



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

计算机辅助工程

主 编 许承东

副主编 贺媛媛 胡春生

第1章

介绍 CAE 的基本理论和基础知识，以及 CAE 相关软件系统及其与 CAD 的关系
以完整案例形式介绍了 CAE 技术在车辆设计和飞行器设计等领域的实际应用
让学生不仅学习 CAE 基础理论知识，还学会如何进行 CAE 分析的方法和流程



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

014001253

TP391.72-43

157

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划

计算机辅助工程

许承东 主 编
贺媛媛 胡春生 副主编



TP391.72-43

157



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北航

C1689064

内 容 简 介

CAE(计算机辅助工程)是近年来在航空航天、机械、土木工程等领域发展迅速的学科,也是本科生计算机应用课程的一个方向。CAE 是计算机辅助设计和计算机辅助分析等技术的延伸,也是固体力学、流体力学、数值计算、计算机仿真等多个学科的交叉。本书系统阐述了 CAE 的基本概念、原理、工具软件、分析流程等,结合实际的工程背景给出了进行 CAE 分析的两个实例,读者可以根据书中介绍的原理、流程和实例,逐步掌握 CAE 的基本原理和方法。

本书的内容包括:CAE 的发展历史、CAE 的分析流程、几何建模基础、网格剖分基础、CAE 软件前处理介绍、数值计算方法基础、计算流体力学基础、计算结构力学基础、计算机图形图像基础、CAE 软件中的后处理模块介绍、主流 CAE 软件介绍、面向轨道车辆设计的 CAE 技术应用示例、面向飞行器设计的 CAE 技术应用示例。本书注重于实例教学,介绍基本概念的同时提供应用案例,同时附有一定数量的习题。

本书可以作为高等学校航空宇航类、机械工程、机械电子工程、车辆工程和土木工程等专业相关课程的教材,也可供从事 CAE 相关研究与应用的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助工程/许承东主编. —北京:北京大学出版社, 2013.8

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22977-4

I. ①计… II. ①许… III. ①计算机辅助技术—高等学校—教材 IV. ①TP391.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 182838 号

书 名: 计算机辅助工程

著作责任者: 许承东 主编

策 划 编 辑: 郑 双

责 任 编 辑: 郑 双

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22977-4/TH · 0365

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 462 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

CAE 是 Computer Aided Engineering 的缩写, 一般译为计算机辅助工程。广义的 CAE 包含了工程全生命周期的各个计算机辅助技术(CAD、CAA、CIM、CAM、CAPP 等), 狭义的 CAE 主要指计算机辅助分析, 本书的内容主要是针对狭义 CAE 展开的。CAE 是固体力学、流体力学、数值计算、计算机仿真等多个学科的交叉与融合, 它的特点是以工程和科学问题为背景, 建立计算模型并对其进行计算机仿真分析。CAE 的理论基础在 20 世纪 40~60 年代已经基本完善, 20 世纪 80 年代之后 CAE 开始蓬勃发展, 现在它已经是航空航天、机械、土木等多个工程领域必不可少的分析和验证手段。

CAE 的蓬勃发展在于它能够通过对产品零部件工作状态进行合理的计算机模拟和仿真, 及早发现设计中的缺陷, 从而显著缩短研制周期, 节约试验费用, 提高生产效率。通过计算机模拟和仿真, 可以节省大量的真实实验的成本, 同时由于计算机仿真的“时间”可以快于现实时间, 因此 CAE 可以在很短的时间内分析现实中很长时间的变化, 进而缩短了研制周期, 提高了效率。对于航空航天、机械、土木等工程专业的本科生, 及早掌握 CAE 的基本原理和相关技术, 可以为未来工作打下良好的基础。本书力图以基本原理介绍与相关实例演示相结合的方式, 深入浅出地阐明 CAE 的基本原理、方法和技术, 并以实例来帮助读者掌握 CAE 的基本原理和流程。

全书共分 7 个章节, 其中第 1 章简述了 CAE 的发展历史; 第 2 章介绍了 CAE 前处理的基础知识, 包括几何建模的基础、网格剖分的基础等; 第 3 章介绍了 CAE 分析技术的基本原理, 包括数值计算方法的基础, 并介绍了在此基础上发展起来的计算流体力学和计算结构力学的基本概念; 第 4 章介绍了 CAE 后处理的基础知识, 包括计算机图形图像基础、典型 CAE 软件中的后处理模块; 第 5 章分类介绍了市面上主流 CAE 软件的功能特点; 第 6 章举例介绍了 CAE 在轨道车辆设计中的应用; 第 7 章举例介绍了 CAE 在飞行器设计中的应用。书中每章都提供了导入案例和阅读材料, 并编制了配套习题, 尽量使读者在学习的过程中逐步掌握 CAE 的整个流程。

本书的编写是众多人员辛勤劳动的结果。北京理工大学许承东教授作为主编, 编制了本书的大纲, 起草了书稿的章节及初稿, 并全程指导了书稿的编写; 贺媛媛副教授以多年从事 CAE 课程教学的经验对本书的章节安排和习题课件编制提出了修改意见, 并参与了部分内容的编写; 北京理工大学的胡春生、曹啸博、张鹏飞、蔡熙、张弛、李光耀、马小强、宋丹、李剑、范国超、李赫等人合作完成了本书第 1~5 章和第 7 章内容。北京交通大学的李强教授和刘德坤编写了第 6 章的内容。特别感谢曹啸博、范国超、刘德坤为第 6 章和第 7 章实例部分所做的大量工作。另外还需要感谢出现在本书参考文献中的各个书目或论文的作者, 你们的工作给本书的编著提供了大量的素材, 是本书完成的基础。

由于时间和水平有限, 书中难免出现不妥之处, 恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1	3.3.2 计算结构力学的基本原理和方法	74
1.1 CAE 的基本概念	2	3.3.3 计算结构力学的基本概念	77
1.2 计算机发展概述	3	3.3.4 计算结构力学分析的基本步骤	79
1.3 CAE 的发展历史	6	3.3.5 典型的计算结构力学问题	80
1.4 CAE 分析的流程	9	3.3.6 边界条件与载荷	84
小结	11	小结	88
习题	13	习题	88
第 2 章 前处理技术基础	14	第 4 章 后处理技术基础	90
2.1 几何建模基础	15	4.1 计算机图形图像基础	91
2.1.1 基本的几何元素	16	4.1.1 点阵图基础	92
2.1.2 典型的几何建模方法	19	4.1.2 矢量图基础	94
2.1.3 几何建模实例	27	4.1.3 点阵图和矢量图的比较	95
2.2 网格剖分基础	28	4.1.4 动画基础	98
2.2.1 网格单元	28	4.2 CAE 软件中的后处理模块	99
2.2.2 网格分类	30	4.2.1 FLUENT 后处理	99
2.2.3 网格剖分方法	33	4.2.2 MSC.NASTRAN 后处理	105
2.2.4 CAE 软件中的网格剖分	41	4.2.3 ANSYS 后处理	112
2.2.5 网格剖分实例	42	4.2.4 MSC.ADAMS 后处理	116
2.3 CAE 软件前处理	43	小结	121
小结	44	习题	122
习题	45	第 5 章 CAE 相关主流软件系统简介 ...	124
第 3 章 分析技术基础	47	5.1 几何建模软件	125
3.1 数值计算方法基础	48	5.1.1 Pro/E(Creo)	125
3.1.1 有限差分法	48	5.1.2 UG	128
3.1.2 有限体积法	52	5.1.3 SolidWorks	131
3.1.3 有限元法	54	5.1.4 CATIA	134
3.2 计算流体力学基础	60	5.2 网格剖分软件	137
3.2.1 计算流体力学简介	60	5.2.1 HyperMesh	137
3.2.2 计算流体力学的基本概念	62	5.2.2 其他网格剖分软件	141
3.2.3 计算流体力学的求解过程	69	5.3 结构分析软件	142
3.2.4 计算流体力学问题的边界条件	70	5.3.1 MSC.Nastran	142
3.3 计算结构力学基础	73	5.3.2 ANSYS	145
3.3.1 计算结构力学简介	73		



5.4	动力学分析软件	148
5.4.1	MSC.ADAMS	148
5.4.2	LS-DYNA	151
5.4.3	ABAQUS	155
5.5	流体力学分析软件	158
5.5.1	FLUENT	158
5.5.2	FASTRAN	160
5.6	模型交换技术	165
5.6.1	模型交换的基本方法	166
5.6.2	模型交换的常见问题	168
5.6.3	模型交换的主要环节	169
5.6.4	模型的修正问题	170
5.6.5	模型特征重建	171
5.7	数据交互文件	171
5.7.1	IGES 标准	171
5.7.2	STEP 标准	173
5.7.3	DXF 文件	175
5.7.4	STL 文件	176
5.7.5	IDF 文件	177
5.7.6	ACIS 文件	178
5.7.7	Parasolid 文件	178
小结		179
习题		180

第 6 章 面向轨道车辆设计的 CAE 技术应用

6.1	轮对外形设计	184
6.1.1	车轮强度分析	185
6.1.2	瞬态温度场的数学模型	186
6.1.3	温度场的有限元理论	187
6.1.4	热应力场的有限元理论	187
6.1.5	制动热负载的确定和施加	188
6.1.6	热应力的计算过程	188
6.2	几何建模	189
6.3	网格划分	193
6.3.1	轮对几何模型的六面体 结构网格剖分实例	193
6.3.2	轮对几何模型的非结构 网格剖分实例	208
6.4	静力分析	210
6.4.1	静力分析描述	210

6.4.2	静力分析实例及步骤	210
6.5	模态分析	215
6.5.1	模态分析描述	215
6.5.2	模态分析实例及步骤	215
6.6	热-应力耦合分析	220
6.6.1	热-应力耦合分析仿真 场景描述	220
6.6.2	分析实例及步骤	220
小结		233
习题		234

第 7 章 面向飞行器设计的 CAE 技术应用

7.1	飞行器总体设计与 CAE 技术	236
7.1.1	CAE 技术在飞行器气动 外形设计中的应用	238
7.1.2	CAE 技术在飞行器结构 设计中的应用	239
7.1.3	CAE 技术在飞行器动力学 特性分析中的应用	240
7.2	几何建模实例	241
7.3	网格剖分	248
7.3.1	飞行器几何模型的非结构 网格剖分实例	248
7.3.2	飞行器几何模型的六面体 结构网格剖分实例	251
7.4	空气动力学仿真	264
7.4.1	空气动力学仿真场景描述	264
7.4.2	仿真实例及步骤	265
7.5	结构力学仿真	281
7.5.1	结构力学仿真场景描述	281
7.5.2	仿真实例及步骤	281
7.6	系统动力学仿真	292
7.6.1	系统动力学仿真场景描述	292
7.6.2	仿真实例及步骤	293
小结		300
习题		301

附录 课后习题答案

参考文献

第 1 章

绪 论



学习目标

- 了解 CAE 的基本概念。
- 了解 CAE 的发展历史。
- 掌握 CAE 分析的流程。



知识结构

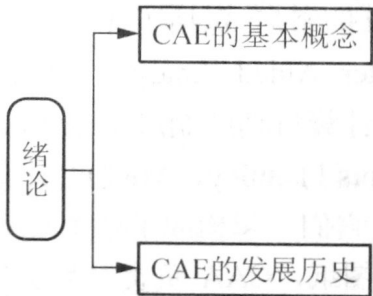


图 1.1 绪论知识结构图



导入案例

20 世纪 90 年代初,美国波音(Boeing)公司正式启动波音 777 飞机研制计划,它采用一种全新的设计与制造方式并在 4 年半之后,于 1994 年 6 月 12 日直接进行了第 1 架波音 777 的首飞。波音 777 飞机的研制采用了全数字化的无纸设计技术,整机设计、部件测试、整机装配及在各种环境下的试飞,均是采用仿真技术在计算机上进行,将产品(新型飞机)功能与工艺两方面可能出现的问题,提前发现并解决于生产制造过程的上游——设计阶段,达到设计的最优化和产品制造的一次性成功。波音 777 的整机外形、结构件和整机飞机系统 100%采用三维数字化定义,100%应用数字化预装配,整个设计制造过程无需模型和样机,最终一次试飞成功。对比以往的飞机研制,波音 777 成本降低了 25%,出错返工率减少了 75%,制造周期缩短了 50%。波音 777 的成功研制成为了现代产品开发新技术应用的里程碑,其采用的开发过程现在称为虚拟产品开发(Virtual Product Development, VPD),应用的开发技术称为虚拟样机技术(Virtual Prototyping, VP)。而支持 VPD 的基础是面向零部件的(Computer Aided Design, CAD)、(Computer Aided Engineering, CAE)、(Computer Aided Manufacturing, CAM)技术。接下来,本章将对 CAE 技术进行讲解,使读者能够了解其相关的知识。

1.1 CAE 的基本概念

CAE 是 Computer Aided Engineering 的缩写,一般译为计算机辅助工程,它的特点是以工程和科学问题为背景,建立计算模型并对其进行计算机仿真分析。关于 CAE 的含义可以从广义和狭义两部分去理解,广义的 CAE 包括了计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助分析(Computer Aided Analysis, CAA)、计算机集成制造(Computer Integrated Manufacturing, CIM)、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)、物料需求规划(Material Requirements Planning, MRP)、计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)。它们一起构成了整个 CAE 的体系,我们可以简单地理解为:CAD 负责制作数字化的方案图纸,CAA 负责对数字化的方案图纸进行分析,CIM 负责组织和管理制造企业的运行,CAM 负责根据数字化图纸进行制造活动,MRP 负责为制造活动合理地安排物料,CAPP 负责对工艺过程进行规划设计。由此可见广义的 CAE 包含的内涵非常广泛,几乎涵盖了产品制造的全生命周期。而狭义的 CAE 一般指 CAE 软件或是用 CAE 软件来进行复杂工程和产品结构强度、刚度、屈曲稳定性、动力响应、热传导、三维多体接触、弹塑性等力学性能的分析计算及结构性能的优化设计等问题的一种近似数值分析方法,狭义的 CAE 更接近于广义 CAE 中 CAA 的部分,主要是指工程设计中的分析计算与分析仿真。本书的后续章节主要是针对狭义 CAE 展开的,有关 CAE 的概念和内涵除非另作说明,否则一律指代狭义的 CAE。

CAE 的作用主要是指用计算机对工程和产品的运行性能与安全可靠性分析,对其未来的

运行状态进行模拟,及早发现设计计算中的缺陷,并证实未来工程、产品功能和性能的可用性和可靠性。具体包括工程数值分析、结构与过程优化设计、强度与寿命评估、运动/动力学仿真。工程数值分析用来分析确定产品的性能;结构与过程优化设计用来保证产品功能、工艺过程的基础上,使产品、工艺过程的性能最优;结构强度与寿命评估用来评估产品的精度设计是否可行,可靠性如何及使用寿命为多少;运动/动力学仿真用来对 CAD 建模完成的虚拟样机进行运动学仿真和动力学仿真。

对 CAE 进一步分析,其具体的含义表现为以下几个方面:

- 运用工程数值分析中的有限元等技术分析计算产品结构的应力、变形等物理场量,给出整个物理场量在空间与时间上的分布,实现结构从线性、静力的计算分析到非线性、动力的计算分析。
- 运用过程优化设计的方法在满足工艺、设计等约束条件下,对产品的结构、工艺参数、结构形状参数进行优化设计,使产品结构性能、工艺过程达到最优。
- 运用结构强度与寿命评估的理论、方法、规范,对结构的安全性、可靠性及使用寿命做出评价与估计。
- 运用运动/动力学的理论、方法,对由 CAD 实体造型设计出的零件、部件和整机进行运动/动力学仿真,给出零件的模态,部件和整机的运动轨迹、速度、加速度及动反力的大小等。

CAE 技术的应用,一方面使许多过去受条件限制无法分析的复杂问题,通过计算机数值模拟得到满意的解答;另一方面,计算机辅助分析使大量繁杂的工程分析问题简单化,使复杂的过程层次化,节省了大量的时间,避免了低水平重复的工作,使工程分析更快、更准确。CAE 作为计算机学科和工程分析学科的交叉,其发展史与计算机及工程分析技术的发展息息相关。

1.2 计算机发展概述

计算机的发展至今为止总共经历了四次大的革命性的飞跃,据此将计算机分为四代,分别是第一代电子管计算机、第二代晶体管计算机、第三代集成电路计算机和第四代大规模集成电路计算机,下面分别对这四代计算机进行简单的介绍。

1. 第一代电子管计算机(1945—1956)

第二次世界大战期间,为了开发新型火炮和导弹,美国陆军军械部在马里兰州的阿伯丁建立了“弹道研究实验室”,要求该实验室每天为部队提供 6 张火力表。其中,每张火力表都要计算几百条弹道,而每条弹道的数学模型都是一组复杂的非线性方程组。这些方程组只能用数值方法进行近似计算,而利用当时的计算工具,即使是 200 多名雇员加班加点工作,也需要两个多月才能算出一张火力表。这显然无法满足军方的要求。

为此,1942 年美国宾夕法尼亚大学的约翰·莫希利(John Mauchly)提出试制“高速电子管计算装置”的设想,希望用电子管代替继电器以提高计算速度。该设想很快得到军方的支持,于是成立了以莫希利以及他的学生约翰·埃克特(John Eckert)为首的研制小组。在研制过程的中期,时任弹道研究实验室顾问、正在参与美国第一颗原子弹研制的数学家冯·诺



依曼(Von Neumann)带着原子弹研制中的计算问题,加入了研制小组。在冯·诺依曼的帮助下,1946年2月15日,世界上第一台计算机——电子数字积分器与计算器(Electronic Numerical Integrator And Calculator, ENIAC)诞生。其计算速度达到每秒5000次加法运算,比当时最快的继电器式计算装置的运算速度快1000多倍,极大地提高了弹道的计算速度。与现代的计算机相比,ENIAC显然是个庞然大物,它使用了18000多个电子管,占地面积约 170m^2 ,重达30t,功率约150kW。

1945年冯·诺依曼等人发表了“离散自变量自动电子计算机(Electronic Discrete Variable Automatic Computer, EDVAC)”的报告。该报告长达101页纸,明确定义了计算机的五大部件:运算器(Arithmetic Logic Unit)、逻辑控制器(Logic Control Unit)、存储器(Memory)、输入设备(Input Equipment)和输出设备(Output Equipment)及其之间的相互关系,如图1.2所示。其中,运算器和逻辑控制器也合称中央处理器(Central Processing Unit, CPU),是计算机的核心部件,被称为计算机的心脏。报告还指出:数据和指令均采用由“0”和“1”组成的二进制,以便发挥电子器件的特性,简化系统结构和逻辑设计;采用存储器存储程序、指令和数据,以提高计算速度。该报告奠定了现代计算机的基本架构,是计算机发展史上里程碑式的文献。冯·诺依曼由此被称为“计算机之父”。ENIAC的发明标志着信息时代的来临,它一直工作到1955年10月。1946—1954年间,真空电子管是计算机的核心器件,这时候的计算机一般被称为第一代计算机。

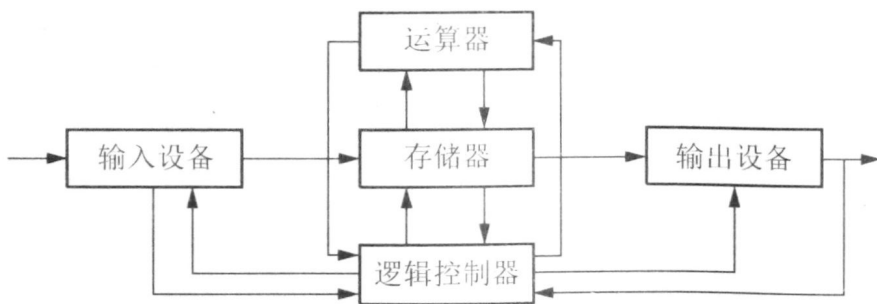


图 1.2 冯·诺依曼的计算机体系架构

2. 第二代晶体管计算机(1956—1963)

1947年12月,美国贝尔(Bell)实验室的科学家威廉·肖克利(William Shockley)、约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)等研制成功世界上第一个晶体管,取得固体物理学和微电子技术领域的重大突破。1956年,他们三个共同荣获了诺贝尔物理学奖。晶体管的发明引发了电子工业的一场革命,被科学界称为“20世纪最重要的发明”。威廉·肖克利也被称为“晶体管之父”。晶体管的发明极大地促进了计算机的发展。晶体管代替了体积庞大的电子管,电子设备的体积不断减小。1954年,美国贝尔实验室采用晶体管制造了世界上的第一台晶体管计算机,标志着计算机技术进入了第二个发展阶段(1954—1964)。与第一代计算机相比,第二代计算机体积小、速度快、功耗低、性能更加稳定。早期采用晶体管技术的计算机主要用于核物理中的数据处理,价格昂贵,生产数量极少。1960年后,第二代计算机开始用于商业领域、大学和政府等部门。打印机、磁带、磁盘、内存、操作系统等现代化计算机的部件开始出现。

3. 第三代集成电路计算机(1964—1971)

1958年仙童公司开发出首个平面晶体管。1959年1月,仙童公司总经理罗伯特·诺依斯(Robert Noyce)提出有关集成电路的设计方案,当年的7月30日提交了“半导体器件——连线结构”的专利申请,并于1961年4月25日获得美国专利。1958年7月,杰克·基尔比(Jack Kilby)加入德州仪器(Texas Instruments, TI)公司并于1958年9月12日,成功地将1只晶体管、4只电阻和3只电容等集成在一块半导体锗晶体片上,研制出了世界上第一块集成电路(IC)。集成电路的发明奠定了现代微电子技术的基础,开创了电子技术发展的新纪元,越来越多的元器件被集成到单一的半导体芯片上。1964年,美国国际商用机器公司(International Business Machines Corporation, IBM)研制成功世界上第一台采用集成电路的通用计算机 IBM System360,标志着计算机产业进入第三发展阶段。由于采用了集成电路,第三代计算机体积更小、功耗更低、速度更快。此外,第三代计算机开始使用操作系统,计算机在操作系统(Operating System, OS)的控制下可以同时运行多个程序。

1968年7月,罗伯特·诺依斯、高登·摩尔(Gordon Moore)与安迪·格鲁夫(Andy Grove)三人离开仙童公司,合伙创办了一家名为集成电子(Integrated Electronic)的公司,这就是后来闻名遐迩的英特尔(Intel)公司。英特尔公司的创始人之一高登·摩尔在集成电路的发展进程中扮演着重要的角色。著名的计算机界的“摩尔定律”就是以他的名字命名的:1965年,摩尔通过长期的研究发现,大约每隔18个月,每块集成电路上集成的电子元器件数量会增加一倍,集成电路的性能会提升一倍,而价格则会下降一半。

4. 第四代大规模集成电路计算机(1971—现在)

按照摩尔定律,集成电路不断扩大规模和集成度。20世纪70年代以后,大规模集成电路(Large Scale Integration, LSI)和超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)相继出现。1969年,Intel发布了世界首款金属氧化物半导体(MOS)静态随机存储器1101。1971年,英特尔发布了世界首款可擦写编程只读存储器。1971年11月15日,Intel公司工程师马西安·特德·霍夫(Marcian E Hoff)发明了世界首款包括运算器、控制器在内的商用微处理器(Micro Processor)4004,也称为中央处理器(CPU),实现了单片计算机(Computer on a Chip)的梦想。Intel 4004字长为4位,只有45条指令,每秒能执行5万条指令,运行速度甚至比不上世界第一台计算机ENIAC。但是,一块4004集成了2300只晶体管,其质量还不到1盎司(28.35g)。Intel 4004的发明是信息技术(Information Technology, IT)史上重要的里程碑,它为计算机的微型化和个人计算机(PC)的诞生奠定了基础,引发了计算机产业的第四次变革。计算机不断向着小型化、微型化、低功耗、智能化、系统化的方向发展。霍夫也因此被称为“微处理器之父”。

这个时候的计算机已经和我们现在用的计算机差别很小了,从1980年直到现在,计算机一直按照着“摩尔定律”不断地发展,CPU的运算速度越来越快,内存和硬盘越来越大。2012年6月,世界上运算速度最快的超级计算机是由IBM公司为美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室研发的Sequoia,它每秒能完成 1.6×10^8 亿次运算,这一记录在2012年10月被隶属于美国能源部的橡树岭国家实验室的“泰坦(Titan)”打破,泰坦每秒能完成 17.59×10^8 亿次运算。2011年单块硬盘的容量已经达到了4TB(4×1024 GB),同年的单条内存最大容量也达到了16GB。计算机硬件的迅速发展为CAE的发展扫清了限制和制约,使得大规模的CAE分析变得可行。



5. 未来的计算机

自问世以来数字计算机在速度和能力上有了可观的提升,但迄今仍有不少课题超出了当前计算机的能力所及。对于其中一部分课题,传统计算机是无论如何也不可能实现的,因为找到一个解决方法的时间还赶不上问题规模的扩展速度。因此,科学家开始将目光转向新的方向来解决这一类问题,这些未来的计算机是:超导计算机、激光计算机、DNA 计算机和量子计算机等。

高速超导计算机的耗电仅为半导体器件计算机的几千分之一,它执行一条指令只需十亿分之一秒,比半导体器件快几十倍。以目前的技术制造出的超导计算机的集成电路芯片只有 $3\sim 5\text{mm}^2$ 大小。

激光计算机是利用激光作为载体进行信息处理的计算机,又称光脑,其运算速度将比普通的电子计算机至少快 1000 倍。它依靠激光束进入由反射镜和透镜组成的阵列中来对信息进行处理。与电子计算机相似之处是,激光计算机也靠一系列逻辑操作来处理 and 解决问题。光束在一般条件下的互不干扰的特性,使得激光计算机能够在极小的空间内开辟很多平行的信息通道,密度大得惊人。一块截面等于 5 分硬币大小的棱镜,其通过能力超过全球现有全部电缆的许多倍。

科学家研究发现,脱氧核糖核酸(DNA)有一种特性,能够携带生物体的大量基因物质。数学家、生物学家、化学家及计算机专家从中得到启迪,正在合作研究制造未来的液体 DNA 计算机。这种 DNA 计算机的工作原理是以瞬间发生的化学反应为基础,通过和酶的相互作用,将发生过程进行分子编码,把二进制数翻译成遗传密码的片段,每一个片段就是著名的双螺旋的一个链,然后对问题以新的 DNA 编码形式加以解答。和普通的计算机相比,DNA 计算机的优点首先是体积小,但存储的信息量却超过现在世界上所有的计算机。

量子力学证明,个体光子通常不相互作用,但是当它们与光学谐振腔内的原子聚在一起时,它们相互之间会产生强烈影响。光子的这种特性可用来发展量子力学效应的信息处理器件——光学量子逻辑门,进而制造量子计算机。量子计算机利用原子的多重自旋进行。量子计算机可以在量子位上计算,可以在 0 和 1 之间计算。在理论方面,量子计算机的性能能够超过任何可以想象的标准计算机。

1.3 CAE 的发展历史

CAE 最主要的理论基础是有限元法(Finite Element Method, FEM),有限元方法是用来求偏微分方程式近似解的一种数学方法,它也可以被用来求解积分方程式。有限元方法起源于需要解决市政工程和航空工程方面复杂的弹性结构分析问题。它的开发可以追溯到 A.Hrennikoff(1941)和 R.Courant(1942)的工作,这些先驱者使用这些方法都共享一个基本的特性:把连续域的网格离散化进入一组离散的子域里。Hrennikoff 的工作是采用格子使域离散,而与之类似,Courant 的方法是把域划分成有限的三角形子域来求解 St.Venant 扭转问题。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,从而使得里兹分析的所有理论基础都适应于有限元法,确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。以此为理论指导,有限元法的应用范围有了

很大的拓展,有限元法的应用由简单的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性问题、动力学问题和波动问题;分析对象从弹性材料扩展到塑性、粘塑性和复合材料,从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。将有限元分析技术逐渐由传统的分析和校核扩展到优化设计,并与计算机辅助设计(CAD)和辅助制造(CAM)密切结合,形成了现在 CAE 技术的框架。

CAE 的发展是伴随着有限元、计算机技术的发展而发展的,在 20 世纪 60~70 年代有限元的理论还处于发展阶段,分析的对象主要是航空航天设备结构的强度、刚度及模态实验和分析问题,又由于当时的计算机的硬件内存少、磁盘的空间小、计算速度慢等特点,CAE 软件处于探索时期。下面列出的是 60~70 年代 CAE 发展历史上部分具有标志性的节点:

- 1963 年——Edward L. Wilson 教授和 Ray W. Clough 教授为了教授结构静力与动力分析而开发了 SMIS。
- 1969 年——Wilson 教授在第一代程序的基础上开发的第二代线性有限元分析程序,就是著名的 SAP(Structural Analysis Program),而非线性程序则为 NONSAP。
- 1978 年——Wilson 教授的学生 Ashraf Habibullah 创建了 Computer and Structures Inc.(CSI)。
- 1963 年——Richard MacNeal 博士和 Robert Schwendler 先生联手创办了 MSC 公司。
- 1969 年——NASA 推出了其第一个 NASTRAN 版本,称为 COSMIC Nastran。
- 1971 年——MSC 继续的改良 Nastran 程序并推出 MSC.Nastran。
- 1967 年——在 NASA 的支持下 SDRC 公司成立。
- 1968 年——发布了世界上第一个动力学测试及模态分析软件包。
- 1971 年——推出商业用有限元分析软件 Supertab(后并入 I-DEAS 软件中)。
- 1969 年——John Swanson 博士建立了自己的公司 Swanson Analysis Systems Inc(SASI)。

20 世纪 60~70 年代是 CAE 软件的诞生期,这些软件的诞生大部分是由具体的应用需求牵引的,这些应用需求大部分是军事和航天产业中出现的需要解决的工程问题,随着分析方法和计算技术的发展,CAE 软件开始从实验室走向了工程应用,从特定的应用范围走向了通用,并诞生了 CAE 领域的三大产品 Nastran、IDEAS 和 ANSYS。时至今日,这三大巨头主导 CAE 市场的格局基本保持下来,只是在发展方向上,MSC 和 ANSYS 比较专注于非线性分析市场,SDRC 则是更偏向于线性分析市场,同时 SDRC 发展起来了自己的 CAD / CAE / PDM 技术。

20 世纪 70~90 年代,CAE 开始蓬勃发展,出现了大量的新公司和新软件,下面列出的是这一期间的标志性节点:

- 1971 年 MARC 公司成立,致力于发展用于高级工程分析的通用有限元程序, Marc 程序重点处理非线性结构和热问题。
- 1977 年 Mechanical Dynamics Inc. (MDI)公司成立,致力于发展机械系统仿真软件。其软件 ADAMS 应用于机械系统运动学、动力学仿真分析。
- 1978 年 Hibbitt Karlsson & Sorensen, Inc. 公司成立。其 ABAQUS 软件主要应用于结构非线性分析。



- 1982 年 Computer Structural Analysis and Research(CSAR)成立。其 CSA/Nastran 主要针对大结构、流固耦合、热及噪声分析。
- 1983 年 Automated Analysis Corporation(AAC)成立,其程序 COMET 主要用于噪声及结构噪声优化等领域的分析软件 FIDAP。
- 1986 年 ADINA 公司成立并致力于发展结构、流体及流固耦合的有限元分析软件。
- 1987 年 Livermore Software Technology Corporation(LSTC)成立,其产品 LS-DYNA 特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题。
- 1988 年 FLOmeric 公司成立,提供用于电子系统内部空气流及热传递的分析程序 FloTHERM。
- 1989 年 Engineering Software Research and Development 公司成立,致力发展 P 法有限元程序。同时 Forming Technologies Incorporated 公司成立,致力于冲压模型软件的开发。
- 1994 年——Swanson Analysis Systems, Inc.被 TA Associates 并购,并宣布了新的公司名称改为 ANSYS。

在此期间,有限元分析技术在结构分析和场分析领域获得了很大的成功,从力学模型开始拓展到各类物理场的分析,这个期间有限元技术的应用范围已经囊括了力学、热、流体、电磁这自然界四大基本物理场;从线性分析向非线性分析(如材料为非线性、几何大变形导致的非线性、接触行为引起的边界条件非线性等)发展,从单一场的分析向几个场的耦合分析发展。三个大型商用 CAE 软件 Nastran、IDEAS 和 ANSYS 日渐走向成熟,更多新的 CAE 软件迅速出现,为 CAE 市场的繁荣注入了新鲜血液。在此期间,CAE 软件的开发主要集中在计算速度、精度及与硬件平台的匹配方面,由于当时计算机的内存和硬盘造价昂贵,如何有效地利用计算机内存及磁盘空间完成大规模的仿真计算是需要考虑的重要因素。这期间 CAE 软件的使用者多数为专家且集中在航空、航天、军事等几个领域,这些使用者往往在使用软件的同时还需要进行软件的二次开发。

20 世纪 90 年代至今,是 CAE 的成熟壮大期,众多 CAE 软件经历了兼容合并,逐步扩大了软件的适应性和应用范围,下面列出的是这一期间诞生的典型公司和产品:

- MSC 公司——旗下拥有十几个产品,覆盖了线性分析、非线性分析、显式非线性分析及流体动力学问题和流场耦合问题。
- ANSYS 公司——通过一连串的并购与自身壮大后,ANSYS 塑造了一个体系规模庞大、产品线极为丰富的仿真平台,在结构分析、电磁场分析、流体动力学分析、多物理场、协同技术等方面都提供完善的解决方案。
- Siemens 公司——2001 年 SDRC 公司被 EDS 所收购,并将其与 UGS 合并重组,SDRC 的有限元分析程序也演变成了 NX 中的 I-deas NX Simulation,与 NX Nastran 一起成为了 NX 产品生命周期中的仿真分析中的重要组成部分。2007 年被西门子并购。
- Dassault Systemes 公司——2005 年 Dassault Systemes 并购 SIMULIA 的 ABAQUS,并在 SolidWorks 上进行了集成。
- Altair 公司——以前后处理而进入 CAE 领域的 Altair 公司,近年围绕前后处理建立起来的 HyperWorks 软件成为现在市场上很有竞争力的软件。

- LMS 公司——其软件的分析集 1D(一维多领域系统仿真)、3D(三维虚拟样机仿真)、“试验”于一身，不仅可以加速虚拟仿真，还能使仿真结果更准确可靠。
- COMSOL 公司——以多物理场耦合仿真开辟出了一片新天地，为其发展、更为 CAE 技术的发展拨开迷雾。

在此期间，各个 CAE 软件都积极扩展 CAE 本身的功能，领域呈现出了大鱼吃小鱼的市场局面，大的软件公司为了提升自己的分析技术、拓宽自己的应用范围，不断寻找机会收购、并购小的、专业的软件商，因此 CAE 软件本身的功能得到了极大的提升；同时，由于 CAE 分析需要以数字化的模型为基础，各大分析软件都向 CAD 靠拢，发展与各 CAD 软件的专用接口并增强软件的前后置处理能力，如 MAC/Nastran 在 1994 年收购了 PATRAN 作为自己的前后处理软件，并先后开发了与 CATIA、UG 等 CAD 软件的数据接口，ANSYS 也在大力发展其软件的 ANSYS/PrePost 前后处理功能，SDRC 公司利用 I-DEAS 自身的 CAD 功能强大的优势，积极开发与别的 CAD 模型传输接口，先后投放了与 Pro/E、UG、CATIA 等的接口，以保证 CAD/CAE 的相关性；另外，CAD 软件商通过并购大力增强其软件 CAE 功能，如 CATIA、SolidWorks、UG 都增加了基本的 CAE 前后处理及简单的线性、模态分析功能；CAE 软件的应用领域越来越宽，使用者从分析专家转向设计者和设计工程师，而且分析人员将主要时间和精力转向了前后处理。

随着计算机软、硬件技术的快速发展，CAE 无论在性能还是在功能等方面都得到了极大的发展，并呈现出如下发展趋势：

(1) CAE 软件向专业应用方向发展：CAE 软件将提供完善的外部接口，CAE 用户可以利用这些接口在通用软件平台上进行深度的二次开发，建立企业级的 CAE 分析软件，由此简化分析方法，提高 CAE 应用效益，以此来建立和提升企业开发和研制的能力。

(2) CAE 功能进一步扩充：CAE 将实现多结构耦合分析、多物理场耦合分析、多尺度耦合分析，以及结构、构件和材料的一体化设计、计算与模拟仿真等功能。

(3) 三维图形处理与虚拟现实技术：随着快速三维虚拟现实技术的日趋成熟，CAE 软件的前后处理系统将会在复杂的三维实体建模及相关的静态和动态图形处理技术方面有新的发展。

(4) 一体化的 CAD/CAE/CAM 系统：现在的大部分 CAE 软件都实现了和 CAD 的集成，由于不同模型转换之间存在的隐患，未来的发展方向必然是 CAD/CAE/CAM 的无缝集成和一体化。

(5) 多媒体用户界面与智能化、网络化：随着计算机网络和图形技术的发展，未来的 CAE 软件的用户界面具有更强的直观性。同时，使用户能够实现多专业、异地、协同、综合地设计与分析。

1.4 CAE 分析的流程

任何产品的设计开发都是一个反复迭代的过程，CAE 最大的作用就是减少设计中的迭代。理想的现代设计过程中，CAE 应该渗透进产品设计开发的每个阶段和环节，如图 1.3 所示。

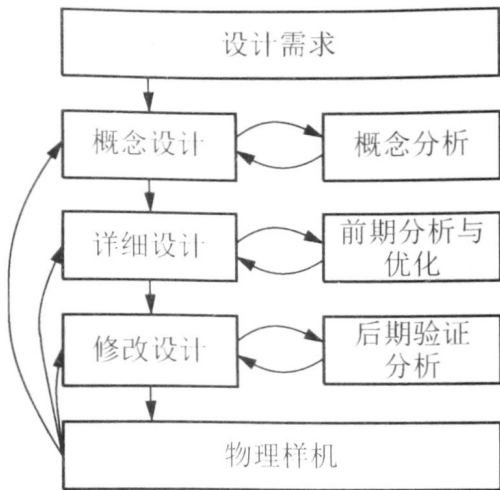


图 1.3 CAE 在产品设计过程中的作用

CAE 分析流程和着重点在概念设计阶段、详细设计阶段和后期验证阶段都是不一样的，而且做不同类型的 CAE 分析其流程也是不同的，甚至不同软件的分析流程也是不同的。虽然无法用一个统一的流程来涵盖所有的 CAE 分析，但是所有的 CAE 分析基本都包括三个大的部分：前处理、分析计算和后处理。前处理主要完成几何模型的构建、网格的剖分、各种参数的设定，这部分工作需要大量人力的参与，而且 CAE 分析结果的好坏几乎都在这一部分被确定了；分析计算主要是计算机利用前处理所设定的求解器或者计算方法来“自动”完成问题的分析和解算，这一部分是没有人力参与的；后处理主要完成分析数据的处理，利用各种图形、图像或者动画进行分析结果的显示。一个典型的 CAE 分析流程，如图 1.4 所示。

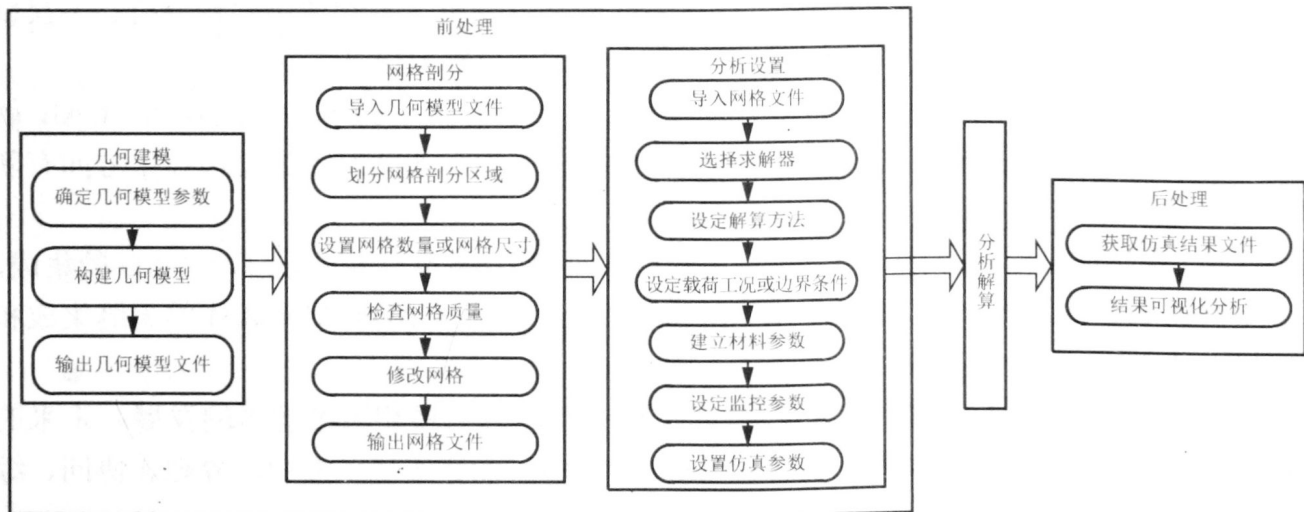


图 1.4 一个典型的 CAE 分析流程

本书的后续章节也将按照典型 CAE 的分析流程来进行展开，其中第 2 章介绍前处理的部分内容，第 3 章介绍分析计算的部分内容，第 4 章介绍后处理的部分内容，第 5 章对主流的 CAE 软件进行简单的介绍，第 6 章和第 7 章分别针对轨道车辆和飞行器，进行了 CAE 的简单分析。

小 结

本章从广义和狭义两个角度介绍了 CAE 的基本概念,并概述了计算机和 CAE 的发展历史,最后简述了 CAE 分析的基本流程。通过对本章的学习,读者应该能对“CAE 是什么?”、“CAE 能干什么?”、“CAE 从何而来?”和“CAE 的分析流程是什么?”等问题做出自己的解答。

阅读材料

如何成为一名 CAE 工程师?

下面是某单位的招聘公告:

CAE 工程师

岗位职责:

1. 使用 CAE 工具参与产品设计并给出设计建议;
2. 负责计划和执行工程仿真(CAE),安排 CAE 时间,收集产品数据,选择与修改计算模型,完成具体仿真计算和报告。

岗位要求:

1. 机械工程、计算数学、材料、力学等专业硕士或以上学历,力学基础扎实,熟悉有限元技术或有限体积法;
2. 2 年以上相关工作经验,具有 Hypermesh、Fluent、Nastran 或 Abaqus 软件实际应用经验者优先考虑;
3. 工作计划性、条理性强,认真主动;
4. 良好的英语读写能力。

产品开发工程师

岗位职责:

1. 应用 UG 等 CAD/CAE 工具进行驱动电机、电力电子控制等产品的变型开发设计;
2. 编制上述产品的工程图纸及生产制造文件;
3. 编制相关产品的试验与认可规范;
4. 进行上述产品的试验验证;
5. 支持样品制造。

岗位要求:

1. 机械、电子等工程类专业大学本科毕业或以上;
2. 3 年以上机械设计经验,具有较强的机械设计能力,熟悉模具设计、复杂机械设计、机床设计、电机机械设计、非标机械设计者优先考虑;
3. 熟悉汽车行业产品开发流程,能熟练使用 UG 软件尤佳;
4. 良好的英语读写能力。

上面的招聘公告极具代表性,从中我们可以看出对 CAE 工程师的基本要求。以有限元分析工程师为例,作为一个合格的有限元分析工程师,至少应该具备以下几个方面的技能和经验:

1. 专业技能和知识,如机械原理与设计制造,流体力学等。如果目标是汽车行业的那还需要汽车相关专业的知识;如果目标是飞机行业,则需要飞机相关专业的知识。