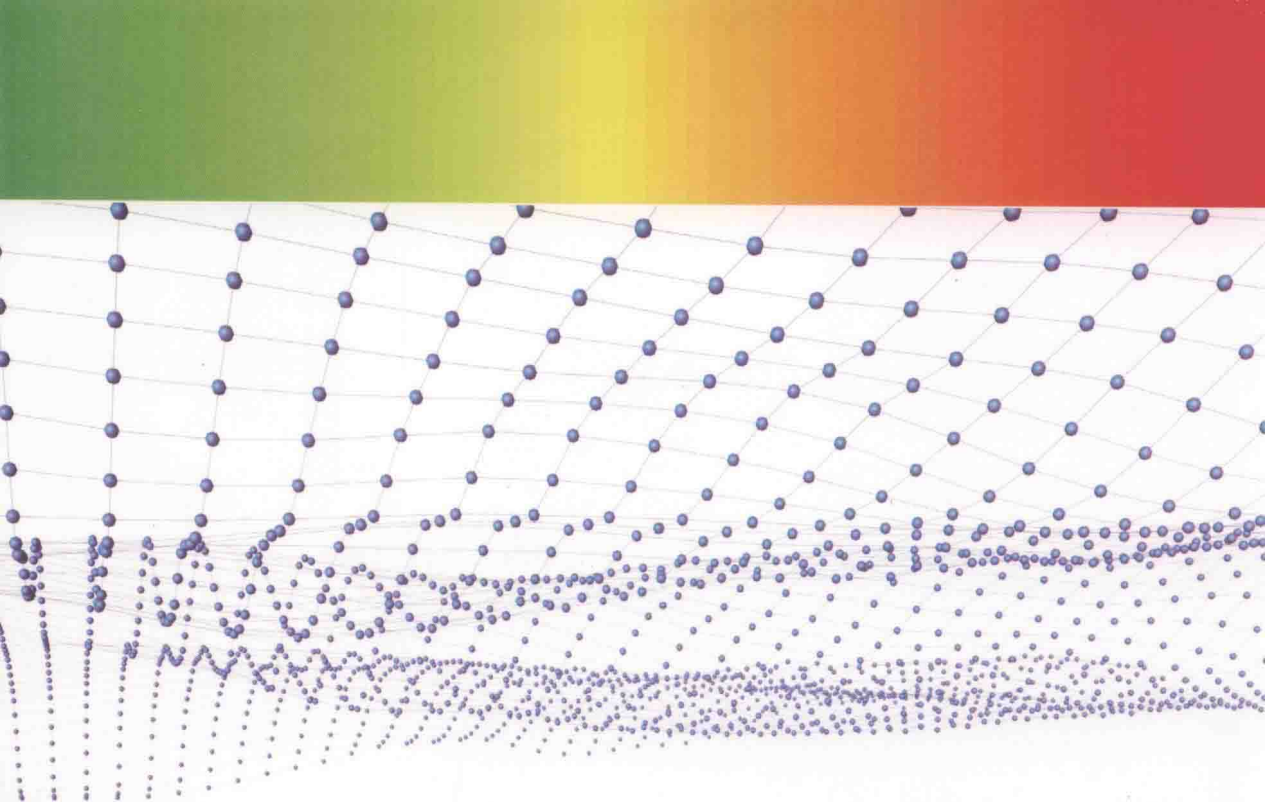




有限元分析及 ANSYS Workbench工程应用

张进军 编著

西北工业大学出版社

YOUXIANYUAN FENXI JI ANSYS Workbench GONGCHENG YINGYONG

有限元分析及 ANSYS Workbench 工程应用

张进军 编著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书以有限元分析软件 ANSYS Workbench 18.0 为平台,详细介绍了各个菜单的选项意义、使用方法和应用实例。本书分为 10 章,主要讲解了 Workbench 的基础知识和主界面,几何建模的方法和实例,网格划分的方法和实例,Mechanical 的前处理和后处理,结构静力学分析,结构动力学分析(包括模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析),多刚体动力学,刚柔体动力学分析,以及工程热力学分析等内容。

本书附带的光盘有近 30 个典型算例,与书中实例一一对应,包含算例的几何模型、所有设置、边界条件和求解结果,可帮助读者尽快掌握、使用 ANSYS Workbench。

本书既可以作为机械工程、能源动力、航空航天、船舶与海洋工程、土木水利、电子通信等专业的高年级本科生、研究生和教师的参考书及教学用书,也可以作为相关领域从事产品设计、工程计算、仿真分析的工程技术人员和科研工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

有限元分析及 ANSYS Workbench 工程应用/张进军编
著. —西安:西北工业大学出版社,2018.11
ISBN 978-7-5612-6286-3

I. 有… II. ①张… III. ①有限元分析—应用软件
IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 218186 号

策划编辑:李阿盟

责任编辑:李阿盟

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印刷者:陕西天意印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:33.625

字 数:777 千字

版 次:2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价:88.00 元 (含光盘 1 张)



Preface

前言

ANSYS 公司成立于 1970 年,总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡。2006 年,ANSYS 公司收购了在流体仿真领域处于国际领先地位的美国 Fluent 公司,2008 年,收购了美国 Ansoft 公司(在电路和电磁领域的仿真能力处于世界领先水平),2011 年,收购模拟软件提供商 Apache Design Solutions,2012 年,收购 Esterel Technologies,2013 年,收购了 EVEN,2015 年,收购了高级计算电磁学仿真和射频系统分析软件开发商 Delcross Technologies。通过以上整合、收购、兼并,ANSYS 公司成为全球最大的 ACE 仿真软件公司。目前,ANSYS 整个产品线包括结构分析系列 Mechanical,流体动力学系列 ANSYS CFD(FLUENT/CFX),电子设计系列 ANSYS Ansoft 以及 ANSYS Workbench 和 EKM 等。产品广泛应用于航空、航天、电子、车辆、船舶、交通、通信、建筑、电子、医疗、国防、石油和化工等众多行业。

现有的关于 Workbench 的教程、参考书有数十种,但都侧重于举一些例子,仅仅介绍如何完成该例子,对 Workbench 软件只做简单介绍。而当读者真正面对自己所研究领域、专业中的工程问题时,不知道如何进行设置。所以亟需对 Workbench 中所有选项进行详尽的介绍,并指出各个选项的使用范围和场合。本书正是基于这种需求而产生的。

本书具有以下四大特色:

特色一:内容详尽。之前出版的很多关于 ANSYS Workbench 的书中,只是简单介绍 Workbench 的内容,举一些算例。读者只能照猫画虎做完书中的算例,但对于读者本行业的仿真工作却作用不大。而本书对 ANSYS Workbench 每个菜单、窗口、对话框的所有选项都进行了详尽的解释,非常便于读者自学,有助于读者在今后的仿真中做出正确、恰当的选择,帮助读者独立进行仿真分析。

特色二:通俗易懂。不少同类图书中提到的对话框、菜单、窗口等,并没有交代清楚它们在软件的哪个位置,或者即使有对照图形,但并没有在图形上用醒目的记号标示出来。本书斟酌文字,努力避免歧义;而对照图形用椭圆、长方形、箭头、数字等进行标注,便于读者阅读。

特色三:将 ANSYS Workbench 与工程实际相结合。在每章的开头部分,都详细解释本

章的主要内容,并说明它在工程实际的作用。涉及有限元知识、机械、力学、热学等学科的专业术语时,也介绍了相关的理论知识,有助于读者尽快掌握该软件。本书实例均来自科学研究和工程实践,使读者很快能将 ANSYS Workbench 软件与工程实际应用结合起来。

特色四:ANSYS Workbench 软件有自带的全英文帮助库。书中将每章对应的帮助库的链接路径列出,有助于读者更进一步理解此软件。点击 Workbench 主界面的菜单 Help-ANSYS Workbench,就弹出新窗口 ANSYS 18.0 Help,这里有软件自带的全英文帮助系统。用户可以将该路径输入 ANSYS 18.0 Help 窗口的 Go To Page……,找到对应的英文帮助。

本书既可以作为机械工程、能源动力、航空航天、船舶与海洋工程、土木水利、电子通信等专业的高年级本科生、研究生和教师的参考书及教学用书,也可以作为相关领域从事产品设计、工程计算、仿真分析的工程技术人员和科研工作者的参考书。写作本书曾经参阅了相关文献资料,在此谨向其作者表示诚挚的谢意。

由于水平有限,书中内容涉及面广,不足之处在所难免,希望广大读者和同仁批评指正。

编者

2018年7月

Contents

目 录

第 1 章 ANSYS Workbench 基础	1
1.1 CAE 概述	1
1.2 ANSYS 软件概述	2
1.2.1 ANSYS 发展历程	2
1.2.2 ANSYS 软件特点	4
1.3 AWE 介绍	5
1.4 仿真过程及例子 1	8
第 2 章 AWE 的主界面	15
2.1 AWE 主界面简介	15
2.1.1 主菜单	16
2.1.2 基本工具条	20
2.1.3 工具箱 Toolbox	20
2.1.4 工程流程图 Project Schematic	23
2.1.5 主界面 Options 的设置	27
2.2 AWE 窗口管理	37
2.2.1 窗口管理功能	37
2.2.2 窗口相互切换	37
2.2.3 窗口紧凑模式	38
第 3 章 DesignModeler 几何建模	39
3.1 DesignModeler 平台	39
3.1.1 DesignModeler 主菜单	41
3.1.2 选择工具条	44
3.1.3 视图工具条	47
3.1.4 平面和草图工具条	48
3.1.5 图形选项工具条	50

3.1.6	弹出菜单	51
3.1.7	鼠标功能	53
3.2	草图模式 Sketching	54
3.2.1	绘制草图 Draw	54
3.2.2	修改草图 Modify	55
3.2.3	尺寸标注 Dimensions	58
3.2.4	草图约束 Constraints	60
3.2.5	草图设置 Settings	62
3.2.6	草图援引和草图投影	62
3.2.7	第3章例子1	63
3.3	3D 建模 Modeling	66
3.3.1	体和零件	66
3.3.2	详细选项	68
3.3.3	3D 特征创建	70
3.3.4	3D 高级建模操作	77
3.3.5	体的操作 Body Operation	85
3.3.6	体的变换 Body Transformation	88
3.3.7	第3章例子3	90
3.4	概念建模 Concept	93
3.4.1	创建线体和分割线体	94
3.4.2	线体的横截面	96
3.4.3	3D 曲线特征	101
3.4.4	创建表面体	102
3.5	高级工具 Tools 之一	104
3.5.1	冻结 Freeze	105
3.5.2	解冻 Unfreeze	105
3.5.3	命名选择 Named Selection	105
3.5.4	属性 Attribute	105
3.5.5	接合 Joint	106
3.5.6	包围 Enclosure 和例子4	107
3.5.7	面分割 Face Split	109
3.5.8	对称 Symmetry	110

3.5.9	填充 Fill 和例子 5	110
3.5.10	抽取中面	113
3.5.11	表面延伸和例子 6	114
3.5.12	表面修补和例子 7	119
3.5.13	表面翻转 Surface Flip	122
3.5.14	合并 Merge	122
3.5.15	连接 Connect	123
3.5.16	投影 Projection	124
3.5.17	转换 Conversion	125
3.5.18	焊接 Weld	126
3.6	高级工具 Tools 之二	127
3.6.1	修补工具 Repair	127
3.6.2	分析工具 Analysis Tools	128
3.6.3	选项设置 Option	131
第 4 章	Meshing 网格划分	134
4.1	网格划分概述	134
4.1.1	ANSYS 18.0 网格划分	134
4.1.2	网格形状	134
4.1.3	网格划分的目的和流程	135
4.1.4	需考虑的原则	136
4.2	网格划分的界面	137
4.2.1	主菜单	137
4.2.2	工具条	139
4.2.3	鼠标快捷菜单	145
4.3	3D 网格的全局控制 Method	147
4.3.1	程序自动划分网格 Automatic	147
4.3.2	四面体单元划分 Tetrahedrons	148
4.3.3	六面体为主 Hex Dominant	151
4.3.4	扫掠划分 Sweep	152
4.3.5	多区 MultiZone	155
4.3.6	第 4 章例子 1	157
4.3.7	第 4 章例子 2	160

4.3.8	第 4 章例子 3	163
4.3.9	第 4 章例子 4	164
4.4	3D 网格的局部控制	167
4.4.1	网格局部尺寸控制 Sizing	167
4.4.2	接触网格尺寸控制 Contact Sizing	170
4.4.3	网格局部单元细化控制 Refinement	170
4.4.4	面网格映射控制及例子 5	171
4.4.5	匹配网格划分及例子 6	174
4.4.6	网格修剪控制 Pinch	179
4.4.7	网格膨胀控制 Inflation	180
4.5	其他工具	184
4.5.1	虚拟拓扑工具 Virtual Topology	184
4.5.2	2D 网格划分方法	187
4.5.3	第 4 章例子 7	190
4.6	网格划分的默认选项、细节窗口及向导	192
4.6.1	网格的默认选项	192
4.6.2	网格整体的细节窗口	194
4.6.3	Meshing Options	206
4.7	网格划分质量	207
4.7.1	网格质量的度量	207
4.7.2	网格划分失败的原因	209
4.7.3	补救措施及例子 8	210
第 5 章	Mechanical 基础	214
5.1	Engineering Data 定义材料属性	214
5.1.1	材料数据的窗口	214
5.1.2	材料数据的使用	217
5.1.3	第 5 章例子 1	218
5.2	准备工作	220
5.3	Geometry 导入几何模型	221
5.3.1	几何模型的种类	221
5.3.2	Geometry Property	223
5.3.3	几何模型的导入	225

5.3.4	Geometry 细节窗口	227
5.3.5	零件的信息	228
5.4	后处理之查看结果	230
5.4.1	标准工具条	230
5.4.2	截面 Section	232
5.4.3	标注 Annotation	232
5.4.4	曲线图和表格 New Chart and Table	233
5.4.5	注解 Comment	234
5.4.6	图形和照片 Figure and Image	235
5.4.7	结果工具条	235
5.4.8	图例的快捷菜单	238
5.4.9	动画窗口 Animation	239
5.4.10	多窗口	240
5.4.11	报警器 Alert	241
5.5	后处理之指定结果和输出结果	242
5.5.1	指定结果	242
5.5.2	输出结果	244
第 6 章	结构静力学分析	246
6.1	结构分析概述	246
6.2	结构静力分析模块的界面	247
6.2.1	主菜单	248
6.2.2	界面中其他部分	249
6.2.3	Options	250
6.3	几种简单的工具条	256
6.3.1	模型 Model 工具条	256
6.3.2	几何体 Geometry 工具条	264
6.3.3	坐标系 Coordinate System	264
6.4	连接关系 Connections 工具条	267
6.4.1	Connections 连接	267
6.4.2	Connection Group	268
6.4.3	连接之接触 Contact	269
6.4.4	第 6 章例子 1	282

6.4.5	连接之 Spot Weld 焊接点	284
6.4.6	End Release	285
6.5	分析设置	286
6.5.1	Step Controls	286
6.5.2	Solver Controls	290
6.5.3	Restart Controls	292
6.5.4	Nonlinear Controls	293
6.5.5	Output Controls	294
6.5.6	Analysis Data Management	295
6.5.7	Restart Analysis	296
6.6	惯性载荷和结构载荷工具条	296
6.6.1	载荷分类及细节窗口	297
6.6.2	加速度	302
6.6.3	标准的地球重力	303
6.6.4	旋转速度	303
6.6.5	压强	304
6.6.6	管道压强	304
6.6.7	静水压强	304
6.6.8	力	305
6.6.9	远端力	305
6.6.10	轴承载荷	306
6.6.11	螺栓预紧载荷	307
6.6.12	力矩载荷	309
6.6.13	广义平面应变	309
6.6.14	线压强	309
6.6.15	热载荷	310
6.6.16	流固界面载荷	312
6.7	约束支撑工具条	312
6.7.1	固定约束	312
6.7.2	位移约束	313
6.7.3	远端位移	314
6.7.4	无摩擦约束	315

6.7.5	仅有压缩的约束	315
6.7.6	圆柱面约束	316
6.7.7	简单约束	316
6.7.8	约束旋转	316
6.7.9	弹性支撑	317
6.7.10	第 6 章例子 2	317
6.8	Conditions 工具条	324
6.8.1	Coupling	324
6.8.2	约束方程	324
6.8.3	Pipe Idealization	325
6.8.4	Nonlinear Adaptive Region	325
6.9	求解选项	327
6.9.1	求解精度	327
6.9.2	Solution 细节窗口	327
6.9.3	Solution Information 细节窗口	328
6.9.4	Result Tracker 工具条	333
6.9.5	Result Tracker 的其他功能	334
6.10	求解结果 Solution	335
6.10.1	变形 Deformation	335
6.10.2	应变 Strain 和应力 Stress	337
6.10.3	能量 Energy	340
6.10.4	损伤 Damage	341
6.10.5	线性应力 Linearized Stress	341
6.10.6	探针 Probe	343
6.10.7	应力工具 Stress Tool	347
6.10.8	接触工具 Contact Tool	349
6.10.9	用户自定义结果 User Defined Result	350
6.10.10	坐标系 Coordinate Systems	353
6.11	结构静力分析的步骤及策略	354
6.11.1	模型和网格划分	354
6.11.2	载荷	355
6.11.3	求解模型和检查结果	355

6.11.4	强度评定	355
6.12	第 6 章例子 3	358
6.12.1	UG 模型处理	358
6.12.2	有限元模型	358
6.12.3	只有径向载荷	364
6.12.4	只有惯性力载荷	365
第 7 章	结构动力学分析	368
7.1	结构动力学分析基础	368
7.1.1	结构动力学分析概述	368
7.1.2	Workbench 动力学分析类型	371
7.1.3	Workbench 动力学的求解	373
7.1.4	阻尼	374
7.2	模态分析	378
7.2.1	介绍模态分析	378
7.2.2	自由模态分析流程	380
7.2.3	预应力模态分析流程	384
7.2.4	第 7 章例子 1	385
7.3	谐响应分析	389
7.3.1	谐响应分析概述	389
7.3.2	两种求解方法	390
7.3.3	谐响应分析流程	392
7.3.4	第 7 章例子 2	400
7.4	响应谱分析	405
7.4.1	响应谱分析概述	405
7.4.2	响应谱分析的参数	406
7.4.3	响应谱分析流程	409
7.4.4	第 7 章例子 3	413
7.5	随机振动分析	418
7.5.1	随机振动术语	419
7.5.2	随机振动分析流程	420
7.5.3	添加求解结果	421
7.5.4	第 7 章例子 4	425

第 8 章 多刚体动力学	428
8.1 刚体动力学概述	428
8.2 Connection 连接工具条	429
8.2.1 连接之 Joint 运动副	429
8.2.2 连接之 Spring 弹簧	439
8.2.3 连接的其他按钮	441
8.3 多刚体动力学分析步骤	442
8.3.1 材料、模型和网格	442
8.3.2 连接	442
8.3.3 载荷和约束支撑	443
8.3.4 多刚体动力学分析设置	445
8.3.5 查看结果	447
8.4 第 8 章例子 1	450
8.4.1 建立仿真	450
8.4.2 Connection 定义运动副	451
8.4.3 连杆和曲轴的位置配对	454
8.4.4 多刚体动力学分析设置	455
8.4.5 求解并添加结果	455
第 9 章 瞬态(刚柔体)动力学分析	459
9.1 瞬态(刚柔体)动力学分析概述	459
9.2 刚柔体动力学分析步骤	460
9.2.1 材料、零件和网格	460
9.2.2 Connection 连接	461
9.2.3 初始条件	461
9.2.4 刚柔体动力学分析设置	464
9.2.5 载荷和约束支撑	468
9.2.6 收敛	470
9.2.7 查看结果	470
9.3 第 9 章例子 1	471
9.4 对比刚体动力学	474
第 10 章 工程热分析	476
10.1 热分析概述	476

10.1.1	传热基本方式	476
10.1.2	稳态热分析基本原理	478
10.1.3	瞬态热分析基本原理	479
10.2	稳态热分析详细步骤	480
10.2.1	材料属性	480
10.2.2	几何模型	481
10.2.3	定义 Connection 连接	481
10.2.4	划分网格	483
10.2.5	热载荷	483
10.2.6	分析设置	491
10.2.7	初始化	493
10.2.8	求解	493
10.2.9	结果与后处理	494
10.3	第 10 章例子 1	498
10.3.1	实例描述	498
10.3.2	步骤	499
10.4	瞬态热分析详细步骤	504
10.4.1	前处理	504
10.4.2	分析设置	505
10.4.3	定义初始条件	507
10.4.4	热载荷	507
10.4.5	求解与结果	507
10.5	第 10 章例子 2	507
10.5.1	实例描述	507
10.5.2	稳态热分析步骤	509
10.5.3	建立瞬态热分析	512
10.6	第 10 章例子 3	517
10.6.1	实例描述	517
10.6.2	建立稳态热分析	517
10.6.3	建立瞬态热分析	520
参考文献		524

第1章 ANSYS Workbench 基础

1.1 CAE 概述

计算机辅助工程分析 Computer Aided Engineering(CAE)是指工程设计中的计算机辅助工程。CAE 是用计算机辅助求解的一种近似数值分析方法,常用于解决复杂工程和产品结构强度、刚度、屈曲稳定性、动力响应、热传导、三维多体接触、弹塑性等力学性能的分析计算,以及结构性能的优化设计等问题。

CAE 主要是以有限元法(Finite Element Analysis, FEA)、有限差分法(Finite Difference Element Method, FDM)、有限体积法(Finite Volume Method, FVM)以及边界元法(Boundary Element Method, BEM)为数学基础发展起来的一个软件行业。由于目前国内有限元法应用最为广泛,并且 ANSYS 软件也是基于有限元法,所以本书只关注有限元法。

CAE 系统的核心思想是结构的离散化,它将实际结构离散为有限数量的、规则的单元,通过对得到的离散体进行分析,得出满足工程精度的近似结果,来替代对实际结构的分析,这样可以解决很多实际工程中只能理论分析、但无法求解的复杂问题。其基本过程先是将一个形状复杂的连续体的求解区域分解为有限的、形状简单的子区域,即将一个连续体简化为由数量有限的单元组合的等效组合体;通过将连续体离散化,把求解连续体的场变量(应力、位移、压力和温度等)问题简化为求解有限的单元节点上的场变量值。此时得到的基本方程是一个代数方程组,而不是原来描述真实连续体场变量的微分方程组。然后针对研究对象的物理和数学特征,选择相应的分析系统、求解算法进行求解。求解后得到近似的数值解,其近似程度取决于所采用的单元类型、数量以及对单元的插值函数。

应用 CAE 软件对工程或产品进行性能分析和模拟时,一般要经历以下 3 个过程:①前处理:采用 CAD(计算机辅助设计,Computer Aided Design)技术对工程或产品进行建模,输入所需各种数据,建立合理的有限元分析模型。②有限元分析:对有限元模型进行单元特性分析、有限元单元组装、有限元系统求解和有限元结果生成,这一步通常由软件完成。③后处理:根据工程或产品模型与设计的要求,对有限元分析结果进行用户所要求的加工、计算,并以图形方式提供给用户,辅助用户判定计算结果与设计方案的合理性。例如位移、应力、温度、压力分布的等值线图,表示应力、温度、压力分布的彩色明暗图,以及随着机械载荷和温度载荷变化而计算得到的位移、应力、温度、压力的动态显示图。

CAE 软件可以完成结构静态分析、动态分析;研究线性、非线性问题;结构(固体)、流体、电磁等分析等。CAE 软件主要的工程应用列举如下:①结构静强度计算分析;②结构动



力学分析;③结构碰撞与冲击的计算分析;④结构优化分析;⑤结构的疲劳与耐久性分析;⑥结构热分析;⑦结构的屈曲分析与稳定分析;⑧振动-噪声分析;⑨转子动力学分析;⑩柔性机构动力学分析;⑪机械-热耦合分析;⑫结构-流体-声场耦合分析;⑬光-机械-热耦合分析;⑭流体动力学分析;⑮化学反应和燃烧/爆炸分析;⑯金属成型分析;⑰结构制造过程仿真分析;⑱电磁场分析;⑲铸造仿真分析;⑳结构压电材料及微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)分析;等等。

目前国内外的 CAE 软件主要有 ANSYS, ADINA, ABAQUS, MSC 等。ANSYS 是经典的 CAE 软件,国内应用最广,客户成熟度最高,尤其是在高校科研领域。ADINA 和 ABAQUS 在非线性计算功能方面比 ANSYS 强,ABAQUS 没有流体计算模块,ADINA 不能做电磁分析但却是目前做流体-固体耦合最好的软件。

CAE 从 20 世纪 60 年代初在工程上开始应用到今天,已经历几十年的发展历史,其理论和算法都经历了从蓬勃发展到日趋成熟的过程,现已成为工程和产品结构分析中(如航空、航天、机械、土木结构等领域)必不可少的数值计算工具,同时也是分析连续力学各类问题的一种重要手段。随着计算机技术的普及和不断提高,CAE 系统的功能和计算精度都有很大提高,各种基于产品数字建模的 CAE 系统应运而生,并已成为结构分析和结构优化的重要工具,同时也是计算机辅助 4C 系统(CAD/CAE/CAPP/CAM)的重要环节。

1.2 ANSYS 软件概述

1.2.1 ANSYS 发展历程

1963 年,ANSYS 的创办人 John Swanson 博士任职于美国宾夕法尼亚州匹兹堡西屋公司的太空核子实验室。当时他的工作之一是为某个核子反应火箭作应力分析。为了工作上的需要,Swanson 博士写了一些程序来计算加载温度和压力的结构应力和变形。几年后,Wilson 博士在原有的有限元素法热传导程序上,扩充了不少三维分析的程序,包括了板壳、非线性、塑性、潜变(蠕变)和动态全程等。此程序当时命名为 STASYS(Structural Analysis System)。

1970 年末,ANSYS Inc. 宣告成立,ANSYS 的公司总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡。根据 Swanson 博士本人的说法,取 ANSYS 这个名字是因为专利律师跟他保证,ANSYS 并没有任何的特别含义,也不会侵犯到任何公司的版权。

1970 年,公司发布了 ANSYS 的 2.0 版。1979 年左右,ANSYS 3.0 版问世。1984 年发布 ANSYS 4.0,并开始支持 PC 机。1993 年推出 5.0 版。1994 年,Swanson Analysis Systems Inc. 被 TA Associates 并购。当年该公司在底特律的 AUTOFACT'94 展览会上宣布了新的公司名称:ANSYS。

2001 年是 ANSYS 非常忙碌而且蓬勃发展的一年。首先和 International Techne Group Incorporated 合作推出了 CAD fix for ANSYS 5.6.2/5.7,以解决由外部汇入不同几何模型文件的问题。接着先后并购了 CADOES. A 及 ICM CFD Engineering。2001 年 12 月,ANSYS 6.0 版开始发售。此版的离散(Sparse)求解模块有显著的改进,不但速度增快,而且内存空间需求大为减小。

2002 年 10 月,ANSYS 推出 7.0 版。自 ANSYS 7.0 开始,ANSYS 公司在 ANSYS 经