



ANSYS工程应用系列丛书

ANSYS 13.0

有限元分析

从入门到精通

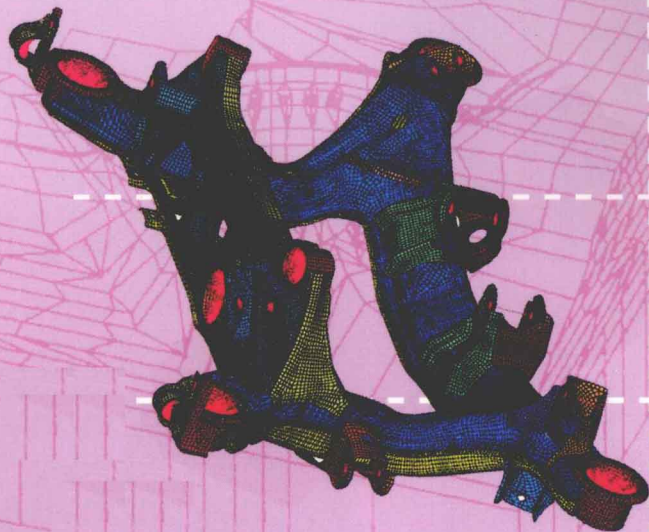


视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

三维书屋工作室

张红松 胡仁喜 康士廷 等编著

全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 13.0 有限元分析从入门到精通

三维书屋工作室

张红松 胡仁喜 康士廷 等编著

机械工业出版社

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS13.0 为依托,对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍,并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 的具体工程应用方法。

本书前 7 章为操作基础,详细介绍了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法:第 1 章 ANSYS 概述;第 2 章几何建模;第 3 章建模实例;第 4 章划分网格;第 5 章施加载荷;第 6 章求解;第 7 章后处理。后 9 章为专题实例,按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧;第 8 章静力学分析;第 9 章非线性分析;第 10 章模态分析;第 11 章瞬态动力学分析;第 12 章谐响应分析;第 13 章结构屈曲分析;第 14 章谱分析;第 15 章接触问题分析;第 16 章优化设计。

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。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 13.0 有限元分析从入门到精通/张红松等编著.
—2 版. —北京:机械工业出版社,2011.4
ISBN 978-7-111-33871-0

I. ①A… II. ①张… III. ①有限元分析—应用程序,
ANSYS 13.0—高等学校—教材 IV. ①0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 049153 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:曲彩云 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011 年 6 月第 2 版第 1 次印刷
184mm×260mm·32 印张·796 千字
0001—4000 册
标准书号:ISBN 978-7-111-33871-0

ISBN 978-7-89451-925-2(光盘)

定价:69.00 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

前 言

有限单元法作为数值计算方法中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的发展和應用，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、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，中国大多数科研院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS13.0 为依托，对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍，并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。书中尽量避开了繁琐的理论描述，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了讲解。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。

本书分为两部分，第 1 章 ANSYS 概述；第 2 章几何建模；第 3 章建模实例；第 4 章网格划分；第 5 章施加载荷；第 6 章求解；第 7 章后处理。后 9 章为专题实例，按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧；第 8 章静力分析；第 9 章非线性分析；第 10 章模态分析；第 11 章瞬态动力学分析；第 12 章谐响应分析；第 13 章结构屈曲分析；第 14 章谱分析；第 15 章接触问题分析；第 16 章优化设计。

本书附有一张多媒体光盘，光盘中除了有每一个实例 GUI 实际操作步骤的视频以外，还以文本文件的格式给出了每个实例的命令流文件，用户可以直接调用。

本书由三维书屋工作室总策划，河南工程学院的张红松博士后、军械工程学院的胡仁喜博士和康士廷主编，其中张红松执笔编写了第 1~10 章，胡仁喜执笔编写了 11~14 章，康士廷执笔编写了 15、16 章。张日晶、王培合、左昉、王玉秋、许洪、王义发、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、王艳池、孟清华、李广荣、郑长松、王佩楷、王文平、张俊生、路纯红、阳平华等参加了部分编写工作。

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。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，登录 www.sjzsanweishuwu.com 或联系 win760520@126.com 批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 ANSYS 概述.....	1
1.1 CAE 软件简介.....	2
1.2 有限元法简介.....	3
1.2.1 有限元法的基本思想.....	3
1.2.2 有限元法的特点.....	4
1.3 ANSYS 简介.....	5
1.3.1 ANSYS 的发展.....	5
1.3.2 ANSYS 的功能.....	5
1.3.3 ANSYS 13.0 的新特点.....	7
1.3.4 ANSYS 13.0 的启动.....	8
1.3.5 ANSYS 13.0 运行环境配置.....	9
1.4 程序结构.....	10
1.4.1 处理器.....	10
1.4.2 文件格式.....	10
1.4.3 输入方式.....	11
1.4.4 输出文件类型.....	11
1.5 ANSYS 分析的基本过程.....	11
1.5.1 前处理.....	12
1.5.2 加载并求解.....	12
1.5.3 后处理.....	12
1.5.4 实例导航——导弹发动机药柱承受温度和内压载荷数值模拟.....	13
第 2 章 几何建模.....	15
2.1 几何建模概论.....	16
2.1.1 自底向上创建几何模型.....	16
2.1.2 自顶向下创建几何模型.....	16
2.1.3 布尔运算操作.....	17
2.1.4 拖拉和旋转.....	18
2.1.5 移动和复制.....	18
2.1.6 修改模型（清除和删除）.....	18
2.1.7 从 IGES 文件几何模型导入到 ANSYS.....	19
2.2 坐标系简介.....	19
2.2.1 总体和局部坐标系.....	20
2.2.2 显示坐标系.....	22
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	27
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	32
2.4.4	面	34
2.4.5	体	35
2.5	自顶向下创建几何模型（体素）	37
2.5.1	创建面体素	37
2.5.2	创建实体体素	37
2.6	使用布尔操作来修正几何模型	39
2.6.1	布尔运算的设置	39
2.6.2	布尔运算之后的图元编号	40
2.6.3	交运算	40
2.6.4	两两相交	42
2.6.5	相加	42
2.6.6	相减	43
2.6.7	利用工作平面作减运算	44
2.6.8	搭接	45
2.6.9	分割	45
2.6.10	粘接（或合并）	46
2.7	移动、复制和缩放几何模型	46
2.7.1	按照样本生成图元	47
2.7.2	由对称映像生成图元	47
2.7.3	将样本图元转换坐标系	48
2.7.4	实体模型图元的缩放	48
2.8	实例导航——导弹发动机药柱建模	49
2.8.1	自底向上建立药柱模型	49
2.8.2	布尔操作建立药柱模型	55

2.8.3 导入 SolidWorks 中创建的药柱模型	57
第 3 章建模实例	59
3.1 实例导航——几何模型的输入	60
3.1.1 输入 IGES 单一实体	60
3.1.2 输入 SAT 单一实体	62
3.1.3 输入 SAT 实体集合	64
3.1.4 输入 Parasolid 单一实体	68
3.1.5 输入 Parasolid 实体集合	70
3.2 实例导航——对输入模型修改	73
3.3 实例导航——自主建模	76
3.3.1 自顶向下建模实例	76
3.3.2 自底向上建模实例	84
第 4 章网格划分	95
4.1 有限元网格概论	96
4.2 设定单元属性	96
4.2.1 生成单元属性表	96
4.2.2 在划分网格之前分配单元属性	97
4.3 网格划分的控制	99
4.3.1 ANSYS 网格划分工具 (MeshTool)	100
4.3.2 单元形状	100
4.3.3 选择自由或映射网格划分	101
4.3.4 控制单元边中节点的位置	101
4.3.5 划分自由网格时的单元尺寸控制 (SmartSizing)	102
4.3.6 映射网格划分中单元的默认尺寸	102
4.3.7 局部网格划分控制	103
4.3.8 内部网格划分控制	104
4.3.9 生成过渡棱锥单元	106
4.3.10 将退化的四面体单元转化为非退化的形式	106
4.3.11 执行层网格划分	107
4.4 自由网格划分和映射网格划分控制	108
4.4.1 自由网格划分	108
4.4.2 映射网格划分	109
4.5 给实体模型划分有限元网格	113
4.5.1 用 xMESH 命令生成网格	113
4.5.2 生成带方向节点的梁单元网格	114
4.5.3 在分界线或者分界面处生成单位厚度的界面单元	116
4.6 延伸和扫略生成有限元模型	117

4.6.1 延伸 (Extrude) 生成网格	117
4.6.2 扫略 (VSWEEP) 生成网格	119
4.7 修正有限元模型	122
4.7.1 局部细化网格	122
4.7.2 移动和复制节点和单元	125
4.7.3 控制面、线和单元的法向	126
4.7.4 修改单元属性	127
4.8 直接通过节点和单元生成有限元模型	128
4.8.1 节点	128
4.8.2 单元	129
4.9 编号控制	132
4.9.1 合并重复项	132
4.9.2 编号压缩	132
4.9.3 设定起始编号	133
4.9.4 编号偏差	134
4.10 实例导航——导弹发动机药柱模型网格划分	134
4.10.1 采用智能分网	136
4.10.2 采用扫略分网	136
4.10.3 采用延伸分网	141
第 5 章 施加载荷	146
5.1 载荷概论	147
5.1.1 什么是载荷	147
5.1.2 载荷步、子步和平衡迭代	148
5.1.3 时间参数	149
5.1.4 阶跃载荷与坡道载荷	149
5.2 施加载荷	150
5.2.1 实体模型载荷与有限单元载荷	150
5.2.2 施加载荷	151
5.2.3 利用表格来施加载荷	156
5.2.4 轴对称载荷与反作用力	159
5.2.5 利用函数来施加载荷和边界条件	160
5.3 设定载荷步选项	161
5.3.1 通用选项	162
5.3.2 非线性选项	165
5.3.3 动力学分析选项	166
5.3.4 输出控制	167
5.3.5 Biot-Savart 选项	168

5.3.6 谱分析选项	168
5.3.7 创建多载荷步文件	168
5.4 实例导航——导弹发动机药柱模型载荷施加	170
5.4.1 单载荷步的施加	170
5.4.2 多载荷步的施加	173
5.4.3 表格及函数载荷的施加	176
第 6 章求解	178
6.1 求解概论	179
6.1.1 使用直接求解法	180
6.1.2 使用稀疏矩阵直接解法求解器	180
6.1.3 使用雅克比共轭梯度法求解器	180
6.1.4 使用不完全分解共轭梯度法求解器	181
6.1.5 使用预条件共轭梯度法求解器	181
6.1.6 使用自动迭代解法选项	182
6.1.7 获得解答	182
6.2 利用特定的求解控制器来指定求解类型	183
6.2.1 使用 Abridged Solution 菜单选项	183
6.2.2 使用求解控制对话框	184
6.3 多载荷步求解	185
6.3.1 多重求解法	185
6.3.2 使用载荷步文件法	186
6.3.3 使用数组参数法（矩阵参数法）	187
6.4 重新启动分析	188
6.4.1 重新启动一个分析	189
6.4.2 多载荷步文件的重启动分析	192
6.5 预测求解时间和估计文件大小	194
6.5.1 估计运算时间	194
6.5.2 估计文件的大小	195
6.5.3 估计内存需求	195
6.6 实例导航——导弹发动机药柱模型求解	195
6.6.1 单载荷步求解	195
6.6.2 多载荷步求解	196
第 7 章后处理	197
7.1 后处理概述	198
7.1.1 什么是后处理	198
7.1.2 结果文件	198
7.1.3 后处理可用的数据类型	199

7.2 通用后处理器 (POST1)	199
7.2.1 将数据结果读入数据库	199
7.2.2 列表显示结果	206
7.2.3 图像显示结果	213
7.2.4 映射结果到某一路径上	220
7.2.5 表面操作	226
7.2.6 将结果旋转到不同坐标系中显示	229
7.3 时间历程后处理 (POST26)	231
7.3.1 定义和储存 POST26 变量	231
7.3.2 检查变量	233
7.3.3 POST26 后处理器的其他功能	235
7.4 实例导航——导弹发动机药柱模型结果后处理	237
7.4.1 通用后处理器	237
7.4.2 时间历程处理器	248
第 8 章静力分析	251
8.1 静力分析介绍	252
8.1.1 结构静力分析简介	252
8.1.2 静力分析的类型	253
8.1.3 静力分析基本步骤	253
8.2 实例导航——悬臂梁的横向剪切应力分析	254
8.2.1 问题的描述	254
8.2.2 GUI 路径模式	254
8.2.3 命令流模式	265
第 9 章非线性分析	268
9.1 非线性分析概论	269
9.1.1 非线性行为的原因	269
9.1.2 非线性分析的基本信息	270
9.1.3 几何非线性	272
9.1.4 材料非线性	273
9.1.5 其他非线性问题	278
9.2 非线性分析的基本步骤	278
9.2.1 前处理 (建模和分网)	278
9.2.2 设置求解控制器	278
9.2.3 设定其他求解选项	281
9.2.4 加载	282
9.2.5 求解	283
9.2.6 后处理	283

9.3 实例导航——螺栓的蠕变分析	285
9.3.1 问题描述	285
9.3.2 GUI 路径模式	285
9.3.3 命令流	293
第 10 章 模态分析	295
10.1 模态分析概论	296
10.2 模态分析的基本步骤	296
10.2.1 建模	296
10.2.2 加载及求解	297
10.2.3 扩展模态	300
10.2.4 观察结果和后处理	302
10.3 实例导航——压电变换器的自振频率分析	302
10.3.1 问题描述	302
10.3.2 GUI 模式	303
10.3.3 命令流模式	317
第 11 章 瞬态动力学分析	320
11.1 瞬态动力学概论	321
11.1.1 完全法 (Full Method)	321
11.1.2 模态叠加法 (Mode Superposition Method)	321
11.1.3 减缩法 (Reduced Method)	322
11.2 瞬态动力学的基本步骤	322
11.2.1 前处理 (建模和分网)	322
11.2.2 建立初始条件	323
11.2.3 设定求解控制器	324
11.2.4 设定其他求解选项	325
11.2.5 施加载荷	326
11.2.6 设定多载荷步	326
11.2.7 瞬态求解	328
11.2.8 后处理	328
11.3 实例导航——哥伦布阻尼的自由振动分析	330
11.3.1 问题描述	331
11.3.2 GUI 模式	331
11.3.3 命令流模式	344
第 12 章 谐响应分析	346
12.1 谐响应分析概论	347
12.1.1 完全法 (Full Method)	348
12.1.2 减缩方法 (Reduced Method)	348

12.1.3 模态叠加法 (Mode Superposition Method)	348
12.1.4 3 种方法的共同局限性	349
12.2 谐响应分析的基本步骤	349
12.2.1 建立模型 (前处理)	349
12.2.2 加载和求解	350
12.2.3 观察模型 (后处理)	356
12.3 实例导航——弹簧质子系统的谐响应分析	357
12.3.1 问题描述	357
12.3.2 GUI 模式	358
12.3.3 命令流方式	370
第 13 章结构屈曲分析	372
13.1 结构屈曲概论	373
13.2 结构屈曲分析的基本步骤	373
13.2.1 前处理	373
13.2.2 获得静力解	373
13.2.3 获得特征值屈曲解	374
13.2.4 扩展解	376
13.2.5 后处理 (观察结果)	377
13.3 实例导航——桁架结构屈曲分析	378
13.3.1 问题描述	378
13.3.2 GUI 路径模式	378
13.3.3 命令流	393
第 14 章谱分析	398
14.1 谱分析概论	399
14.1.1 响应谱	399
14.1.2 动力设计分析方法 (DDAM)	399
14.1.3 功率谱密度 (PSD)	399
14.2 谱分析的基本步骤	400
14.2.1 前处理	400
14.2.2 模态分析	400
14.2.3 谱分析	400
14.2.4 扩展模态	403
14.2.5 合并模态	404
14.2.6 后处理	406
14.3 实例导航——支撑平板的动力效果分析	407
14.3.1 问题描述	407
14.3.2 GUI 路径模式	408

14.3.3 命令流.....	431
第 15 章接触问题分析.....	434
15.1 接触问题概论.....	435
15.1.1 一般分类.....	435
15.1.2 接触单元.....	435
15.2 接触分析的步骤.....	436
15.2.1 建立模型, 并划分网格.....	437
15.2.2 识别接触对.....	437
15.2.3 定义刚性目标面.....	437
15.2.4 定义柔性体的接触面.....	439
15.2.5 设置实常数和单元关键点.....	441
15.2.6 控制刚性目标的运动.....	442
15.2.7 给变形体单元施加必要的边界条件.....	442
15.2.8 定义求解和载荷步选项.....	442
15.2.9 求解.....	444
15.2.10 检查结果.....	444
15.3 实例导航——陶瓷套管的接触分析.....	446
15.3.1 问题描述.....	446
15.3.2 GUI 方式.....	446
15.3.3 命令流方式.....	461
第 16 章优化设计.....	469
16.1 优化设计概论.....	470
16.2 优化设计的基本步骤.....	472
16.2.1 生成分析文件.....	472
16.2.2 建立优化过程中的参数.....	475
16.2.3 进入 OPT 处理器, 指定分析文件.....	476
16.2.4 指定优化变量.....	476
16.2.5 选择优化工具或优化方法.....	477
16.2.6 指定优化循环控制方式.....	478
16.2.7 进行优化分析.....	479
16.2.8 查看设计序列结果.....	480
16.3 实例导航——框架结构的优化设计.....	481
16.3.1 问题描述.....	481
16.3.2 GUI 方式.....	481
16.3.3 命令流方式.....	495

第

1

章

ANSYS 概述

本章首先介绍 CAE 技术及其有关基本知识,并由此引出了 ANSYS 的最新版本 13.0。讲述了新版本功能特点以及 ANSYS 程序结构和分析基本流程。

本章提纲挈领地介绍了 ANSYS 的基本知识,主要目的是给读者提供一个 ANSYS 感性认识。

学

习

要

点

- CAE 软件简介
- ANSYS 简介
- ANSYS13.0 产品及其功能
- ANSYS 分析的基本过程

1.1 CAE 软件简介

由图 1-1 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, 而且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地进步。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做产品设计, 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人员与客户沟通; 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。图 1-2 所示为引入 CAE 后产品设计流程图。

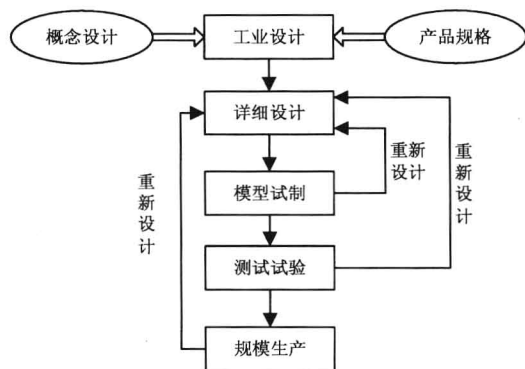


图 1-1 传统产品设计流程图

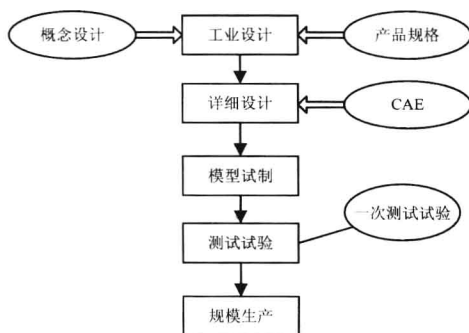


图 1-2 引入 CAE 后产品设计流程图

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, 针对产品做相关的质量试验, 最常见的如落下与冲击试验, 这些不仅耗费了大量的研发时间和成本, 而且试验本身也存在很多缺陷, 表现在:

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

引入 CAE 后可以在产品开模之前, 透过相应软件对电子产品模拟自由落下试验 (Free Drop Test)、模拟冲击试验 (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, 进而为一次试验甚至无试验可使产品通过测试规范提供了可能。

CAE 重要性:

(1) CAE 本身就可以看作一种基本试验。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、积分方程以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。利用试验方法费用昂贵,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试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,容易为人理解和分析;还可以显示任何试验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。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试验,如反应堆的爆炸事故,核爆炸的过程与效应等。

(3) CAE 促进了试验的发展,对试验方案的科学制定、试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、爆炸试验费用是昂贵的,并存在一定危险,因此数值模拟不但有很大的经济效益,而且可以加速理论、试验研究的进程。

(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,但和试验相比,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的需求。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%。

1.2 有限元法简介

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结点相互联结为一个组合体。如图 1-3 所示。

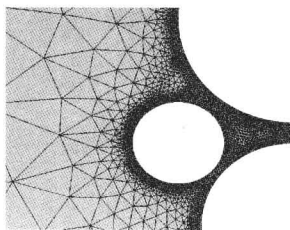


图 1-3 有限元法单元划分示意图

(2) 用每个单元内所假设的近似函数来分片地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）在单元各个结点上的数值和与其对应的插值函数来表达。由于在联结相邻单元的结点上，场函数具有相同的数值，因而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结点值的有限自由度问题。

(3) 通过和原问题数学模型（例如基本方程、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（场函数结点值）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

(1) 对于复杂几何构形的适应性：由于单元在空间上可以适一维、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。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地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，例如线弹性问题、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。图 1-5 所示为一个热应力问题。

(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适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）或者是随着单元自由度数的增加（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。



图 1-4 三维实体的单元划分模型

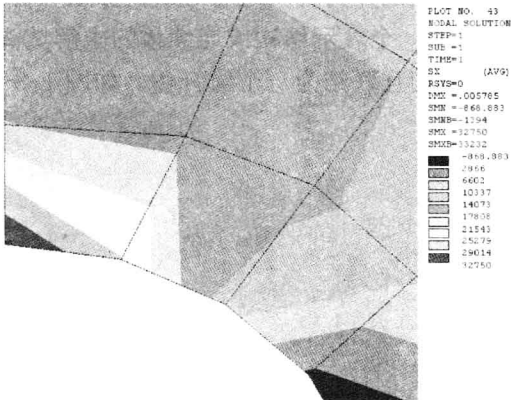


图 1-5 热应力问题