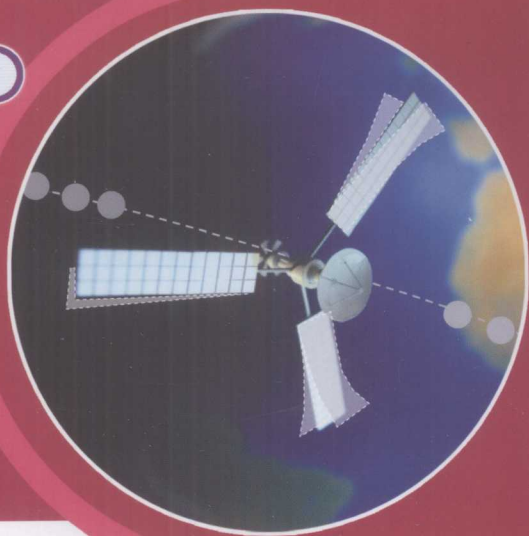




普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目



工程有限元方法

主 编 曾 攀
副主编 石 伟 雷丽萍



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

工程有限元方法

主 编 曾 攀
副主编 石 伟 雷丽萍

科 学 出 版 社
北 京

内 容 简 介

本书针对有限元方法的基本原理与专题应用这两方面进行编写,分为两部分,共8章。第一部分为有限元方法的基本原理,包括第1~4章,内容有引论,杆、梁结构分析的有限元方法,连续变形体的力学描述,连续变形体分析的有限元方法;第二部分为有限元方法的专题应用,包括第5~8章,内容有静力结构的分析、传热问题的分析、弹塑性问题的分析、振动问题的分析。第一部分强调有限元方法的工程概念与理解,从杆、梁结构入手,基于刚度分析的直接方法引入有限元方法的基本原理,并扩展到连续体结构的分析,读者仅具有材料力学及矩阵方面的基本知识就可以阅读;而在第二部分,则强调有限元方法在工程中的应用,提供了基于 ANSYS 软件平台的建模算例,可以使读者在“学中用、用中学”的交互方式中掌握有限元方法。全书提供了多样化的例题以及具有一定深度及广度的 ANSYS 算例,以便于读者研习。

本书具有基本原理阐述简明扼要、重点突出、深入浅出、例题丰富、计算实例覆盖面广等特点,可作为机械、力学、土木、水利、航空航天等专业的本科高年级学生以及工程硕士的课程教材,也可使不同程度的读者进行自学,对于希望在 ANSYS 软件平台上进行建模分析的读者,本书具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工程有限元方法/曾攀主编. —北京:科学出版社,2010.2

(普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材·北京市高等教育精品教材立项项目)

ISBN 978-7-03-026707-8

I. ①工… II. ①曾… III. ①有限元分析-高等学校-教材 IV. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019515 号

责任编辑:毛莹 潘继敏 / 责任校对:张怡君
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市农林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—4 000 字数:368 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

曾攀男,1963年生,海南省海口市人。1988年在清华大学获博士学位,1988~1992年先后在大连理工大学和西南交通大学从事两站博士后研究(领域为计算力学),为国家杰出青年科学基金获得者(1998)、长江学者(2000)、德国“洪堡”学者(1994~1995)、“新世纪百千万人才工程”国家级人选。现为清华大学机械工程系主任、教授、博士生导师,全国塑性工程学会副理事长,《机械工程学报》、《工程力学》、《塑性工程学报》等5家学术期刊的编委,上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室、华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室学术委员会委员,先后主持和参加国家级重点基金项目、863项目、霍英东基金项目等科研项目30多个,获教委科技进步二等奖、机械部一等奖、国家级教学成果二等奖、北京高等教育教学成果一等奖及二等奖各一项,并获国家发明专利授权3项;已出版及翻译学术著作有《材料的概率疲劳损伤力学及现代结构分析原理》(曾攀,1993)、《有限元分析及应用》(曾攀,2004)、《有限元基础教程》(曾攀,2009)、《工程中的有限元方法》(T. R. Chandrupatla,曾攀译,2006)、《有限元方法第1卷:基本原理》(O. C. Zienkiewicz,第5版,曾攀译,2008),发表论文100多篇。主要从事计算力学、结构设计与分析、材料加工中的数值模拟等方面的研究。长期从事“有限元分析及应用”课程的教学工作。

石伟男,1966年生。1984~1991年在上海交通大学学习,获学士、硕士学位,1997年在清华大学获博士学位,毕业后留校任教,现为清华大学机械工程系副教授。主要从事材料加工过程多物理场建模与模拟、制造系统建模与系统仿真、面向产品创新设计的大型工件热加工工艺研究与优化、大型锻件热处理三维模拟软件开发、大型空心钢锭结构设计与凝固分析等项目研究。长期从事“有限元分析”课程的教学工作,获得1997年、1998年、1999年度“清华之友”优秀青年教师奖,获得2008年清华大学教学成果一等奖。

雷丽萍女,1968年生。分别于1991年、1996年在清华大学获得学士、硕士学位,2000年在韩国国立釜山大学获得博士学位,2001~2003年在清华大学机械工程系从事博士后研究工作,现为清华大学机械工程系副教授。主要从事材料加工中的数值模拟、塑性微成形、大型装备结构设计与分析等方面的研究。长期从事“有限元分析及应用”课程的教学工作,获得2008年清华大学教学成果一等奖。

前 言

当代科技的发展日新月异,特别是计算机技术和数字化分析的发展更是深刻地改变着当今世界,使得一些以前不可能做或不敢做的事情变成可能。通过数字化的手段可以获得复杂结构在复杂载荷环境下的真实信息,如2004年法国戴高乐机场航站楼垮塌事故的分析,2007年我国新一代北京正负电子对撞机核心部件漂移室的数字化设计等一系列重大的工程和结构,2008年我国南方雪灾时大型输电塔垮塌的极限载荷分析,2008年杭州地铁施工现场垮塌事故的分析,2008年北京奥运会鸟巢场馆支撑结构的减重分析都需要进行多次的计算和分析。有限元方法在其中的数字化分析中起到了非常重要的作用。

有限元方法已成为非常普及的数字化分析方法,国际上已发布了众多的有限元分析软件,因此,甚至可以说只要你能够进行工程设计和画图,就可以进行有限元分析。因为在一个自动化程度很高的软件平台基础上,有限元分析完全可以由计算机来自动完成。

但是,有两个最重要的问题需要回答:其一,你所获得的计算结果可靠吗?在没有试验结果或标准答案的情况下,你如何判断结果的正确性?其二,在获得计算结果后,你如何使用所获得的信息对设计进行修改和优化。这两个问题要求学生除具有坚实的基础理论和深入的专业知识外,还应具备应用所学知识解决实际问题的能力,这就要求具备“一个基础、两种能力”。“一个基础”就是以有限元方法基本原理为基础,让学生掌握坚实的有限元方法的数学、力学基础,了解该领域知识所形成的过程,为今后进行自我学习和知识创新打下基础;而“两种能力”就是进行有限元分析的建模能力,以及针对实际问题的专题分析能力,以培养学生参与实践的综合素质,使之成为学生亲身体验的实践环节。

正是出于这样的考虑,我们设计并编写了本书,并定位为针对高年级本科生和应用型研究生,培养具有扎实基础知识、宽泛专业背景、较强实践能力的人才,为开展有限元方法的应用型及研究型课程教学提供新的素材。

本书力求反映出一种新的教学理念,由以前以教师传播知识为主要特征的传授型教学模式,向以培养学生认知能力和实践能力为主要特征的应用型及研究型教学模式转变,并以教材为载体,营造出研究型课程教学的环境,围绕这一思路进行本书的体系设计。本书分为三个层次:基本原理、建模方法和专题应用。对于第一个层次,以清晰的工程概念阐述有限元方面的基本原理,从杆、梁结构分析入手,直接推导出有限元方法,然后扩展到连续变形体的力学描述及有限元方法,并给出

相应的例题,所有的推导都以力学分量形式给出,不出现复杂的数学张量符号,仅要求具有材料力学及矩阵方面的知识就可以阅读,对读者的预备知识要求较低。对于第二个层次,实际上是第一个层次的深化,本书设计了具有一定难度的典型例题,展示有限元方法的推导过程,让读者充分理解有限元方法的标准性、规范性和程式化的特点,并掌握有限元建模过程中的每一个细节。对于第三个层次,设计了一系列具有较强工程背景的算例,基于目前国际上著名的 ANSYS 软件平台,给出了建模的要点以及完整的基于图形用户界面(GUI)的操作流程,提供了可以进行二次修改的命令流,涉及目前较广泛的工程应用领域,如静力结构、传热问题、弹塑性问题、振动问题等,为读者进一步进行实际问题的计算分析打下良好的基础,并提供相应的建模参考范例。

全书包括两部分,共分 8 章。第一部分为有限元方法的基本原理,包括第 1~4 章,相关的内容如下。

第 1 章为引论,简要介绍与力学相关的课程分类及有限元方法的发展历史。

第 2 章为杆、梁结构分析的有限元方法,首先基于一个简单弹簧系统的力学分析过程给出有限元直接求解的方法,然后讨论杆单元及坐标变换、梁单元及坐标变换、平面梁求解的最小势能原理、边界条件的处理,具体对二杆结构、杆-梁组合结构以及弹簧系统给出完整的典型例题。

第 3 章为连续变形体的力学描述,介绍一般变形体的描述及变量定义,包括三大类变量描述、三大类基本方程、两类边界条件及能量表达等,讨论平面应力、平面应变及刚体位移等基本问题,引入力学问题求解的虚功原理,系统介绍材料破坏的常用力学准则。

第 4 章为连续变形体分析的有限元方法,讨论平面问题的单元构造、轴对称问题的单元构造、空间问题的单元构造、平面单元分布力的处理、参数单元的一般原理和数值积分、有限元方法的收敛性等问题,引入 h -方法以及 p -方法等基本概念。

第二部分为有限元方法的专题应用,包括第 5~8 章,相关的内容如下。

第 5 章为静力结构的分析,分别就杆、梁结构,连续体结构的静力分析给出 ANSYS 算例,涉及订书钉压入状态的受力分析、路灯装置的受力分析、小型铁路钢桥的求解、八角形管道的循环对称求解、高塔结构受三角形剪切分布力的分析、平面槽环缺口结构闭合状态的分析、带裂纹平面结构的应力强度因子的数值模拟等专题。

第 6 章为传热问题的分析,介绍传热分析的基本方程、稳态传热与瞬态传热分析的有限元列式、热应力分析的有限元列式,给出的 ANSYS 算例涉及焊接接头稳态传热过程的数值模拟、桁架结构的装配应力分析、瞬态热过程的分析。

第 7 章为弹塑性问题的分析,讨论弹塑性分析的基本方程及有限元列式;给出的 ANSYS 算例涉及三点弯曲梁的弹塑性分析、厚壁圆筒受内压的弹塑性分析、带

裂纹 COD 试样的裂纹尖端弹塑性分析。

第 8 章为振动问题的分析,讨论振动分析的基本方程及有限元列式;给出的 ANSYS 算例涉及桥梁结构的振动模态分析、卫星结构的振动模态分析、大型模锻液压机机架的振动模态分析。

为方便读者了解和使用 ANSYS 软件平台,在附录 A 中,通过一个简例来展示有限元分析的全过程,包括基于图形用户界面的交互式操作(GUI)、命令流的输入方式以及 APDL 参数化编程的操作。

本书的重点是强调有限元方法的理解和融会贯通,力求精而透,强调学生综合能力(掌握和应用有限元方法)的培养,为学生亲自参与建模以及使用先进的有限元软件平台提供较好的素材;在所给出的 15 个 ANSYS 算例中,完整提供了基于图形用户界面的交互式操作及命令流,其命令流的运行不受 ANSYS 版本号的限制,可以给学生提供进一步扩展的空间。本书 ANSYS 算例中的命令流可通过网站(http://www.sciencep.com/eduresource/resource_download.php)下载。

本书第一部分为有限元方法的基本原理,可作为高年级本科生、应用型研究生的人门教材,需 20~30 学时。第二部分为有限元方法的专题应用,其中的第 5 章及第 6 章作为建模与专题应用的基础教材,需 12~16 学时;第 7 章及第 8 章为扩充内容,可作为有较高要求或中级水平读者的教学内容,需 8~10 学时。本书提供的各个部分的素材可根据各高校的具体教学要求来进行组合。

在本书中,曾攀编写了第 1~4 章及第 5~8 章的基本原理部分,石伟编写了第 6 章、第 7 章的典型例题和 ANSYS 算例,雷丽萍编写了第 5 章、第 8 章的典型例题和 ANSYS 算例。清华大学机械工程系的博士研究生杜泓飞、硕士研究生黄少锋、吴玥明、姚波、郇宜伟、高蔚然、梅乐、刘倩、王文娟、许月杰、李聪聪、李婉宜、李源、邹建荣核对了书中的 ANSYS 算例,博士研究生赵加清核对了全书的习题。作者在此还要感谢张惠玲女士、科学出版社的毛莹编辑对本书做出的重要贡献。

由于作者水平有限,书中出现疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009 年 10 月于清华园

目 录

前言

第一部分 有限元方法的基本原理

第 1 章 引论	(1)
1.1 概况	(1)
1.2 各类力学课程的分类与特征	(5)
1.3 有限元方法的历史	(6)
1.4 有限元分析软件	(7)
1.5 本章要点	(9)
第 2 章 杆、梁结构分析的有限元方法	(10)
2.1 简单弹簧系统的力学分析过程.....	(10)
2.2 杆结构的力学分析过程.....	(14)
2.3 杆单元及坐标变换.....	(17)
2.4 梁单元及坐标变换.....	(22)
2.5 边界条件的处理.....	(35)
2.6 有限元分析的基本步骤及表达式.....	(39)
2.7 典型例题.....	(41)
2.8 本章要点.....	(46)
习题	(46)
第 3 章 连续变形体的力学描述	(50)
3.1 一般变形体的描述及变量定义.....	(50)
3.2 平面问题的基本力学方程.....	(57)
3.3 空间问题的基本力学方程.....	(62)
3.4 弹性问题中的能量表示.....	(66)
3.5 虚位移、虚应变与虚功原理	(67)
3.6 材料破坏的力学准则.....	(72)
3.7 典型例题.....	(77)
3.8 本章要点.....	(82)
习题	(82)

第 4 章 连续变形体分析的有限元方法	(85)
4.1 平面问题的单元构造	(85)
4.2 轴对称问题及其单元构造	(98)
4.3 空间问题的单元构造	(101)
4.4 单元分布力的处理	(105)
4.5 参数单元的一般原理和数值积分	(106)
4.6 关于有限元方法的收敛性	(114)
4.7 典型例题	(116)
4.8 本章要点	(120)
习题	(121)

第二部分 有限元方法的专题应用

第 5 章 静力结构的分析	(124)
5.1 杆、梁结构的 ANSYS 分析算例	(125)
5.2 连续体结构的 ANSYS 分析算例	(137)
5.3 本章要点	(160)
习题	(160)
第 6 章 传热问题的分析	(163)
6.1 传热分析的基本方程	(163)
6.2 稳态传热与瞬态传热分析的有限元列式	(165)
6.3 热应力分析的有限元列式	(169)
6.4 典型例题	(170)
6.5 传热及热应力问题的 ANSYS 分析算例	(173)
6.6 本章要点	(190)
习题	(190)
第 7 章 弹塑性问题的分析	(192)
7.1 弹塑性分析的基本方程及有限元列式	(192)
7.2 典型例题	(196)
7.3 弹塑性问题的 ANSYS 分析算例	(199)
7.4 本章要点	(221)
习题	(222)
第 8 章 振动问题的分析	(224)
8.1 振动分析的基本方程及有限元列式	(224)
8.2 典型例题	(228)
8.3 振动问题的 ANSYS 分析算例	(232)

8.4 本章要点	(245)
习题	(245)
附录 A ANSYS 软件的基本操作	(248)
附录 B 常用的材料常数及单位换算表	(261)
参考文献	(264)
中文索引	(265)
英文索引	(269)
命令流编程索引表	(273)

例题、ANSYS 算例目录

第 2 章

- 【例题 2.1(1)】 基于弹簧类比推导杆件的平衡关系 (13)
- 【例题 2.3(1)】 杆单元中形状函数的性质 (19)
- 【例题 2.3(2)】 杆单元刚度矩阵的性质 (20)
- 【例题 2.4(1)】 平面梁问题的解析求解 (25)
- 【例题 2.4(2)】 简支梁最小势能原理的求解 (26)
- 【例题 2.4(3)】 简支梁最小势能原理的证明 (26)
- 【例题 2.5(1)】 采用罚函数法处理边界条件 (37)
- 【例题 2.7(1)】 二杆结构的有限元分析 (41)
- 【例题 2.7(2)】 杆-梁组合结构的有限元分析 (43)
- 【例题 2.7(3)】 弹簧系统的最小势能原理求解 (45)

第 3 章

- 【例题 3.1(1)】 杆件的特征建模与通用建模方法 (54)
- 【例题 3.6(1)】 复杂应力状态的坐标变换 (75)
- 【例题 3.6(2)】 指定斜面上正应力与剪应力的计算 (75)
- 【例题 3.6(3)】 采用 4 个强度准则分析关键点的强度及安全系数 (76)
- 【例题 3.7(1)】 构形、位移与应变的计算(平行四边形变形) (77)
- 【例题 3.7(2)】 夹持杆结构受中点载荷的虚功原理分析 (78)
- 【例题 3.7(3)】 基于应变测量的应力状态分析 (79)
- 【例题 3.7(4)】 分析 4 个强度准则的差别 (81)

第 4 章

- 【例题 4.1(1)】 构形、位移与应变的计算(任意四边形变形) (95)
- 【例题 4.5(1)】 一点和两点高斯数值积分的计算比较 (113)
- 【例题 4.6(1)】 平面 3 节点三角形单元的收敛解 (115)
- 【例题 4.7(1)】 高阶三角形单元的收敛性与描述能力 (116)
- 【例题 4.7(2)】 有限元分析应力结果的后处理方法 (117)

第 5 章

- 【ANSYS 算例 5.1(1)】 订书钉压入状态的受力分析 (125)
- 【ANSYS 算例 5.1(2)】 小型铁路钢桥的求解 (132)
- 【ANSYS 算例 5.2(1)】 八角形管道的循环对称求解 (137)

【ANSYS 算例 5.2(2)】 高层建筑承受风载荷分布的分析	(142)
【ANSYS 算例 5.2(3)】 平面槽环缺口结构闭合状态的分析	(146)
【ANSYS 算例 5.2(4)】 带裂纹平面结构的应力强度因子的数值模拟	(151)
第 6 章	
【例题 6.1(1)】 一维传热问题的基本方程及边界条件	(164)
【例题 6.2(1)】 一维传热单元温度场的构造	(166)
【例题 6.2(2)】 基于 Galerkin 方法构造一维传热问题的有限元列式	(167)
【例题 6.4(1)】 三层复合墙体的一维传热分析	(170)
【例题 6.4(2)】 夹持杆结构的温度应力分析	(172)
【ANSYS 算例 6.5(1)】 焊接接头稳态传热过程的数值模拟	(173)
【ANSYS 算例 6.5(2)】 桁架结构的温度及装配应力分析	(179)
【ANSYS 算例 6.5(3)】 钢制圆柱冷却过程温度场的瞬态分析	(185)
第 7 章	
【例题 7.2(1)】 刚性夹持杆结构的弹塑性分析	(196)
【ANSYS 算例 7.3(1)】 三点弯曲梁的弹塑性分析	(199)
【ANSYS 算例 7.3(2)】 厚壁圆筒受内压的弹塑性分析	(204)
【ANSYS 算例 7.3(3)】 带裂纹 COD 试样的裂纹尖端弹塑性分析	(213)
第 8 章	
【例题 8.1(1)】 一维 3 节点杆单元振动分析的有限元列式	(227)
【例题 8.2(1)】 弹簧系统的振动频率分析	(228)
【例题 8.2(2)】 杆结构的振动频率分析	(230)
【ANSYS 算例 8.3(1)】 桥梁结构的振动模态分析	(232)
【ANSYS 算例 8.3(2)】 卫星结构的振动模态分析	(234)
【ANSYS 算例 8.3(3)】 大型模锻液压机机架的振动模态分析(3 梁 2 立柱的 三维结构)	(239)

第一部分 有限元方法的基本原理

第 1 章 引 论

1.1 概 况

理论研究、科学实验以及计算分析是人们进行科学研究和解决实际工程问题的重要手段^[1~3],随着计算机技术及数值分析方法的发展,以有限元方法为代表的数值计算技术得到越来越广泛的应用。以飞机设计为例,它是一个复杂的系统工程(图 1-1),周期也比较长,从初步设计到最后定型投产最快也要十几年的时间(小飞机和改进型飞机除外);飞机的结构复杂,可靠性要求高;它是最典型的既要求结构重量轻,又对结构的强度和刚度有很高要求的设计。要做到这一点,就需要对整机的受力状况有非常准确的了解,有效的计算分析方法和工具就显得尤为重要。这也是为何有限元方法最早产生于飞机设计领域的原因之一。

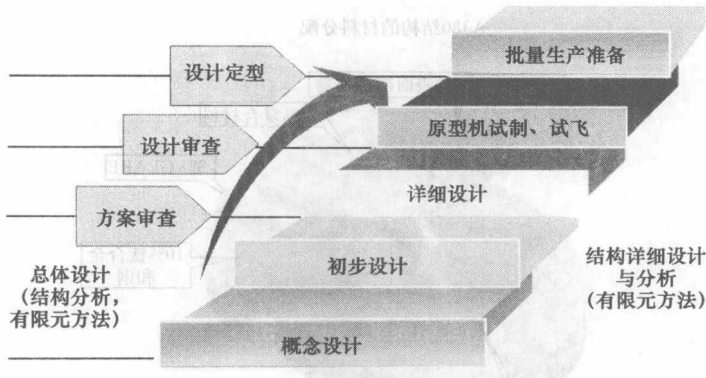


图 1-1 飞机研制的主要流程

空中客车 A380 是欧洲空中客车工业公司研制生产的四发远程超大型宽体客机,投产时也是全球载客量最大的客机。空机重 276.8t,最大起飞总重 560t,客舱布局载客 500 多人。要保证结构的安全,就必须对结构的各种受力状态进行准确的分析,然后应用各种设计准则来进行校核和结构修改,以满足强度和刚度的要

求, A380 结构设计准则见图 1-2, 由于飞机是反复使用的, 因此, 它的载荷也是载荷谱的形式, 由于重复的载荷容易在金属结构内产生微小的疲劳裂纹, 这就必须考虑材料的损伤容限性能, 以使 A380 的寿命要达到 40~50 年。A380 还大量采用新型材料和先进工艺技术, 其选材分布见图 1-3, 铝合金占的比重最大, 占总质量的 61%, 在采用新材料和新工艺时, 必须对强度、损伤、稳定性和抗腐蚀性提出具体要求, 也需要进行准确的力学分析, 以提高强度和损伤容限, 加强稳定性并提高抗腐蚀能力。



图 1-2 A380 结构设计准则

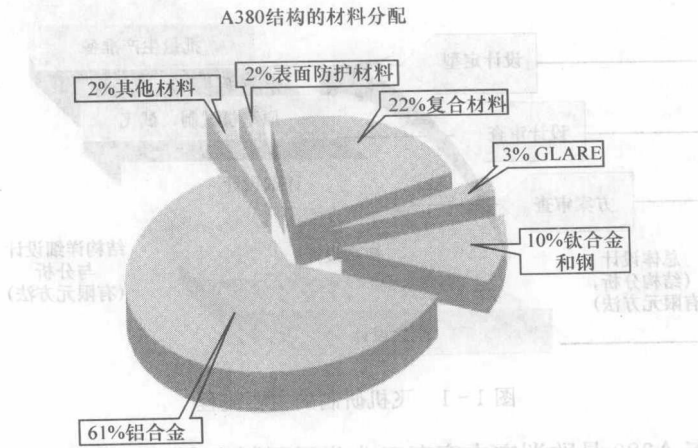


图 1-3 A380 选材的分布

随着计算机技术的发展, 应用基于有限元方法的计算机辅助工程(CAE)的方法越来越普及, 并成为飞机结构设计的主流工具; 40 多年来, 解决了诸多难题, 在

结构优化及减重方面发挥了不可替代的作用,提高了飞行器的可靠性,缩短了新机型研制周期,如波音 B777 的设计,从原计划的 8~9 年缩短为 4~5 年,采用 CAE 技术可以减少成本 25%,出错返工率减少 75%,A380 总体减重 44%。

有限元方法在其他领域也得到广泛的应用,成为数字化分析的主流方法之一;一些行业甚至还将有限元方法指定为强度和刚度校核的必需工具。一些国际商业化有限元软件还通过了 ISO 9000 等国际标准的认证,为工程结构的分析提供可靠的手段。当前,有限元方法已成为结构设计与优化的一体化工具,如土木工程中大型桥梁的设计(图 1-4)、高层建筑的设计(图 1-5)、大型风电设备的设计(图 1-6)和高速列车的设计(图 1-7)等。



图 1-4 大型桥梁的设计与建造

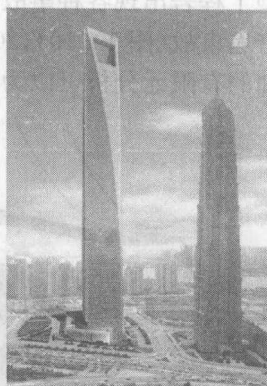


图 1-5 高层建筑的设计与建造



图 1-6 大型风电设备的设计与建造



图 1-7 高速列车的设计与制造

同时,有限元方法也成为前沿领域研究的主要工具,特别是对于一些目前还不能采用试验方法来进行研究的前沿领域,采用数字化手段可以就一些微观结构的性能进行分析和预测,如基于数字化的原子结构模拟(图 1-8)和基于数字化的分子结构设计与分析(图 1-9)。

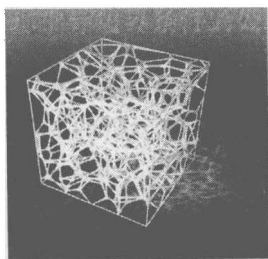


图 1-8 基于数字化的原子结构模拟

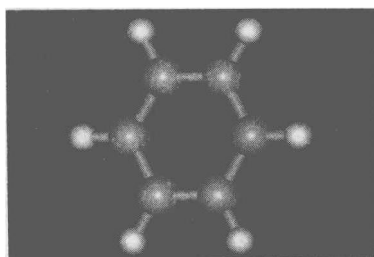


图 1-9 基于数字化的分子结构设计与分析

大型工程若出现各种事故,必然带来巨大的灾难,如 1940 年美国 Tacoma 悬索桥的垮塌事故(图 1-10),2003 年美国哥伦比亚号航天飞机的事故(图 1-11)。通过精细的有限元分析可以为寻找真正的失事原因提供依据。

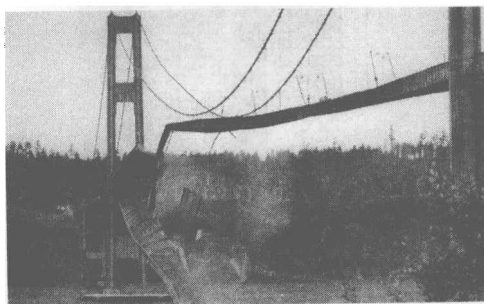


图 1-10 美国 Tacoma 悬索桥的垮塌事故(1940 年)

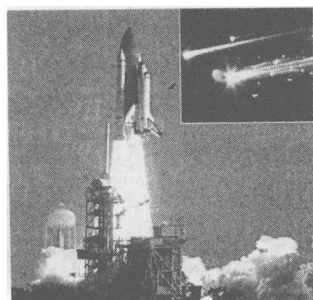
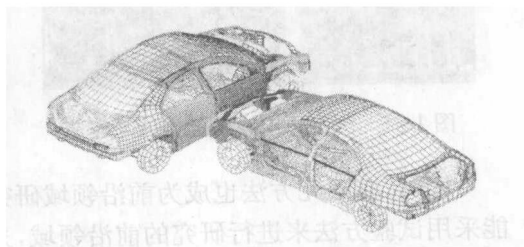


图 1-11 美国哥伦比亚号航天飞机事故(2003 年)

采用有限元方法还可以进行虚拟试验,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的参考,同时,也可节约大量的时间,降低产品的研发成本。目前,基于有限元方法的整机数字化试验可以将计算的误差控制在 10% 以内,能够满足工程上的需要。图 1-12 为汽车的碰撞试验与全过程数字化分析。



(a) 汽车的碰撞试验



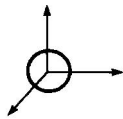
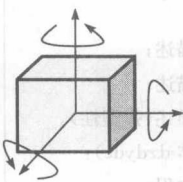
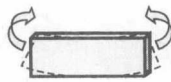
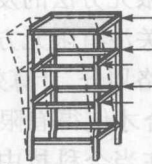
(b) 全过程数字化碰撞试验

图 1-12 汽车的碰撞试验与全过程数字化分析

1.2 各类力学课程的分类与特征

对于物体,总是处于受力与运动之中,需要就对象的特征进行分类,因此,在教学上形成了各种名目的力学课程。表1-1给出了主要力学课程的比较,从对象及特征、基本变量及方程、求解方式等方面进行讨论,并给出相应的图示。可以看出,有限元分析的力学基础是弹性力学,它基于区域离散的技术来描述复杂几何形状的变形体,并求解出对象的所有力学信息。

表1-1 各类力学课程的分类

各类力学课程	图示	对象及特征	基本变量及方程	求解方式
中学力学		对象:质点 (将整个对象抽象为点) 特征: (1)无变形; (2)无形状的点	基本变量: (1)质点描述(质心); (2)运动状态描述(质心); (3)力的平衡描述。 基本方程: 质点的牛顿三大定律	解析求解 微分方程
理论力学		对象:质点系或刚体 特征: (1)无变形; (2)具有复杂形状的刚体	变量: (1)刚体描述(质心,转动); (2)运动状态描述(质心,转动); (3)力的平衡描述。 方程: (1)质心的牛顿三大定律; (2)刚体转动的牛顿方程(动量矩方程)	解析求解 微分方程
材料力学		对象:简单变形体(杆、梁) 特征: (1)小变形; (2)简单形状的变形体	变量: (1)变形方面描述; (2)力的平衡描述; (3)材料物性描述。 方程: (1)几何变形方程; (2)力的平衡方程; (3)物理本构方程	简化的求解方法, 线性方程
结构力学		对象:数量众多的简单变形体 特征: (1)小变形; (2)简单形状的变形体(数量多)	变量: (1)变形方面描述; (2)力的平衡描述; (3)材料物性描述。 方程: (1)几何变形方程; (2)力的平衡方程; (3)物理本构方程	简化的求解方法, 线性方程组(大规模)