



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

机械CAD/CAE 应用技术基础

第2版

杜静 何玉林 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

机械 CAD/CAE 应用技术基础

第 2 版

主编 杜 静 何玉林
参编 金 鑫 杨 仕 刘成俊
主审 何援军 谭建荣



机械工业出版社

本书主要讲述机械 CAD/CAE 技术的基本理论和方法。全书共分九章：第一章介绍机械 CAD/CAE 的基本概念、系统结构以及集成的关键技术；第二章介绍 CAD 建模；第三章介绍有限元分析技术基础和应用实例；第四章介绍机械动态设计与实验模态分析技术基础；第五章介绍 Pro/ENGINEER 三维设计基础；第六章至第九章主要介绍系统运动学和动力学分析软件 ADAMS 的使用方法和应用实例。本书在内容的安排上从设计基础理论到设计工具，由浅入深，逐步展开，力求做到基础知识与最新方法介绍两者兼顾。

本书可作为高等学校本科生教材，也可作为研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械 CAD/CAE 应用技术基础/杜静, 何玉林主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2008.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

ISBN 978-7-111-10012-6

I. 机… II. ①杜…②何… III. ①机械设计: 计算机辅助设计-高等学校-教材②机械制造-计算机辅助制造-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 195574 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: 刘小慧 责任编辑: 刘小慧 版式设计: 霍永明

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 李 妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2008 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 18 印张 · 446 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-10012-6

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379715

封面无防伪标均为盗版

国家工科基础课程教学基地机械基础系列

教材编审委员会

主 任：唐一科

副 主 任：刘昌明 何玉林 黄茂林

顾 问：杨叔子

主编人员：丁 一 祖业发 黄茂林 龙振宇 刘天模 袁绩乾

赵月望 陈国聪 何玉林 吕仲文 杨学元 秦 伟

李文贵

审稿人员：常 明 华中科技大学

张 策 天津大学

吴鹿鸣 西南交通大学

杨治国 四川大学

李建保 清华大学

林萍华 东南大学

张春林 北京理工大学

何援军 上海交通大学

谭建荣 浙江大学

张济生 重庆大学

(排名不分先后)

策划单位：机械工业出版社 重庆大学

序

为了适应 21 世纪我国现代化建设的需要,培养高质量的工程科学技术人才,教育部从 1996 年开始实施了“面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划”,接着又决定建设国家工科基础课程教学基地。这些措施推动了教育改革的深入发展,形成了一批有特色的课程体系和系列教材。由重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地组织编写、机械工业出版社出版的“国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材”就是其中之一。这套系列教材是国内众多资深教授的支持、指导和数十位长期从事教学和教学改革教师辛勤劳动的结果,能够满足机械类专业人才培养的要求。

这套系列教材紧密结合“机械类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”、“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两个面向 21 世纪重大教学改革项目和国家工科基础课程机械基础教学基地建设,集中反映了重庆大学等高校围绕人才培养,在改革机械基础课程体系和教学内容方面所取得的成果。

这套系列教材的特色在于将机械基础系列课程分为设计基础和制造基础两类课群。以拓宽基础、培养学生综合应用机械基础理论与现代设计分析方法进行机械设计和创新为宗旨,遵循认知规律,明确课程定位,突破各课程自身的传统体系,基本上实现了系列课程的整体优化。通过“机械认识实践”的实践教学,帮助学生建立机械的感性认识。制造基础课群则对原机械制造的冷、热加工专业课程进行了整合和改造,建立了适合宽口径大机械专业的三个知识点——“机械制造技术基础”、“材料成形工艺基础”和“工程材料”。设计基础课群对传统的“机械设计”及“机械原理”进行了大胆的尝试性整合;展示了在“机械创新设计”思维的引导下,运用“计算机图形学”、“机械 CAD/CAE 技术基础”等现代设计方法和手段进行机械设计主线。

这套系列教材较好地体现了面向 21 世纪机械类专业人才培养模式改革的思路,对机械类专业机械基础系列课程体系及教学内容的改革进行了富有成效的探索与实践。机械工业出版社出版这套教材,实为一件很有意义的事,其将为全国机械基础课程体系的教改与教学提供又一套很有特色的教材。

当然,这套系列教材还需要在教学改革和教学实践中经受检验、不断完善,以结出我国教育改革的硕果,是为序。

中国科学院院士
重庆大学机械传动国家重点实验室学术委员会主任
华中科技大学教授

杨占子

第2版前言

随着计算机技术的进步和发展, CAD/CAE 技术日趋完善, 在产品设计阶段为设计人员提供了快速、有效的设计工具和手段, 极大地改善了产品的设计过程, 已成为提高产品设计水平、缩短产品开发周期、大幅度提高劳动生产率和产品质量的重要手段。目前, CAD/CAE 技术已在机械、电子、造船、航空、汽车、建筑等领域得到了广泛的应用, 其应用水平已成为衡量一个国家科技现代化和工业现代化水平的重要标志之一。

为了适应培养高素质应用型工程技术人才的需要, 结合作者近年来在机械 CAD/CAE 教学、科研和工程培训实践中的经验对本书第 1 版进行了修订。修改后的本书具有如下特点:

1. 强调系统集成应用的理念, 注重现代设计方法与技术手段的结合

机械 CAD 技术正经历着由传统单元技术向系统集成的重要转变, CAD/CAE 作为建模和分析的工具是建立在科学和系统的设计方法的基础之上的。针对机械工程设计的特点, 本书有选择地介绍了现代设计方法中的常用技术, 并且融入在设计案例之中, 读者在掌握应用工具软件的同时, 可以学习 CAD 建模技术、动态设计、有限元分析、系统动力学等设计思想, 培养现代设计思维。

2. 加强与相关课程和教材的衔接, 注重专业知识与 CAD/CAE 技术的结合

为了加强与“工程制图”、“机械设计”和“机械原理”等课程及其教材的衔接, 本书从三维设计分析软件的教学入手, 利用三维设计功能完成机械系统及零部件的结构设计, 并在 ADAMS 分析环境中进行机械系统运动学和动力学的仿真及结构优化。

3. 理论联系实际, 提高解决问题的能力

本书理论联系实际, 结合设计对象, 把 CAD 建模与系统分析和仿真结合起来, 通过案例给出解决问题的具体思路、应用技术和方法, 注重提高解决实际问题的能力。从工程应用的角度出发, 各章都配有实用案例, 带领读者去学习相关的技能和应用方法。

针对国内 CAD/CAE 技术的日益增长的需求, 本书作者在长期从事 CAD/CAE 领域的教学和科研的基础上, 参阅了国内外数十种同类书籍和有关文献资料, 同时紧密结合现代设计和工程应用现状, 以三维实体建模、运动学和动力学仿真、有限元分析为主线, 介绍了现代设计理论与方法。以具有代表性的 CAD 软件 Pro/ENGINEER、有限元软件 Patran/Nastran、机械系统动力学仿真软件 ADAMS 为对象, 对机械 CAD/CAE 的建模理论、方法、求解及典型工程应用等进行了由浅入深的讲解, 力求做到基础知识与最新方法介绍的两者优先。全书结合实例编写, 方便读者练习, 可作为高等学校本科生教材, 也可作为研究生和工程技术人员的参考书。

本书由重庆大学杜静、何玉林任主编, 重庆科技大学刘成俊、重庆大学金鑫、西南大学杨仕参加了编写。其中何玉林编写第一、二章, 金鑫编写第三章, 刘成俊编写第四、五章, 杜静编写第六章, 杨仕编写第七章, 第八、九章由杜静、金鑫、杨仕共同完成。

在编写过程中, 得到了胡桂川、冉勇、何孔德等同志的帮助和支持, 在此表示衷心的感谢。

全书由浙江大学何援军谭建荣教授主审, 在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足和错误, 欢迎广大读者批评指正。

编者

第 1 版前言

为了适应新世纪培养高素质、创造型机械科技人才的需要,重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地组织编写了机械基础系列教材。这套教材编写的整个过程就是我们完成教育部面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划中“机械类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”、“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两个项目的过程。我们按照新世纪机械专业人才应该具备的能力、素质和知识结构,研究制定了机械类专业人才培养方案及教学内容体系和与之相适应的机械基础系列课程体系及教学内容,并在 97、98、99 级本科教学中经过实践,所以这套教材反映了我们进行教学改革的成果。

这套系列教材的特色在于将机械基础系列课程分为设计基础和制造基础两类课群,对原机械制造工艺、金属切削机床、金属切削刀具、夹具、铸造、锻压等专业课程进行了整合和改造,编写了适合宽口径机械专业的《机械制造技术基础》、《材料成形工艺基础》和《工程材料》;增设了以参观和实践为主的《机械认识实践》课程;《现代机械制图》把投影制图和计算机绘图作为重点,并将其贯穿于全书;以设计为主线,重新规划了机械设计基础的体系结构,把齿轮机构的原理与设计有机融合,放在《机械设计》教材中,将《机械原理》的重点定位于机构的运动学、动力学和机械系统运动方案的分析与设计,并将《机械设计》安排在《机械原理》之前开出。增加了《计算机图形学》、《机械 CAD/CAE 应用技术基础》等计算机应用技术基础教材,反映了现代科学技术的新发展,引导学生应用现代设计方法和手段进行机械设计,增加了《机械创新设计》,介绍创新方法,启发创新思维。

CAD/CAE 技术是一项综合性的新技术,是 CAD/CAE/CAM 集成系统的基础。目前产品评估(PE)的概念已经开始广为人们接受。产品评估要求在整个产品开发过程中,在用户需求—概念设计—产品设计—产品及零件详细设计—工艺性分析—产品性能验证—生产维护的各个阶段,对产品进行及时有效的分析。要求在产品的初始设计阶段,就能较好地完善设计概念,用三维或四维虚拟样机实验代替传统的实物样机实验,在产品制造加工前发现产品设计问题并及时予以纠正。CAD/CAE 技术是产品评估和虚拟样机设计的支撑技术和设计平台。

本教材从最新的基于 PC 平台的三维参数化机械设计软件 MDT6.0 的教学入手,让学生以全新的设计概念,利用三维参数化设计功能完成机械零部件的设计,并编辑生成工程图,同时掌握装配和自由曲面设计的基本方法。在此基础上以深受广大企业欢迎的最新的工程分析软件(Working Model)对三维模型进行运动学、动力学的动态仿真分析。通过多个典型案例的分析,让读者掌握一些典型机构的设计方法,并从中了解机械的结构特征、工作原理和运动学、动力学特性,提高对机械系统的认识,加强对机械系统方案设计能力的培养。

在学习新技术的时候,没有比边学边动手更有效的方法了。边学边做正是学习本教材的方法。为此,本教材非常强调实战能力的提高,在每一章里都有一个实例,带领读者去学习相关的技能和应用方法。读者只要在计算机上照着做一遍,就可以基本上了解 CAD、CAE

的功能以及使用它们的方法了。

本教材共三个部分。第一章为 CAD/CAE 技术概论部分，让读者建立起 CAD、CAE 的概念，了解 CAD、CAE 的概貌，浏览流行的 CAD/CAE 软件，从集成的角度论述了 CAD、CAE 的核心技术，让读者明确功能如此强大的 CAD/CAE 软件的技术原理，这对学习理解并应用 CAD/CAE 是很有益处的。第二章到第五章为 CAD 部分，详细介绍了 AutoDesk 公司推出的融合二维和三维设计的机械设计平台——Mechanical Desktop (MDT) 软件。它是集 AutoCAD 交互作图系统和参数化实体造型、曲面造型等为一体的机械设计系统，含有 GB 符号库、符合 GB 制图标准，全中文界面。第六章至第八章为 CAE 部分。详细介绍了无缝集成在 MDT 环境下的工程分析平台——Working Model (WM) 软件，着重介绍以 MDT 作三维造型设计、以 WM 作动态分析的机械产品设计/分析的方法。

本书由重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地陈国聪、杜静、王旭霞、任亨斌等老师编写，陈国聪、杜静为主编。上海交通大学计算机系何援军教授为主审，他为本书的编写提出了许多宝贵的建议，在本书编写与审阅中给予了大力的帮助和指导。

由于作者水平有限，加之 CAD/CAE 技术发展迅猛，本书错误及疏漏难免，谨请读者批评指正。

编者

目 录

序	1
第2版前言	1
第1版前言	1
第一章 绪论	1
第一节 机械 CAD/CAE 技术概述	1
一、机械 CAD/CAE 概念	1
二、机械 CAD/CAE 集成的关键技术	2
三、机械 CAD/CAE 技术的应用	3
第二节 机械 CAD/CAE 技术的发展	4
一、CAD/CAE 技术发展的历史	4
二、CAD/CAE 技术发展的趋势	6
第三节 机械 CAD/CAE 系统结构	8
一、CAD/CAE 集成系统的特点	8
二、CAD/CAE 集成系统的典型体系结构	9
第二章 CAD 建模	11
第一节 几何模型	11
一、几何模型的概念	11
二、表示形体的坐标系	11
三、基本几何元素	13
四、表示形体的模型	14
第二节 常用的几何造型方法	16
一、基本体素表示法	16
二、特征表示法	17
三、边界表示法	17
四、扫描表示法	18
五、构造实体几何法	20
第三节 特征模型建模方法	23
一、特征造型法	23
二、特征的分类	24
三、特征的参数化	25
四、特征的表示	25
五、特征库的建立	27
六、特征的形式化描述	28
七、特征造型系统实现模式	30
第三章 有限元分析	32
第一节 有限元方法的基本概念	32

一、有限元概述	32
二、有限单元方法处理问题的基本步骤	34
三、有限元方法的组成模块	35
第二节 常用有限元分析软件介绍	36
一、MSC 系列产品	36
二、ANSYS 系列产品	38
三、ABAQUS 系列产品	39
四、ALGOR	40
第三节 有限元在机械行业中的应用	41
一、结构静力分析	41
二、结构动力分析	42
三、热分析及热应力分析	43
第四节 应用实例	43
一、创建有限元模型	43
二、静强度分析	52
三、模态分析	54
四、瞬态分析	57
第四章 机械动态设计与实验模态分析技术基础	62
第一节 机械动态设计基础	62
一、关于静态与动态的基本概念	62
二、动力学及振动的数学基础	64
三、动态设计基础	67
四、模态分析基础	71
第二节 实验模态分析及其工程应用	74
一、实验模态分析的概念	74
二、实验模态分析的工程应用	75
三、实验模态分析的基本内容	76
四、实验模态分析技术的实施	78
五、模态分析技术新进展	79
第五章 Pro/ENGINEER 三维设计基础	84
第一节 概述	84
第二节 Pro/ENGINEER 菜单及基本模块	85
一、菜单栏	85
二、Pro/ENGINEER 主要模块	86
三、与工程和产品设计有关的基本概念	87
第三节 Pro/ENGINEER 的特征造型设计	90
一、基准特征	90
二、创建基础特征	94
三、放置实体特征的创建	112
四、特征的基本操作	120
五、编辑零件	130
第四节 Pro/ENGINEER 装配	131

一、创建组件	131
二、约束类型	132
三、基本装配	136
第五节 Pro/ENGINEER 与 ADAMS 集成	137
一、概述	137
二、Pro/ENGINEER 与 ADAMS 的接口	139
第六章 ADAMS 概述	141
第一节 虚拟样机技术的应用与 ADAMS 的特点	141
一、虚拟样机技术应用	141
二、ADAMS 特点	142
第二节 ADAMS 模块	143
一、用户界面模块 (ADAMS/View)	143
二、求解器模块 (ADAMS/Solver)	144
三、后处理模块 (ADAMS/PostProcessor)	144
四、高速动画模块 (ADAMS/Animation)	144
五、振动分析模块 (ADAMS/Vibration)	145
六、柔性分析模块 (ADAMS/Flex)	145
七、控制模块 (ADAMS/Controls)	145
八、图形接口模块 (ADAMS/Exchange)	145
九、轿车模块 (ADAMS/Car)	146
十、发动机设计模块 (ADAMS/Engine)	146
第三节 ADAMS 应用基础	146
一、ADAMS/View 界面	146
二、ADAMS/View 中的常用工具	148
三、ADAMS/View 常用的快捷键	153
四、定义建模环境	153
五、ADAMS 的主要文件介绍	157
六、ADAMS 的帮助	158
第七章 ADAMS View 模型建立及仿真	159
第一节 ADAMS 几何建模	159
一、基本几何形状	159
二、简单几何体	161
三、复杂几何体	163
四、修改构件属性	165
第二节 添加运动副	167
一、运动副类型	167
二、定义运动副的一些技巧	170
第三节 ADAMS 载荷	171
一、添加单向作用力和力矩	172
二、添加力或力矩	173
三、添加柔性连接	173
四、特殊载荷	174

第四节 仿真参数控制及仿真	175
一、仿真分析输出设置	175
二、模型检查	178
三、模型仿真	178
第五节 仿真后处理	182
一、后处理程序基本操作	183
二、仿真过程回放	184
三、仿真曲线	185
第八章 ADAMS 高级仿真分析	188
第一节 ADAMS 参数化建模与优化设计	188
一、参数化建模	188
二、设计研究	188
三、试验设计	189
四、优化分析	190
五、参数化建模与优化设计实例	190
第二节 多柔体系统建模与仿真	197
一、导入柔性体	198
二、柔性体设置	199
三、利用 AutoFlex 生成柔性体	202
第三节 振动分析	208
一、在时域内定义模型	208
二、运用 ADAMS/Vibration 模块进行频域响应分析	211
三、应用实例	215
第四节 联合系统仿真	223
一、联合系统仿真概述	223
二、应用实例	223
第九章 CAD/CAE 在机械设计中的应用	231
第一节 航空飞行器夹紧机构建模与仿真分析	231
一、工作原理	231
二、建立几何模型	232
三、挂锁仿真分析	233
四、测试验证	235
五、参数化模型及优化设计	237
第二节 摩托车整车动态响应分析	240
一、导入摩托车车架柔性体模型	240
二、创建摩托车前悬挂系统	241
三、创建摩托车后悬挂	243
四、创建摩托车路面和前后轮	244
五、添加摩托车发动机、驾驶员和油箱物理属性	245
六、路况行驶仿真	245
七、发动机惯性激振力对摩托车的振动响应	247
第三节 汽车悬架系统仿真分析	249

一、创建前悬架模型	249
二、测试前悬架模型	252
三、参数化前悬架模型	262
四、定制界面	266
五、优化前悬架模型	271
参考文献	275

第一章 绪 论

第一节 机械 CAD/CAE 技术概述

一、机械 CAD/CAE 概念

在机械产品开发过程中,设计人员迫切需要一种能对所做的设计进行正确评价和精确分析的工具,而不再仅仅依靠以往积累的经验 and 知识去估计。鉴于这种目的,人们希望将工程领域里广泛应用的有限元分析方法与 CAD 技术集成,共同实现“设计—评价—再设计”任务的自动化,以提高设计的精确程度和效率。

机械 CAD/CAE (Computer Aided Design/Computer Aided Engineering) 技术就是通过计算机及图形输入/输出设备进行机械产品的交互设计,并建立产品的数字模型,然后在统一的产品数字模型下进行结构的计算分析、性能仿真、优化设计、自动绘图。机械 CAD/CAE 技术是用于支持机械产品开发的计算机辅助设计、分析的理论、方法与工具等相关技术的总称,包括现代设计理论与方法学(如并行设计、协同设计、虚拟设计、大规模定制设计、分形设计等),以及与设计工具相关的技术(如产品数字化定义及建模技术、基于 PDM 的产品数据管理与过程管理技术、集成的 CAx 和 DFX 工具、智能技术等),能使设计工作实现信息化、集成化、网络化和智能化,达到产品设计质量高、成本低和周期短的目标。

以机械 CAD/CAE 为基础,还可以将产品的数字模型高效及时地传送并应用到整个企业产品价值链所涉及的各个重要环节,包括工艺规划、工装设计、生产、加工、质量控制、编制技术文档、供应、销售和服务,实现人、财、物、产、供、销信息的集成管理、科学决策。它从根本上改变了从设计到产品生产整个过程的传统工作方式和管理方法,使设计和制造领域发生了深刻的变革。

随着中国加入 WTO,制造业企业不得不参与国际市场竞争,传统的产品开发方式已不再适应企业对产品的时间、质量、成本的要求,特别是基于二维 CAD 的设计过程,只能处理二维图形信息,无法直观地得到三维实体产品模型,进行产品的装配分析、工程分析、物理特性计算等。而机械 CAD/CAE 设计分析平台,以建立全参数化三维实体模型为基础,再用有限元分析等方法进行关键零部件的强度、稳定性以及整机或部件的运动性能和动力性能的仿真分析,为企业建立起一套产品开发体系。它支持“自顶向下”和“自底向上”等设计方法,使设计更加符合实际设计过程,比使用二维 CAD 设计质量提高,设计原型错误减少 80%,重复设计减少 50%,节省了时间和资金,可以大批量生产的速度生产定制产品,缩短产品开发周期,便于企业增进全球性合作。因此,机械 CAD/CAE 是一种崭新的设计模式,制造企业应从设计和管理两方面分析考虑,通过产品设计手段与设计过程的数字化和智能化,缩短产品开发周期,促进产品设计的数字化,提高企业的产品创新能力。

机械 CAD/CAE 应包括如下几个方面的内容:

- (1) 建立机械产品所有零部件及各级部件和整机的三维 CAD 模型, 并使三维模型参数化, 适合于变形设计和部件模块化设计;
- (2) 与三维 CAD 模型相关联的二维工程图;
- (3) 部件和整机的三维 CAD 模型能适合运动分析、动力分析和优化设计;
- (4) 机械 CAD/CAE 的过程就是基于三维 CAD 的产品开发体系建立的过程, 要形成基于三维 CAD 的 PDM (Product Data Management, 产品数据管理) 结构体系;
- (5) 从机械 CAD/CAE 过程中摸索出定制产品的开发模式及所遵循的规律;
- (6) 为了验证和修正 CAD/CAE 模型, 需要与整机和部件的检测与试验相结合。

二、机械 CAD/CAE 集成的关键技术

在 CAD 与 CAE 技术的集成中, 目前存在的主要困难是:

- (1) 如何实现从几何模型到 CAE 分析模型的自动转换;
- (2) 如何从 CAE 分析的结果出发评价和修改设计。

产生有限元分析模型需要把 CAD 建立的几何模型经过简化, 并进行网格划分、载荷、约束和材料的定义。而这种模型抽象化的过程常常要依赖于有经验的分析人员, 而且需要花费大量的时间和精力。虽然各种有限元分析软件的后处理器凭借优异的图形功能, 能以等高线、矢量、阴影、动画、多模型、多窗口、图表、表格等方式表现解析结果, 但都不具备对有限元分析结果进行解释和评价的功能。同时, 对设计的修改也要由设计者经过分析和判断后自行给出方案, 而没有利用计算机强大的计算和推理功能对设计的修改进行优化指导。因此, 有必要应用人工智能技术, 结合先前积累的知识和经验, 建立一个包括有限元分析模型的建立、分析和解释的专家系统, 并加入到 CAD 与有限元分析集成系统中, 在“机器专家”的指导下, 自动完成有限元分析模型的建立、分析和解释, 并可自动评价有限元计算结果还可修改设计, 进一步丰富和完善前后处理功能, 使其与设计者共同完成设计的优化。

机械系统自动动力学分析软件 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System)、动力学分析和设计系统软件 DADS (Dynamic Analysis and Design System) 等, 它们集成了多体系统仿真的基本步骤、动力学理论成果、参数化的建模工具, 可以提供静力学、运动学和动力学分析的求解器、功能强大的后处理模块和可视化界面等, 极大地提高了机械系统仿真的效率。然而, 由于这些软件的重点是在力学分析上, 在建模方面还是有很多不足, 尤其是一些复杂机械系统零部件的三维建模很难实现, 所以很有必要利用 CAD 软件建模来解决这个问题, 同时需要合适的接口程序来完成。

特征造型是几何造型技术的延伸, 它是从工程的角度, 对形体的各个组成部分的形状、尺寸及其结构、材料和精度等特征进行定义, 使所描述的形体信息具有工程意义。特征模型既包含了低层几何信息, 又能为下游的分析、加工提供高层语义信息。因此, 实现特征建模是实现 CAD 与 CAE 集成的关键。CAD 与 CAE 技术集成系统的结构如图 1-1 所示。

1. 特征造型

设计者通过调用特征库里的特征 (必要时自定义特征) 进行产品特征建模。在特征造型过程中, 设计者要全面周到地考虑设计对象, 尽可能地将以后各种应用 (如分析、加工

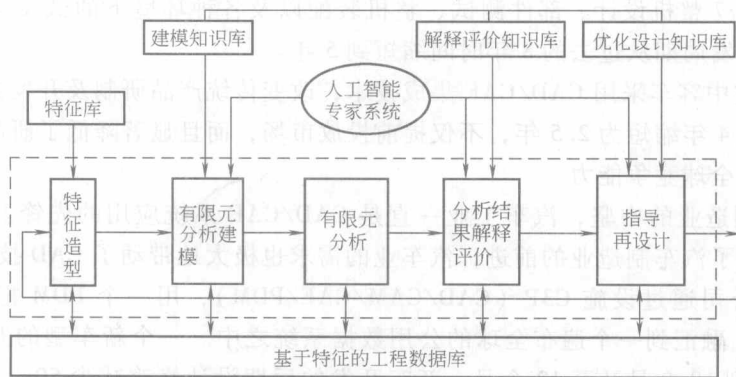


图 1-1 CAD 与 CAE 技术集成系统的结构图

等)所要用到的特征信息考虑进来。

2. 有限元分析建模

从特征的观点看,有限元分析建模就是将设计特征转换成有限元分析特征;从集成的观点看,有限元分析建模就是有限元分析的前处理部分。在建模过程中,专家系统访问建模知识库,利用其中存储的规则进行判断推理;访问基于特征的产品数据库,利用其中的数据信息进行逐步计算,最终形成分析模型。

3. 有限元分析

目前,有限元求解算法已经比较完善和成熟,工程化的分析软件也不少,可直接应用。

4. 分析结果解释和评价

在解释评价知识库的指导下,对分析结果进行解释,对本次设计进行评价。该模块决定是否对本次设计进行修改。如果不修改设计,则系统将各种数据存入产品数据库,并将任务交给其他系统;如果需要修改设计,则任务转入修改设计模块。

5. 指导再设计

根据优化知识库中的规则作出判断,对产品数据库中的特征信息进行修改,同时对于多种修改方案进行优化选择。

从机械 CAD/CAE 总体构架来看, CAD 与 CAE 集成系统有两方面工作要做:一个是基于特征的有限元前处理;另一个是基于特征的有限元后处理。系统存在三个知识库和一个基于特征的产品数据库。建模知识库与前处理相联系,解释评价知识库和优化设计知识库与后处理发生作用。通过规则,这三个知识库分别对前处理、后处理进行驱动。基于特征的产品数据库与集成系统的整个过程相联系,为各个模块提供所需的各种信息。在知识库和产品数据库的支持下,作为后台核心的专家系统控制整个过程的运行,与设计者共同完成“设计—分析—再设计”任务。

三、机械 CAD/CAE 技术的应用

近年来,由于市场竞争日益激烈,因而提高产品及相关过程的质量,降低产品成本和缩短产品开发周期就成了企业生存和发展的关键,因此研究先进的设计方法和理论具有极其重要的意义。CAD/CAE 集成技术引起了学术界和企业界的广泛关注,成为研究的热点之一,它对产品设计影响深远,典型的例子有:

(1) 波音 777 整机设计、部件测试、整机装配以及各种环境下的试飞均是在计算机上完成的,使其开发周期从过去的 8 年时间缩短到 5 年。

(2) 欧洲空中客车采用 CAD/CAE 集成技术,改变传统产品研制及开发方法,把空中客车的试制周期从 4 年缩短为 2.5 年,不仅提前投放市场,而且显著降低了研制费用及生产成本,大大增强了全球竞争能力。

(3) 作为制造业的中坚,汽车工业一直是 CAD/CAE 系统应用的先锋。CAD 技术的应用,有效地推动了汽车制造业的前进,汽车业的需求也极大地带动了 CAD 技术的发展。

(4) 福特公司通过设施 C3P (CAD/CAM/CAE/PDM),用一个 PDM 把 CAD、CAE 和 CAM 集成起来,融汇到一个遍布全球的公用数据系统之中。一个新车型的开发周期从过去的 36 个月缩短到 18 个月乃至 12 个月,新车开发的后期设计修改减少 50%,原型车制造和测试成本减少 50%,投资收益提高 30%。

(5) 我国的模具制造业 20 年前是以传统的手工设计、有经验的钳工师傅为主导的技艺型生产方式为主,模具工业年产值只有约 20 亿元,模具进出口总额只有约 2600 万美元,进出口之比是 18:1。而如今,通过 CAD/CAE/CAM 技术的应用,我国模具制造业已进入到现代模具工业生产的时代,数字化、信息化、CAD/CAM/CAE 技术和数控加工机床已普遍采用,成了技术密集型和资金密集型的高技术产业。模具制造水平有了很大的提高,生产的模具精度已达到微米级,模具寿命提高了几十倍,模具生产周期缩短了约 3/4,模具标准件的使用覆盖率几乎是从零到现在的 45% 左右,模具工业年产值现在已达到 450 亿元以上,进出口总额达到 17 亿美元,进出口之比达到 4:1。

第二节 机械 CAD/CAE 技术的发展

一、CAD/CAE 技术发展的历史

20 世纪 50~60 年代初,CAD 技术处于准备和酝酿时期,被动式的计算机绘图是这一阶段 CAD 技术的特征。60 年代,交互式计算机图形学的创立为 CAD 技术的进一步发展和应用打下了理论基础,不断成熟的图形输入/输出设备的出现推动了 CAD 技术的蓬勃发展。70 年代,CAD 技术进入广泛的使用时期,1970 年美国 Applicon 公司首先推出了面向企业的 CAD 商品化系统。80 年代 CAD 技术进入迅猛发展时期,这一阶段的技术特征是 CAD 技术从大中型企业向小企业扩展;从发达国家向发展中国家扩展;从用于产品设计发展到用于工程设计和工艺设计。90 年代以后,CAD 技术进入开放式、标准化、集成化和智能化的发展时期,这一阶段的 CAD 技术都具有良好的开放性,图形接口、功能日趋标准化。微机加视窗操作系统与工作站加 UNIX 操作系统在因特网的环境下构成 CAD 系统的主流工作平台,同时网络技术的发展使得 CAD/CAE/CAM 集成化体系摆脱空间的约束,能够更好地适应现代企业的生产布局及生产管理的要求。在 CAD 系统中,正文、图形、图像、语音等多媒体技术和人工智能、专家系统等高新技术得到综合应用,大大提高了 CAD 自动化设计的程度,智能 CAD 应运而生。智能 CAD 把工程数据库及管理系统、知识库及专家系统、拟人化用户界面管理系统集于一体。CAD 体系结构大体可分为基础层、支撑层和应用层三个层次。基础层由计算机及外围设备和系统软件组成。随着网络的广泛使用,异地协同虚拟 CAD 环境