

CAD/CAM/CAE

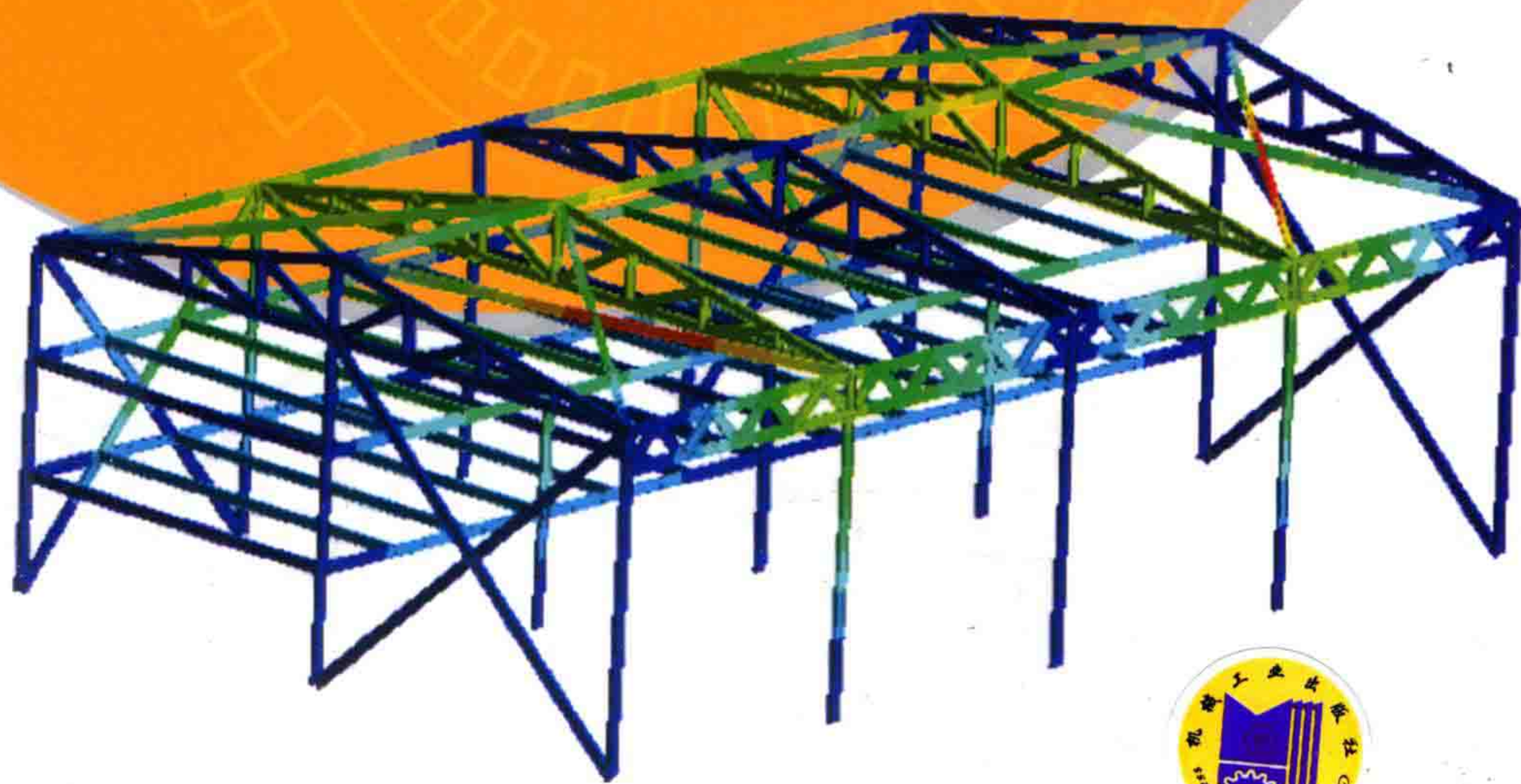
工程应用丛书

ANSYS系列

# ANSYS Workbench 17.0

## 结构仿真分析从入门到精通

CAE应用联盟 组编 张岩 李艳艳 等编著



关注机械工业出版社计算机分社官方微信订阅号“IT 有得聊”，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 17.0 结构仿真 分析从入门到精通

CAE 应用联盟 组 编

张 岩 李艳艳 等编著



机械工业出版社

本书以 ANSYS Workbench 17.0 为操作平台, 详细介绍软件的功能及应用。本书内容丰富, 涉及领域广, 使读者在掌握软件操作的同时, 也能掌握解决相关工程领域实际问题的思路与方法。

全书共 4 部分, 第 1 部分 (第 1~4 章) 从有限元理论着手介绍有限元的控制方程及 ANSYS Workbench 17.0 平台的基础应用知识; 第 2 部分 (第 5~11 章) 以项目范例为指导, 主要讲解在 ANSYS Workbench 17.0 平台中进行的结构静力学分析、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内容; 第 3 部分 (第 12~15 章) 作为结构有限元分析的进阶部分, 主要讲解在 ANSYS Workbench 17.0 平台中进行的显式动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及接触分析内容; 第 4 部分 (第 16、17 章) 以项目范例为指导, 主要讲解在 ANSYS Workbench 17.0 平台中进行的结构优化分析、ANSYS AIM 静力学分析过程内容。

本书工程实例丰富、讲解详尽, 内容安排循序渐进、深入浅出, 适合理工院校土木工程、机械工程、力学等相关专业的高年级本科生、研究生及教师使用, 也可以用作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 17.0 结构仿真分析从入门到精通 / CAE 应用联盟组编;

张岩等编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.4

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-56814-8

I. ①A… II. ①C… ②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 (2017) 第 103922 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 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·27 印张·655 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-7-56814-8

定价: 85.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: (010) 68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

(010) 88379203

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://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较早, 使用也较为广泛。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 在建筑工程中的应用, 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。

很多行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, 要将软件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”。本丛书按照相应的工程应用领域划分为三个系列: 机械篇、电子篇和建筑篇。其中, 机械篇涉及 AutoCAD、Pro/Engineer、UG、CAXA、SolidWorks、Inventor、Mastercam、ANSYS 等有关机械设计、性能分析、制造技术方面的应用; 电子篇涉及 Protel、VHDL/FPGA、MATLAB、LabVIEW 等有关电子、通信领域的电子电路设计、印制电路板、电路仿真等方面的应用; 建筑篇主要包括 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, 配以大量极具代表性的实例, 并融入了作者丰富的实践经验, 使得本套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 公司的 ANSYS Workbench 平台作为多物理场及优化分析平台,将在流体市场占据份额最大的 FLUENT 及 CFX 软件集成起来,同时也将电磁行业分析标准——ANSOFT 系列软件集成到其中,还提供了软件之间的数据耦合,给用户带来了巨大的便利。

目前 ANSYS 公司的最新版 ANSYS Workbench 17.0 所提供的 CAD 双向参数链接互动,项目数据自动更新机制,全面的参数管理,无缝集成的优化设计工具等,使 ANSYS 在“仿真驱动产品设计”(Simulation Driven Product Development, SDPD)方面达到了前所未有的高度,同时 ANSYS Workbench 17.0 具有强大的结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析的功能。此外,从 ANSYS 17.0 版开始,Workbench 平台中的 ANSYS AIM 分析环境对分析界面进行统一化改进。

作为业界领先的工程仿真技术集成平台,Workbench 17.0 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主要对象,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 ANSYS Workbench 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、内容新颖:本书结合作者多年使用经验与实际工程应用案例,将 ANSYS Workbench 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书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。

## 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。

本书分为 4 部分共 17 章,主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 平台在结构静力学、结构动力学、复合材料及疲劳分析等各个领域中的有限元分析及操作过程。

第一部分介绍有限元理论和 ANSYS Workbench 17.0 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,本部分包括以下 4 章。

第 1 章:有限元基本理论

第 2 章:ANSYS 17.0 几何建模概述

第 3 章:ANSYS Meshing 17.0 网格划分

第 4 章:ANSYS Mechanical 17.0 后处理概述

第二部分介绍 ANSYS Workbench 17.0 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 7 个方面的内容,本部分包括以下 7 章。

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

第三部分介绍 ANSYS Workbench 17.0 平台结构进阶分析功能，主要包括显示动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及接触分析等内容，本部分包括以下 4 章。

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：接触分析

第四部分介绍 ANSYS Workbench 17.0 平台在优化分析领域中的应用及 ANSYS AIM 分析过程的内容，本篇包括以下两章。

第 16 章：结构优化分析

第 17 章：ANSYS AIM 分析过程

注意，其中疲劳分析模块（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。

### 3. 网盘内容

本书网盘内容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一起放于相关章节的目录中，以方便读者查询。

例如，第 5 章的第二个操作实例“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\”文件夹下。

### 4. 读者对象

本书适合 ANSYS Workbench 17.0 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，包括：

- ★ 大中专院校的教师和在校生
- ★ 相关培训机构的教师和学员
- ★ ANSYS Workbench 17.0 爱好者和初中级从业人员
- ★ 广大科研工作人员

### 5. 读者服务

读者朋友在学习过程中若遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 [caxart@126.com](mailto:caxart@126.com)，或者访问博客 <http://blog.sina.com.cn/caxart>，编者会尽快给予解答。

### 6. 本书作者

本书由 CAE 应用联盟组编，主要由张岩、李艳艳编著，参与编写的还有丁金滨、张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、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。虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完整，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。

作 者

## 目 录

出版说明

前言

<b>第 1 章 有限元基本理论</b> ..... 1	<b>3.1 ANSYS Meshing 17.0 网格划分</b>
1.1 有限元法发展综述..... 1	简介..... 71
1.1.1 有限元法的孕育过程以及诞生和 发展..... 2	3.1.1 Meshing 网格划分适用领域..... 71
1.1.2 有限元法的基本思想..... 2	3.1.2 Meshing 网格划分方法..... 72
1.1.3 有限元的应用及其发展趋势..... 4	3.1.3 Meshing 网格默认设置..... 74
1.2 有限元分析基本理论..... 6	3.1.4 Meshing 网格尺寸设置..... 75
1.2.1 有限元分析的基本概念和计算 步骤..... 6	3.1.5 Meshing 网格膨胀层设置..... 78
1.2.2 基于最小势能原理的有限元法..... 13	3.1.6 Meshing 网格 Patch Conforming 选项..... 80
1.2.3 杆系结构的非线性分析理论..... 17	3.1.7 Meshing 网格高级选项..... 80
1.2.4 稳定计算理论..... 26	3.1.8 Meshing 网格损伤设置..... 81
1.3 本章小结..... 28	3.1.9 Meshing 网格评估统计..... 82
<b>第 2 章 ANSYS 17.0 几何建模概述</b> ..... 29	<b>3.2 ANSYS Meshing 17.0 网格划分</b>
2.1 ANSYS 17.0 平台及模块..... 29	实例..... 87
2.1.1 Workbench 平台界面..... 30	3.2.1 应用实例 1——网格尺寸控制..... 87
2.1.2 菜单栏..... 30	3.2.2 应用实例 2——扫掠网格划分..... 94
2.1.3 工具栏..... 42	3.2.3 应用实例 3——多区域网格划分..... 98
2.1.4 工具箱..... 42	3.2.4 应用实例 4——CDB 网格导入..... 102
2.2 DesignModeler 17.0 几何 建模..... 47	3.3 本章小结..... 106
2.2.1 DesignModeler 几何建模平台..... 47	<b>第 4 章 ANSYS Mechanical 17.0 后</b>
2.2.2 菜单栏..... 47	处理概述..... 107
2.2.3 工具栏..... 57	4.1 ANSYS Mechanical 17.0 后
2.2.4 常用命令栏..... 59	处理..... 107
2.2.5 Tree Outline (模型树)..... 59	4.1.1 查看结果..... 107
2.2.6 DesignModeler 几何建模 实例——连接板..... 62	4.1.2 结果显示..... 110
2.2.7 ANSYS SCDM 同步几何建模 实例——连接板..... 67	4.1.3 变形显示..... 111
2.3 本章小结..... 70	4.1.4 应力和应变..... 112
<b>第 3 章 ANSYS Meshing 17.0 网格</b>	4.1.5 接触结果..... 113
划分..... 71	4.1.6 自定义结果显示..... 113
	4.2 案例分析..... 114
	4.2.1 问题描述..... 114
	4.2.2 启动 Workbench 并建立分析 项目..... 114

4.2.3 导入创建几何体	115	性静力分析	147
4.2.4 添加材料库	116	5.4.1 问题描述	147
4.2.5 添加模型材料属性	117	5.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目	147
4.2.6 划分网格	118	5.4.3 创建几何体	148
4.2.7 施加载荷与约束	119	5.4.4 添加材料库	152
4.2.8 结果后处理	120	5.4.5 添加模型材料属性	153
4.2.9 保存与退出	124	5.4.6 划分网格	154
4.3 本章小结	124	5.4.7 施加载荷与约束	155
<b>第 5 章 结构静力学分析</b>	<b>125</b>	5.4.8 结果后处理	157
5.1 线性静力分析简介	125	5.4.9 保存与退出	159
5.1.1 线性静力分析	125	5.5 静力分析实例 4——大形变静力学分析	159
5.1.2 线性静力分析流程	126	5.5.1 问题描述	160
5.1.3 线性静力分析基础	126	5.5.2 使用 Solid Works 建模	160
5.2 静力分析实例 1——实体静力分析	127	5.5.3 导入模型	165
5.2.1 问题描述	127	5.5.4 设定材料属性	165
5.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	127	5.5.5 划分网格	166
5.2.3 导入创建几何体	127	5.5.6 定义约束及边界条件	167
5.2.4 添加材料库	128	5.5.7 求解及后处理	168
5.2.5 添加模型材料属性	130	5.5.8 开启大形变开关再次求解	169
5.2.6 划分网格	131	5.5.9 再次求解及后处理	170
5.2.7 施加载荷与约束	131	5.5.10 保存并退出	171
5.2.8 结果后处理	133	5.6 本章小结	171
5.2.9 保存与退出	135	<b>第 6 章 模态分析</b>	<b>172</b>
5.3 静力分析实例 2——子模型静力分析	135	6.1 结构动力学分析简介	172
5.3.1 问题描述	135	6.1.1 结构动力学分析	172
5.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	135	6.1.2 结构动力学分析的阻尼	173
5.3.3 导入创建几何体	136	6.2 模态分析简介	173
5.3.4 添加材料库	137	6.2.1 模态分析	174
5.3.5 添加模型材料属性	139	6.2.2 模态分析基础	174
5.3.6 划分网格	140	6.2.3 预应力模态分析	174
5.3.7 施加载荷与约束	140	6.3 模态分析实例 1——模态分析	175
5.3.8 结果后处理	142	6.3.1 问题描述	175
5.3.9 子模型分析	143	6.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	175
5.3.10 保存并退出	146	6.3.3 创建几何体	175
5.4 静力分析实例 3——梁单元线性静力分析	147	6.3.4 添加材料库	176
		6.3.5 添加模型材料属性	177



6.3.6	划分网格	178	7.2.1	问题描述	198
6.3.7	施加载荷与约束	179	7.2.2	启动 Workbench 并建立分析项目	199
6.3.8	结果后处理	180	7.2.3	创建模态分析项目	200
6.3.9	保存与退出	183	7.2.4	材料选择	200
6.4	模态分析实例 2——有预应力 (预压力) 模态分析	183	7.2.5	划分网格	200
6.4.1	问题描述	183	7.2.6	模态求解	202
6.4.2	启动 Workbench 并建立分析项目	183	7.2.7	后处理	203
6.4.3	创建几何体	184	7.2.8	创建谐响应分析项目	204
6.4.4	添加材料库	184	7.2.9	施加载荷与约束	205
6.4.5	添加模型材料属性	186	7.2.10	谐响应计算	206
6.4.6	划分网格	186	7.2.11	结果后处理	207
6.4.7	施加载荷与约束	187	7.2.12	保存与退出	209
6.4.8	模态分析	189	7.3	谐响应分析实例 2——实体 单元谐响应分析	209
6.4.9	后处理	189	7.3.1	问题描述	209
6.4.10	保存与退出	191	7.3.2	启动 Workbench 并建立分析项目	210
6.5	模态分析实例 3——有预应力 (预拉力) 模态分析	191	7.3.3	材料选择	211
6.5.1	问题描述	191	7.3.4	划分网格	211
6.5.2	修改外载荷数据	192	7.3.5	模态求解	213
6.5.3	模态分析	192	7.3.6	后处理	213
6.5.4	后处理	192	7.3.7	谐响应分析	214
6.5.5	保存与退出	194	7.3.8	谐响应计算	216
6.5.6	结论	194	7.3.9	结果后处理	216
6.6	模态分析实例 4——存在阻尼 模态分析	194	7.3.10	保存与退出	217
6.6.1	问题描述	194	7.4	谐响应分析实例 3——含阻尼 谐响应分析	218
6.6.2	模态分析	194	7.5	本章小结	219
6.6.3	后处理	195	第 8 章	响应谱分析	220
6.6.4	保存与退出	196	8.1	响应谱分析简介	220
6.7	本章小结	196	8.1.1	频谱的定义	220
第 7 章	谐响应分析	197	8.1.2	响应谱分析的基本概念	221
7.1	谐响应分析简介	197	8.2	响应谱分析实例 1——简单 梁响应谱分析	223
7.1.1	谐响应分析基础	197	8.2.1	问题描述	223
7.1.2	谐响应分析的载荷与输出	198	8.2.2	启动 Workbench 并建立分析项目	224
7.1.3	谐响应分析通用方程	198	8.2.3	导入几何体模型	224
7.2	谐响应分析实例 1——梁单元 谐响应分析	198			

8.2.4 显示几何截面	225	9.2.7 施加约束	251
8.2.5 添加材料库	225	9.2.8 模态分析	253
8.2.6 网格划分	225	9.2.9 结果后处理	253
8.2.7 施加约束	226	9.2.10 随机振动分析	254
8.2.8 模态分析	228	9.2.11 添加加速度频谱	254
8.2.9 结果后处理	228	9.2.12 后处理	255
8.2.10 响应谱分析	230	9.2.13 保存与退出	257
8.2.11 添加加速度频谱	230	9.3 随机振动分析实例 2——建筑	
8.2.12 后处理	231	物随机振动分析	257
8.2.13 其他设置	233	9.3.1 问题描述	257
8.2.14 保存与退出	234	9.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	257
8.3 响应谱分析实例 2——建筑		9.3.3 导入几何体模型	258
物响应谱分析	235	9.3.4 静态力学分析	258
8.3.1 问题描述	235	9.3.5 添加材料库	258
8.3.2 启动 Workbench 并建立分析		9.3.6 划分网格	258
项目	235	9.3.7 添加接触	259
8.3.3 导入几何体模型	236	9.3.8 施加约束	259
8.3.4 显示几何模型	237	9.3.9 模态分析	261
8.3.5 添加材料库	237	9.3.10 结果后处理	261
8.3.6 划分网格	237	9.3.11 随机振动分析	262
8.3.7 添加接触	237	9.3.12 添加加速度频谱	263
8.3.8 施加约束	237	9.3.13 后处理	265
8.3.9 模态分析	239	9.3.14 保存与退出	267
8.3.10 结果后处理	239	9.4 本章小结	267
8.3.11 响应谱分析	241	第 10 章 瞬态动力学分析	268
8.3.12 添加加速度频谱	241	10.1 瞬态动力学分析简介	268
8.3.13 后处理	243	10.1.1 瞬态动力学分析基础	268
8.3.14 保存与退出	245	10.1.2 瞬态动力学分析基本公式	268
8.4 本章小结	245	10.2 瞬态动力学分析实例 1——	
第 9 章 随机振动分析	246	钢构架地震分析	269
9.1 随机振动分析简介	246	10.2.1 问题描述	269
9.2 随机振动分析实例 1——简单		10.2.2 启动 Workbench 并建立分析	
梁随机振动分析	247	项目	270
9.2.1 问题描述	247	10.2.3 创建几何体模型	270
9.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	248	10.2.4 瞬态动力学分析	271
9.2.3 导入几何体模型	248	10.2.5 添加材料库	271
9.2.4 静态力学分析	249	10.2.6 划分网格	271
9.2.5 添加材料库	250	10.2.7 施加约束	272
9.2.6 网格划分	250	10.2.8 结果后处理	275

10.2.9 保存与退出	278	12.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	306
10.3 瞬态动力学分析实例 2——梁模型的振动分析	278	12.2.3 启动 Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) 建立项目	307
10.3.1 问题描述	278	12.2.4 材料选择与赋予	307
10.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	278	12.2.5 模型分析	308
10.3.3 创建几何体模型	279	12.2.6 分析前处理	309
10.3.4 模态分析	280	12.2.7 施加载荷	310
10.3.5 划分网格	280	12.2.8 启动 LS-DYNA 程序	311
10.3.6 施加约束	281	12.2.9 Autodyn 计算	313
10.3.7 结果后处理	282	12.2.10 问题解读	316
10.3.8 瞬态动力学分析	283	12.3 显式动力学分析实例 2——金属块穿透钢板分析	316
10.3.9 添加动态力载荷	285	12.3.1 问题描述	316
10.3.10 后处理	287	12.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目	316
10.3.11 保存与退出	289	12.3.3 绘制几何模型	317
10.4 本章小结	289	12.3.4 添加材料方法	318
<b>第 11 章 线性屈曲分析</b>	<b>290</b>	12.3.5 添加材料	319
11.1 线性屈曲分析简介	290	12.3.6 显式动力学分析前处理	320
11.1.1 屈曲分析	290	12.3.7 施加约束	321
11.1.2 线性屈曲分析基本公式	290	12.3.8 结果后处理	323
11.2 线性屈曲分析实例——钢管屈曲分析	291	12.3.9 启动 AUTODYN 软件	324
11.2.1 问题描述	291	12.3.10 LS-DYNA 计算	327
11.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	291	12.3.11 保存与退出	328
11.2.3 创建几何体	292	12.4 本章小结	329
11.2.4 设置材料	293	<b>第 13 章 复合材料分析</b>	<b>330</b>
11.2.5 添加模型材料属性	293	13.1 复合材料简介	330
11.2.6 划分网格	294	13.2 ANSYS ACP 模块功能简介	335
11.2.7 施加载荷与约束	296	13.3 复合材料静力学分析实例——层合板受力分析	339
11.2.8 静力计算	298	13.3.1 问题描述	339
11.2.9 线性屈曲分析	299	13.3.2 启动 Workbench 软件	339
11.2.10 屈曲分析	299	13.3.3 静力分析项目	339
11.2.11 屈曲计算	300	13.3.4 定义复合材料数据	340
11.2.12 保存与退出	303	13.3.5 数据更新	342
11.3 本章小结	303	13.3.6 ACP 复合材料定义	343
<b>第 12 章 显式动力学分析</b>	<b>304</b>	13.3.7 有限元计算	351
12.1 显式动力学分析简介	304	13.3.8 后处理	352
12.2 显式动力学分析实例 1——钢柱体撞击金属网分析	305		
12.2.1 问题描述	306		

13.3.9 ACP 专业后处理工具	352	14.5 本章小结	380
13.3.10 保存与退出	354	第 15 章 接触分析	381
13.4 本章小结	355	15.1 接触分析简介	381
第 14 章 疲劳分析	356	15.2 静态接触分析实例——铝合 金板孔受力分析	383
14.1 疲劳分析简介	356	15.2.1 问题描述	383
14.2 疲劳分析方法	358	15.2.2 启动 Workbench 软件	383
14.2.1 疲劳程序	358	15.2.3 建立几何体模型	384
14.2.2 应力-寿命曲线	359	15.2.4 添加材料库	386
14.2.3 疲劳材料特性	359	15.2.5 添加模型材料属性	386
14.3 疲劳分析实例 1——前桥疲劳 分析	360	15.2.6 创建接触	386
14.3.1 问题描述	360	15.2.7 划分网格	387
14.3.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	360	15.2.8 施加载荷与约束	388
14.3.3 导入几何体	360	15.2.9 结果后处理	389
14.3.4 添加材料库	361	15.2.10 保存与退出	392
14.3.5 添加模型材料属性	363	15.3 本章小结	392
14.3.6 划分网格	363	第 16 章 结构优化分析	393
14.3.7 施加载荷与约束	364	16.1 优化分析简介	393
14.3.8 结果后处理	365	16.1.1 优化设计基础	393
14.3.9 保存工程文件	367	16.1.2 AWE 介绍及优化原理	394
14.3.10 添加疲劳分析选项	368	16.1.3 优化分析工具	395
14.3.11 保存与退出	371	16.2 优化分析实例——响应曲面 优化分析	395
14.4 疲劳分析实例 2——轴疲劳 分析	372	16.2.1 问题描述	395
14.4.1 问题描述	372	16.2.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	395
14.4.2 启动 Workbench 并建立分析 项目	372	16.2.3 导入几何模型	396
14.4.3 导入几何体	372	16.2.4 结果后处理	402
14.4.4 添加材料库	373	16.3 本章小结	410
14.4.5 添加模型材料属性	373	第 17 章 ANSYS AIM 分析过程	411
14.4.6 划分网格	374	17.1 ANSYS AIM 分析环境简介	411
14.4.7 施加载荷与约束	374	17.2 ANSYS AIM 分析实例——板件 弯曲分析	412
14.4.8 结果后处理	376	17.2.1 问题描述	412
14.4.9 保存文件	377	17.2.2 进行 ANSYS AIM 分析	412
14.4.10 启动 nCode 程序	377	17.3 本章小结	419
14.4.11 疲劳分析	379	参考文献	420
14.4.12 保存与退出	380		

# 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、计算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的数值计算工具。

目前，有限元在许多科学技术领域和实际工程问题中得到了广泛的应用，如机械制造、材料科学、航海航空、土木工程、电气工程、国防军工、石油化工及汽车能源等领域，都受到了普遍的重视。

现有的商业化有限元软件已经成功应用于固体力学、流体力学、传热学、电磁学、声学及生物领域等，能够求解弹塑性问题，求解各种场分布问题，如水流管道的流动分析、压力分析及多物理场的相互作用分析。

## 学习目标：

- 1) 了解有限元的发展历程；
- 2) 了解有限元的一般求解原理；
- 3) 了解有限元的一般求解方法；
- 4) 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

随着现代科学技术的发展，人们正在不断建造更为快速的交通工具、更大规模的建筑物、更大跨度的桥梁、更大功率的发电机组和更为精密的机械设备。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，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，确定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，用传统方法往往是不可能解决的。

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。有限元法是以变分原理为基础发展起来的，因此，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（这类场与泛函分析的极值问题有着紧密的联系）。

1969年以后，某些学者在流体力学中应用加权余数法中的迦辽金法（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分析的极值问题有所联系。

### 1.1.1 有限元法的孕育过程以及诞生和发展

大约在 300 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。

在牛顿之后约一百年，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径。

19 世纪末至 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，该方法广泛用于有限元。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。

因此，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，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，美国的克拉夫 (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有限元分析这一手段。

在有限元分析的发展初期，由于其基本思想和原理的“简单”和“朴素”，许多学术权威都对其学术价值有所“鄙视”，国际著名刊物《Journal of Applied Mechanics》许多年来都拒绝刊登有关于有限元分析的文章。然而现在，有限元分析已经成为数值计算的主流，不但国际上存在如 ANSYS 等数种通用有限元分析软件，而且涉及有限元分析的杂志也有几十种之多。

### 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的,则整个计算域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成。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,而内积的极小值是使代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;另一类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,称为厄尔米特 (Hermite) 多项式插值。

单元坐标有笛卡儿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,三角形单元的应用最早,近年来四边形等参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:一般边界条件有三种形式,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的。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,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、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之一。

从那时到现在,世界各地的研究机构和大学也开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,以及美国的 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和特征。

#### 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,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。因此,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,当气流流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气流的流动……这就需要用到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发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;诸如塑料、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,只有采用非线性有限元算法才能解决。



众所周知，非线性的数值计算是很复杂的，它涉及很多专门的数学问题和运算技巧，很难被一般工程技术人员掌握。为此，近年来国外一些公司花费了大量的人力和投资开发诸如 MARC、ABQUS 和 ADINA 等专门求解非线性问题的有限元分析软件，并广泛应用于工程实践。这些软件的共同特点是具有高效的非线性求解器以及丰富和实用的非线性材料库。

### 3. 增强可视化的前置建模和后置数据处理功能

早期有限元分析软件的研究重点在于推导新的高效率求解方法和高精度的单元。随着数值分析方法的逐步完善，尤其是计算机运算速度的飞速发展，整个计算系统用于求解运算的时间越来越少，而数据准备和运算结果的表现问题却日益突出。

在现在的工程工作站上，求解一个包含 10 万个方程的有限元模型只需要用几十分钟。但是，如果用手工方式来建立这个模型，然后处理大量的计算结果，则需用几周的时间。可以毫不夸张地说，工程师在分析计算一个工程问题时有 80% 以上的精力都花在数据准备和结果分析上。因此，目前几乎所有的商业化有限元程序系统都有功能很强的前置建模和后置数据处理模块。

在强调“可视化”的今天，很多程序都建立了对用户非常友好的 GUI (Graphical User Interface, 图形用户接口)，使用户能以可视图形方式直观、快速地进行网格自动划分，生成有限元分析所需数据，并按要求将大量的计算结果整理成变形图、等值分布云图，便于极值搜索和所需数据的列表输出。

### 4. 与 CAD 软件的无缝集成

当今有限元分析系统的另一个特点是与通用 CAD 软件的集成使用，即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后，自动生成有限元网格并进行计算。如果分析的结果不符合设计要求，则重新进行造型和计算，直到满意为止，从而极大地提高了设计水平和效率。

目前，工程师可以在集成的 CAD 和 FEA 软件环境中快速地解决一个在以前无法应付的复杂工程分析问题。因此，当今几乎所有的商业化有限元系统商都开发了和著名的 CAD 软件（如 SpaceClaim、Pro/ENGINEER、Catia、Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks、IDEAS、Bentley 和 AutoCAD 等）的接口。

### 5. 在 Wintel 平台上的发展

早期的有限元分析软件基本上都是在大中型计算机上开发和运行的，后来又发展到以工程工作站 (Engineering WorkStation, EWS) 为平台，它们的共同特点都是采用 UNIX 操作系统。PC 的出现使计算机的应用发生了根本性的变化，使工程师渴望在办公桌上完成复杂工程分析的梦想成为现实。

但是早期的 PC 采用 16 位 CPU 和 DOS 操作系统，内存中的公共数据块受到限制，因此当时计算模型的规模不能超过 1 万阶方程。微软公司的 Windows 操作系统和 32 位的 Intel Pentium 处理器的推出为 PC 用于有限元分析提供了必要的软件和硬件支撑平台。因此，当前国际上著名的有限元程序研究和机构都纷纷将它们的软件移植到 Wintel 平台上。

在大力推广 CAD 技术的今天，从自行车到航天飞机，所有的设计制造都离不开有限元分析计算，有限元法在工程设计和分析中将越来越受重视。目前以分析、优化和仿真为特征的 CAE (Computer Aided Engineering) 技术在世界范围内蓬勃发展。它可以快速、有效地分析产品的各种特性、揭示各结构参数变化对产品性能的影响，从而进行设计方案的修改和调