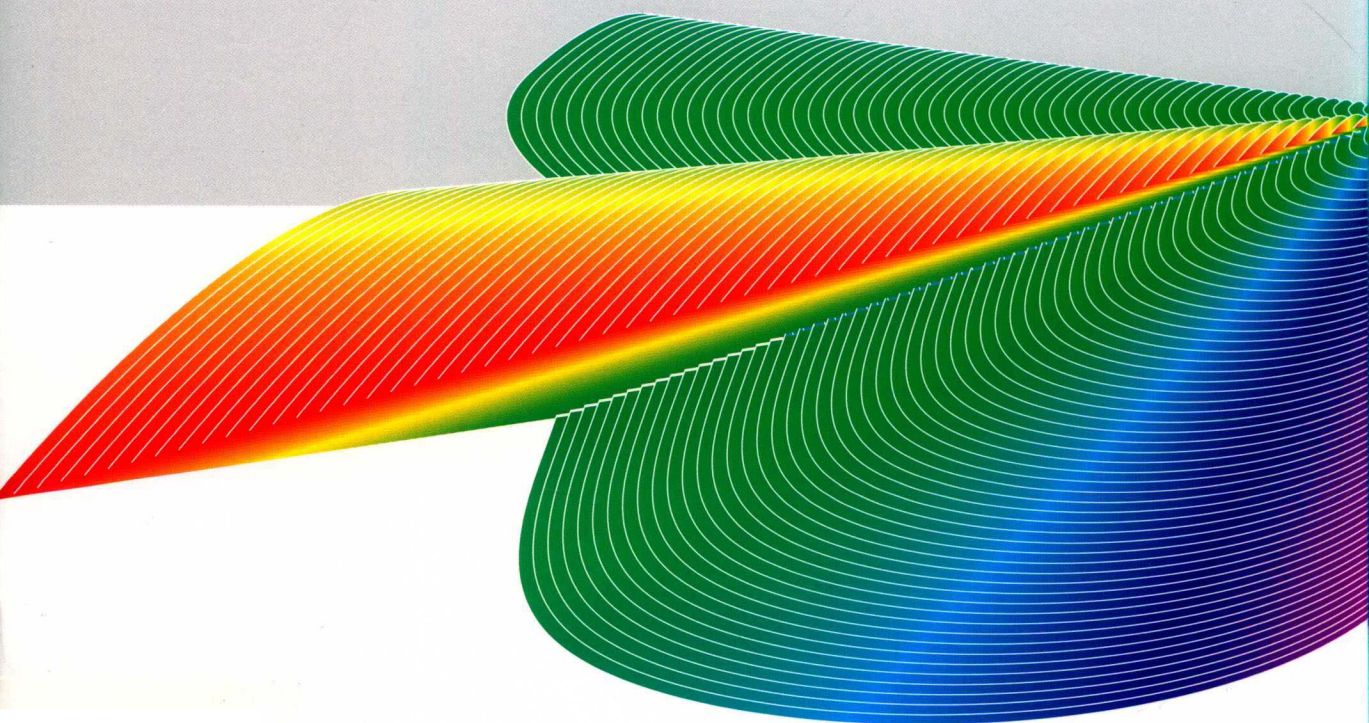


清华大学出版社“十三五”规划教材

# 有限元原理 与程序可视化设计

主编 梁清香

参编 张伟伟 陈慧琴 刘利亭 贾有



清华大学出版社

# 有限元原理 与程序可视化设计

主编 梁清香

参编 张伟伟 陈慧琴 刘利亭 贾有

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书共3篇,分别为有限元原理、有限元建模、有限元程序可视化设计。有限元原理部分重点介绍最具有有限元课程特点的基本内容及程序设计思想,主要包括弹性问题、弹塑性问题、结构动力问题的有限元法;从实用角度介绍有限元建模方法、有限元程序可视化设计;做到理论体系完整,理论与应用并重。本书采用模块式结构,3篇内容相对独立,可根据需要选学。

本书可作为工程力学、机械、材料、土木、水利类专业本科生、研究生的有限元教材,也可作为相关专业有限元程序设计教材,还可供高等院校相关专业教师和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

有限元原理与程序可视化设计/梁清香主编. —北京:清华大学出版社,2019

ISBN 978-7-302-52485-4

I. ①有… II. ①梁… III. ①有限元分析—可视化软件—程序设计—教材 IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 040931 号

责任编辑:朱红莲

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.75

字 数:357千字

版 次:2019年3月第1版

印 次:2019年3月第1次印刷

定 价:42.00元

产品编号:081539-01

# 前言

## FOREWORD

有限元法从 20 世纪 50 年代中期发展至今,已成为工程实际中最有效、应用最广的一种数值方法,已在教学、科研及工程应用中普及使用,并取得了丰硕成果。

2018 年 6 月,“新时代全国高等学校本科教育工作会议”在四川大学召开,教育部党组书记、部长陈宝生在会议的讲话中明确指出:“要着力推进课程内容更新,将学科研究新进展、实践发展新经验、社会需求新变化及时纳入教材。”本书中有限元建模技术、有限元可视化程序设计就是根据实践发展新经验、社会需求新变化纳入有限元教材中的新内容。目前尚未发现与本教材中有限元建模实例与有限元可视化程序设计方面类似的书籍。

有限元理论和有限元软件之间存在着巨大鸿沟,而有限元模型就是在这一鸿沟上架起的桥梁。利用有限元理论建立正确合理的有限元模型已成为衡量工程技术人员有限元应用水平的重要标志。没有正确的有限元模型,无法达到应用商用有限元软件解决工程实际问题的目的。在新工科背景下,掌握有限元建模技术对学生应用有限元方法解决工程实际问题的能力起到决定性的作用。

有限元程序设计作为有限元理论实现的一部分,一直作为有限元教材的重要内容,但到目前为止,有限元程序设计仍停留在数据文件时代,不能满足随时可以看到结果、程序与结果调整同步的可视化社会需求。可视化技术的发展与相应有限元商用软件极具诱惑的前后处理功能已为有限元程序设计提供很好的参考,推广可视化程序设计,对创新能力培养将起到积极作用。

本书力求提供具有现代特色的教学内容。在教材的编写上,做到阐述简明扼要,深入浅出。在教材的内容体系上,综合考虑有限元方法的基本原理、建模技术、可视化程序设计方法,使学生的学习原理的基础上,一方面学会建模方法,为应用商用有限元软件架起桥梁,一方面学习可视化编程技术,为学生开发特定问题的可视化应用软件提供完整的操作示范。使学生在实践基础上深刻理解和掌握有限元原理,达到使用有限元软件与开发新软件解决工程实际问题的目的。

本书结合编著者 20 多年来的教学经验及丰富的商用有限元软件应用经验,以近几年工程力学专业本科生使用的讲义为蓝本编写而成。在编写过程中,主要参考了梁清香、张根全编著的《有限元与 MARC 实现》(机械工业出版社,2003 年 1 月)和梁清香主编的《有限元与 MARC 实现》第 2 版(机械工业出版社,2005 年 4 月),同时还参阅了国内有关教材和网上图片,在此一并致谢。

全书内容共3篇12章。第1章至第8章介绍有限元基本原理,循序渐进地阐述弹性问题、弹塑性问题、结构动力问题的有限元理论,使读者了解工程中常见结构静力分析与动力分析的有限元原理。第9章至第10章介绍有限元建模知识,并通过例题分析给出有限元模型图示。第11章至第12章介绍有限元可视化编程技术,并附例题的VB源程序与详细解读。第1章至第10章提供适当数量习题,配合教学使用。

本书由梁清香主编。其中第1章、第2章、第4章、第5章、第6章、第9章、第10章由梁清香编著,第3章由贾有编著,第7章由张伟伟编著,第8章由陈慧琴编著,第11章、第12章由刘利亭编著,全书由梁清香统稿审定。

本书的编写工作得到太原科技大学工程力学2017山西省优势专业建设项目的资助,在此表示衷心感谢。

在本书编写过程中得到多方面的关心和支持,北京理工大学宁建国教授、太原理工大学王志华教授对本书提出了许多有益的建议,在此深表感谢。清华大学出版社有关工作人员对本书的出版做了大量工作,谨此表示诚挚的谢意。

教材中有限元建模例题的分析与图示、有限元可视化程序设计都是首次尝试,难免有不尽如人意之处;限于编者水平,书中的疏漏与不妥之处也在所难免,欢迎读者指正。

编者

2018年9月

# 目录

## CONTENTS

### 第 1 篇 有限元原理

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 有限元法概述            | 3  |
| 1.1 有限元法的发展概况           | 3  |
| 1.2 有限元法的主要优点           | 4  |
| 1.3 有限元法在工程中的应用         | 4  |
| 1.4 通用有限元软件简介           | 6  |
| 1.4.1 通用有限元软件的共同之处      | 7  |
| 1.4.2 几个通用有限元软件简介       | 7  |
| 1.5 有限元法基本知识            | 9  |
| 1.5.1 有限元法基本思想          | 9  |
| 1.5.2 有限元法分类            | 10 |
| 1.5.3 有限元法分析工程实际问题的一般过程 | 11 |
| 1.5.4 单元位移函数的选取与收敛性分析   | 12 |
| 1.6 预备知识                | 13 |
| 1.6.1 弹性力学基本方程的矩阵表示     | 13 |
| 1.6.2 变形体虚位移原理          | 16 |
| 习题                      | 17 |
| 第 2 章 平面问题的有限元法         | 18 |
| 2.1 弹性力学平面问题            | 18 |
| 2.1.1 平面应力问题            | 18 |
| 2.1.2 平面应变问题            | 19 |
| 2.2 三角形单元位移函数和形函数       | 20 |
| 2.2.1 单元位移函数            | 21 |
| 2.2.2 位移函数的收敛性          | 23 |
| 2.2.3 形函数的性质            | 25 |
| 2.2.4 位移函数和形函数的几何意义     | 25 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 2.3 单元等效节点载荷向量                 | 26 |
| 2.3.1 集中载荷的等效节点载荷              | 27 |
| 2.3.2 分布体力的等效节点载荷              | 28 |
| 2.3.3 分布面力的等效节点载荷              | 28 |
| 2.4 应变矩阵、应力矩阵和单元刚度矩阵           | 31 |
| 2.4.1 应变矩阵                     | 31 |
| 2.4.2 应力矩阵                     | 32 |
| 2.4.3 单元刚度矩阵                   | 32 |
| 2.4.4 计算单元刚度矩阵的程序设计            | 36 |
| 2.5 整体平衡方程与整体刚度矩阵              | 37 |
| 2.5.1 由节点平衡建立整体平衡方程            | 37 |
| 2.5.2 整体刚度矩阵的集成                | 39 |
| 2.5.3 整体刚度矩阵的特点                | 40 |
| 2.5.4 整体刚度矩阵的存储                | 42 |
| 2.5.5 形成整体刚度矩阵的程序设计            | 43 |
| 2.6 整体节点载荷向量                   | 45 |
| 2.6.1 整体节点载荷向量的集成              | 45 |
| 2.6.2 注意事项                     | 48 |
| 2.6.3 形成单元节点载荷向量和整体节点载荷向量的程序设计 | 48 |
| 2.7 约束条件的引入                    | 49 |
| 2.7.1 引入约束条件的过程                | 49 |
| 2.7.2 几点说明                     | 53 |
| 2.7.3 引入约束条件的程序设计              | 53 |
| 2.8 求解                         | 54 |
| 2.9 应力计算及结果整理                  | 54 |
| 2.10 较精密的平面单元                  | 56 |
| 2.10.1 矩形单元                    | 56 |
| 2.10.2 六节点三角形单元                | 62 |
| 2.11 等参元                       | 70 |
| 2.11.1 母单元与子单元                 | 72 |
| 2.11.2 标准化坐标系下矩形单元族的形函数        | 73 |
| 2.11.3 等参变换的唯一性及等参元位移函数的收敛性    | 79 |
| 2.11.4 等参元的单元刚度矩阵与单元等效节点载荷向量   | 81 |
| 2.11.5 数值积分                    | 82 |
| 习题                             | 84 |
| 第3章 空间问题的有限元法                  | 87 |
| 3.1 空间问题的离散化                   | 87 |
| 3.2 四面体单元                      | 88 |
| 3.2.1 位移函数                     | 88 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 3.2.2 | 应变矩阵、应力矩阵         | 89  |
| 3.2.3 | 单元刚度矩阵            | 90  |
| 3.2.4 | 体积坐标              | 90  |
| 3.2.5 | 单元等效节点载荷向量        | 91  |
| 3.2.6 | 高阶四面体单元           | 92  |
| 3.3   | 六面体单元             | 93  |
| 3.3.1 | 八节点六面体单元          | 93  |
| 3.3.2 | 二十节点六面体单元         | 94  |
| 3.3.3 | 单元刚度矩阵            | 96  |
| 3.3.4 | 单元等效节点载荷          | 96  |
| 3.4   | 五面体单元             | 97  |
| 3.5   | 实体单元比较与选择         | 98  |
|       | 习题                | 98  |
| 第4章   | 空间轴对称问题的有限元法      | 100 |
| 4.1   | 空间轴对称问题概述         | 100 |
| 4.1.1 | 空间轴对称问题的几何方程与物理方程 | 100 |
| 4.1.2 | 空间轴对称问题的离散化       | 102 |
| 4.2   | 单元位移函数            | 102 |
| 4.3   | 应变矩阵、应力矩阵和单元刚度矩阵  | 103 |
| 4.3.1 | 应变矩阵              | 103 |
| 4.3.2 | 应力矩阵              | 104 |
| 4.3.3 | 单元刚度矩阵            | 104 |
| 4.4   | 单元等效节点载荷          | 104 |
|       | 习题                | 107 |
| 第5章   | 杆系结构的有限元法         | 108 |
| 5.1   | 杆系结构有限元法概述        | 108 |
| 5.2   | 一维等直杆单元           | 109 |
| 5.2.1 | 拉压杆单元             | 109 |
| 5.2.2 | 扭转杆单元             | 112 |
| 5.3   | 桁架结构的有限元法         | 112 |
| 5.3.1 | 桁架结构概述            | 112 |
| 5.3.2 | 桁架结构的有限元分析        | 112 |
| 5.4   | 梁单元               | 115 |
| 5.4.1 | 梁的基本公式            | 115 |
| 5.4.2 | 平面弯曲梁单元           | 116 |
| 5.4.3 | 平面自由式梁单元          | 120 |
| 5.4.4 | 考虑剪切变形的梁单元        | 121 |
| 5.4.5 | 空间梁单元             | 121 |

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 5.5        | 刚架结构的有限元法             | 124        |
| 5.5.1      | 刚架结构概述                | 124        |
| 5.5.2      | 刚架结构的有限元分析            | 124        |
|            | 习题                    | 125        |
| <b>第6章</b> | <b>板壳问题的有限元法</b>      | <b>127</b> |
| 6.1        | 板壳弯曲问题有限元法概述          | 127        |
| 6.2        | 板理论基础                 | 128        |
| 6.2.1      | 弹性力学薄板理论              | 128        |
| 6.2.2      | 板的横向剪切变形理论            | 129        |
| 6.3        | 薄板弯曲问题的有限元法           | 130        |
| 6.3.1      | 离散化                   | 130        |
| 6.3.2      | 矩形薄板单元                | 130        |
| 6.3.3      | 三角形薄板单元               | 131        |
| 6.3.4      | 小片试验                  | 133        |
| 6.3.5      | 离散的基尔霍夫理论薄板单元         | 134        |
| 6.4        | 厚板单元简介                | 135        |
| 6.5        | 壳理论简介                 | 135        |
| 6.6        | 三角形平板薄壳单元             | 136        |
| 6.6.1      | 局部坐标系中的单元刚度矩阵         | 136        |
| 6.6.2      | 单元刚度矩阵从局部坐标系到整体坐标系的转换 | 138        |
| 6.6.3      | 局部坐标的方向余弦             | 140        |
| 6.7        | 轴对称壳单元                | 141        |
| 6.7.1      | 轴对称薄壳理论               | 142        |
| 6.7.2      | 薄壳截锥单元                | 142        |
|            | 习题                    | 143        |
| <b>第7章</b> | <b>结构动力问题的有限元法</b>    | <b>144</b> |
| 7.1        | 引言                    | 144        |
| 7.2        | 结构离散化与动力平衡方程          | 144        |
| 7.2.1      | 结构离散化与动载荷             | 144        |
| 7.2.2      | 动力平衡方程                | 145        |
| 7.3        | 集中质量矩阵和一致质量矩阵         | 146        |
| 7.3.1      | 几个简单单元的集中质量矩阵和一致质量矩阵  | 146        |
| 7.3.2      | 质量矩阵的特点               | 148        |
| 7.4        | 自由振动分析                | 148        |
| 7.4.1      | 特征值问题                 | 148        |
| 7.4.2      | 几种求解特征值问题的方法概述        | 149        |
| 7.5        | 动力响应分析                | 150        |
| 7.5.1      | 阻尼模型                  | 150        |

|       |       |     |
|-------|-------|-----|
| 7.5.2 | 振型叠加法 | 151 |
| 7.5.3 | 直接积分法 | 153 |
|       | 习题    | 154 |

## 第 8 章 弹塑性问题的有限元法

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 8.1   | 弹塑性有限元法概述              | 155 |
| 8.2   | 弹塑性理论基础                | 155 |
| 8.2.1 | 材料的塑性性质                | 156 |
| 8.2.2 | Mises 屈服准则及硬化定律        | 156 |
| 8.2.3 | Prandtl-Reuss 塑性流动增量理论 | 158 |
| 8.3   | 弹塑性有限元法                | 159 |
| 8.3.1 | 弹塑性有限元法的应力应变关系         | 159 |
| 8.3.2 | 弹塑性有限元方程               | 162 |
| 8.3.3 | 弹塑性有限元方程的求解            | 163 |
|       | 习题                     | 168 |

## 第 2 篇 有限元建模

## 第 9 章 有限元模型

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 9.1   | 有限元模型的重要性 | 171 |
| 9.2   | 有限元模型的定义  | 171 |
| 9.2.1 | 分析问题类型    | 171 |
| 9.2.2 | 几何模型      | 173 |
| 9.2.3 | 单元类型的选择   | 180 |
| 9.2.4 | 网格布局及网格划分 | 180 |
| 9.2.5 | 边界条件      | 183 |
| 9.2.6 | 材料参数与几何特性 | 184 |
|       | 习题        | 186 |

## 第 10 章 有限元建模过程

|      |            |     |
|------|------------|-----|
| 10.1 | 有限元建模的一般过程 | 187 |
| 10.2 | 有限元建模举例    | 187 |
|      | 习题         | 197 |

## 第 3 篇 有限元程序可视化设计

## 第 11 章 面向对象的程序设计概述

|        |           |     |
|--------|-----------|-----|
| 11.1   | 面向对象的基本概念 | 201 |
| 11.1.1 | 对象的基本概念   | 202 |
| 11.1.2 | 对象的特征     | 202 |

|        |               |     |
|--------|---------------|-----|
| 11.1.3 | 对象的要素         | 203 |
| 11.1.4 | 面向对象的开发方法     | 204 |
| 11.1.5 | 面向对象的模型       | 204 |
| 11.2   | 面向对象的分析       | 206 |
| 11.2.1 | 对象的分析         | 206 |
| 11.2.2 | 建立对象模型        | 206 |
| 11.2.3 | 建立动态模型        | 208 |
| 11.2.4 | 建立功能模型        | 208 |
| 11.2.5 | 确定操作          | 209 |
| 11.3   | 面向对象的设计       | 209 |
| 11.3.1 | 面向对象设计的准则     | 209 |
| 11.3.2 | 面向对象设计的启发规则   | 209 |
| 11.3.3 | 系统设计          | 210 |
| 11.3.4 | 对象设计          | 211 |
| 11.4   | 面向对象的实现       | 212 |
| 11.4.1 | 程序设计语言        | 212 |
| 11.4.2 | 类的实现          | 212 |
| 11.4.3 | 应用系统的实现       | 212 |
| 11.4.4 | 面向对象测试        | 213 |
| 11.5   | 面向对象和基于对象的区别  | 213 |
| 第 12 章 | 平面问题可视化程序设计   | 214 |
| 12.1   | 程序总体框架与主要功能   | 214 |
| 12.2   | 原始数据准备及录入界面   | 214 |
| 12.3   | 数据输入验证及纠错     | 215 |
| 12.4   | 单元网格图及计算结果的显示 | 217 |
| 12.4.1 | 单元网格图显示程序     | 217 |
| 12.4.2 | 节点位移图显示程序     | 218 |
| 12.4.3 | 单元应力图显示程序     | 218 |
| 12.5   | 原始数据生成与保存     | 219 |
| 12.6   | 计算部分处理框图      | 220 |
| 12.7   | 算例            | 220 |
| 12.8   | 程序代码          | 224 |
| 参考文献   |               | 225 |

## 第 1 篇

# 有限元原理

# 有限元原理



## 第1章

# 有限元法概述

有限元法(finite element method, FEM)是工程领域中应用最广泛的一种数值计算方法。经过近 60 年的发展,有限元法理论臻趋完善,应用几乎遍及所有的工程技术领域。综合有限元理论、计算数学、计算机图形学和优化技术,开发出了一大批通用与专用有限元软件,它们以功能强、用户使用方便、技术结果可靠和效率高而成为新的技术产品,使用这些软件已经成功地解决了机械、建筑、材料加工、航空航天、造船、核能、声学、电磁学等工程领域的诸多难题。有限元软件已经成为推动科技进步和社会发展的生产力,并且取得了巨大的经济效益。

## 1.1 有限元法的发展概况

有限元法基本思想的提出,可以追溯到 Courant 在 1943 年的工作,他第一次尝试应用定义在三角形区域的分片连续函数和最小势能原理求解圣维南(St. Venant)扭转问题。

现代有限元法第一个成功的尝试,是将刚架位移法推广应用于弹性力学平面问题,这是 Turner、Clough 等人在分析飞机结构时于 1956 年得到的成果。他们第一次给出了用三角形单元求平面应力问题的正确解答,打开了利用计算机求解复杂问题的新局面。1960 年 Clough 将这种方法命名为有限元法。

1963—1964 年, Besseling、Melosh 和 Jones 等人证明了有限元法是基于变分原理的里兹(Ritz)法的另一种形式,从而使里兹法分析的所有理论基础都适用于有限元法,确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。利用变分原理建立有限元方程和经典里兹法的主要区别是,有限元法假设的近似函数不是在全求解域上给出的,而是在单元上给出的,而且事先不要求满足任何边界条件,因此它可以用来处理很复杂的连续介质问题。

有限元法在工程中应用的巨大成功,引起了数学界的关注。20 世纪 60 年代至 70 年代,数学工作者对有限元法的误差、解的收敛性和稳定性等进行了卓有成效的研究,从而巩固了有限元法的数学基础。我国数学家冯康在 60 年代研究变分问题的差分格式时,也独立地提出了分片插值的思想,为有限元法的创立做出了贡献。

近 60 年来,有限元法的应用已由平面问题扩展到空间问题、板壳问题、组合结构,由静力问题扩展到稳定问题、动力问题和波动问题。分析对象从弹性材料扩展到塑性、黏弹性、

黏塑性和复合材料等。研究领域从固体力学扩展到流体力学、传热学、电磁学、声学等领域,由单一物理场的求解扩展到多物理场的耦合,结构尺寸从宏观扩展到微观。在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到新产品设计。随着计算机的发展,应用基于有限元法的计算机辅助工程(CAE)的方法越来越普及,已成为飞机、高层建筑、大型桥梁、高速列车等大型结构设计的主流工具,特别是对一些目前还不能采用试验方法研究的微观结构性能的分析与预测,成为新材料研制的有效手段。可以预测,随着现代力学、计算数学和计算机技术等学科的发展,有限元法作为一个具有巩固理论基础和广泛应用效力的数值分析工具,必将在国民经济建设和科学技术发展中发挥更大的作用,其自身亦将得到进一步的发展和完善。

## 1.2 有限元法的主要优点

有限元法能迅速成为现代工业与工程技术密不可分的一个组成部分,除了依赖于现代工业化技术发展需要的大环境之外,有限元法本身具有的许多优点也吸引了大量的理论研究人员和应用工程技术人员。它的主要优点是:

(1) 应用范围广泛。有限元法已成功地求解固体力学、流体力学、温度场、电磁场、声场、多场耦合等领域的各类线性、非线性问题。它几乎适应于求解所有的连续介质和场问题,目前已渗透到微观结构领域。

(2) 软件功能强大。有限元软件已经成功地解决了许多领域的工程计算难题。与其他CAD软件的无缝连接及不断完善的前后处理功能,使有限元法的使用范围不断扩充。

(3) 描述简单,便于推广。有限元法采用矩阵形式表示,使问题的描述简单化,使求解问题的方法规范化,便于编制计算机程序。

## 1.3 有限元法在工程中的应用

有限元法在工程中得到了广泛的应用,主要应用范围体现在如下四个方面。

### 1. 新产品设计

由有限元法设计产品,能缩短新产品的研制周期,减少成本,降低出错返工率;而仿真驱动产品研发,也将许多工程带到更高境界。

1990年10月,美国波音公司采用有限元软件对新型客机B-777实现了完全数字化设计,并试飞成功。现在,基于有限元方法的CAE已成为飞机结构设计的主流工具。图1-1为飞机整机有限元网格。

同样,在卫星结构设计过程中,不可避免地要根据各方面的要求不断修改尺寸和材料,优化卫星结构,而如何修改和修改的效果如何,都要进行有限元仿真计算;汽车产品研发初期,用有限元法对汽车零部件、总成、系统、整车进行模拟分析,可以及时发现产品设计中的隐患,优化结构,从而降低汽车制造和试验成本,使新产品早日投入市场,增强企业的竞争力;在金

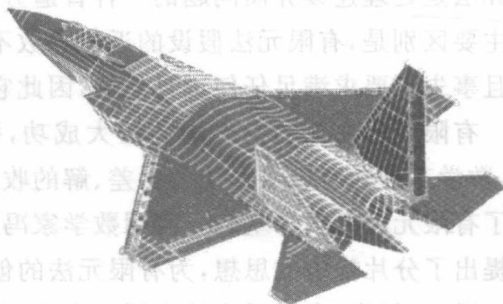


图 1-1 飞机整机有限元网格

属成形领域,新产品设计前先进行模拟仿真,通过分析金属成形工艺和热处理工艺,对加工过程中材料流动、模具充填、成形载荷、缺陷形成等积累更多的知识,从而优化加工过程,提高产品成形质量。目前某些特殊用途的异形钢管就是模拟仿真后出现的新产品。

## 2. 现有产品的改进与修复

对现有产品的改进设计包括结构、材料等方面的改进,使改进后的产品在满足强度、刚度、稳定性等要求下,在经济性、舒适性、轻量化、美观等方面得到改进;带缺陷的产品修复补强后,可以继续使用,变废为宝。

“鸟巢”是在有限元软件平台上设计与优化的。有关专家在修改初步设计与施工图设计中,应用有限元软件对主桁架、桁架柱、次结构的布置进行了调整,结构抗震性能与节点构造得到改善,并通过采取一系列优化措施,有效地减小了结构用钢量,达到了控制工程造价的目的,取得了良好的技术经济效益。图 1-2 所示为国家体育馆“鸟巢”有限元网格。

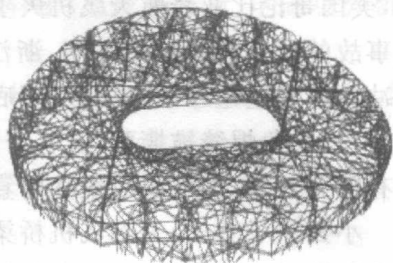


图 1-2 国家体育馆“鸟巢”有限元网格

目前土石坝已经向 300 米级高坝发展,基坑的支护问题、边坡稳定问题在土石坝改进设计时均应充分考虑,而这些工作都可由有限元法完成;汽车产品批量生产后,有限元分析主要解决汽车在使用过程中发现的质量问题,并提出改进方案,为汽车质量改进及优化提供简单而行之有效的方法;英国 Newport pagnell 的 Tickford 桥是一座世界上距今时间最久、最古老的铸铁公路桥,对该桥采用了铺贴复合材料片进行加固修复补强;带裂纹缺陷的液化石油气球罐对安全运行有重大影响,通过有限元法补强分析,可以找到经济高效地修复球罐裂纹并延长球罐使用年限的方法;在口腔生物力学研究中,种植固位覆盖义齿对牙齿进行修复补强主要采用有限元法。图 1-3 所示为双江口坝体的有限元网格,图 1-4 为带缺陷球罐的复合材料补强有限元网格。

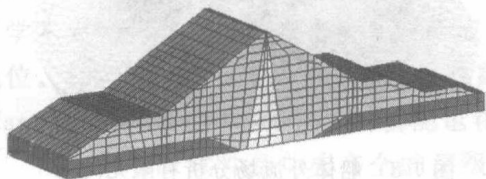


图 1-3 双江口坝体有限元网格

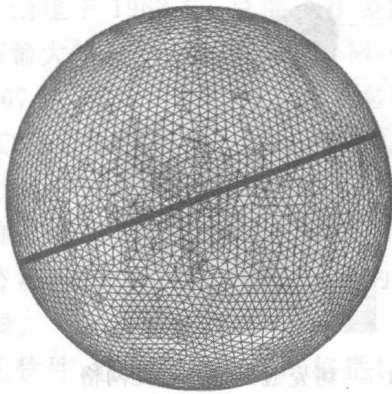


图 1-4 带缺陷球罐的复合材料补强有限元网格

## 3. 虚拟试验

采用有限元法进行虚拟试验,以找出对产品性能有重要影响的各种关键因素,为产品的改进提供重要参考;同时,也可节约大量时间,降低产品的研发成本。目前,虚拟试验可以将计算误差控制在 10% 以内,能够满足工程需要。

如何提高车身的抗碰撞能力,是汽车被动安全中需要解决的问题之一。过去美国福特汽车公司每开发一个新车型,都要用 120 辆车进行冲撞试验,约耗资 6000 万美元。现在利用有限元法进行汽车碰撞过程的模拟,以节省昂贵的实车碰撞试验经费,是国内外汽车公司普遍采用的一种方法。图 1-5 所示为汽车碰撞过程模拟试验有限元网格。

#### 4. 重大事故原因分析

1983 年,北京一幢正在施工的高层建筑的大型脚手架坍塌,5 人死亡,7 人受伤;1940 年,美国 Tocomo 悬索桥的垮塌事故,被记载为 20 世纪最严重的工程设计错误之一;2003 年,美国哥伦比亚号航天飞机失事,外部燃料箱表面泡沫材料安装过程中存在的缺陷,是造成事故的罪魁祸首;2014 年,浙江某厂蜡油加氢脱硫及柴油加氢精制联合装置中一台溶剂缓冲储罐发生超压破坏事故,罐底板中间外凸变形,周边底板被抬起,储罐整体向一侧严重倾斜,且大角焊缝被撕裂,有害介质大量外流,导致整个装置停工。通过对事故现场调查,结合有限元分析,找出事故发生的直接原因,提出事故安全预防措施。

小到原子分子,大到飞机桥梁,无论是整机、装配图还是零件,无论是固体、流体、气体还是生物体,均可由有限元法进行分析。图 1-6 所示为碳纳米管分子结构有限元网格,图 1-7 所示为烤瓷冠三维有限元网格,图 1-8 所示为船体外流场分析有限元网格。

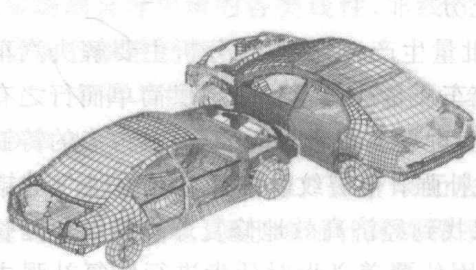


图 1-5 汽车碰撞过程模拟试验有限元网格

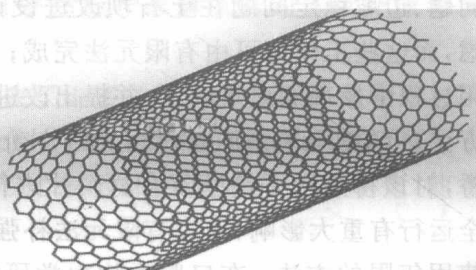


图 1-6 碳纳米管分子结构有限元网格

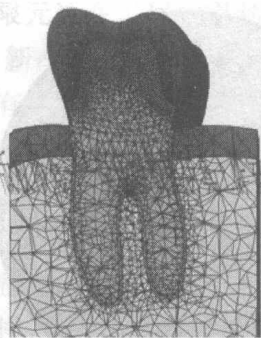


图 1-7 烤瓷冠三维有限元网格

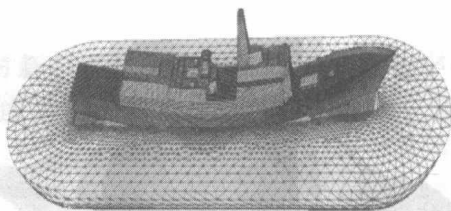


图 1-8 船体外流场分析有限元网格

## 1.4 通用有限元软件简介

有限元软件是商品,也是沟通理论分析与工程实际的桥梁。许多大型工程项目就是依赖于有限元软件分析模拟而确定实施方案的,许多高水平的学术论文也都声明所用的是某