

CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS 系列

ANSYS Workbench 16.0

理论解析与工程应用实例

CAE应用联盟 组编



关注“机械工业出版社计算机分社”官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS Workbench 16.0 理论解析 与工程应用实例

CAE 应用联盟 组编



机械工业出版社

本书以 ANSYS Workbench 16.0 为对象, 详细介绍了该软件的功能及应用。本书内容丰富, 涉及领域范围广, 读者在学习软件操作的同时, 也能掌握解决相关工程领域实际问题的思路与方法, 并能自如地解决本领域所出现的问题。

全书共分 6 篇, 第 1 篇从有限元理论着手介绍了有限元的控制方程以及 ANSYS Workbench 平台的基础应用知识; 第 2 篇通过项目范例讲解在 Workbench 平台中进行结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析、瞬态动力学分析及线性屈曲分析的方法; 第 3 篇为结构有限元分析的进阶部分, 讲解在 Workbench 平台中进行的显式动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及压电分析的方法; 第 4 篇通过项目范例讲解在 Workbench 平台中进行的热力学分析、流体力学分析及电磁场分析的方法; 第 5 篇作讲解在 Workbench 平台的结构优化分析; 第 6 篇通过案例介绍 ANSYS AIM 分析环境的分析过程与方法。

本书工程实例丰富、讲解详尽, 内容安排循序渐进、深入浅出, 适合不同基础的读者。本书适合理工院校土木工程、机械工程、力学、电气工程等相关专业的高年级本科生、研究生及教师使用, 同时也可以作为相关工程技术人员从事工程研究的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例 / CAE 应用联盟组编.

—北京: 机械工业出版社, 2016.5

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-54571-2

I. ①A… II. ①C… III. ①有限元分析-应用软件 IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 192858 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

责任校对: 张艳霞 责任印制: 李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·29.75 印张·733 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-54571-2

定价: 79.00 元

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

服务咨询热线: (010) 88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网: www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

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，还可以节省大量建设投资。

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、Creo、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 Workbench 16.0 具有强大的结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析的功能，除此之外，从 ANSYS 16.0 版本开始，在 Workbench 平台中对分析界面进行了统一改进——ANSYS AIM 分析环境。

作为业界有一定影响力的工程仿真技术集成平台，Workbench 16.0 提供了全新的“项目视图 (Project Schematic View)”功能，将整个仿真流程更加紧密地组合在一起，通过简单的拖拽操作即可完成复杂的多物理场分析流程及多物理场的优化分析功能。

1. 本书特点

由浅入深，循序渐进：本书以初、中级读者为对象，首先从有限元基本原理及 ANSYS Workbench 使用基础讲起，再辅以 ANSYS Workbench 在工程中的应用案例帮助读者尽快掌握使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、内容新颖：本书将作者多年 ANSYS Workbench 使用经验与实际工程应用案例结合，在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

实例典型、轻松易学：学习分析案例的具体操作是掌握 ANSYS Workbench 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ANSYS Workbench 在各方面的应用。

2. 本书内容

本书在必要的理论概述的基础上，通过大量的典型案例对 ANSYS Workbench 分析平台中的模块进行了详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解，全书内容简洁、明快，给人耳目一新的感觉。

本书主要分 6 篇 20 章，主要介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台在结构、电磁、热学、噪声、流体力学、压电材料、复合材料及疲劳分析各个领域中的有限元分析及操作过程：

第 1 篇介绍了有限元理论和 ANSYS Workbench 16.0 平台常用命令，几何建模与导入方法，网格划分及网格质量评价方法，结果的后处理操作等方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 1 章：有限元基本理论

第 2 章：几何建模

第 3 章：网格划分

第 4 章：后处理

第 2 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台结构基础分析内容，包括结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析、瞬态动力学分析及线性屈曲分析等 7 个方面的内容，本篇包括以下 7 个章节的内容。

第 5 章：结构静力学分析

第 6 章：模态分析

第 7 章：谐响应分析

第 8 章：响应谱分析

第 9 章：随机振动分析

第 10 章：瞬态动力学分析

第 11 章：线性屈曲分析

第 3 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台的进阶分析功能，主要包括显式动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及压电分析等内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 12 章：显式动力学分析

第 13 章：复合材料分析

第 14 章：疲劳分析

第 15 章：压电分析

第 4 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台在电磁场、热力学及流体力学方面的内容，本篇包括以下 3 个章节的内容。

第 16 章：热学分析

第 17 章：流体动力学分析

第 18 章：电磁场分析

第 5 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台结构高级分析功能，主要介绍了结构优化方面的内容，本篇包括以下 1 章的内容。

第 19 章：结构优化分析

第 6 篇介绍了使用 ANSYS AIM 分析环境进行有限元分析的一般方法及步骤，本篇包括以下 1 章的内容：

第 20 章：ANSYS AIM 分析过程

3. 网盘内容

本书附赠网盘资料主要包括案例模型与案例的操作文档，其中案例的模型文件与案例工程文件同放于相关章节的目录中，以方便读者查询。

例如：第 5 章的第 2 个操作实例“静力分析实例 2——子模型静力分析”的几何文件和工程项目管理文件放置在“网盘\Chapter05\char05-2\”路径的文件夹下。

4. 读者对象

本书适合于 ANSYS Workbench 16.0 初学者和期望提高有限元分析及建模仿真工程应用能力的读者，具体说明如下。

★相关从业人员

★初学 ANSYS Workbench 16.0 的技术人员

★大中专院校的教师和在校生

★相关培训机构的教师和学员

★参加工作实习的“菜鸟”

★ ANSYS Workbench 16.0 爱好者

★广大科研工作人员

★初、中级 ANSYS Workbench 16.0 从业人员

注：其中电磁分析模块（Maxwell）及疲劳分析模块（nCode）需要读者单独安装，另外本书中部分章节的内容需要安装接口程序。

建议使用 ANSYS Workbench 16.0 及以上平台学习本教程。

5. 读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者朋友在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 <http://blog.sina.com.cn/caxart>，编者会尽快给予解答，我们将竭诚为您服务。

6. 本书作者

本书由 CAE 应用联盟组编，参与编写的有丁金滨、张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、张岩、唐家鹏、石良臣、王菁、郭海霞、李昕、刘成柱、沈再阳、林金宝、高飞、宋玉旺、张文电、张亮亮、于苍海和孙国强，在此一并表示感谢。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

目 录

出版说明
前言

第 1 篇

第 1 章 有限元基本理论	1
1.1 有限元法发展综述.....	1
1.1.1 有限元法的孕育过程及诞生和 发展.....	2
1.1.2 有限元法的基本思想.....	2
1.1.3 有限元的应用及其发展趋势.....	4
1.2 有限元分析基本理论.....	6
1.2.1 有限元分析的基本概念和计算 步骤.....	6
1.2.2 基于最小势能原理的有限元法.....	13
1.2.3 杆系结构的非线性分析理论.....	17
1.2.4 稳定计算理论.....	25
1.3 工程问题中的有限元理论.....	28
1.3.1 工程问题的数学物理方程.....	28
1.3.2 变分函数.....	31
1.3.3 插值函数.....	32
1.3.4 形函数.....	32
1.3.5 刚度矩阵.....	32
1.3.6 连通性.....	33
1.3.7 边界条件.....	33
1.3.8 圆柱坐标系中的问题.....	34
1.3.9 直接方法.....	34
1.4 桁架与梁的有限元方法.....	35
1.4.1 桁架的定义.....	35
1.4.2 桁架的有限元公式.....	36
1.4.3 梁的定义.....	40
1.4.4 梁的有限元公式.....	41
1.4.5 载荷矩阵.....	43
1.5 板的有限元方法.....	44
1.5.1 矩形单元.....	44
1.5.2 自然坐标.....	46
1.5.3 线性三角形单元.....	47
1.6 应用实例.....	47
1.6.1 实例 1: 求解悬索的位移.....	47
1.6.2 实例 2: 求温度分布问题.....	49
1.7 本章小结.....	50
第 2 章 几何建模	51
2.1 ANSYS 16.0 平台及模块.....	51
2.1.1 Workbench 平台界面.....	52
2.1.2 菜单栏.....	52
2.1.3 工具栏.....	65
2.1.4 工具箱.....	65
2.2 DesignModeler 16.0 几何建模.....	69
2.2.1 DesignModeler 几何建模平台.....	69
2.2.2 菜单栏.....	70
2.2.3 工具栏.....	80
2.2.4 常用命令栏.....	81
2.2.5 Tree Outline (模型树).....	81
2.2.6 DesignModeler 几何建模 实例——连接板.....	84
2.2.7 ANSYS SpaceClaim 同步几何建模 实例——连接板.....	89
2.3 本章小结.....	93
第 3 章 网格划分	94
3.1 ANSYS Meshing 16.0 网格划分.....	94
3.1.1 Meshing 网格划分适用领域.....	94
3.1.2 Meshing 网格划分方法.....	95
3.1.3 Meshing 网格默认设置.....	97
3.1.4 Meshing 网格尺寸设置.....	98
3.1.5 Meshing 网格膨胀层设置.....	101
3.1.6 Meshing 网格 Patch Conforming 选项.....	103

3.1.7 Meshing 网格高级选项	103	4.1.2 结果显示	134
3.1.8 Meshing 网格损伤设置	104	4.1.3 变形显示	135
3.1.9 Meshing 网格评估统计	104	4.1.4 应力和应变	135
3.2 ANSYS Meshing 16.0 网格划分实例	110	4.1.5 接触结果	136
3.2.1 应用实例 1——网格尺寸控制	110	4.1.6 自定义结果显示	137
3.2.2 应用实例 2——扫掠网格划分	117	4.2 案例分析	138
3.2.3 应用实例 3——多区域网格划分	121	4.2.1 问题描述	138
3.2.4 应用实例 4——CDB 网格导入	125	4.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	138
3.3 小结	130	4.2.3 导入创建几何体	139
第 4 章 后处理	131	4.2.4 添加材料库	140
4.1 ANSYS Workbench 16.0 后处理	131	4.2.5 添加模型材料属性	141
4.1.1 查看结果	131	4.2.6 划分网格	142
		4.2.7 施加载荷与约束	143
		4.2.8 结果后处理	144
		4.2.9 保存与退出	148
		4.3 本章小结	148

第 2 篇

第 5 章 结构静力学分析	149	5.3.1 问题描述	159
5.1 静力分析简介	149	5.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	159
5.1.1 线性静力分析	149	5.3.3 导入创建几何体	160
5.1.2 线性静力分析流程	150	5.3.4 添加材料库	161
5.1.3 线性静力分析基础	150	5.3.5 添加模型材料属性	163
5.2 静力分析实例 1——实体静力分析	151	5.3.6 划分网格	164
5.2.1 问题描述	151	5.3.7 施加载荷与约束	164
5.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	151	5.3.8 结果后处理	166
5.2.3 导入创建几何体	152	5.3.9 子模型分析	167
5.2.4 添加材料库	153	5.3.10 保存并退出	171
5.2.5 添加模型材料属性	154	5.4 本章小结	171
5.2.6 划分网格	155	第 6 章 模态分析	172
5.2.7 施加载荷与约束	155	6.1 结构动力学分析简介	172
5.2.8 结果后处理	157	6.1.1 结构动力学分析	172
5.2.9 保存与退出	159	6.1.2 结构动力学分析的阻尼	173
5.3 静力分析实例 2——子模型静力分析	159	6.2 模态分析简介	173
		6.2.1 模态分析	173
		6.2.2 模态分析基础	174

6.2.3 预应力模态分析	175	7.2.5 施加载荷与约束	195
6.3 模态分析实例 1——模态分析	175	7.2.6 模态求解	197
6.3.1 问题描述	175	7.2.7 后处理	198
6.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	175	7.2.8 创建谐响应分析项目	200
6.3.3 创建几何体	176	7.2.9 施加载荷与约束	200
6.3.4 添加材料库	176	7.2.10 谐响应计算	202
6.3.5 添加模型材料属性	178	7.2.11 结果后处理	202
6.3.6 划分网格	178	7.2.12 保存与退出	204
6.3.7 施加载荷与约束	179	7.3 谐响应分析实例 2——谐响应分析	204
6.3.8 结果后处理	180	7.3.1 问题描述	204
6.3.9 保存与退出	183	7.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	205
6.4 模态分析实例 2——有预应力模态分析	183	7.3.3 材料选择	206
6.4.1 问题描述	183	7.3.4 施加载荷与约束	206
6.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目	184	7.3.5 模态求解	208
6.4.3 创建几何体	184	7.3.6 后处理	208
6.4.4 添加材料库	185	7.3.7 谐响应分析	210
6.4.5 添加模型材料属性	186	7.3.8 谐响应计算	211
6.4.6 划分网格	187	7.3.9 结果后处理	211
6.4.7 施加载荷与约束	187	7.3.10 保存与退出	213
6.4.8 模态分析	189	7.4 谐响应分析实例 3——含阻尼谐响应分析	214
6.4.9 后处理	189	7.5 本章小结	215
6.4.10 保存与退出	191	第 8 章 响应谱分析	216
6.5 本章小结	191	8.1 响应谱分析简介	216
第 7 章 谐响应分析	192	8.1.1 频谱的定义	216
7.1 谐响应分析基础	192	8.1.2 响应谱分析的基本概念	217
7.1.1 谐响应分析简介	192	8.2 响应谱分析实例——简单梁响应谱分析	219
7.1.2 谐响应分析的载荷与输出	193	8.2.1 问题描述	219
7.1.3 谐响应分析通用方程	193	8.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	220
7.2 谐响应分析实例 1——梁单元谐响应分析	193	8.2.3 导入几何体模型	220
7.2.1 问题描述	193	8.2.4 静态力学分析	221
7.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	194	8.2.5 添加材料库	221
7.2.3 创建模态分析项目	195	8.2.6 网格划分	222
7.2.4 材料选择	195	8.2.7 施加约束	222
		8.2.8 模态分析	224

8.2.9 结果后处理	224	10.2.7 施加约束	247
8.2.10 响应谱分析	226	10.2.8 结果后处理	250
8.2.11 添加加速度谱	226	10.2.9 保存与退出	253
8.2.12 后处理	227	10.3 瞬态动力学分析实例 2——振动分析	253
8.2.13 其他设置	229	10.3.1 问题描述	253
8.2.14 保存与退出	230	10.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	253
8.3 本章小结	230	10.3.3 创建几何体模型	253
第 9 章 随机振动分析	231	10.3.4 模态分析	254
9.1 随机振动分析简介	231	10.3.5 模态分析前处理	255
9.2 随机振动分析实例——简单梁随机振动分析	232	10.3.6 施加约束	256
9.2.1 问题描述	232	10.3.7 结果后处理	257
9.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	233	10.3.8 瞬态动力学分析	258
9.2.3 导入几何体模型	233	10.3.9 添加动态力载荷	259
9.2.4 静态力学分析	234	10.3.10 后处理	262
9.2.5 添加材料库	235	10.3.11 保存与退出	264
9.2.6 网格划分	235	10.4 本章小结	264
9.2.7 施加约束	236	第 11 章 线性屈曲分析	265
9.2.8 模态分析	238	11.1 线性屈曲分析简介	265
9.2.9 结果后处理	238	11.1.1 屈曲分析	265
9.2.10 随机振动分析	239	11.1.2 线性屈曲分析	265
9.2.11 添加加速度谱	239	11.2 项目案例 1——钢管屈曲分析	266
9.2.12 后处理	240	11.2.1 问题描述	266
9.2.13 保存与退出	242	11.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	266
9.3 本章小结	242	11.2.3 创建几何体	266
第 10 章 瞬态动力学分析	243	11.2.4 设置材料	268
10.1 瞬态动力学分析简介	243	11.2.5 添加模型材料属性	268
10.1.1 瞬态动力学分析简介	243	11.2.6 划分网格	269
10.1.2 瞬态动力学分析基本公式	243	11.2.7 施加载荷与约束	270
10.2 瞬态动力学分析实例 1——建筑物地震分析	244	11.2.8 结果后处理	272
10.2.1 问题描述	244	11.2.9 线性屈曲分析	274
10.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	245	11.2.10 施加载荷与约束	274
10.2.3 创建几何体模型	245	11.2.11 结果后处理	275
10.2.4 瞬态动力学分析	246	11.2.12 保存与退出	277
10.2.5 添加材料库	246	11.3 本章小结	277
10.2.6 划分网格	246		

第 3 篇

- 第 12 章 显式动力学分析** 278
- 12.1 显式动力学分析简介 278
- 12.2 显式动力学分析实例——钢球
撞击金属网分析 279
- 12.2.1 问题描述 280
- 12.2.2 启动 Workbench 并建立分析
项目 280
- 12.2.3 启动 Explicit Dynamics
(LS-DYNA Export)建立项目 281
- 12.2.4 材料选择与赋予 281
- 12.2.5 建立项目分析 282
- 12.2.6 分析前处理 283
- 12.2.7 施加载荷 283
- 12.2.8 启动 LS-DYNA 程序 286
- 12.2.9 Autodyn 计算 287
- 12.2.10 问题解读 289
- 12.3 显式动力学分析实例——金属
块穿透钢板分析 290
- 12.3.1 问题描述 290
- 12.3.2 启动 Workbench 并建立分析
项目 290
- 12.3.3 绘制几何模型 290
- 12.3.4 添加材料方法 291
- 12.3.5 添加材料 293
- 12.3.6 显式动力学分析前处理 294
- 12.3.7 施加约束 295
- 12.3.8 结果后处理 297
- 12.3.9 启动 AUTODYN 软件 298
- 12.3.10 LS-DYNA 计算 300
- 12.3.11 保存与退出 301
- 12.4 本章小结 301
- 第 13 章 复合材料分析** 302
- 13.1 复合材料概论 302
- 13.2 层合板的失效判断准则 303
- 13.3 复合材料层合板强度的有限
单元法 306
- 13.4 ANSYS ACP 模块功能概述 307
- 13.5 复合材料静力学分析
实例——复合板受力分析 310
- 13.5.1 问题描述 310
- 13.5.2 启动 Workbench 软件 310
- 13.5.3 静力分析项目 311
- 13.5.4 定义复合材料数据 312
- 13.5.5 数据更新 314
- 13.5.6 ACP 复合材料定义 315
- 13.5.7 有限元计算 322
- 13.5.8 后处理 323
- 13.5.9 ACP 专业后处理工具 324
- 13.5.10 保存与退出 326
- 13.6 本章小结 326
- 第 14 章 疲劳分析** 327
- 14.1 疲劳分析简介 327
- 14.2 疲劳分析方法 329
- 14.2.1 疲劳程序 329
- 14.2.2 应力寿命曲线 330
- 14.2.3 疲劳材料特性 330
- 14.3 疲劳分析实例 1——前桥疲劳
分析 331
- 14.3.1 问题描述 331
- 14.3.2 启动 Workbench 并建立分析
项目 332
- 14.3.3 导入创建几何体 332
- 14.3.4 添加材料库 333
- 14.3.5 添加模型材料属性 334
- 14.3.6 划分网格 335
- 14.3.7 施加载荷与约束 336
- 14.3.8 结果后处理 338
- 14.3.9 保存工程文件 340
- 14.3.10 添加疲劳分析选项 340
- 14.3.11 保存与退出 342
- 14.4 疲劳分析实例 2——实体疲劳
分析 343
- 14.4.1 问题描述 344
- 14.4.2 启动 Workbench 并建立分析

项目·····	344	方法·····	354
14.4.3 导入创建几何体·····	344	15.1.4 基本耦合公式·····	354
14.4.4 添加材料库·····	345	15.1.5 压电材料的主要参数·····	355
14.4.5 添加模型材料属性·····	345	15.2 压电分析模块的安装·····	356
14.4.6 划分网格·····	345	15.3 压电分析实例——压电传感器	
14.4.7 施加载荷与约束·····	346	分析·····	358
14.4.8 结果后处理·····	347	15.3.1 问题描述·····	358
14.4.9 保存文件·····	348	15.3.2 启动 Workbench 并建立分析	
14.4.10 启动 nCode 程序·····	348	项目·····	359
14.4.11 疲劳分析·····	350	15.3.3 导入创建几何体·····	359
14.4.12 保存与退出·····	352	15.3.4 添加材料库·····	362
14.5 本章小结·····	352	15.3.5 网格与属性·····	362
第 15 章 压电分析·····	353	15.3.6 施加载荷与约束·····	363
15.1 压电材料基本知识·····	353	15.3.7 结果后处理·····	364
15.1.1 压电材料的概念·····	353	15.3.8 模态分析·····	365
15.1.2 压电材料的主要特性·····	354	15.3.9 保存与退出·····	368
15.1.3 压电复合材料的有限元分析		15.4 小结·····	368
第 4 篇			
第 16 章 热学分析·····	369	16.3.1 问题描述·····	378
16.1 热力学分析简介·····	369	16.3.2 启动 Workbench 并建立分析	
16.1.1 热力学分析目的·····	369	项目·····	378
16.1.2 热力学分析·····	369	16.3.3 导入几何体模型·····	378
16.1.3 基本传热方式·····	370	16.3.4 创建分析项目·····	379
16.2 稳态热学分析实例 1——热		16.3.5 添加材料库·····	380
传递分析·····	370	16.3.6 添加模型材料属性·····	381
16.2.1 问题描述·····	371	16.3.7 划分网格·····	382
16.2.2 启动 Workbench 并建立分析		16.3.8 施加载荷与约束·····	382
项目·····	371	16.3.9 结果后处理·····	383
16.2.3 导入几何体模型·····	371	16.3.10 保存与退出·····	385
16.2.4 创建分析项目·····	372	16.3.11 读者演练·····	385
16.2.5 添加材料库·····	372	16.4 稳态热学分析实例 3——热	
16.2.6 添加模型材料属性·····	373	辐射分析·····	385
16.2.7 划分网格·····	374	16.4.1 案例介绍·····	385
16.2.8 施加载荷与约束·····	374	16.4.2 启动 Workbench 并建立分析	
16.2.9 结果后处理·····	376	项目·····	385
16.2.10 保存与退出·····	377	16.4.3 定义材料参数·····	386
16.3 稳态热学分析实例 2——热对		16.4.4 导入模型·····	386
流分析·····	378	16.4.5 划分网格·····	386

16.4.6 定义荷载	388	18.1.2 一般形式的电磁场微分方程	420
16.4.7 求解以后处理	389	18.1.3 电磁场中常见边界条件	421
16.4.8 保存并退出	390	18.1.4 ANSYS Workbench 平台电磁 分析	421
16.5 本章小结	390	18.1.5 Ansoft 软件电磁分析	422
第 17 章 流体动力学分析	391	18.2 瞬态磁场分析实例——金属 屏蔽分析	423
17.1 流体动力学分析简介	391	18.2.1 启动 Workbench 并建立分析 项目	423
17.1.1 流体动力学分析	391	18.2.2 建立求解器	424
17.1.2 CFD 基础	394	18.2.3 建立几何模型	424
17.2 流体动力学实例——CFX 旋转 机械流场分析	401	18.2.4 添加材料	426
17.2.1 问题描述	401	18.2.5 边界条件设定	427
17.2.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	402	18.2.6 网格划分	429
17.2.3 BladeGen 中设置	402	18.2.7 求解计算	430
17.2.4 TurboGrid 中设置	405	18.2.8 图表显示	432
17.2.5 CFX 中设置	408	18.2.9 3D 图表显示	433
17.3 本章小结	418	18.2.10 修改材料属性	434
第 18 章 电磁场分析	419	18.2.11 保存与退出	436
18.1 电磁场基本理论	419	18.3 本章小结	436
18.1.1 麦克斯韦方程	419		

第 5 篇

第 19 章 结构优化分析	437	19.2.1 问题描述	438
19.1 优化分析简介	437	19.2.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	439
19.1.1 优化设计概述	437	19.2.3 导入几何模型	439
19.1.2 Workbench 结构优化分析	438	19.2.4 结果后处理	445
19.2 优化分析实例——响应曲面 优化分析	438	19.3 本章小结	452

第 6 篇

第 20 章 ANSYS AIM 分析过程	453	20.2.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	454
20.1 ANSYS AIM 分析环境简介	453	20.3 本章小结	461
20.2 ANSYS AIM 分析实例——板件 弯曲分析	454	参考文献	462
20.2.1 问题描述	454		

第 1 篇

第 1 章 有限元基本理论

有限元是求解数理方程的一种数值计算方法，是将弹性理论、数学和计算机软件有机结合在一起的一种数值分析技术，是解决工程实际问题的一种有力工具。

目前，有限单元法在许多科学技术领域和实际工程中得到了广泛的应用，如机械制造、材料科学、航空航天、土木工程、电气工程、国防军工、石油化工及汽车能源等。

现有的商业化软件已经成功应用于固体力学、流体力学、传热学、电磁学、声学及生物学等领域，能够求解弹塑性和各种场分布问题，如水流管道的流动分析、压力分析以及多物理场的相互作用分析等。

知识点	学习目标	了解	理解	应用	实践
有限元发展历程		√			
有限元的一般求解原理			√		
有限元的一般求解方法			√		
能够对简单的单元进行有限元计算				√	√

1.1 有限元法发展综述

随着科学技术的发展，人们正在不断研发更快的交通工具、建造更大规模的建筑物和更大跨度的桥梁、制造更大功率的发电机组和更加精密的机械设备。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出产品和工程的技术性能，这就需要对结构的静、动力强度以及温度场、流场、电磁场和渗流等技术参数进行分析计算。

例如，分析计算高层建筑和大跨度桥梁在地震时所受到的影响，看看是否会发生破坏性事故；分析计算核反应堆的温度场，确定传热和冷却系统是否合理；分析涡轮机叶片内的流体动力学参数，以提高其运转效率。这些都可归结为求解物理问题的控制偏微分方程式往往是不可能的。

近年来在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）方法（以下简称有限元法）则为解决这些复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。

有限元法是一种高效能、常用的计算方法。有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的，所以它广泛地应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中（这类场与泛

函数的极值问题有着紧密的联系)。

自 1969 年以来,某些学者在流体力学中应用加权余数法中的伽辽金法 (Galerkin) 或最小二乘法等同样获得了有限元方程,因而有限元法可应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中,而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

1.1.1 有限元法的孕育过程及诞生和发展

300 多年前,牛顿和莱布尼茨发明了积分法,证明了该运算具有整体对局部的可加性。虽然,积分运算与有限元技术对定义域的划分是不同的(前者进行无限划分而后者进行有限划分),但积分运算为实现有限元技术准备好了一个理论基础。

在牛顿之后约 100 年,著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的解法。这两项成果的前者被用来将微分方程改写为积分表达式,后者被用来求解有限元法所得出的代数方程组。在 18 世纪,另一位数学家拉格朗日提出泛函分析。泛函分析是将偏微分方程改写为积分表达式的另一途经。

在 19 世纪末及 20 世纪初,数学家瑞雷和里兹首先提出可对全定义域运用展开函数来表达其上的未知函数。1915 年,数学家伽辽金提出了选择展开函数中形函数的伽辽金法,该方法被广泛地用于有限元法。1943 年,数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数,这实际上就是有限元的做法。到这时为止,实现有限元技术的第二个理论基础也已确立。

20 世纪 50 年代,飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组,首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析,经过一番波折后获得前述的两个离散的成功。

20 世纪 50 年代,大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作,这为实现有限元技术准备好了物质条件。1960 年前后,美国的 R.W.Clough 教授及我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后,这样的叫法被大家接受,有限元技术从此正式诞生。

1990 年 10 月,美国波音公司开始在计算机上对新型客机 B-777 进行“无纸设计”,仅用了三年半时间,于 1994 年 4 月第一架 B-777 就试飞成功,这是制造技术史上划时代的成就,其中在结构设计和评判中就大量采用了有限元分析这一手段。

1.1.2 有限元法的基本思想

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=瑞利-里茨 (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。

有限元方法(FEM)的基础是变分原理和加权余量法,其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元,在每个单元内,选择一些合适的节点作为求解函数的插值点,将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式,借助于变分原理或加权余量法,将微分方程离散求解。

采用不同的权函数和插值函数形式,便构成不同的有限元方法。有限元方法最早应用于结构力学,后来随着计算机的发展慢慢用于流体力学的数值模拟。

在有限元方法中,把计算域离散剖分为有限个互不重叠且相互连接的单元,在每个单元内选择基函数,用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解,整个计算域上总体的基函数可以看为由每个单元基函数组成,整个计算域内的解可以看成是由所有单元上的近似解构成的。在河道数值模拟中,常见的有限元计算方法是由变分法和加权余量法发展而来的里兹法和伽辽金法、最小二乘法等。

根据所采用的权函数和插值函数的不同,有限元方法也分为多种计算格式。从权函数的选择来说,有配置法、矩量法、最小二乘法和伽辽金法;从计算单元网格的形状来划分,有三角形网格、四边形网格和多边形网格;从插值函数的精度来划分,又分为线性插值函数和高次插值函数等不同的组合。

同样构成不同的有限元计算格式。对于权函数,伽辽金(Galerkin)法是将权函数取为逼近函数中的基函数;最小二乘法是令权函数等于余量本身,而内积的极小值则为对待求系数的平方误差最小;在配置法中,先在计算域内选取 N 个配置点。令近似解在选定的 N 个配置点上严格满足微分方程,即在配置点上令方程余量为0。

插值函数一般由不同次幂的多项式组成,但也有采用三角函数或指数函数组成的乘积表示,但最常用的是多项式插值函数。有限元插值函数分为两大类,一类只要求插值多项式本身在插值点取已知值,称为拉格朗日(Lagrange)多项式插值;另一种不仅要求插值多项式本身,还要求它的导数值在插值点取已知值,称为哈密特(Hermite)多项式插值。

单元坐标有笛卡尔直角坐标系和无因次自然坐标,有对称和不对称等。常采用的无因次坐标是一种局部坐标系,它的定义取决于单元的几何形状,一维看作长度比,二维看作面积比,三维看作体积比。

在二维有限元中,三角形单元应用得最早,近来四边形等单元的应用也越来越广。对于二维三角形和四边形单元,常采用的插值函数为有Lagrange插值直角坐标系中的线性插值函数及二阶或更高阶插值函数、面积坐标系中的线性插值函数、二阶或更高阶插值函数等。

对于有限元方法,其解题步骤可归纳为:

1) 建立积分方程:根据变分原理或方程余量与权函数正交化原理,建立与微分方程初边值问题等价的积分表达式,这是有限元法的出发点。

2) 区域单元剖分:根据求解区域的形状及实际问题的物理特点,将区域剖分为若干相互连接、不重叠的单元。区域单元划分是采用有限元方法的前期准备工作,这部分工作量比较大,除了给计算单元和节点进行编号和确定相互之间的关系之外,还要表示节点的位置坐标,同时还需要列出自然边界和本质边界的节点序号和相应的边界值。

3) 确定单元基函数:根据单元中节点数目及对近似解精度的要求,选择满足一定插值条件的插值函数作为单元基函数。有限元方法中的基函数是在单元中选取的,由于各单元具有规则的几何形状,在选取基函数时可遵循一定的法则。

4) 单元分析: 将各个单元中的求解函数用单元基函数的线性组合表达式进行逼近; 再将近似函数代入积分方程, 并对单元区域进行积分, 可获得含有待定系数 (即单元中各节点的参数值) 的代数方程组, 称为单元有限元方程。

5) 总体合成: 在得出单元有限元方程之后, 将区域中所有单元有限元方程按一定法则进行累加, 形成总体有限元方程。

6) 边界条件的处理: 一般边界条件有 3 种形式, 分为本质边界条件 (狄里克雷边界条件)、自然边界条件 (黎曼边界条件)、混合边界条件 (柯西边界条件)。对于自然边界条件, 一般在积分表达式中可自动得到满足。对于本质边界条件和混合边界条件, 需按一定法则对总体有限元方程进行修正满足。

7) 解有限元方程: 根据边界条件修正的总体有限元方程组, 是含所有待定未知量的封闭方程组, 采用适当的数值计算方法求解, 可求得各节点的函数值。

1.1.3 有限元的应用及其发展趋势

有限元的应用范围相当广泛, 它涉及工程结构、传热、流体运动、电磁等连续介质的力学分析中, 并在气象、地球物理、医学等领域得到应用和发展。电子计算机的出现和发展使有限元法在许多实际问题中的应用变为现实, 并具有广阔的前景。

国际上早在 20 世纪 50 年代末至 60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局 (NASA) 在 1965 年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本, 是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。

世界各地的研究机构和大学也随后研发了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件, 主要有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、美国的 ABAQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。当今国际上 FEA 方法和软件发展呈现出以下一些趋势特征。

1. 从单纯的结构力学计算发展到求解许多物理场问题

有限元分析方法最早是从结构化矩阵分析发展而来的, 逐步推广到板、壳和实体等连续体固体力学分析, 实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明, 只要用于离散求解对象的单元足够小, 所得的解就可足够逼近于精确值。

所以近年来有限元方法已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算, 最近又发展到求解几个交叉学科的问题。

例如, 当气流通过一个很高的铁塔时就会使铁塔产生变形, 而塔的变形又反过来影响到气流的流动, 这就需要用固体力学和流体动力学的有限元分析结果交叉迭代求解, 即所谓“流固耦合”的问题。

2. 由求解线性工程问题进展到分析非线性问题

随着科学技术的发展, 线性理论已经远远不能满足设计的要求。例如, 建筑行业中的高层建筑和大跨度悬索桥的出现, 就要求考虑结构的大位移和大应变等几何非线性问题; 航天和动力工程的高温部件存在热变形和热应力, 也要考虑材料的非线性问题; 随着塑料、橡胶和复合材料等各种新材料的出现, 仅靠线性计算理论不足以解决遇到的问题, 只有采用非线性