



ANSYS

11.0

周长城 胡仁喜 熊文波 编著
飞思数码产品研发中心 监制

基础与典型范例



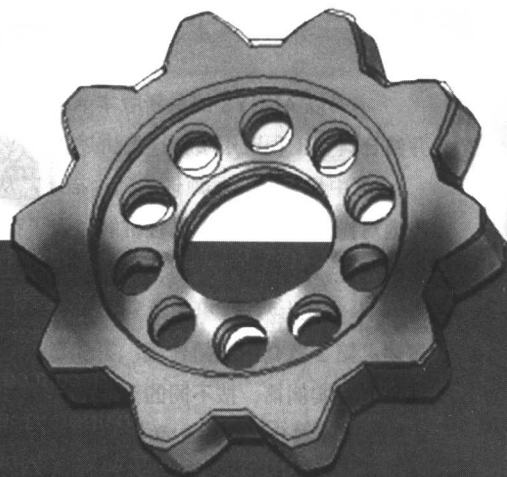
电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

书中实例源文件、效果图片
操作步骤的多媒体视频教程



CAD/教学基地
CAM/CAE



ANSYS

11.0

周长城 胡仁喜 熊文波 编著
飞思数码产品研发中心 监制

基础与典型范例

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS11.0 为依据,对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行详细的介绍,并结合典型工程应用实例详细讲述 ANSYS 具体工程应用方法。

书中尽量避开了烦琐的理论描述,从实际应用出发,结合作者使用该软件的经验,实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令,在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书分为两篇,第 1 篇为操作基础篇,详细介绍 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法,分为 6 章:第 1 章为 ANSYS 概述;第 2 章介绍几何建模;第 3 章介绍划分网格;第 4 章介绍施加载荷;第 5 章介绍求解;第 6 章介绍后处理。第 2 篇为专题实例篇,按不同的分析专题讲解各种分析专题的参数设置方法与技巧,分为 9 章:第 7 章介绍静力学分析;第 8 章介绍模态分析;第 9 章介绍谐响应分析;第 10 章介绍瞬态动力学分析;第 11 章介绍谱分析;第 12 章介绍非线性分析;第 13 章介绍接触问题分析;第 14 章介绍结构屈曲分析;第 15 章介绍优化设计。

本书随书光盘包含书中实例源文件、效果图片,以及操作步骤的多媒体视频教程。

本书适用于 ANSYS 软件的初中级用户,以及有初步使用经验的技术人员;本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材,也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 11.0 基础与典型范例 / 周长城, 胡仁喜, 熊文波编著. —北京: 电子工业出版社, 2007.10

(CAD/CAM/CAE 教学基地)

ISBN 978-7-121-05001-5

I. A… II. ①周…②胡…③熊… III. 有限元分析—应用程序, ANSYS 11.0 IV. O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139611 号

责任编辑: 徐 磊

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 850×1168 1/16 印张: 29.25 字数: 936 千字

印 次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 48.00 元 (含光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

随着计算力学、计算数学、工程管理学,特别是信息技术的飞速发展,数值模拟技术日趋成熟。数值模拟可以广泛应用到土木、机械、电子、能源、冶金、国防军工、航天航空等诸多领域,并对这些领域产生深远的影响。

有限单元法作为数值计算方法是在工程分析领域应用较为广泛的一种计算方法,自20世纪中叶以来,以其独有的计算优势得到了广泛地发展和应用,已出现了不同的有限元算法,并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展,各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS软件以它的多物理场耦合分析功能而成为CAE软件的应用主流,在工程分析应用中得到了较为广泛的应用。

ANSYS软件是美国ANSYS公司研制的大型通用有限元分析(FEA)软件,它是世界范围内增长最快的CAE软件,能够进行包括结构、热、声、流体,以及电磁场等学科的研究,在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医药、轻工、地矿、水利、日用家电等领域有着广泛的应用。ANSYS的功能强大,操作简单方便,现在它已成为国际最流行的有限元分析软件,在历年FEA评比中都名列第一。目前,中国有100多所理工院校采用ANSYS软件进行有限元分析或作为标准教学软件。

本书以ANSYS的最新版本ANSYS11.0为依据,对ANSYS分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行详细的介绍,并结合典型工程应用实例详细讲述ANSYS具体工程应用方法。

书中尽量避开了烦琐的理论描述,从实际应用出发,结合作者使用该软件的经验,实例部分采用GUI方式一步一步地对操作过程和步骤进行讲解。为了帮助用户熟悉ANSYS的相关操作命令,在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书分为两篇,第1篇为操作基础篇,详细介绍ANSYS分析全流程的基本步骤和方法,分为6章:第1章为ANSYS概述;第2章介绍几何建模;第3章介绍划分网格;第4章介绍施加载荷;第5章介绍求解;第6章介绍后处理。第2篇为专题实例篇,按不同的分析专题讲解各种分析专题的参数设置方法与技巧,分为9章:第7章介绍静力学分析;第8章介绍模态分析;第9章介绍谐响应分析;第10章介绍瞬态动力学分析;第11章介绍谱分析;第12章介绍非线性分析;第13章介绍接触问题分析;第14章介绍结构屈曲分析;第15章介绍优化设计。

本书随书光盘包含书中实例源文件、效果图片,以及操作步骤的多媒体视频教程。

本书由山东理工大学的周长城教授和北京理工大学的胡仁喜博士,以及北京航空航天大学的熊文波博士主编。此外,左、许洪、刘昌丽、熊慧、王敏、周冰、董伟、李瑞、王兵学、袁涛、王渊峰、李世强、周广芬、李鹏、陈丽芹、孟清华、李广荣、郑长松、王佩楷、王文平等参加了资料整理和编排工作,在此编者向他们表示衷心的感谢。

本书适用于 ANSYS 软件的初中级用户, 以及有初步使用经验的技术人员; 本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材, 也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。另外, 由于时间仓促, 加之作者的水平有限, 缺点和错误在所难免, 恳请专家和广大读者不吝赐教, 可联系 win760520@126.com 批评指正。

编著者
2007 年 9 月

 联系方式

咨询电话: (010) 68134545 88254160

电子邮件: support@fecit.com.cn

服务网址: <http://www.fecit.com.cn> <http://www.fecit.net>

通用网址: 计算机图书、飞思、飞思教育、飞思科技、FECIT

目 录

第 1 篇 操作基础篇

第 1 章 ANSYS 概述	3
1.1 CAE 软件简介	4
1.2 有限元法简介	5
1.2.1 有限元法的基本思想	5
1.2.2 有限元法的特点	6
1.3 ANSYS 简介	6
1.3.1 ANSYS 的发展	7
1.3.2 ANSYS 的功能	7
1.4 ANSYS 11.0 特点	8
1.4.1 ANSYS 11.0 版本的新特点	8
1.4.2 ANSYS 11.0 运行环境配置	11
1.5 程序结构	12
1.5.1 处理器	12
1.5.2 文件格式	12
1.5.3 输入方式	12
1.5.4 输出文件类型	13
1.6 ANSYS 分析的基本过程	13
1.6.1 前处理	13
1.6.2 加载并求解	14
1.6.3 后处理	14
1.6.4 实例导航	14
1.7 本章小结	16
第 2 章 几何建模	17
2.1 几何建模概论	18
2.1.1 自底向上创建几何模型	18
2.1.2 自顶向下创建几何模型	18
2.1.3 布尔运算操作	19
2.1.4 拖拉和旋转	19
2.1.5 移动和复制	19
2.1.6 修改模型 (清除和删除)	20
2.1.7 从 IGES 文件几何模型导入到 ANSYS	20
2.2 坐标系简介	20
2.2.1 总体和局部坐标系	21
2.2.2 显示坐标系	23
2.2.3 节点坐标系	23

2.2.4 单元坐标系	24
2.2.5 结果坐标系	24
2.3 工作平面的使用	25
2.3.1 定义一个新的工作平面	25
2.3.2 控制工作平面的显示和样式	26
2.3.3 移动工作平面	26
2.3.4 旋转工作平面	26
2.3.5 还原一个已定义的工作平面	27
2.3.6 工作平面的高级用途	27
2.4 自底向上创建几何模型	29
2.4.1 关键点	29
2.4.2 硬点	30
2.4.3 线	31
2.4.4 面	33
2.4.5 体	34
2.5 自顶向下创建几何模型 (体素)	35
2.5.1 创建面体素	35
2.5.2 创建实体体素	36
2.6 使用布尔操作来修正几何模型	37
2.6.1 布尔运算的设置	37
2.6.2 布尔运算之后的图元编号	38
2.6.3 交运算	38
2.6.4 两两相交	39
2.6.5 相加	40
2.6.6 相减	40
2.6.7 利用工作平面进行减运算	41
2.6.8 搭接	41
2.6.9 分割	42
2.6.10 粘接 (合并)	42
2.7 移动、复制和缩放几何模型	42
2.7.1 按照样本生成图元	43
2.7.2 由对称映像生成图元	43
2.7.3 将样本图元转换坐标系	43
2.7.4 实体模型图元的缩放	44
2.8 从 IGES 文件中将几何模型导入到 ANSYS	44
2.8.1 使用 SMOOTH 选项	45
2.8.2 使用 FACETED 选项	45
2.9 实例导航	46
2.9.1 自底向上建立药柱模型	46

2.9.2 布尔操作建立药柱模型	51	3.7.4 修改单元属性	86
2.9.3 导入 SolidWorks 中 创建的药柱模型	53	3.8 直接通过节点和单元 生成有限元模型	87
2.10 本章小结	55	3.8.1 节点	87
第 3 章 划分网格	57	3.8.2 单元	88
3.1 有限元网格概论	58	3.9 编号控制	90
3.2 设定单元属性	58	3.9.1 合并重复项	90
3.2.1 生成单元属性表	59	3.9.2 编号压缩	91
3.2.2 在划分网格之前 分配单元属性	59	3.9.3 设定起始编号	92
3.3 网格划分的控制	61	3.9.4 编号偏差	92
3.3.1 ANSYS 网格划分工具 (MeshTool)	61	3.10 实例导航	93
3.3.2 单元形状	62	3.10.1 采用智能分网	94
3.3.3 选择自由或映射网格划分	62	3.10.2 采用扫略分网	95
3.3.4 控制单元边中节点的位置	63	3.10.3 采用延伸分网	99
3.3.5 划分自由网格时的单元 尺寸控制 (SmartSizing)	63	3.11 本章小结	102
3.3.6 映射网格划分中单元的 默认尺寸	64	第 4 章 施加载荷	103
3.3.7 局部网格划分控制	65	4.1 载荷概论	104
3.3.8 内部网格划分控制	65	4.1.1 什么是载荷	104
3.3.9 生成过渡棱锥单元	67	4.1.2 载荷步、子步和平衡迭代	104
3.3.10 将退化的四面体单元 转化为非退化的形式	67	4.1.3 时间参数	105
3.3.11 执行层网格划分	68	4.1.4 阶跃载荷与坡道载荷	106
3.4 自由网格划分和映射网格划分控制	69	4.2 施加载荷	107
3.4.1 自由网格划分	69	4.2.1 实体模型载荷与 有限单元载荷	107
3.4.2 映射网格划分	70	4.2.2 施加载荷	107
3.5 给实体模型划分有限元网格	74	4.2.3 轴对称载荷与反作用力	112
3.5.1 用 xMESH 命令生成网格	74	4.2.4 利用表格来施加载荷	113
3.5.2 生成带方向节点的梁 单元网格	75	4.2.5 利用函数来施加载荷 和边界条件	115
3.5.3 在分界线或分界面处 生成单位厚度的界面单元	76	4.3 设定载荷步选项	117
3.6 延伸和扫略生成有限元模型	77	4.3.1 通用选项	117
3.6.1 延伸 (Extrude) 生成网格	77	4.3.2 动力学分析选项	120
3.6.2 扫略 (VSWEEP) 生成网格	79	4.3.3 非线性选项	120
3.7 修正有限元模型	81	4.3.4 输出控制	121
3.7.1 局部细化网格	82	4.3.5 Biot-Savart 选项	122
3.7.2 移动和复制节点和单元	84	4.3.6 谱分析选项	122
3.7.3 控制面、线和单元的法向	85	4.3.7 创建多载荷步文件	122
		4.4 实例导航	123
		4.4.1 单载荷步的施加	124
		4.4.2 多载荷步的施加	126
		4.4.3 表格及函数载荷的施加	129
		4.5 本章小结	130

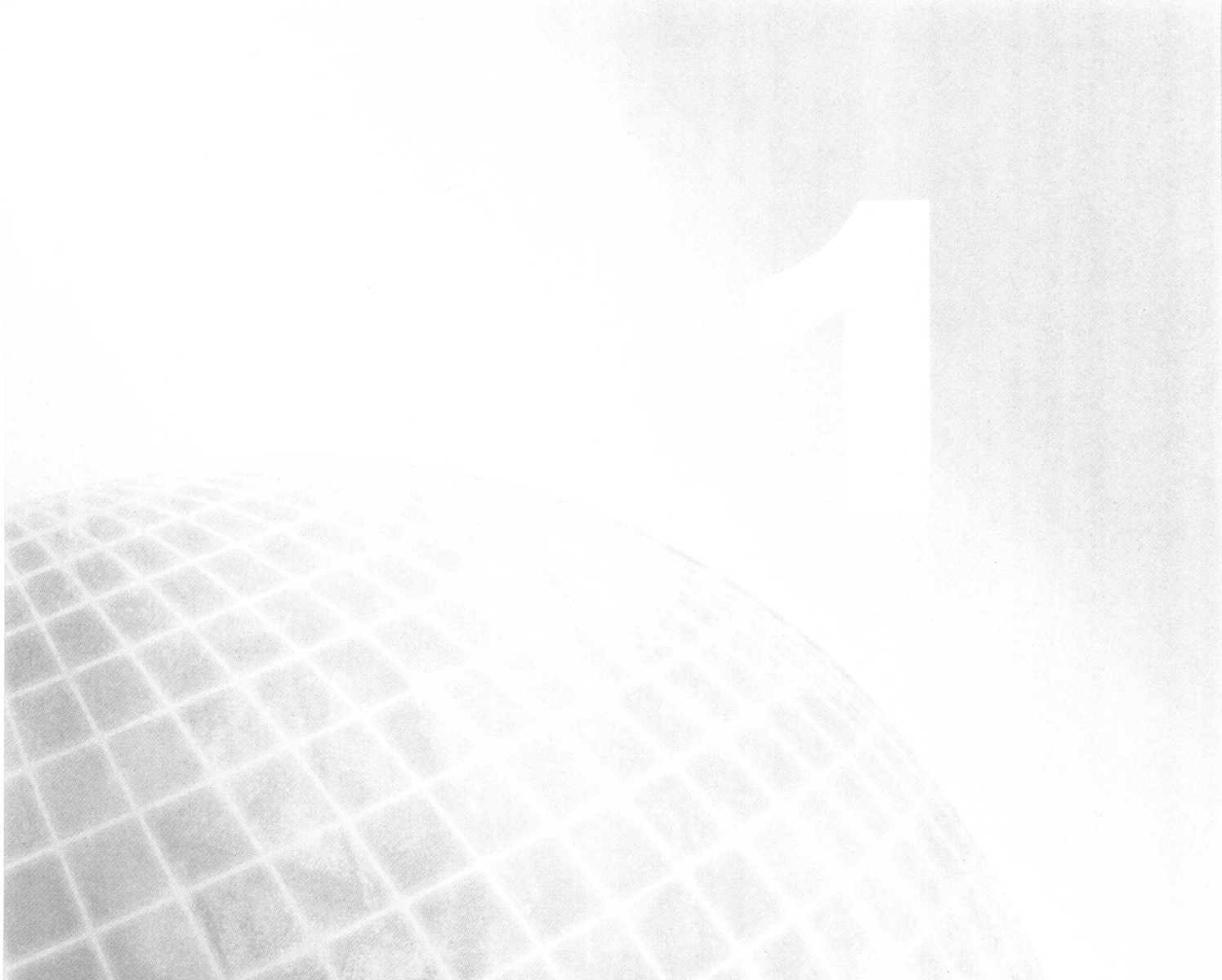
第 5 章 求解	131
5.1 求解概论	132
5.1.1 使用直接求解法	132
5.1.2 使用稀疏矩阵直接 解法求解器	133
5.1.3 使用雅克比共轭梯度法 求解器	133
5.1.4 使用不完全分解共轭梯度法 求解器	133
5.1.5 使用预条件共轭梯度法 求解器	134
5.1.6 使用自动迭代解法选项	134
5.1.7 获得解答	135
5.2 利用特定的求解控制器来 指定求解类型	135
5.2.1 使用【Abridged Solution】 菜单选项	136
5.2.2 使用求解控制对话框	136
5.3 多载荷步求解	137
5.3.1 多重求解法	137
5.3.2 使用载荷步文件法	138
5.3.3 使用数组参数法 (矩阵参数法)	138
5.4 重新启动分析	140
5.4.1 重新启动一个分析	140
5.4.2 多载荷步文件的重启动分析	143
5.5 预测求解时间和估计文件大小	145
5.5.1 估计运算时间	145
5.5.2 估计文件的大小	146
5.5.3 估计内存需求	146
5.6 实例导航	146
5.6.1 单载荷步求解	146
5.6.2 多载荷步求解	146
5.7 本章小结	147
第 6 章 后处理	149
6.1 后处理概述	150
6.1.1 什么是后处理	150
6.1.2 结果文件	150
6.1.3 后处理可用的数据类型	151
6.2 通用后处理器 (POST1)	151
6.2.1 将数据结果读入数据库	151
6.2.2 图像显示结果	157

6.2.3 列表显示结果	162
6.2.4 表面操作	168
6.2.5 映射结果到某一路径上	171
6.2.6 将结果旋转到不同 坐标系中显示	175
6.3 时间历程后处理 (POST26)	177
6.3.1 定义和储存 POST26 变量	177
6.3.2 检查变量	179
6.3.3 POST26 后处理器的 其他功能	181
6.4 实例导航	182
6.4.1 通用后处理器	182
6.4.2 时间历程处理器	190
6.5 本章小结	192
第 2 篇 专题实例篇	
第 7 章 静力学分析	195
7.1 静力学概论	196
7.2 静力学分析的基本步骤	196
7.2.1 建立模型	196
7.2.2 设置求解控制选项	197
7.2.3 设置其他求解选项	200
7.2.4 施加载荷	203
7.2.5 求解	204
7.2.6 检查结果	205
7.3 平面问题静力分析实例	206
7.3.1 分析问题	207
7.3.2 建立模型	207
7.3.3 定义边界条件并求解	219
7.3.4 查看结果	221
7.4 周期对称结构的静力分析实例	224
7.4.1 分析问题	224
7.4.2 建立模型	225
7.4.3 定义边界条件并求解	232
7.4.4 查看结果	234
7.5 本章小结	238
第 8 章 模态分析	239
8.1 模态分析概论	240
8.2 模态分析的基本步骤	240
8.2.1 建模	240
8.2.2 加载及求解	240

8.2.3 扩展模态	243	10.2.8 后处理	292
8.2.4 观察结果和后处理	245	10.3 阻尼振动系统的自由	
8.3 齿轮的模态分析实例	246	振动分析实例	294
8.3.1 分析问题	246	10.3.1 分析问题	294
8.3.2 建立模型	246	10.3.2 建立模型	295
8.3.3 进行模态设置、定义边界		10.3.3 进行瞬态动力分析设置、	
条件并求解	252	定义边界条件并求解	300
8.3.4 查看结果	255	10.3.4 查看结果	304
8.4 本章小结	257	10.4 本章小结	307
第 9 章 谐响应分析	259	第 11 章 谱分析	309
9.1 谐响应分析概论	260	11.1 谱分析概论	310
9.1.1 完全法 (Full Method)	260	11.1.1 响应谱	310
9.1.2 减缩方法		11.1.2 动力设计分析方法	
(Reduced Method)	261	(DDAM)	310
9.1.3 模态叠加法 (Mode		11.1.3 功率谱密度 (PSD)	310
Superposition Method)	261	11.2 谱分析的基本步骤	311
9.1.4 3 种方法的共同局限性	261	11.2.1 前处理	311
9.2 谐响应分析的基本步骤	262	11.2.2 模态分析	311
9.2.1 建立模型 (前处理)	262	11.2.3 谱分析	311
9.2.2 加载和求解	262	11.2.4 扩展模态	314
9.2.3 观察模型 (后处理)	267	11.2.5 合并模态	315
9.3 吉他琴弦的谐响应分析实例	269	11.2.6 后处理	316
9.3.1 分析问题	269	11.3 支撑平板的动力效果分析实例	318
9.3.2 建立模型	269	11.3.1 问题描述	318
9.3.3 查看结果	281	11.3.2 GUI 路径模式	318
9.4 本章小结	283	11.4 本章小结	339
第 10 章 瞬态动力学分析	285	第 12 章 非线性分析	341
10.1 瞬态动力学概论	286	12.1 非线性分析概论	342
10.1.1 完全法 (Full Method)	286	12.1.1 非线性行为的原因	342
10.1.2 模态叠加法 (Mode		12.1.2 非线性分析的基本信息	343
Superposition Method)	286	12.1.3 几何非线性	345
10.1.3 减缩法 (Reduced		12.1.4 材料非线性	346
Method)	287	12.1.5 其他非线性问题	350
10.2 瞬态动力学的基本步骤	287	12.2 非线性分析的基本步骤	350
10.2.1 前处理 (建模和分网)	287	12.2.1 前处理 (建模和分网)	351
10.2.2 建立初始条件	288	12.2.2 设置求解控制器	351
10.2.3 设定求解控制器	288	12.2.3 设定其他求解选项	353
10.2.4 设定其他求解选项	290	12.2.4 加载	354
10.2.5 施加载荷	290	12.2.5 求解	355
10.2.6 设定多载荷步	291	12.2.6 后处理	355
10.2.7 瞬态求解	292	12.3 材料非线性分析实例	357

12.3.1	分析问题	357
12.3.2	建立模型	358
12.3.3	定义边界条件并求解	363
12.3.4	查看结果	365
12.4	几何非线性分析实例	367
12.4.1	分析问题	368
12.4.2	建立模型	368
12.4.3	定义边界条件并求解	372
12.4.4	查看结果	376
12.5	本章小结	379
第 13 章	接触问题分析	381
13.1	接触问题概论	382
13.1.1	一般分类	382
13.1.2	接触单元	382
13.2	接触分析的步骤	383
13.2.1	建立模型并划分网格	383
13.2.2	识别接触对	384
13.2.3	定义刚性目标面	384
13.2.4	定义柔性体的接触面	385
13.2.5	设置实常数和单元关键点	387
13.2.6	控制刚性目标的运动	388
13.2.7	给变形体单元施加必要的边界条件	388
13.2.8	定义求解和载荷步选项	388
13.2.9	求解	389
13.2.10	检查结果	390
13.3	齿轮的接触分析实例	391
13.3.1	分析问题	391
13.3.2	建立模型	392
13.3.3	定义边界条件并求解	401
13.3.4	查看结果	403
13.4	本章小结	405

第 14 章	结构屈曲分析	407
14.1	结构屈曲概论	408
14.2	结构屈曲分析的基本步骤	408
14.2.1	前处理	408
14.2.2	获得静力解	408
14.2.3	获得特征值屈曲解	409
14.2.4	扩展解	410
14.2.5	后处理(观察结果)	412
14.3	桁架结构屈曲分析实例	412
14.3.1	问题描述	413
14.3.2	GUI 路径模式	413
14.4	本章小结	426
第 15 章	优化设计	427
15.1	优化设计概论	428
15.2	优化设计的基本步骤	430
15.2.1	生成分析文件	430
15.2.2	建立优化过程中的参数	433
15.2.3	进入 OPT 处理器, 指定分析文件 (OPT)	433
15.2.4	指定优化变量	434
15.2.5	选择优化工具或优化方法	434
15.2.6	指定优化循环控制方式	435
15.2.7	进行优化分析	436
15.2.8	查看设计序列结果	437
15.3	框架结构的优化设计实例	437
15.3.1	问题描述	437
15.3.2	GUI 方式	438
15.4	本章小结	456



第 1 篇 操作基础篇

本篇详细介绍 ANSYS 11.0 的理论基础和基本操作方法、流程，包括有限元分析基本理论、几何建模、划分网格、施加载荷、求解、后处理等 ANSYS 分析的整个流程的基本知识和技巧。内容详细具体，全程贯穿一个 ANSYS 分析实例对基本理论和基本操作方法进行串联和具体应用。

第

1

章

ANSYS 概述

本章导读

本章首先介绍 CAE 技术及其相关基础知识，并由此引出 ANSYS 的最新版本 11.0。随后，讲述新版本功能特点，以及 ANSYS 程序结构和分析的基本流程。

本章可以使读者对 ANSYS 有一个感性的认识。



CAE 软件简介



ANSYS 简介



ANSYS 11.0 产品及其功能



ANSYS 分析的基本过程

1.1 CAE 软件简介

传统的产品设计流程往往都是先由客户提出产品相关的规格及要求, 然后由设计人员进行概念设计, 接着由工业设计人员对产品进行外观设计及功能规划, 最后再由工程人员对产品进行详细设计, 设计方案确定以后, 便进行开模等投产前的工作。如图 1-1 所示可以发现, 各项产品测试皆在设计流程后期方能进行。因此, 一旦发生问题, 除了必须付出设计成本, 相关前置作业也需改动, 而且发现问题越晚, 重新设计所付出的成本将会越高, 若影响交货期或产品形象, 损失更是难以估计, 为了避免此情形的发生, 预期评估产品的特质便成为设计人员的重要课题。

计算力学、计算数学、工程管理学的运用, 特别是信息技术的飞速发展极大地推动了相关产业和学科研究的进步。有限元、有限体积及差分等方法与计算机技术相结合, 诞生了新兴的跨专业和跨行业的学科。CAE 作为一种新兴的数值模拟分析技术, 越来越受到工程技术人员的重视。在产品开发过程中引入 CAE 技术后, 在产品尚未批量生产之前, 不仅能协助工程人员进行产品设计, 更可以在争取订单时, 作为一种强有力的工具协助营销人员及管理阶层与客户沟通; 在批量生产阶段, 可以协助工程技术人员在重新更改时, 找出问题发生的起点; 在批量生产以后, 相关分析结果还可以成为下次设计的重要依据。如图 1-2 所示为引入 CAE 后产品设计的流程图。

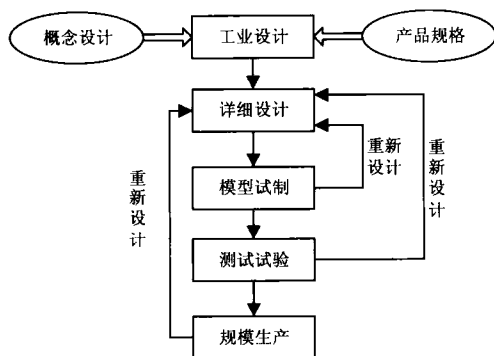


图 1-1 传统产品设计流程图

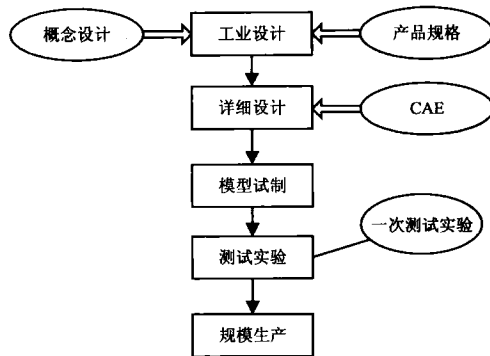


图 1-2 引入 CAE 后产品设计流程图

以电子产品为例, 80% 的电子产品都来自于高速撞击, 研究人员往往耗费大量的时间和成本, 针对产品进行相关的质量实验, 最常见的如落下与冲击实验, 这些不仅耗费了大量的研发时间和成本, 而且实验本身也存在很多缺陷, 表现如下:

- 实验发生的历程很短, 很难观察实验过程的现象;
- 测试条件难以控制, 实验的重复性很差;
- 实验时很难测量产品内部特性和观察内部现象;
- 一般只能得到实验结果, 而无法观察实验原因。

引入 CAE 后, 可以在产品开模之前, 通过相应软件对电子产品模拟自由落下实验 (Free Drop Test), 模拟冲击实验 (Shock Test), 以及应力应变分析、振动仿真、温度分布分析等求得设计的最佳解, 进而为一次实验甚至无实验即可使产品通过测试规范提供了可能。

CAE 作为一种应用计算力学、计算数学、信息科学等相关科学和技术的综合工程技术, 是支持工程技术人员进行创新研究和创新设计的重要工具和手段。它对教学、科研、设计、生产、管理、决策等部门都有很大的应用价值, 为此世界各国均投入了相当多的资金和人力进行研究。其重要性具体体现在以下几个方面。

(1) 从广义上讲, CAE 本身就可以看做一种基本实验。计算机计算弹体的侵彻与炸药爆炸过程,

以及各种非线性波的相互作用等问题,实际上是求解含有很多线性与非线性的偏微分方程、积分方程及代数方程等的耦合方程组。利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的,一般只能考虑一些很简单的问题。利用实验方法费用昂贵,还只能表征初始状态和最终状态,中间过程无法得知,因而也无法帮助研究人员了解问题的实质。而数值模拟在某种意义上比理论与实验对问题的认识更为深刻、更为细致,不仅可以了解问题的结果,而且可随时连续地、动态地、重复地显示事物的发展,了解其整体与局部的细致过程。

(2) CAE 可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象,容易使人理解和分析,它还可以显示任何实验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。例如,弹体在不均匀介质侵彻过程中的受力和偏转,爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程。同时,数值模拟可以替代一些危险、昂贵的,甚至是难于实施的实验,如反应堆的爆炸事故,核爆炸的过程与效应等。

(3) CAE 促进了实验的发展,对实验方案的科学制定、实验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供更可靠的理论指导。侵彻、爆炸实验,费用是极其昂贵的,并且存在一定的危险,因此数值模拟不仅有很大的经济效益,而且可以加速理论、实验研究的进程。

(4) 一次投资,长期受益。虽然数值模拟大型软件系统的研制需要花费相当多的经费和人力资源,但与实验相比,数值模拟软件是可以进行复制移植、重复利用,并可进行适当修改而满足不同情况需求的。据相关统计数据显示,应用 CAE 技术后,开发期的费用占开发成本的比例,从 80%~90% 下降到 8%~12%。

总之,CAE 已经与理论分析、实验研究成为科学技术探索研究的三个相互依存、不可缺少的手段。正如美国著名数学家拉克斯所说:“科学计算是关系到国家安全、经济发展和科技进步的关键性环节,是事关国家命脉的大事。”

1.2 有限元法简介

自从 20 世纪 60 年代 Clough 第一次提出“有限单元法(或称有限元法)”这个名称以来,经过 40 多年的发展,它如今已经成为工程分析中应用最广泛的数值计算方法。由于它的通用性和有效性,受到工程技术界的高度重视,伴随着计算机科学和技术的飞速发展,有限单元法现已成为计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)的重要组成部分。

1.2.1 有限元法的基本思想

在工程或物理问题的数学模型(基本变量、基本方程、求解域和边界条件等)确定以后,有限元法作为对其进行分析的数值计算方法的基本思想可简单概括为如下 3 点。

(1) 将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个子域(单元),并通过它们边界上的节点相互联结为一个组合体,如图 1-3 所示。

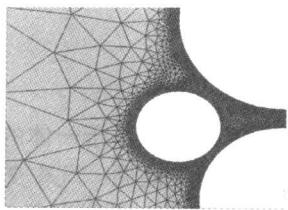


图 1-3 有限元法单元划分示意图

(2) 用每个单元内所假设的近似函数来分片表示全求解域内待求解的未知场变量,而每个单元内的近似函数由未知场函数(或其导数)在单元各个节点上的数值和与其对应的插值函数来表示。由于在

联结相邻单元的节点上,场函数具有相同的数值,因此将它们作为数值求解的基本未知量。这样一来,求解原待求场函数的无穷多自由度问题转换为求解场函数节点值的有限自由度问题。

(3) 通过和原问题数学模型(如基本方程、边界条件等)等效的变分原理或加权余量法,建立求解基本未知量(场函数节点值)的代数方程组或常微分方程组。此方程组成为有限元求解方程,并表示成规范化的矩阵形式,接着用相应的数值方法求解该方程,从而得到原问题的解答。

1.2.2 有限元法的特点

有限元之所以能有如此广泛的用途,是因为它有其自身的特点,概括如下。

(1) 对于复杂几何构形的适应性。由于单元在空间上可以是一维、二维或三维的,而且每一种单元可以有不同的形状,同时各种单元可以采用不同的连接方式,所以,工程实际中遇到的非常复杂的结构或构造都可以离散为由单元组合体表示的有限元模型。如图 1-4 所示为一个三维实体的单元划分图。

(2) 对于各种物理问题的适用性。由于用单元内近似函数分片表示全求解域的未知场函数,并未限制场函数所满足的方程形式,也未限制各个单元所对应的方程必须有相同的形式,因此它适用于各种物理问题,如线弹性问题、弹塑性问题、粘弹性问题、动力问题、屈曲问题、流体力学问题、热传导问题、声学问题、电磁场问题等,而且还可以用于各种物理现象相互耦合的问题。如图 1-5 所示为一个热应力问题。



图 1-4 三维实体的单元划分模型

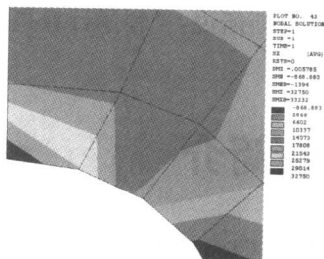


图 1-5 热应力问题

(3) 建立于严格理论基础上的可靠性。因为用于建立有限元方程的变分原理或加权余量法在数学上已证明是微分方程和边界条件的等效积分形式,所以只要原问题的数学模型是正确的,同时用来求解有限元方程的数值算法是稳定可靠的,则随着单元数目的增加(即单元尺寸的缩小)或是随着单元自由度的增加(即插值函数阶次的提高),有限元解的近似程度不断地被改进。如果单元是满足收敛准则的,则近似解最后收敛于原数学模型的精确解。

(4) 适合计算机实现的高效性。由于有限元分析的各个步骤可以表达成规范化的矩阵形式,所以求解方程可以统一为标准的矩阵代数问题,特别适合计算机的编程和执行。随着计算机硬件技术的高速发展,以及新的数值算法的不断出现,大型复杂问题的有限元分析已成为工程技术领域的常规工作。

1.3 ANSYS 简介

ANSYS 软件是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。该软件可在大多数计算机及操作系统中运行,从 PC 到工作站再到巨型计算机,ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。ANSYS 多物理场耦合的功能,允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算成本,如热结构耦合、磁结

构耦合, 以及电-磁-流体-热耦合, 在 PC 上生成的模型同样可运行于巨型机上, 这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

1.3.1 ANSYS 的发展

ANSYS 由世界上著名的有限元分析软件公司 ANSYS 开发, 它能与多数 CAD 软件结合使用, 实现数据的共享和交换, 如 AutoCAD、I-DEAS、Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor 等, 是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单, 具体包括: 结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变/有限转动功能, 以及利用 ANSYS 参数设计语言 (APDL) 的扩展宏命令功能。基于 Motif 的菜单系统使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择, 为用户使用 ANSYS 提供“导航”。

1.3.2 ANSYS 的功能

ANSYS 包括以下主要功能模块:

- 结构分析
- 热分析
- 电磁分析
- 流体分析 (CFD)
- 耦合场分析——多物理场

1. 结构分析

结构分析包括以下类型。

(1) 静力分析——用于静态载荷。可以考虑结构的线性及非线性行为。例如, 大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹性及蠕变等。

(2) 模态分析——计算线性结构的自振频率及振形, 谱分析是模态分析的扩展, 用于计算由随机振动引起的结构应力和应变 (也叫做响应谱或 PSD)。

(3) 谐响应分析——确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应。

(4) 瞬态动力学分析——确定结构对随时间任意变化的载荷的响应。可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为。

(5) 特征屈曲分析——用于计算线性屈曲载荷, 并确定屈曲模态形状 (结合瞬态动力学分析可以实现非线性屈曲分析)。

(6) 专项分析——断裂分析、复合材料分析、疲劳分析。

专项分析用于模拟非常大的变形, 惯性力占支配地位, 并考虑所有的非线性行为。

它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题, 是目前求解这类问题最有效的方法。

2. ANSYS 热分析

热分析一般不是单独的, 其后往往进行结构分析, 计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力。

热分析包括以下类型。

(1) 相变 (熔化及凝固) ——金属合金在温度变化时的相变, 如铁合金中马氏体与奥氏体的转变。

(2) 内热源 (电阻发热等) ——存在热源问题, 如加热炉中对试件进行加热。

(3) 热传导——热传递的一种方式, 当相接触的两物体存在温度差时发生。

(4) 热对流——热传递的一种方式, 当存在流体、气体和温度差时发生。