

ANSYS Workbench 14.0 JIANMU FANGZHEN JISHU JI SHILI XIANGJIE

ANSYS Workbench 14.0 建模仿真技术 及实例详解

袁越锦 徐英英 张艳华 编著

— 结构静力分析实例

— 动力学分析实例

— 优化设计实例

— 疲劳分析实例

— 热分析实例

— 电磁场分析实例

— 计算流体动力学分析



化学工业出版社

ANSYS Workbench 14.0 JIANMU FANGZHEN JISHU JI SHILI XIANGJIE

ANSYS Workbench 14.0 建模仿真技术 及实例详解

袁越锦 徐英英 张艳华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS Workbench 14.0 建模仿真技术及实例详解/袁越锦,
徐英英, 张艳华编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-122-18107-7

I. ①A… II. ①袁…②徐…③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 (2013) 第 177494 号



责任编辑: 贾娜
责任校对: 宋夏

文字编辑: 余纪军
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 22½ 字数 555 千字 2014 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

面对制造业信息化大潮，ANSYS 公司于 2002 年推出了新一代协同仿真产品研发平台 Workbench，该平台不但继承了 ANSYS 经典平台（ANSYS Classic）在有限元仿真分析上的所有功能，而且融入了 PRO/E、UG 等 CAD 软件强大的几何建模功能和 ISIGHT、BOSS 等优化软件在优化设计方面的优势，真正实现了集产品设计、仿真和优化功能于一身，可以帮助技术人员在同一软件环境下完成产品研发过程中的所有工作，从而大大简化了产品开发流程，加快了上市周期。十多年来，ANSYS 公司兼并了 CFX 和 FLUENT 等许多优秀软件而成为全球 CAE 界的巨无霸。目前，ANSYS 公司的最新版 Workbench 14.0 所提供的 CAD 双向参数链接互动、项目数据自动更新、全面的参数管理、无缝集成的优化设计工具等功能，使其在仿真驱动产品设计分析方面达到了前所未有的高度。同时，ANSYS Workbench 14.0 具有强大结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析的功能。作为业界最领先的工程仿真技术集成平台，Workbench14.0 提供了全新的“项目视图”功能，将整个仿真流程更加紧密地组合在一起，通过简单的拖曳操作即可完成复杂的多物理场分析流程。

本书正是以该软件的最新版本 ANSYS Workbench 14.0 为操作平台，以案例教学模式为思路而精心编写的。本书每一章的编写都根据软件实际应用的步骤，由浅入深、图文并茂地介绍其具体的使用方法和操作技巧，并引入实例详解其操作过程，旨在使读者熟练掌握每个模块的操作步骤，最终能够独立完成较为复杂的 ANSYS Workbench 建模与仿真技术工作。

全书共分为 10 章，各章具体内容简单介绍如下。

第 1 章 绪论。本章对 CAE 软件、有限元法和 ANSYS Workbench14.0 的新亮点进行了简单介绍，对 Workbench 的分析基本过程、启动方式及其操作界面等进行了详细讲解。目的是使读者初步了解该软件，为后面各章节知识的学习打下基础。

第 2 章 DesignModeller 建模。本章主要讲解如何在 ANSYS Workbench 中建模，包括草图建模、三维几何建模、高级三维几何建模、概念建模以及参数化建模，通过操作实例，使读者能够更好的掌握并应用建模知识，为后面进行有限元分析打下坚实的基础。

第 3 章 ANSYS Workbench 前处理。本章介绍了 Workbench 中 CAD 模型导入，网格划分以及 Mechanical 的工作环境、前处理等内容，重点讲解了如何对模型进行网格划分、如何在模型中施加载荷及约束、如何进行结果后处理等内容。

第 4 章 结构静力分析实例。本章介绍了结构静力学分析的内容，并通过实例讲解了常见的静力学分析，读者在本章学习后应主要掌握 Workbench14.0 中材料的定义、网格的划分、约束和载荷的设定、输出结果的设定等相关内容，详细掌握网格细化、接触关系类型及定义、远程力的加载、位移载荷的加载、零部件的隐藏操作等内容。

第 5 章 动力学分析实例。本章中介绍了车轮的模态分析和瞬态分析两个实例，详细的讲

解了 Workbench14.0 中的模态分析模块和随即响应模块的应用,对于其中的模型导入、载荷设定、输出参数设置、后处理结果中的数据分析等应重点掌握。

第 6 章 优化设计实例。本章介绍了优化设计的基本知识,讲解了如何通过 ANSYS Workbench 对模型进行优化设计,并通过具体实例——支架的优化设计对操作过程进行详细的介绍。

第 7 章 疲劳分析实例。本章首先对疲劳分析及其相关理论做了介绍,接着讲解了关于 ANSYS Workbench 用于疲劳分析的原理,最后通过对一个简单实例的操作过程的讲解具体介绍了疲劳分析的步骤。

第 8 章 热分析实例。本章介绍了热力学分析的基本知识,讲解了热力学分析的基本过程,给出了热力学分析的两个典型实例——齿轮泵基座和汽缸盖的热分析。

第 9 章 电磁场分析实例。本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 与 Ansoft Maxwell 15.0 的单向耦合分析功能。讲解通过 Ansoft Maxwell 软件计算通有电流的四分裂导线的磁场,磁场与电流互相作用产生磁场力,然后将磁场力结果映射到 Workbench 模型中,进行静力分析。

第 10 章 计算流体动力学分析。本章介绍了流体动力学的基本知识,讲解了流体动力学问题分析的基本过程,给出了流体动力学问题分析的两个典型实例——基于 Fluent 的机翼机体流体动力学分析和基于 Fluent、CFX 的消防栓水枪头流体动力学分析。

本书可供从事产品设计、仿真与优化的工程技术人员和广大 CAE 爱好者学习参考,也可作为机械、化工、能源、电子通信、工程力学、航空航天等专业的高年级本科生、研究生和教师的参考书、教学用书和实验指导书。

本书由袁越锦、徐英英、张艳华编著,其中,第 1~3、9、10 章由袁越锦编写,第 4、5 章由张艳华编写,第 6~8 章由徐英英编写。另外,感谢聂俊男、赵哲、陈原在本书编写过程中提供的帮助。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

第 1 章 绪论/1

1.1 CAE 软件简介	1
1.1.1 应用状况	2
1.1.2 CAE 重要性	4
1.2 有限元法简介	4
1.2.1 有限元法的基本思想	5
1.2.2 有限元法特点	5
1.3 ANSYS 软件介绍	6
1.3.1 ANSYS 软件的发展	7
1.3.2 ANSYS 软件的主要功能	7
1.4 ANSYS Workbench 概述	8
1.4.1 ANSYS Workbench 架构	8
1.4.2 多物理场分析模式	9
1.4.3 项目级仿真参数管理	9
1.4.4 Workbench 应用模块	9
1.4.5 Workbench 应用方式	10
1.4.6 ANSYS Workbench 软件的特点	10
1.5 ANSYS Workbench 分析的基本过程	12
1.5.1 前处理	12
1.5.2 加载并求解	13
1.5.3 后处理	13
1.6 系统要求	14
1.7 Workbench 14.0 基本操作界面	14
1.7.1 启动 ANSYS Workbench	14
1.7.2 ANSYS Workbench 的主界面	16
1.8 Workbench 项目管理	19
1.8.1 复制及删除项目	19
1.8.2 关联项目	19
1.8.3 项目管理操作案例	21
1.8.4 设置项属性	22
1.9 Workbench 文件管理	22
1.9.1 文件目录结构	22
1.9.2 快速生成压缩文件	23
1.10 运用 ANSYS Workbench 的第一个简单实例	24
1.10.1 实例介绍	24

1. 10. 2	启动 ANSYS Workbench 并建立分析项目	25
1. 10. 3	导入创建的几何体	26
1. 10. 4	添加材料库	28
1. 10. 5	添加模型材料属性	30
1. 10. 6	划分网格	31
1. 10. 7	施加载荷与约束	32
1. 10. 8	结果后处理	34
1. 10. 9	保存与退出	37

第 2 章 DesignModeler 建模/40

2. 1	概述	40
2. 2	建模实例	43
2. 2. 1	草图实例	43
2. 2. 2	三维几何建模实例	48
2. 2. 3	高级三维几何建模实例	54
2. 2. 4	概念建模实例	57
2. 2. 5	参数化建模实例	61

第 3 章 ANSYS Workbench 前处理/69

3. 1	概述	69
3. 2	导入外部 CAD 文件	69
3. 2. 1	非关联性导入文件	69
3. 2. 2	关联性导入文件	70
3. 2. 3	导入定位	70
3. 2. 4	创建场域几何体	70
3. 3	材料参数输入控制	70
3. 3. 1	进入 Engineering Data 应用程序	70
3. 3. 2	材料库	71
3. 3. 3	添加材料	72
3. 3. 4	添加材料属性	73
3. 4	Workbench 划分网格	74
3. 4. 1	网格划分平台	74
3. 4. 2	网格参数设置	76
3. 4. 3	局部网格控制	85
3. 4. 4	几种 3D 网格划分方法介绍	87
3. 5	施加载荷和约束	93
3. 5. 1	施加载荷	93
3. 5. 2	施加约束	95
3. 6	模型求解	96
3. 7	结果后处理	98
3. 7. 1	结果显示	98
3. 7. 2	变形显示	98

3.7.3 应力和应变	99
3.7.4 接触结果	100
3.7.5 自定义结果显示	101
3.8 网格划分案例	102

第 4 章 结构静力分析实例/112

4.1 概述	112
4.2 圆孔应力集中问题	113
4.2.1 问题描述	113
4.2.2 启动 Workbench 建立承拉板模型	113
4.2.3 模型的网格及边界条件定义	116
4.2.4 应力计算及结果输出	120
4.3 固支梁弯曲问题实例	122
4.3.1 问题阐述	122
4.3.2 固支梁模型的建立	122
4.3.3 网格划分及边界条件的定义	124
4.4 螺栓的连接问题实例	127
4.4.1 问题阐述	127
4.4.2 模型的建立或导入	127
4.5 圆柱体镟粗问题	133
4.5.1 问题阐述	133
4.5.2 有镟粗模型的建立及导入	133
4.5.3 网格划分及边界条件定义	134
4.6 车床装配体整体受力分析	137
4.6.1 问题阐述	137
4.6.2 模型导入及材料定义	137

第 5 章 动力学分析实例/142

5.1 概述	142
5.2 车轮的模态分析	142
5.2.1 问题描述	142
5.2.2 模型导入及材料定义	142
5.2.3 有限元网格的划分	143
5.2.4 模态分析属性设定及求解	144
5.2.5 车轮模态分析结果	145
5.3 车轮瞬态动力学分析	147
5.3.1 瞬态动力学分析概述	147
5.3.2 问题阐述	147
5.3.3 模型项目共享处理及材料定义	147
5.3.4 添加动态力载荷	148
5.3.5 输出设定	150

第 6 章 优化设计实例/153

6.1 概述	153
6.1.1 定义参数	154
6.1.2 ANSYS 优化方法	154
6.1.3 Design Explorer 项目	154
6.1.4 Design Explorer 操作界面	155
6.2 支架拓扑优化设计	156
6.2.1 问题描述	156
6.2.2 项目概图	156
6.2.3 导入几何模型	158
6.2.4 前处理	158
6.2.5 求解结果	161
6.3 支架参数优化设计	163
6.3.1 问题描述	164
6.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	164
6.3.3 导入几何体	165
6.3.4 添加材料库	167
6.3.5 添加模型材料属性	170
6.3.6 划分网格	170
6.3.7 施加约束和载荷	172
6.3.8 结果后处理	172
6.3.9 求解结果	174
6.3.10 观察优化参数	175
6.3.11 响应曲面	180
6.3.12 观察新设计点的结果	185

第 7 章 疲劳分析实例/187

7.1 疲劳分析简介	187
7.2 疲劳分析的基本理论	188
7.2.1 静疲劳理论	188
7.2.2 振动疲劳理论	188
7.2.3 疲劳寿命	188
7.2.4 疲劳抗力曲线 (S-N 曲线)	189
7.2.5 恒定振幅载荷	189
7.2.6 成比例载荷	190
7.2.7 应力定义	190
7.3 ANSYS Workbench 疲劳分析的基本组成	190
7.3.1 疲劳分析的步骤	190
7.3.2 材料特性	190
7.3.3 接触区域	191
7.3.4 载荷与支撑	191

7.3.5	设定需要的结果	191
7.4	Fatigue Tool 模块的组成与运用	191
7.4.1	载荷类型	191
7.4.2	平均应力影响	192
7.4.3	强度因子	192
7.4.4	应力分析	192
7.4.5	求解疲劳分析	193
7.4.6	查看疲劳结果	193
7.5	不稳定振幅的疲劳分析	194
7.5.1	不规则载荷的历程和循环 (History and Cycles)	194
7.5.2	不定振幅程序	194
7.5.3	定义相关	194
7.5.4	查看疲劳结果	195
7.6	非比例载荷的疲劳分析	196
7.6.1	建立两个载荷环境 (two Loading Environments)	196
7.6.2	从模型分支条下增加一个求解组合 (Solution Combination)	196
7.6.3	求解组合 (Solution Combination) 添加 Fatigue Tool	197
7.6.4	(定义) 所需的其他结果并求解	197
7.7	实例: 单向加筋板模型的疲劳分析	197
7.7.1	问题描述	197
7.7.2	启动 Workbench 并建立分析项目	198
7.7.3	导入创建的几何体	198
7.7.4	添加材料库	200
7.7.5	添加模型材料属性	202
7.7.6	划分网格	203
7.7.7	施加载荷与约束	205
7.7.8	结果后处理 (设置求解项)	208
7.7.9	求解并显示求解结果	210
7.7.10	保存和退出	212

第 8 章 热分析实例/214

8.1	传热概述	214
8.1.1	传热方式	215
8.1.2	热分析类型	215
8.1.3	非线性热分析	216
8.1.4	边界条件或初始条件	216
8.2	热分析流程	216
8.2.1	几何模型	217
8.2.2	实体接触	217
8.2.3	导热率	218
8.2.4	施加载荷	218
8.2.5	热边界条件	219

8.2.6	热应力分析	219
8.2.7	结果后处理	220
8.3	热分析实例 1——齿轮泵基座	221
8.3.1	问题描述	221
8.3.2	项目概图	221
8.3.3	前处理	222
8.3.4	结果后处理	226
8.4	热分析实例 2——汽缸盖	228
8.4.1	问题描述	228
8.4.2	项目概图	228
8.4.3	前处理	228
8.4.4	结果后处理	233
8.4.5	热应变分析	235

第 9 章 电磁场分析实例/237

9.1	多物理场耦合分析简介	237
9.2	案例——四分裂导线电磁结构耦合分析	238
9.2.1	问题描述	238
9.2.2	建立电磁分析与数据读取	238
9.2.3	求解器与求解域的设置	240
9.2.4	赋予材料属性	241
9.2.5	添加激励	242
9.2.6	网格化分与分析步创建	242
9.2.7	模型检查与计算	244
9.2.8	创建力学分析和数据共享	244
9.2.9	材料设定	245
9.2.10	网格化分	246
9.2.11	添加边界条件与映射激励	248
9.2.12	后处理	249

第 10 章 计算流体动力学分析/250

10.1	计算流体动力学概述	250
10.1.1	什么是计算流体动力学	250
10.1.2	计算流体动力学特点	251
10.1.3	计算流体动力学的应用领域	251
10.2	常用的 CFD 商用软件	252
10.2.1	FLUENT	252
10.2.2	CFX	253
10.3	流体动力学控制方程	254
10.3.1	质量守恒方程	254
10.3.2	动量守恒方程	255
10.3.3	能量守恒方程	255

10.4	CFD 中的三维湍流模型	256
10.4.1	湍流流动的特性	256
10.4.2	标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型	257
10.5	流体动力学分析流程	257
10.6	基于 Fluent 的机翼机体流体动力学分析	258
10.6.1	案例介绍	258
10.6.2	启动 Workbench 并建立分析项目	259
10.6.3	导入几何体	260
10.6.4	划分网格	263
10.6.5	网格检查与处理	268
10.6.6	设置物理模型和材料	271
10.6.7	设置操作环境和边界条件	273
10.6.8	设置求解方法和控制参数	274
10.6.9	设置监视窗口和初始化	276
10.6.10	求解和退出	281
10.6.11	计算结果的后处理	282
10.6.12	保存与退出	292
10.7	基于 Fluent 的消防栓水枪头流体动力学分析	292
10.7.1	案例介绍	293
10.7.2	启动 Workbench 并建立分析项目 (Fluent)	293
10.7.3	导入几何体	294
10.7.4	划分网格	298
10.7.5	网格检查与处理	306
10.7.6	设置物理模型和材料	309
10.7.7	设置操作环境和边界条件	310
10.7.8	设置求解方法和控制参数	314
10.7.9	设置监视窗口和初始化	316
10.7.10	求解和退出	318
10.7.11	计算结果的后处理	319
10.7.12	保存和退出	329
10.8	基于 CFX 的消防栓水枪头流体动力学分析	330
10.8.1	建立分析项目	330
10.8.2	划分网格	332
10.8.3	设置分析类型	335
10.8.4	设置流体区域参数	336
10.8.5	设置边界条件	337
10.8.6	设置求解器	340
10.8.7	设置输出控制	341
10.8.8	运行求解器	341
10.8.9	计算结果的后处理	343
10.8.10	保存和退出	345

第 1 章

Chapter 1

绪 论

1.1 CAE 软件简介

CAE（计算机辅助工程分析）主要是以有限元法、有限差分法、有限体积以及无网格法为数学基础发展起来的一个软件行业。由于目前在国内有限元法应用最为广泛，因此在这里主要介绍有限元类软件在国内的应用，其他一些软件不做过多的阐述。

作为 20 世纪中期兴起的技术手段，有限元技术随着计算机科学技术的快速发展，得到了飞速的发展和广泛的应用。基于有限元的技术，已经在国际上形成了数百亿规模的广大市场，而主要的有限元厂商则包括了 ABAQUS、SolidWorks Simulation、ADINA、ALGOR、ANSYS 和 MSC 等，其他一些基于有限元算法的专业分析软件则不胜枚举，软件所应用的范围也越来越宽泛，如图 1-1 所示。

同时，随着有限元技术的发展，国内原有的有限元应用体系正在发生着深刻的变化。早在 80 年代初期，国内就已经形成了一批以高校和科研院所为主要力量的有限元技术研究、开发、应用体系。早期北大袁明武老师应用的 SAP，在当时国内引起了广泛的影响。在此背景下，国内的相关学者相继开发了多套有限元程序，例如计算所梁国平老师的 FEPG、郑州机械研究所的紫瑞、北京农机学院的有限元分析系统，以及大连理工的 JIF-EX。而这些软件由于各自的一些原因，虽然在国内产生了一定的影响，但都没能在企业界得到广泛的应用。90 年代国外大型商业软件进入国门，掀起了第二次有限元应用的浪

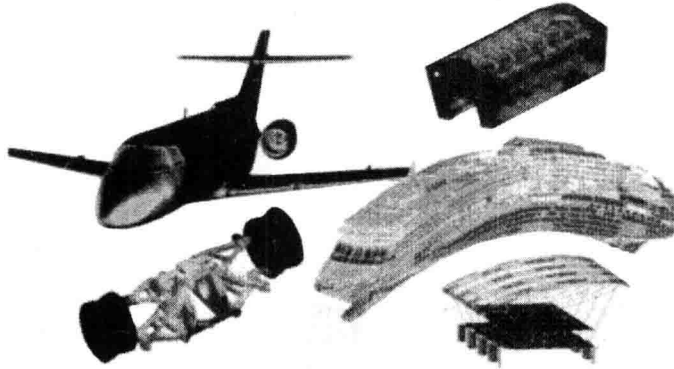


图 1-1 CAE 软件的分析

潮，由于国内高校及研究院所在有限元技术方面具备一定的研发和应用基础，因而成为了应用初期阶段的主力军。

近几年来，数字化产品设计的概念逐渐深入人心，国内高校与科研院所技术研究和应用水平不断提高，有限元技术已经为广大企业所认可，第三次有限元技术的应用浪潮正在形成。值得注意的是，有限元技术不再仅仅停留在高校和研究院所中，而是更多地走向了企业。同时，更多使用方便、操作简单的专用分析软件也得到了广泛应用。

1.1.1 应用状况

目前，CAE 软件在国内主要应用于汽车、电子、航空航天、土木工程、石油等行业，在汽车行业的应用尤为广泛。软件的类型主要包括通用前后处理软件、通用有限元求解软件和行业专用软件。汽车行业在国外是有限元软件的主要应用行业，其所涉及的专业领域相当广泛，并且应用历史长、应用成熟度高。

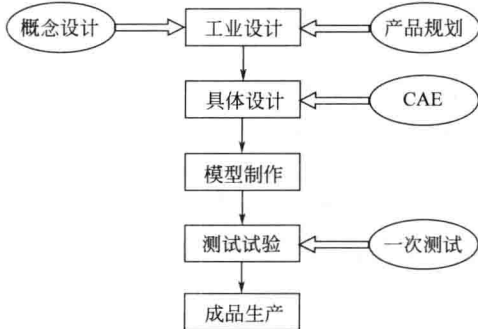


图 1-2 应用 CAE 后产品流程图

由于有限元技术的特点，前处理已经成为了一个相对独立而又十分重要的部分。很多大中型企业都采用了适应自己需求的前后处理软件。这些前后处理软件都具有良好的接口，可与众多的有限元求解软件相结合，以便于用户更快、更方便地处理问题，如图 1-2 所示。

求解软件可以说是琳琅满目，各种软件都有着各自的特点。在行业内，一般将其分为线性分析软件和非线性软件，例如 ALGOR、ANSYS 都在线性分析方面具有自己的优势，而 NASTRAN、ABAQUS、ADINA、MARC

则在非线性分析方面各具特点，其中 ABAQUS 被认定为最优秀的非线性求解软件。

近些年来，分析软件正朝着多物理场的方向发展。大家可以通过业内一些公司的举动感受到这一点，例如，ANSYS 公司收购了 CFX 流体软件，并加强与 EMSS 等公司的合作，就是为了不断加强其多物理场耦合的功能。在这里需要提到的是，由于历史原因，ALGOR 继承了 SAP 的模块化思想，在多物理场分析方面也有很好的应用；同源与 SAP 的 ADINA 在流固耦合上则非常有自己的特色。由于解算多物理场问题更多是从物理方程

出发，因此还有另外一些软件在这方面有着良好的应用，比如国内火箭公司针对微分方程的 FEPG 系统，又如 MathWorks 公司在数值计算软件 MATLAB 基础上发展起来的 FEMLAB。图 1-3 为流体动力学分析实例。

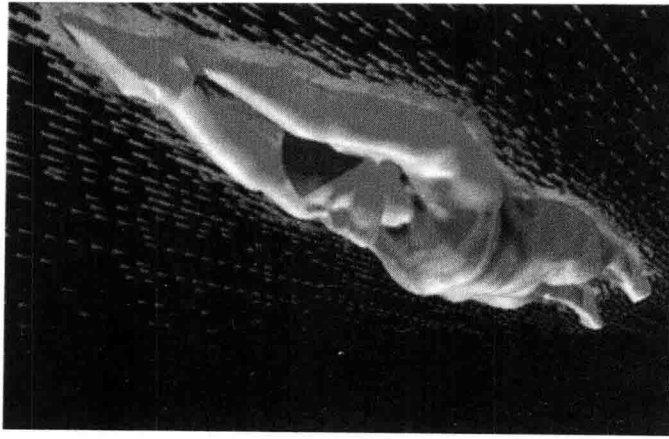


图 1-3 流体动力学分析实例

此外，由于专用有限元软件受其应用领域的限制，只能在各自的行业领域得到应用。例如，法国 ESI 公司的 ProCAST，其与 MAGMA 是竞争关系，软件功能与 MAGMA 大同小异。另外还有在锻造领域应用比较多的 Deform 系统，也得到了国内很多企业的认可。又如，MAGMA 公司的 MAGMA 系列铸造软件，可进行各种金属材料浇铸、固化、压力、流动性、应力、温度及热平衡的仿真分析。工程师可根据计算结果更改设计，调整帽口的位置和数量，进而提高铸造质量。

在板材成形行业里，有 AUTOFORM 系列软件，该软件单元架构基于膜单元形式，因此其运算速度在同行业内相对较快。MSC/DYTRAN，其特有的材料流动性分析可直观地预测出冲压件厚度及应力分布、开裂和皱褶的形成等。另外，来自 ETA 公司的 DYNAFORM 可以预测成形过程中板料的破裂、起皱、减薄、划痕和回弹，评估板料的成形性能，从而为板料成形工艺及模具设计提供帮助。由于这一类分析与模具设计有着非常大的关联，因此以上这些软件都注重与 CAD 软件的接口，基本都与流行的三维设计软件 CATIA、Pro/ENGINEER 和 UG 有着良好的接口，软件的使用操作也都比较方便。

另外，在汽车行业应用中，经常要对整车进行机械动力学仿真，在这一领域中，国内常见的软件有 MSC/ADAMS。其被广泛用来进行汽车操纵稳定性、汽车行驶平顺性的动态仿真。ADAMS 中的 TIRE 模块提供若干种轮胎模型供分析时选用，以准确地建立轮胎的动力学模型。ADAMS 中的 CAR 模块专为汽车动力学仿真而设计，使用十分方便。另外在国内应用比较广泛的还有美国 ETA 公司的 VPG，VPG (Virtual Proving Ground) 虚拟试验场是 ETA 公司长期总结汽车分析工程经验，在 LD-DANA 平台上开发的，是 ETA、LSTC 和 ANSYS 三家公司合作推出的专门应用于汽车工程的软件。VPG 主要被应用于当前汽车产品开发中的重点——整车系统疲劳、整车系统动力学、NVH 和整车碰撞安全及乘员保护等热门问题。市场上还有一些专业软件，例如，LMS 公司的噪音分析软件 SYSNOISE，MSC 公司的疲劳分析软件 MSC/Fatigue，nCode 公司的 Fatigue，奥地利 MAGMA 公司的热疲劳分析软件 FEMFT 等。

1.1.2 CAE 重要性

① CAE 可以直观地显示出目前还不易观测到的、说不清楚的一些实验现象,使得结果容易为人理解和分析,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。如爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程,弹体在不均匀介质穿过过程中的受力和偏转。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,如核爆炸过程与效应,核反应堆的爆炸事故等。

② CAE 本身就可以看做一种基本实验。用计算机计算弹体的飞行与炸药爆炸过程以及各种非线性波的相互作用问题,实际上就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的问题。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。而数值模型在某种意义上比伦理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,而且可以随时连续动态地、重复地显示事物的发展,了解其整体与局部的细致过程。

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。爆炸、穿透试验费用是昂贵的,并存在一定危险,因此数值模拟不但可以加速理论、实验研究的进程,而且有很大的经济效益。

④ 一次投资,长期受益。虽然数值模拟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,数值模拟软件可以进行复制移植、重复利用,并可进行适当的修改而满足不同情况的计算需求。据相关统计数据表明,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 9%~12%。

1.2 有限元法简介

有限元的基本概念即将一个原来是连续的物体划分为有限个单元,这些所划分的单元通过有限个节点相互连接,承受与实际载荷等效的节点载荷,并根据力的平衡条件进行分析,然后根据变形协调的条件把这些单元重新组合,变成能够整体进行综合求解的模块,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。有限元法的基本思想就是离散化。

有限元是那些集合在一起能够表示实际连续域的离散单元。有限元的概念早在几个世纪前就已产生并得到了应用,例如用多边形(有限个直线单元)逼近圆来求得圆的周长,但作为一种方法而被提出,则是从 21 世纪初开始的。有限元法最初被称为矩阵近似方法,应用于航空器的结构强度计算,并由于其方便性、实用性和有效性而引起从事力学研究的科学家的浓厚兴趣。经过短短数十年的努力,随着计算机技术的快速发展和普及,有限元方法迅速从结构工程强度分析计算扩展到几乎所有的科学技术领域,成为一种丰富多彩、应用广泛并且实用高效的数值分析方法。如图 1-4 所示为有限元法用于齿轮的设计计算。

有限元方法与其他求解边值问题近似方法的根本区别在于它的近似性仅限于相对小的子域中。20 世纪 60 年代初首次提出结构力学计算有限元概念的克拉夫(Clough)教授形象地将其描绘为:“有限元法=Rayleigh Ritz 法+分片函数”,即有限元法是 Rayleigh Ritz 法的一种局部化情况。不同于求解(往往是困难的)满足整个定义域边界条件的允许函数的 Rayleigh Ritz 法,有限元法将函数定义在简单几何形状(如二维问题中的三角形或任

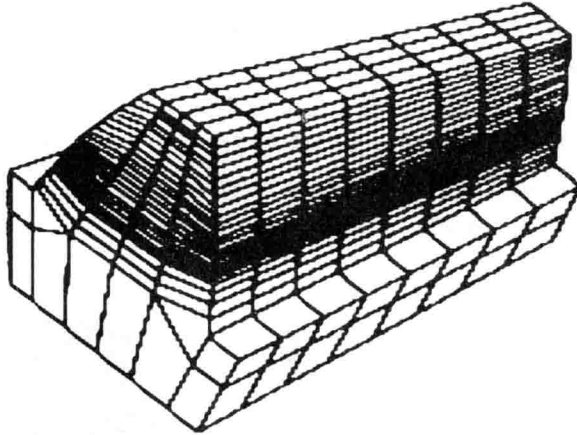


图 1-4 有限元法用于齿轮设计

意四边形)的单元域上(分片函数),且不考虑整个定义域的复杂边界条件,这是有限元法优于其他近似方法的原因之一。

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(基本方程、基本变量、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 将一个连续体或表示结构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连接为一个组合体,如图1-5所示;

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)在单元各个节点上的数值和与其对应的插值函数来表达。由于在连接相邻单元的节点上,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。因此,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;

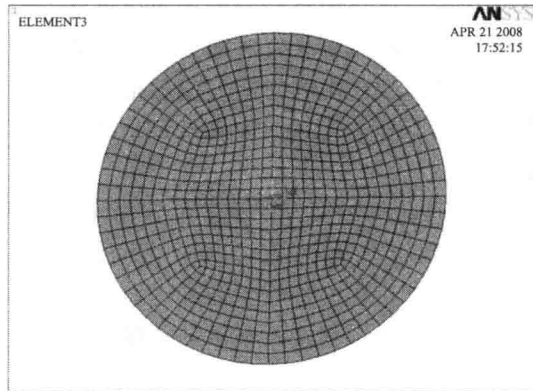


图 1-5 有限元法单元划分示意图

③ 通过和原问题数学模型(例如边界条件、基本方程等)等效的加权余量法或变分原理,建立求解基本未知量(场函数节点值)的常微分方程组或代数方程组。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 有限元法特点

① 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,并未限制各个单元所对应的方程必须有相同的形式,也未限制场函数所满足的方