

现代CAE技术与应用教程

练章华 编著



CAE

Computer
Aided
Engineering



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

现代 CAE 技术与应用教程

练章华 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本教程用 ANSYS、ADINA、ABAQUS 和 MARC 作为现代 CAE 技术应用与实践的典型软件,系统、深入地体验有限元理论与 CAE 软件之间的紧密关系。学习本教程不仅可以循序渐进地深入掌握有限元基本理论,而且可以培养应用现代 CAE 软件解决工程问题的能力。本教程系统地介绍了 CAE 软件的基本分析过程,并重点放在有限元理论深层次问题的 CAE 软件应用与实践,即材料非线性问题、几何非线性与屈曲分析、高度非线性接触问题、断裂力学问题、流-固耦合问题、温度场与应力场耦合问题、计算流体动力学问题和固体动力学分析问题,同时对 CAE 软件的二次开发与应用进行了论述,每部分均有应用实例,是有限元理论到实践的一部高级教程。

本教程可以作为理工科院校相关专业高年级本科生、研究生和教师学习有限元理论与实践的教材或参考书,也可以作为从事核工业、石油化工、航空航天、土木工程、国防军工、铁道、机械制造、能源、汽车、交通、造船、地矿、生物医学、轻工及水利等领域学科研究及产品开发的工程技术人员使用现代 CAE 技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代 CAE 技术与应用教程/练章华编著.

北京:石油工业出版社,2004. 12

ISBN 7-5021-4982-1

I. 现…

II. 练…

III. 工程技术:计算机辅助技术-应用软件-教材

IV. TB-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 142397 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心排版

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20.5

字数:525 千字 印数:1—2000 册

定价:56.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本书由“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”和国家自然科学基金项目“基于数值模拟的复杂地层套管破坏机理研究”(编号:50074025)资助。

CAE 英文全称为 Computer Aided Engineering, 中文意为计算机辅助工程, 主要以有限元分析技术为基础, 综合了迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程管理学与现代计算技术而形成的一门综合性、知识密集型的学科, 它包括了工程和制造业信息化的所有方面, 其相关的软件称为 CAE 软件。

有限元方法(FEA)是 20 世纪中叶电子计算机诞生之后, 在计算数学、计算力学和计算工程领域里诞生的最有效的计算方法。经过 50 年来的发展, 不仅使各种不同的有限元方法形态相当丰富, 理论基础相当完善, 而且已经开发了一批使用有效的通用和专用的有限元软件——CAE 软件。这些 CAE 软件已成功地解决了核能、石油化工、航空航天、土木工程、国防军工、铁道、机械制造、能源、汽车、交通、造船、地矿、生物医学、轻工、水利以及国际工程领域众多的大型科学和工程计算难题, CAE 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和社会效益。CAE 软件能够对特定产品进行性能分析、预测和优化, 也可以对通用产品进行物理、力学性能分析、模拟、预测、评价和优化, 以实现产品的技术创新。随着高性能计算机系统的发展, CAE 软件将成为工程师实现其工程创新和产品创新的得力助手和有效工具。人们使用 CAE 软件, 对其创新的设计方案快速实施性能与可靠性分析, 并进行虚拟运行模拟, 及早发现设计缺陷, 在实现创新的同时, 提高设计质量, 降低研究开发成本, 缩短研究开发周期。可以预测, 在未来的发展中, CAE 软件的发展和应用就像当年 CAD 软件的使用一样得到普及。因此, 对于工程类的学生, 掌握一门 CAE 软件技术已成为了时代的需要。

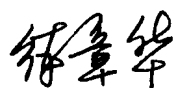
有限元分析法(FEA)并不是 CAE 的全部, 而且一个完整的机械设计并不能单独使用 FEA 完成。FEA 所做的分析只是整个设计流程中的一部分或大部分, 必须结合其他软件才能解决全部的设计问题。因此除了了解 FEA 的解析能力之外, 最好也能了解其他的 CAE 技术, 以使计算机辅助工程达到尽善尽美的境地。现代工业的进步, 完全得力于计算机技术的突飞猛进, 因此由 20 世纪进入 21 世纪, 引导人类科技再次进步的将是与计算机结合的科技。而计算机软件的应用与发展也得力于计算机技术的进步, 将计算机、计算机软件用于产品的开发、设计、分析与制造, 已成为近代工业提升竞争力的主要方法。

我国最早从 20 世纪 80 年代初在北京大学曲圣年教授主持下, 成功地将 SAP5 软件移植到微机上, 各大研究院所、学校用 SAP5 软件完成了许多科研难题。笔者也是从那时起, 将 SAP5 软件开始用于科研和教学, 随后 ADINA 源程序也引进了国内, 笔者将其进行二次开发, 解决了石油工程中高度非线性的岩石力学、井壁稳定和地质应力等科研难题, 并取得了巨大的经济效益和社会效益。在此基础上, 1995 年成功地获得了中国石油天然气集团公司(原石油部)的重点资助 500 万元用于“机械工程重点学科建设”, 此经费全部用于现代 CAD/CAE/CAM 软件和计算机硬件的购置。购置了 ANSYS、MARC、ABAQUS、ADINA、ADAMS、Pro/E 和 Phoenix CFD 等大型商用软件和 SUN、SGI 计算机工作站, 从此笔者一直从事于这些软件的开发、教学和科研。1998 年笔者到美国密歇根大学机械工程与应用力学系进修时, 利用其软件资源,

用 ANSYS、ABAQUS 完成科研课题。笔者在美国调研发现,在美国几乎所有的工科院校均有世界上流行的 CAE 软件,这些软件大多数都是开发商赠送和享受高校优惠政策而获得的,通过用户的信息反馈、提出问题,促进了有限元理论的发展和 CAE 软件版本的快速更新,在大学里培养了一批又一批 CAE 应用的高级技术人才。回国后,笔者一直在酝酿出版一本有关“现代 CAE 技术与应用”方面的教程,贡献自己近 20 年来在 CAE 应用技术方面的积累和经验,为国内培养更多的 CAE 技术高级人才。本书由“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”固定研究人员(西南石油学院)练章华教授编著,在各方的支持和资助下,在研究生李留伟、易浩、林铁军和博士生唐波等的协助下,现在已完成了该教程的编著工作。该教程中实例调试软件版本为 ANSYS5.7-8.0、ADINA8.0、ABAQUS6.2-6.4 和 MARC2000-2003。

本教程编写过程中得到了美国 ANSYS 公司成都办事处大西南区技术总经理雷先华先生、美国 ADINA 公司中国总代理葛孝月总经理、美国 ABAQUS 公司中国代表处白锐工程师和美国 MSC. Software 中国代表处张清泉工程师等的大力支持和提供相关的最新信息,编者借此机会表示衷心地感谢!

由于编者水平有限,书中缺点、错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者  教授

2004 年 8 月于成都

目 录

第1章 CAE 总体概貌	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 工程中的若干数值模拟与解析解问题	(2)
1.3 现代 CAE 技术的发展	(3)
1.3.1 CAE 的发展历史	(3)
1.3.2 CAE 发展方向	(6)
1.4 现代 CAE 技术在工程中的应用	(8)
1.4.1 在油气勘探开发中的应用	(10)
1.4.2 在石油钻井工程中的应用	(10)
1.4.3 在采油工程中的应用	(11)
1.4.4 在油田地面工程建设中的应用	(11)
1.5 著名的 CAE 软件介绍	(12)
1.5.1 ANSYS 软件	(12)
1.5.2 ADINA 软件	(16)
1.5.3 ABAQUS 软件	(21)
1.5.4 MSC. NASTRAN 软件	(26)
1.5.5 MSC. MARC 软件	(28)
1.5.6 其他 CAE 软件	(33)
第2章 CAE 技术基本求解过程	(36)
2.1 有限元法基本知识	(36)
2.1.1 有限元法的基本概念	(36)
2.1.2 有限元法的基本思路	(37)
2.2 线性分析有限元法的计算步骤	(40)
2.2.1 网格划分	(40)
2.2.2 单元分析	(41)
2.2.3 整体分析	(42)
2.3 非线性分类及有限元法基本流程	(43)
2.3.1 非线性结构	(43)
2.3.2 结构非线性有限元法	(44)
2.4 CAE 软件应用案例分析基本过程	(46)
2.4.1 ADINA 孔板应力分析	(46)
2.4.2 ANSYS 孔板应力分析	(50)
2.4.3 MARC 孔板应力分析	(52)
2.4.4 ABAQUS 孔板应力分析	(54)

第3章 ANSYS 结构分析基本过程	(58)
3.1 ANSYS 环境和基本分析过程	(58)
3.1.1 ANSYS 环境简介	(58)
3.1.2 有限元法的基本构架	(59)
3.1.3 ANSYS 构架及命令	(60)
3.1.4 典型的分析过程	(62)
3.1.5 ANSYS 文件及工作文件名	(62)
3.1.6 图形控制	(63)
3.2 有限元模型的建立	(64)
3.2.1 建模方法	(64)
3.2.2 坐标系统及工作平面	(64)
3.2.3 节点定义	(65)
3.2.4 单元定义	(66)
3.2.5 载荷定义	(68)
3.2.6 求解	(71)
3.2.7 用 POST1 进行结果后处理	(72)
3.3 实体模型的建立	(74)
3.3.1 实体模型	(74)
3.3.2 实体模型的建立方法	(74)
3.3.3 群组命令	(74)
3.3.4 点定义	(75)
3.3.5 线段定义	(75)
3.3.6 面定义	(77)
3.3.7 体定义	(77)
3.3.8 用体素创建 ANSYS 对象	(79)
3.3.9 布尔操作	(80)
3.4 实体模型网格划分	(80)
3.4.1 区分实体模型和有限元模型	(80)
3.4.2 网格化的步骤	(81)
3.4.3 单元形状定义	(81)
3.4.4 网格划分工具	(82)
3.5 实体模型边界约束	(82)
第4章 材料非线性理论	(84)
4.1 材料非线性有限元法	(84)
4.1.1 弹塑性有限元分析	(84)
4.1.2 塑性本构关系	(88)
4.1.3 弹塑性问题的有限元解法	(90)
4.1.4 蠕变的有限元分析	(92)
4.2 弹塑性分析在 CAE 中的实践	(94)
4.2.1 弹塑性模型	(94)

4.2.2	各向异性塑性模型	(99)
4.2.3	蠕变模型	(103)
4.3	CAE 在材料非线性中的应用	(107)
4.3.1	土壤中 Drucker - Prager 材料分析(ANSYS)	(107)
4.3.2	受拉力的矩形板蠕变分析(ANSYS)	(110)
4.3.3	管道弯曲的极限载荷分析(ADINA)	(111)
4.3.4	内压作用下厚壁圆筒的蠕变(ABAQUS)	(116)
第5章	几何非线性与屈曲分析	(120)
5.1	几何非线性问题基本理论	(120)
5.1.1	有限应变与应力	(120)
5.1.2	变形率和本构关系	(122)
5.2	几何非线性有限元方程的建立	(124)
5.2.1	全拉格朗日列式法(T.L)	(124)
5.2.2	结构稳定性和屈曲问题	(126)
5.3	CAE 中几何非线性分析描述	(130)
5.3.1	几何非线性	(130)
5.3.2	屈曲分析	(133)
5.4	几何非线性和屈曲分析应用实例	(138)
5.4.1	两块钢板压一个圆盘的大应变非线性分析(ANSYS)	(138)
5.4.2	圆柱壳非线性屈曲分析实例(ANSYS)	(140)
第6章	接触问题分析	(144)
6.1	概述	(144)
6.1.1	接触问题的描述方法	(145)
6.1.2	接触算法	(146)
6.1.3	接触算法的基本流程	(147)
6.2	接触体的定义和运动描述	(148)
6.2.1	可变形接触体的定义	(148)
6.2.2	刚性接触体的定义	(149)
6.2.3	允许传热分析的刚性接触体的定义	(150)
6.2.4	刚体运动描述	(151)
6.2.5	描述刚体运动的初始条件	(151)
6.3	接触探测	(152)
6.3.1	接触容限	(152)
6.3.2	偏斜系数	(153)
6.3.3	接触检查顺序	(154)
6.4	施加接触约束以及修改接触约束	(154)
6.4.1	刚体与变形体之间的接触约束	(154)
6.4.2	变形体与变形体的接触约束	(154)
6.4.3	接触约束的满足与接触体定义顺序的关系	(155)
6.5	接触摩擦问题	(156)

6.5.1	滑动库仑摩擦模型	(156)
6.5.2	剪切摩擦	(158)
6.5.3	粘—滑摩擦模型	(158)
6.5.4	其他摩擦模型	(159)
6.5.5	关于摩擦的其他说明	(159)
6.6	模拟分离	(159)
6.6.1	设置分离力	(159)
6.6.2	分离后释放接触反力	(160)
6.6.3	控制节点分离的发生	(160)
6.7	其他接触功能	(160)
6.7.1	粘合	(160)
6.7.2	过盈检查(过盈闭合)量设置	(161)
6.7.3	对称平面	(161)
6.8	CAE 接触问题实例应用	(162)
6.8.1	钢圆柱和铝板之间的接触问题实例(MARC)	(162)
6.8.2	弹簧卡子接触分析实例(ANSYS)	(164)
6.8.3	两块板间受压的 O 形橡胶密封圈的接触分析实例(ADINA)	(167)
6.8.4	法兰盘连接接触分析(ABAQUS)	(172)
第 7 章	断裂力学问题的有限元分析	(177)
7.1	综述	(177)
7.2	断裂力学理论简介	(177)
7.2.1	断裂力学的形成和发展	(177)
7.2.2	断裂力学基本理论	(179)
7.3	有限元分析方法	(182)
7.3.1	K 提取方法	(184)
7.3.2	J 积分计算	(185)
7.3.3	奇异单元法	(186)
7.3.4	ANSYS 中断裂力学的求解	(186)
7.4	CAE 断裂力学应用实例	(192)
7.4.1	平板裂纹应力分析(ANSYS)	(192)
7.4.2	用 J 积分进行断裂力学分析(MARC)	(197)
第 8 章	流—固耦合问题	(204)
8.1	引言	(204)
8.2	流—固耦合问题有限元基本理论	(204)
8.2.1	流—固耦合系统有限元分析的(u_i, p)格式	(204)
8.2.2	用伽辽金法建立流—固耦合的有限元方程	(206)
8.3	CAE 耦合问题应用实例	(207)
8.3.1	橡胶垫阻碍水的流—固耦合分析(ANSYS)	(208)
8.3.2	双金属梁热—固直接耦合分析(ANSYS)	(213)
8.3.3	隧道内具有柔性结构的流—固耦合分析(ADINA)	(217)

第9章 温度场和热应力场分析	(223)
9.1 稳态热传导问题的有限元法	(223)
9.1.1 热传导方程与换热边界	(224)
9.1.2 稳态温度场分析的一般有限元列式	(227)
9.1.3 三角形单元的有限元列式	(229)
9.2 热弹性应力问题的有限元分析	(232)
9.3 热分析中 CAE 基础知识	(232)
9.3.1 传热学经典理论回顾	(233)
9.3.2 热传递的方式	(233)
9.3.3 稳态传热分析	(234)
9.3.4 瞬态传热分析	(234)
9.3.5 线性与非线性	(235)
9.3.6 边界条件、初始条件	(235)
9.3.7 热分析误差估计	(235)
9.3.8 热应力分析	(236)
9.4 CAE 热分析应用实例	(236)
9.4.1 油气储运罐与接管内温度场分析实例(ANSYS)	(240)
9.4.2 间接法热应力分析实例(ANSYS)	(243)
9.4.3 直接法热应力分析实例(ANSYS)	(245)
第10章 计算流体动力学分析	(245)
10.1 流体流动有限元法	(245)
10.1.1 不可压缩流体流动的有限元法	(249)
10.1.2 不可压缩粘性流体流动	(250)
10.2 FLOTTRAN 计算流体动力学(CFD)分析	(250)
10.2.1 FLOTTRAN CFD 分析的概念	(251)
10.2.2 FLOTTRAN 分析基础	(253)
10.2.3 FLOTTRAN 分析的主要步骤	(259)
10.3 FLOTTRAN 层流和湍流分析算例	(259)
10.3.1 问题描述	(260)
10.3.2 分析方法及假定	(260)
10.3.3 几何尺寸及流体性质	(261)
10.3.4 分析过程	(268)
第11章 动力学分析	(268)
11.1 动力学分析基本原理	(269)
11.2 动力方程和质量矩阵	(269)
11.2.1 动力方程	(270)
11.2.2 质量矩阵	(270)
11.3 特征值问题和结构模态分析	(271)
11.3.1 特征值问题概述	(272)
11.3.2 标准特征值问题	

11.3.3 特征对的性质	(273)
11.3.4 结构模态分析	(274)
11.4 结构动力学问题的有限元法	(275)
11.4.1 结构的动力学方程	(275)
11.4.2 系统的动力响应	(277)
11.5 CAE 动力学分析实例应用	(278)
11.5.1 模态分析实例(ANSYS)	(278)
11.5.2 谐响应分析实例(ANSYS)	(279)
11.5.3 瞬态分析实例(ANSYS)	(280)
11.5.4 固支方板的特征频率分析(MARC)	(282)
第12章 CAE 软件的二次开发	(285)
12.1 ANSYS 软件的二次开发	(285)
12.1.1 解析 UIDL 语言	(285)
12.1.2 UIDL 实例解析	(288)
12.2 UIDL 实例解析	(290)
12.2.1 环境准备及构建对话框	(290)
12.2.2 参数提取	(291)
12.2.3 附录	(292)
12.3 ANSYS 二次开发应用	(293)
12.3.1 UIDL 开发	(293)
12.3.2 APDL 开发	(294)
12.3.3 UPF 开发	(295)
12.3.4 CAE 软件接口	(304)
12.3.5 ANSYS 用户过程和非标准用法	(306)
12.4 MARC 二次开发与 Fortran 程序接口	(309)
12.4.1 概述	(309)
12.4.2 用户子程序分类及常用用户子程序	(310)
12.4.3 利用公共块进行数据传递	(312)
12.4.4 利用内部子程序进行矩阵运算	(313)
12.4.5 用户子程序例题——受移动载荷作用的方板分析(MARC)	(314)
参考文献	(318)

第 1 章 CAE 总体概貌

1.1 概述

CAE 英文全称为 Computer Aided Engineering, 中文意为计算机辅助工程, 主要以有限元分析技术为基础, 综合了迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程管理学与现代计算技术而形成的一门综合性、知识密集型的学科。它包括了工程和制造业信息化的所有方面, 其相关的软件称为 CAE 软件。CAE 软件能够对特定产品进行性能分析、预测和优化, 也可以对通用产品进行物理、力学性能分析、模拟、预测、评价和优化, 以实现产品的技术创新。随着高性能计算机系统的发展, CAE 软件将成为工程师实现其工程创新和产品创新的得力助手和有效工具。人们使用 CAE 软件, 对其创新的设计方案快速实施性能与可靠性分析, 并进行虚拟运行模拟, 及早发现设计缺陷, 在实现创新的同时, 提高设计质量, 降低研究开发成本, 缩短研究开发周期。可以预测在未来的发展中, CAE 软件的发展和应用就像当年 CAD 软件的使用一样得到普及。因此, 对于工程类的学生掌握一门 CAE 软件技术已成为了时代的需要。

有限元分析法 (FEA) 并不是 CAE 的全部, 而且一个完整的机械设计并不能单独使用 FEA 完成设计。FEA 所做的分析只是整个设计流程中的一部分或大部分, 必须结合其他软件才能解决全部的设计问题。因此除了了解 FEA 的解析能力之外, 最好也能了解其他的 CAE 技术, 以使计算机辅助工程能达到尽善尽美的境地。

现代工业的进步, 完全得力于计算机技术的突飞猛进, 因此由 20 世纪进入 21 世纪, 引导人类科技再次进步的将是与计算机结合的科技。而计算机软件的应用与发展也得力于计算机科技的进步, 将计算机、计算机软件用于产品的开发、设计、分析与制造, 已成为近代工业提升竞争力的主要方法。计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 是使用计算机软件直接从事图形的绘制与结构的设计。计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 是用工程上分析的过程及计算方法来辅助工程师作设计后的分析或进行同步工程。而计算机辅助制造 (Computer aided Manufacturing, CAM) 则是直接用计算机来辅助操纵各式各样的精密工具机器以制造不同的零组件。国内最早引进的计算机辅助软件是 CAD, 然后是 CAM, 而最迟者是 CAE。

CAE 的技术种类很多, 这其中包括有限元法 (Finite Element Method, FEM)、边界元法 (Boundary Element Method, BEM)、有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) 等。每一种方法各有其应用的领域, 而其中有限元法应用的领域越来越广, 现已应用于结构力学 (包括线性与非线性)、结构动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等, 而越来越多的发展更结合不同的领域, 像流体与结构力学的结合, 电路学与电磁学的结合, 使得 CAE 的发展越来越迅速, 应用也越来越广泛。

传统的工业皆依据个人的经验累计而成, 同时以经验作出初步的设计, 再由此初步的设计去做出原始模型, 再做出成品。成品完成以后, 便进行实验以确保产品的可靠性, 而此种方法基本上称为试凑法 (Try and Error), 即初级成品经测试不能满足工程或品质上的需求时, 再回

去修改原设计图,再作试品然后再作测试。但此种方法费时且成本相当的高。若使用 CAE,则在设计图完成后即连接 CAE,作各式各样的分析,并且导入最优化(Optimization)成品,即可在短时间内完成产品。但是并非一套软件即可完全解决设计上的问题,例如直升机旋转桨的设计牵涉到机构的动力学、飞行流体力学的计算以及结构力学和振动噪音的问题。此问题将牵涉到不同的 CAE 的技术,同时也牵涉到材料的特性以及验证的必要性。机构动力的传动可以借着机构系统仿真软件(Mechanical System Simulation Software)来虚拟各组件之间的动力传递以及组件之间有可能产生的摩擦力或接触力。而计算流体动力学(Computation Fluid Dynamic, CFD)的软件可以仿真静态及动态下流体的行为以及流体与结构体之间的关系。完成前面的工作后,再使用结构力学和振动学的计算软件计算结构体的应力、应变、位移以及在振动时结构体的动态行为。当做完这些分析之后,可以使用最佳化或参数确认(Parameter Identification)对设计进行修订,并借着模型的修正(Model Modification)重做分析以得到最好的结构。而完成实验测量(Experimental Measurement)可用来确认分析的误差,同时可以建立分析的可靠度。未来使用 CAE 软件结合其他的软件可以对各种不同的企业及工厂建立起个别产品的专家系统(Expert System),更可以缩短产品开发的时间。

1.2 工程中的若干数值模拟与解析解问题

在科学技术领域内,对于许多力学问题和物理问题,人们已经得到了它们应遵循的基本方程(常微分方程或偏微分方程)和相应的定解条件。但能用解析方法求出精确解的只是少数方程性质比较简单且几何形状相当规则的问题。对于大多数问题,由于方程的某些特征的非线性性质,或由于求解区域的几何形状比较复杂,则不能得到解析的答案。许多工程分析问题,如固体力学中的位移场和应力场分析,电磁学中的电磁分析、振动特性分析,传热学中的温度场分析,流体力学中的流场分析,石油行业中的地应力场分析等,都可以归结为在给定边界条件下求解其控制方程(常微分方程和偏微分方程)的问题,但能用解析方法求出精确解的只是方程性质比较简单,且几何边界相当规则的少数问题。对于大多数的工程问题,由于物体的几何形状较复杂或者问题的某些特征是非线性的,则很少有解析解。这类问题的解决通常有两种途径:一是引入简化假设,将方程和几何边界简化为能够处理的问题,从而得到问题在简化状态下的解。但是这种方法只是在有限的情况下是可行的,因为过多的简化可能导致误差很大甚至错误的解。因此人们多年来寻找和发展了另一种求解途径和方法,即在广泛吸收现代数学、力学理论的基础上,借助于现代科学技术的产物——计算机来获得满足工程要求的数值解,这就是数值模拟技术——现代 CAE 技术。特别是近 40 多年来,随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,数值模拟方法已成为求解科学技术问题的主要工具,数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。

已经发展的数值分析方法可以分为两大类。一类以有限差分法为代表。其特点是直接求解基本方程和相应定解条件的近似解。一个问题的有限差分法求解步骤是:首先将求解域划分为网格,然后在网格的结点上用差分方程近似微分方程。当采用较多的结点时,近似解的精度可以得到改进。借助于有限差分法,能够求解某些相当复杂的问题,特别是求解建立于空间坐标系的流体流动问题,有限差分法有自己的优势。因此在流体力学领域内,它至今仍占支配地位,但用于几何形状复杂的问题时,它的精度将降低,甚至发生困难。

另一类数值分析方法是首先建立和原问题基本方程及相应定解条件相等价的积分提法,

然后据之建立近似解法,例如配点法、最小二乘法、Gallatin 法、力矩法等都属于这一类数值方法。如果原问题的方程具有某些特定的性质,则它的等效积分提法可以归结为某个泛函的变分,相应的近似解法实际上是求解泛函的驻值问题,里兹法就属于这一类近似方法。上述不同方法在不同的领域或类型的问题中得到成功的应用,但是也只能限于几何形状规则的问题,其基本原因是它们都是在整个求解区域上假设近似函数。因此,对于几何形状复杂的问题,不可能建立合乎要求的近似函数,而有限单元法的出现,是数值分析方法研究领域内重大突破性的进展。

有限单元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个、且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又可以有不同形状,因此可以模型化几何形状复杂的求解域。有限单元法作为数值分析方法的另一个重要特点是利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个结点的数值和其插值函数来表达。这样一来,在一个问题的有限元分析中,未知场函数及其导数在各个结点上的数值就成为新的未知量(也即自由度),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。一经求解出这些未知量,就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值,从而得到整个求解域上的近似解,显然随着单元数目的增加,即单元尺寸的缩小,或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高,解的近似程度将不断改进。如果单元是满足收敛要求的,近似解最后将收敛于精确解。

目前在工程技术领域内常用的数值模拟方法有:有限元法、边界元法、离散元法和有限差分法,但就其实用性和应用的广泛性而言,主要还是有限元法。有限元法的基本思想是将问题的求解域划分为一系列的单元,单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求量可由单元节点量通过选定的函数关系插值求得。由于单元形状简单,易于由平衡关系或能量关系建立节点单元的方程式,然后将各个单元方程“组集”在一起而形成总体代数方程组,加入边界条件后即可对方程组求解。单元划分越细,计算结果就越精确,从而实现解析解无法求解的问题。

1.3 现代 CAE 技术的发展

1.3.1 CAE 的发展历史

本书“现代 CAE 技术”是指用国际通用有限元法 CAE 软件在计算机辅助工程中的技术应用。从应用数学角度来看,有限单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上的分片连续函数和最小位能原理相结合,来求解 St. Venant 扭转问题。一些应用数学家、物理学家和工程师由于各种原因都涉足过有限元的概念。

有限元法首先是从航空结构设计中提出来的,其起源可以追溯到 20 世纪 50 年代。当时,在世界范围内,喷气式飞机开始逐步取代传统的螺旋桨飞机。随着飞行速度的提高,结构愈益复杂,对结构分析的要求也越来越高。为了适应工程技术飞跃发展的需要,以美国波音公司的 J. Turner 和英国伦敦大学的 J. H. Argyris 为代表,提出了结构矩阵分析方法,应用电子计算机作为主要运算手段,有限元法正是在这种新方法的基础上发展起来的。但是直到 1960 年以后,随着电子计算机的广泛应用和发展,有限元法的发展速度才显著加快。

第一次正式使用“有限单元”(Finite Element)这一术语并提出这种离散系统分析方法是美国加州大学伯克利分校的 R. W. Clough 教授(1960),就连开发大型通用有限元结构分析程序 SAP 的 K. J. Bathe 教授和 L. Wilson 教授以及有限元法的著名大师、英国皇家学会会员 O. C. Zienkiewicz 教授都十分推崇 Clough 教授在创立有限元法方面所作的杰出贡献。而 Zienkiewicz 教授则被誉为解决难题的能手,和他齐名的美国 J. T. Odne 教授、R. L. Taylor 教授以及卡学璜教授等都是从工程界出身的,这也正好说明有限元法是工程和数学相结合的产物。应当指出 B. M. Irons 在有限元法方面的贡献也是不可磨灭的,他提出了等参数单元、波前解法以及叠层单元(Hierarchical Element)等有重要实用价值的新方法、新概念。

有限元法一经提出,便获得迅速发展,从航天、航空扩展到土木、水利、造船和机械工程,从结构分析扩展到流体力学、热传导以及电磁场等各个领域。有限元法创建初期,1960 年正式发表的论文仅 10 篇,1969 年就达到 531 篇,1970 年略有下降。但随着有限元法在结构分析领域里继续广泛推广应用,并向其他场变量领域扩展后,研究成果不断增多,1974 年为 1377 篇,1979 年接近 2000 篇。现在,有关有限元论文的数量已经无法统计,有限元法已经在各行各业解决了许多重大的工程问题,并产生了重大的经济效益和社会效益。

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得平面应力问题的正确解。三角形单元的单元特性是由弹性理论方程来确定的,采用的是直接刚度法。他们的研究工作打开了利用电子计算机求解复杂平面弹性问题的新局面。1960 年 Clough 进一步处理了平面弹性问题,并第一次提出了“有限元法”的名称,使人们开始认识了有限元法的功效。

40 多年来,有限元法的理论和应用得到迅速的、持续不断的发展。从确定单元特性和建立求解方程的理论基础和途径来说,正如上面所提到的,Turner、Clough 等人开始提出有限元法时是利用直接刚度法。它来源于结构分析的刚度法,这对我们明确有限元法的一些物理概念是很有帮助的,但是它只能处理一些比较简单的实际问题。1963—1964 年,经过 J. F. Besseling, R. J. Melosh, R. E. Jones, R. H. Gallaher, T. H. H. Pian(卞学璜)等许多人的工作,认识到有限元法就是变分原理中 Ritz 近似法的一种变形,发展了用各种不同变分原理导出的有限元计算公式。从而使里兹法(Ritz)分析的所有理论基础都适用于有限单元法,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而是在单元上规定的,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。从 20 世纪 60 年代后期开始,进一步利用加权余量法来确定单元特性和建立有限元求解方程。有单元法中所利用的主要是伽辽金(Galerkin)法。它可以用于已经知道问题的微分方程和边界条件但是变分的泛函尚未找到或者根本不存在的状况,因而进一步扩大了有限单元法的应用领域。

40 多年来,有限元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题,由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力问题和波动问题,分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等,从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到优化设计、拓扑优化设计并和计算机辅助设计技术相结合。可以预计,随着现代力学、计算数学和计算机技术等的发展,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。

有限元法是根据变分原理求解数学物理问题的数值计算方法,是工程方法和数学方法相结合的产物,可以求解许多过去用解析方法无法求解的问题,对于边界条件和结构形状都很不规则的机器复杂结构问题是一种非常有效的现代分析方法。现代 CAE 技术—有限元法的发展见表 1.1 所示。

表 1.1 现代 CAE 技术—有限元法的发展

时 间	应用范围	理 论 基 础	研 究 对 象	代表性计算机类型	通用有限元法程序前后处理
1950 年		Turner、Clough 等的论文构筑了工程有关的有限元法		UNIVAC I IBM650	
1960 年	宇航及航空	由 Zienkiewicz 开发各种单元在 Clough 论文中使用了“有限元法”这一说法 虚功原理,最小势能原理	线性问题 静力分析	IBM7000 UNIVAC III	
1967 年	宇航、航空、 土木、造船、 机械、水利	瑞利—里兹法 加权残数法	非线性问题 动力分析	IBM7000 UNIVAC III	
1971 年	热传导、流体力学、电磁场	变分法	非线性接触碰撞,断裂力学耦合问题	IBM370, FACOM, HITAC, CRAY-1 VAX 11/780	ASKA、MSC. Nastran、 MARC、ANSYS、 SAP NISA II 等
1980 年	石油、核工程	形状优化、逆问题	平面和复杂空间问题	VP-200, CRAY X-MP	MSC. Patran、 MSC/XL、ABAQUS MSC. Dytran、ADINA、 PAM-CRASH、 COSMOS/M 等
1990 年	航空航天、地应力	各种新的解算方法和各种高度非线性材料的本构模型	冲击、振动和疲劳问题	部分 PC 机、工作站和大型计算机	MSC. Fatigue、 MSC. Nastran、 ANSYS、SAP5 等
2000 年	机电、随机有限元研究	拓扑优化、计算机图形学	固体、流体力学以及生物力学制造、加工仿真	各种 PC 机、各种大型计算机以及并行计算机	ANSYS、ADINA、 ABAQUS、MARC、 NASTRAN 等

有限元法的基础是结构离散和分片插值。在结构分析中,就是要把一个本来是连续的弹性体划分为有限个单元,把一个具有无限多自由度的结构离散为有限自由度的系统。对每个单元给出满足连续条件的假定位移模式,各个单元在相互连接的节点处有跨单元的连续性。然后再从能量原理出发建立起整体控制方程,求解这一线性代数方程组就可以得到结构的位移场以及应力场等。

有限元分析(FEA):利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷情况)进行模拟。利用简单而又相互作用的元素(即单元),就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。

结构分析的有限元方法是由一批学术界和工业界的研究者在 20 世纪 50 年代到 60 年代创立的。有限元分析理论已有 100 多年的历史,是悬索桥和蒸汽锅炉进行手算评核的基础。

每个单元的特性是通过一些线性方程式来描述的。作为一个整体,单元形成了整体结构的数学模型。尽管梯子的有限元模型低于100个方程(即自由度),而在今天一个小的ANSYS分析就可能有5,000个未知量,矩阵可能有25,000,000个刚度系数。

历史典故:早期ANSYS是随计算机硬件而发展壮大的。ANSYS最早是在1970年发布的,运行在价格为\$1,000,000的由CDC、Univac和IBM生产的计算机上,它们的处理能力远远落后于今天的PC机——一台奔腾PC机在几分钟内可求解 $5,000 \times 5,000$ 的矩阵系统,而过去则需要几天时间。

数值模拟技术通过计算机程序在工程中得到广泛应用。到20世纪80年代初期,国际上较大型的面向工程的CAE有限元通用程序达到几百种,其中著名的有ANSYS、ABAQUS、NASTRAN、MARC、ASKA、ADINA和SAP等。它们多采用FORTRAN语言编写,规模达几万条甚至几十万条语句,其功能越来越完善,不仅包含多种条件下的有限元分析程序而且带有功能强大的前处理和后处理程序。由于有限元通用程序使用方便、计算精度高,其计算结果已成为各类工业产品设计和性能分析的可靠依据。以ANSYS软件代表,即现代CAE软件不断吸取计算方法和计算机技术的最新进展,将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合,已成为解决现代工程学问题必不可少的有力工具。

对于机械产品传统的设计过程如图1.1所示,由开始的概念设计→详细设计→物理样机→测试,如果满足设计要求,就进行成批加工出产品,否则进入设计循环,不断分析,并通过各种设计瓶颈,试制样机,再测试,合格就进行成批产品生产,周期较长,且成功率低。而现代设计法如图1.2所示,概念设计、详细设计直接由CAD软件完成,用CAE软件进行虚拟样机仿真模拟分析,满足工程和设计的要求就直接送入数控加工机床出产品,可以免除物理样机测试,大大缩短了设计周期并节省了成本。

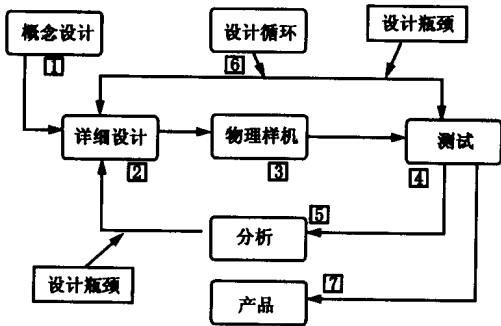


图 1.1 传统设计过程

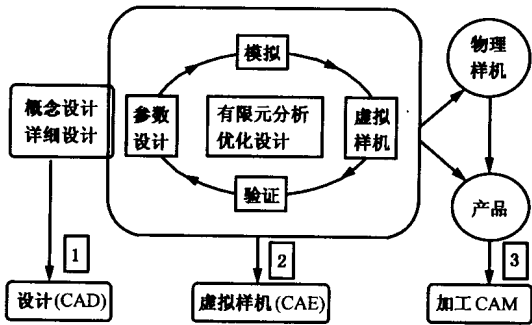


图 1.2 现代设计法

1.3.2 CAE 发展方向

前面已经讲到,有限元分析方法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题,实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。理论证明,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。从“有限元”这个名词第一次出现,到今天有限元在工程上得到广泛应用,经历了40多年的发展历史,基本理论已经日趋完善,复杂非线性问题各种算法得到很大发展。有限元的核心思想是结构的离散化,就是将实际结构假想地离散为有限数目的规则单元组合体,实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析,得出满足工程精度