.5.11 合并模态 .....	421
18.7.3 楔形梁的谐响应分析 .....	399	19.5.12 观察结果 .....	422
<b>第 19 章 谱分析 .....</b>	<b>402</b>	<b>19.6 随机振动分析结果应用 .....</b>	<b>424</b>
19.1 谱分析的概念 .....	402	19.6.1 随机振动结果与失效计算 .....	424
19.2 谱分析的种类 .....	402	19.6.2 随机疲劳失效 .....	424
19.2.1 响应谱分析 .....	402	<b>19.7 多点响应谱分析 .....</b>	<b>426</b>
19.2.2 动力设计分析方法 .....	403	19.7.1 建立有限元模型 .....	426
19.2.3 随机振动分析(功率谱密度) .....	403	19.7.2 获得模态解 .....	426
19.2.4 确定性分析与概率分析 .....	403	19.7.3 激活谱分析 .....	426
<b>19.3 谱分析的基本理论 .....</b>	<b>403</b>	19.7.4 设置谱分析类型 .....	426
19.3.1 ANSYS 的假设和限制 .....	403	19.7.5 定义载荷步选项 .....	427
19.3.2 响应谱分析的基本原理 .....	403	19.7.6 定义载荷 .....	428
19.3.3 参与因子和模态系数 .....	404	19.7.7 计算上述多点响应谱激励参与因子 .....	428
19.3.4 合并模态 .....	405	19.7.8 合并模态 .....	428
19.3.5 随机振动方法 .....	407	19.7.9 观察结果 .....	428
<b>19.4 单点响应谱分析步骤 .....</b>	<b>410</b>	<b>19.8 谱分析工程实例 .....</b>	<b>428</b>
19.4.1 建立有限元模型 .....	410	19.8.1 简支梁的随机振动分析 .....	428
19.4.2 获得模态解 .....	410	19.8.2 框架结构的单点响应谱分析 .....	430
19.4.3 激活谱分析 .....	410	<b>第 20 章 热分析 .....</b>	<b>433</b>
19.4.4 设置分析选项 .....	411	20.1 热分析的目的 .....	433
19.4.5 定义载荷步选项 .....	411	20.2 热分析的基本理论 .....	433
19.4.6 开始求解 .....	413	20.2.1 热分析的有限元控制方程 .....	433
19.4.7 退出求解器 .....	413	20.2.2 热分析的求解技术 .....	436
19.4.8 扩展模态 .....	414	<b>20.3 稳态热分析的步骤 .....</b>	<b>437</b>
19.4.9 合并模态 .....	415	20.3.1 建立有限元模型 .....	437
19.4.10 观察结果 .....	417	20.3.2 激活稳态热分析 .....	437
<b>19.5 随机振动(PSD)分析步骤 .....</b>	<b>417</b>	20.3.3 设置分析选项 .....	438
19.5.1 建立有限元模型 .....	417	20.3.4 定义载荷 .....	439
19.5.2 获得模态解 .....	417	20.3.5 定义载荷步选项 .....	441
19.5.3 激活谱分析 .....	417	20.3.6 求解 .....	443
19.5.4 设置分析选项 .....	417	20.3.7 后处理 .....	443
19.5.5 定义载荷步选项 .....	417	<b>20.4 瞬态传热 .....</b>	<b>444</b>
19.5.6 定义载荷 .....	418	20.4.1 建立有限元模型 .....	444
19.5.7 计算上述 PSD 激励参与因子 .....	419	20.4.2 激活瞬态热分析 .....	444
		20.4.3 建立初始条件 .....	445

20.4.4	设置载荷步选项	446	22.1	基于 VCCT 的裂纹扩展模拟	489
20.4.5	非线性选项	448	22.2	VCCT 裂纹扩展模拟过程	489
20.4.6	后处理	449	22.2.1	建立预先定义裂纹路径的有限元模型	489
20.4.7	相变问题	449	22.2.2	执行能量释放率计算	490
20.5	热-结构耦合分析	450	22.2.3	执行裂纹扩展计算	490
20.5.1	热应力分析的分类	450	22.2.4	裂纹扩展集定义	491
20.5.2	间接法进行热应力分析的步骤	451	22.3	裂纹扩展	491
20.6	热分析工程实例	451	22.4	断裂准则	492
20.6.1	多材料热接触的传热分析	451	22.4.1	临界能量释放率准则	492
20.6.2	液-固体相变分析	453	22.4.2	线性断裂准则	493
<b>第 21 章</b>	<b>断裂力学分析</b>	<b>456</b>	22.4.3	双线性断裂准则	493
21.1	断裂力学分析基础	456	22.4.4	B-K 断裂准则	494
21.1.1	裂纹类型	456	22.4.5	修正 B-K 断裂准则	494
21.1.2	断裂力学参数	456	22.4.6	幂率断裂准则	495
21.2	求解断裂力学问题	458	22.4.7	用户自定义断裂准则	496
21.2.1	建模裂纹尖端区域模型	459	22.5	裂纹扩展分析工程实例	498
21.2.2	计算断裂参数	460	<b>第 23 章</b>	<b>转子动力学分析</b>	<b>504</b>
21.3	J 积分	460	23.1	概述	504
21.3.1	理解域积分法	460	23.1.1	通用动力学方程	504
21.3.2	J 积分计算过程	462	23.1.2	有限单元法模拟转子动力学的优点	504
21.4	能量释放率	464	23.2	转子动力学分析工具	505
21.4.1	使用 VCCT 计算能量释放率	464	23.2.1	常用的命令	505
21.4.2	能量释放率计算步骤	466	23.2.2	常用的单元	505
21.5	应力强度因子	468	23.2.3	常用的术语	505
21.5.1	基于相互作用积分法计算应力强度因子	468	23.3	建立转子动力学模型	508
21.5.2	使用位移外推法计算应力强度因子	471	23.3.1	建立模型	508
21.6	断裂力学计算工程实例	472	23.3.2	建立轴承模型	508
21.6.1	薄板边裂纹的应力强度因子计算	472	23.3.3	建立模型其他部件	511
21.6.2	冲击载荷作用下的动态应力强度因子计算	474	23.4	施加载荷和约束	512
21.6.3	三维应力强度因子的计算	479	23.4.1	瞬态分析时施加旋转力	512
21.6.4	界面裂纹能量释放率的计算	483	23.4.2	谐响应分析时施加旋转力	512
21.6.5	热应力作用下的断裂力学分析	486	23.5	求解转子动力学问题	513
<b>第 22 章</b>	<b>裂纹扩展模拟</b>	<b>489</b>	23.5.1	添加阻尼	513
			23.5.2	指定旋转速度并且考虑陀螺效应	513
			23.5.3	求解随后预应力结构坎贝尔分析	513



23.5.4 求解承受同步或不同步力的谐 响应问题 .....	514
23.5.5 选择合适的求解器 .....	514
23.6 转子动力学的后处理 .....	515
23.6.1 处理复数结果 .....	515
23.6.2 观察运动轨迹 .....	516
23.6.3 输出轨迹特性 .....	517
23.6.4 动画显示轨迹 .....	517
23.6.5 完成瞬态分析后观察轨迹 .....	517
23.6.6 后处理轴承和反力 .....	517
23.6.7 坎贝尔图 .....	518
23.7 转子动力学分析工程实例 .....	521
23.7.1 单盘转子的临界转速分析 .....	521
23.7.2 转子系统不平衡激励的谐响应 分析 .....	522
23.7.3 转子系统启动时的瞬态动力学 分析 .....	526
23.7.4 冲击载荷作用下的转子系统响应 分析 .....	532



# 第 1 章 有限元方法与 ANSYS



## 1.1 有限元方法的基本原理

在工程结构设计和优化中，常常运用数学和力学的知识将实际问题抽象为它们应遵循的基本方程和相应的边界条件。但是对于大多数的工程技术问题，由于物体的几何形状和实际载荷作用方式复杂，只有极少数方程性质比较简单、几何边界条件相当规则的问题，可按经典的弹性力学和塑性力学方法获得解析解，大多数问题获得解析解是非常困难的，有时甚至是不可能的。为了克服这种困难，人们提出了数值解法，如有限单元法、有限差分法、边界元法和离散元法等，由于有限元法具有坚实的理论基础和解决复杂工程问题的能力，所以在工程设计中得到了广泛的应用。

有限元法的基本思想是将一个连续变化的求解区域进行离散化，即把求解区域分割成彼此用节点互相联系的有限个单元，在单元内假设近似解的插值多项式，用有限个节点上的未知参数来表示单元特征，然后使用适当的方法，将各个单元的关系组合成包含这些未知数的方程组，求解方程组，即可得到各节点处的未知参数并利用插值函数求出近似解。为了得到更精确的解，用户可以缩小单元尺寸，如果单元满足收敛条件，则近似解最后收敛于真实解。有限元法按照所选用的基本未知量不同，可分为位移法和力法，由于位移法便于编写计算机通用程序，所以 ANSYS 使用位移法，即以位移为未知量得出位移基本解，然后根据几何方程和材料的应力-应变关系，得出应变场和应力场。

有限元方法到现在已经有 50 多年的历史，其应用已经从结构静力学分析发展到动力学分析、波动分析、稳定性分析。从平面问题发展到空间问题、板壳问题。研究的对象从线性材料扩展到弹塑性、超弹、蠕变、粘弹性、粘塑性、材料损伤、热粘弹性、热粘弹塑性、复合材料和非均匀材料，从小变形的弹性问题发展到大变形的几何非线性问题；由结构计算分析、校核问题扩展到结构优化设计问题；由固体力学扩展到流体力学，继而又渗透到热场分析、电磁场、声学等非力学领域并且可以完成多场耦合问题的分析与计算。可以预计，随着计算机技术的进一步发展，有限元方法作为广泛应用的数值分析工具，必将在科学技术发展和经济建设中发挥更大的作用。

## 1.2 ANSYS 14.0 的新功能

ANSYS 公司作为世界领先的工程仿真软件供应商，40 年间为全球各行各业产品研发与优化提供能完全集成多物理场仿真软件工具的通用平台。ANSYS 提供综合全面的工程仿真解决方案套件，使用户几乎能访问其设计流程所需的任何领域的工程仿真。从设计理念到最终测试阶段，验证并排除新产品的 design 问题，ANSYS 软件能够显著加快设计和开发周期，

降低成本，洞察新产品性能。

2011年12月8日，ANSYS已推出其工程仿真技术套件的最新版本：ANSYS®14.0。此套件可以优化产品开发过程，降低开发周期和成本，促进产品创新。

ANSYS 14.0 拥有的领先技术，包括数百个新的先进功能，确保用户在将新产品推向市场时能更方便快捷，成本控制更得力，对于他们希望得到的结果更充满信心。ANSYS Workbench™作为业界最广泛、最深入的先进工程仿真技术套件的框架，提供了前所未有的生产力。例如，更紧密地整合更多物理应用，可以强化客户的仿真能力，使客户可以充满信心地预测他们的产品在实际生活中茁壮成长。本书主要向用户介绍 Mechanical APDL 模块，即经典模块的改进。

## 1.2.1 接触分析的改进

### 1. 接触稳态阻尼功能

ANSYS 14.0 为用户提供了接触稳态阻尼功能，该项技术可以有效地解决在接触分析中，如果初始接触条件没有建立好，在接触分析开始时会产生刚体位移造成计算收敛困难的问题。对于标准分析或粗糙接触分析，用户可以使用实常数 FDMN 和 FDMT 定义接触法向和切向上的接触阻尼比例因子。

### 2. 尖叫阻尼

在汽车设计中，制动尖叫分析非常重要，为此 ANSYS 14.0 提供了尖叫阻尼分析功能。尖叫阻尼分析涉及界面之间的滑动摩擦接触问题。ANSYS 使用 QRDAMP 阻尼或 DAMP 阻尼复数特征值提取方法来计算尖叫阻尼对阻尼矩阵的贡献。

### 3. 基于接触模型的面投影技术

ANSYS 14.0 将基于接触的面投影技术从三维分析扩展到了二维接触分析和多点约束分析，并支持所有的面-面接触分析单元。该项技术通常会需要更多的计算时间，因此该技术适用于获得局部准确应力的情况。

### 4. 二维接触面和目标面的几何修正技术

ANSYS 14.0 将几何修正技术从三维接触分析扩展到了二维接触分析，将该项计算应用到接触分析存在圆形或接近圆形接触面的问题可以减少有限元网格离散化误差并且可以提供接触应力的计算精度。

### 5. 固结温度

在多数焊接过程中，接触面周围的材料超过临界温度后，表面开始融化并且和其他部件相固结 (bond)。ANSYS 14.0 在接触分析中增加了一个新实常数 TBND，可以允许用户指定该临界温度以便模拟该力学行为。

## 1.2.2 单元和非线性计算

### 1. 网格重分计算

ANSYS 14.0 中的网格重画功能 (Rezoning) 在三维分析中支持表格形式的载荷，并将支持的材料模型扩大到了几乎所有的材料模型，但除铸铁、混凝土、微平面、形状记忆合金和膨胀材料模型。

## 2. 增加了支持形状记忆合金和超弹材料模型的管道单元

在 ANSYS 14.0 中使用 PIPE288 单元和 PIPE289 单元并结合实体管道截面，用户可以轻松模拟特殊材料模型的梁结构，如超弹材料和形状记忆合金材料。

## 3. 支持二维数组定义离散壳体厚度

ANSYS 14.0 具有支持添加离散厚度壳体的功能。当用户把壳体厚度指定为函数形式时，次节点选项会使用厚度和节点相关联的一维数组定义壳体厚度。此外，ANSYS 14.0 中还增加了 NOD2 选项允许用户在二维数组中直接将壳体厚度与节点号相关联。

### 1.2.3 线性动力学

#### 1. 阻尼

在 ANSYS 14.0 中进行完全法谐响应分析和瞬态分析时，用户可以直接定义与材料相关的质量阻尼系数和刚度阻尼系数。对于模态叠加法，与材料相关的阻尼比可以直接使用 MP 和 DMPR 命令进行定义。

#### 2. 线性非预应力模态分析

在 ANSYS 14.0 中增加了用于分析计算制动尖叫问题的线性非预应力模态分析，该项技术操作简单，并且计算精度高。

#### 3. 模态和预应力谐响应分析中的热载荷

如果在模态分析或谐响应分析中定义了热载荷，则在 ANSYS 14.0 中用户可以使用新的 THEXPAND 命令来忽略其对模态和谐响应载荷的贡献。

#### 4. 谱分析

在 ANSYS 14.0 中，质量阻尼系数支持谱分析和功率谱密度分析，即随机振动分析 (PSD)。改进后的 RESP 命令允许用户从输入的加速度中生成响应谱，并且可以确定伪速度和伪加速度响应谱。在 PSD 和多点响应谱分析中，可以输入的谱值数据点最多支持 200 个。

#### 5. 谱合并

在谱分析中，ANSYS 14.0 支持 CQC、DSUM、GRP、NRLSUM、PSDCOM、ROSE 和 SRSS 共 7 种模态合并方法，并且支持合并静态和惯性力。

### 1.2.4 材料模型与断裂力学

#### 1. 基于 VCCT 的裂纹扩展模拟

ANSYS 14.0 中新增加了基于能量释放率来计算模拟裂纹扩展的功能。该方法基于虚拟裂纹闭合技术 (VCCT) 模拟沿预定路径扩展的裂纹。该方法非常适合模拟层合板的界面开裂问题，也适用于模拟各向同性材料的裂纹扩展。

#### 2. Chaboche 材料模型曲线拟合功能

ANSYS 14.0 的材料模型曲线拟合功能增加了 Chaboche 材料模型曲线拟合功能。曲线拟合功能允许用户将试验数据与拟合的非线性材料模型进行比较以确定最合适的材料模型。

#### 3. 改进的初始状态能力

ANSYS 14.0 的初始状态功能得到了很大的增强，它可以考虑初始蠕变和用户自定义状态变量。初始状态技术以前是基于单元进行计算的，在 ANSYS 14.0 中已经扩展到基于节点计算。对于复合材料单元，用户可以将初始状态施加到每一层的每一个节点。