

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

主 编 陈国聪 杜 静

参 编 王旭霞 任亨斌

主 审 何援军



机械工业出版社

本书根据教育部面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革的总体要求以及教育部“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”教改项目的具体规划和要求,结合重庆大学国家工科基础课程机械基础教学基地多年来教学改革中 CAD/CAE 教学、科研和工程培训实践经验编写而成。

本书共八章分三部分:第一章为 CAD/CAE 技术概论部分,简要介绍 CAD、CAE 的概念和发展,CAD、CAE 的核心技术和 CAD/CAE 集成原理。第二章到第五章为 CAD 部分,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,编辑生成工程图,同时掌握自由曲面设计和装配的基本方法。第六章到第八章为 CAE 部分,详细介绍深受广大企业欢迎的最新的工程分析软件(Working Model6.1)的操作和应用方法,对三维 CAD 模型实现运动学、动力学的动态仿真分析。全书通过多个典型案例分析,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,加强对机械系统的认识和机械系统方案设计能力的培养。

本书主要作为高等工科院校机械工程类专业的 CAD 和 CAE 教材,也可作为高职高专、夜大、函大和职工大学同类专业的教材,亦可供从事 CAD/CAE 技术的研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械 CAD/CAE 应用技术基础/陈国聪,杜静主编. —北京:机械工业出版社,2002.7

国家工科基础课程教学基地机械基础系列教材

ISBN 7-111-10012-3

I. 机... II. ①陈... ②杜... III. ①机械设计:计算机辅助设计—高等学校—教材 ②机械设计—计算机辅助实验—高等学校—教材
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 022968 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:商红云 王霄飞

封面设计:鞠杨 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·10.5 印张·407 千字

0 001—4 000 册

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

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的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

2001年6月16日

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 and 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

2001年6月

目 录

序 前言

| | |
|--|----|
| 第一章 CAD/CAE 技术概论 | 1 |
| 第一节 CAD 概念的产生和发展 | 1 |
| 第二节 CAE 概念的产生和发展 | 3 |
| 第三节 CAD/CAE 集成与 虚拟样机设计 | 5 |
| 一、传统的机械产品设计方式 | 5 |
| 二、虚拟样机设计和实验 | 6 |
| 第四节 CAD 的关键技术 | 7 |
| 一、两种造型技术的主要特点 | 7 |
| 二、两种造型技术的比较 | 8 |
| 三、变量化技术的其他特点 | 9 |
| 第五节 CAD/CAE 集成原理 | 10 |
| 一、CAD/CAE/CAM 集成 软件逻辑结构 | 10 |
| 二、CAD/CAE 系统的集成 方法 | 11 |
| 三、CAD/CAE 系统集成的 关键技术 | 13 |
| 第六节 CAD/CAE 集成软件介绍 | 21 |
| 一、CATIA 软件 | 21 |
| 二、UG II 软件 | 21 |
| 三、I-DEAS 软件 | 22 |
| 四、Pro/ENGINEER | 23 |
| 五、MDT 和以 MDT 为平台的 CAD/CAE/CAM 一体化 方案 | 24 |
| 第七节 CAD/CAE 系统体系结构 和发展趋势 | 27 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 一、CAD/CAE 系统的体系 结构 | 27 |
| 二、CAD/CAE 系统的发展 趋势 | 28 |
| 第八节 CAD 系统的选型 | 30 |
| 一、准备工作 | 31 |
| 二、系统选择工作 | 31 |
| 第九节 学习本课程的目的 | 32 |
| 第二章 三维参数化实体造型 | 33 |
| 第一节 概述 | 33 |
| 一、MDT 的用户界面 | 33 |
| 二、三维参数化实体造型 | 35 |
| 第二节 草图及其约束 | 37 |
| 一、草图平面与草图 | 37 |
| 二、草图约束 | 39 |
| 三、编辑草图 | 43 |
| 第三节 特征 | 44 |
| 一、草图特征 | 44 |
| 二、定位特征 | 54 |
| 三、放置特征 | 56 |
| 四、特征编辑 | 62 |
| 五、特征复制 | 63 |
| 六、特征重新排序 | 64 |
| 七、特征删除 | 65 |
| 八、特征抑制 | 65 |
| 九、退化为基础特征 | 66 |
| 第四节 设计变量 | 66 |
| 一、全局变量 | 67 |

| | | | |
|------------------------------|----|--------------------------------|-----|
| 二、局部变量 | 68 | 二、曲面的打断、合并和延展 ... | 100 |
| 三、表驱动、表抑制 | 69 | 三、切割 AutoCAD 实体 | 101 |
| 第五节 零件与零件的编辑 | 70 | 四、曲面缝合和替换曲面 边界 | 101 |
| 一、复制定义 | 70 | 五、实用工具 | 102 |
| 二、镜像零件 | 71 | 六、曲面的可见性控制 | 104 |
| 三、缩放零件 | 71 | 第四章 二维工程图 | 106 |
| 四、重演建模过程 | 71 | 第一节 设置绘图环境 | 106 |
| 五、零件的属性 | 71 | 一、工程图设置 | 107 |
| 六、零件的质量特性 | 72 | 二、标准设置 | 108 |
| 七、其他 | 72 | 三、标注样式设置 | 110 |
| 第三章 NURBS 曲面造型 | 74 | 四、尺寸标注样式输入 | 111 |
| 第一节 创建曲线 | 74 | 五、孔标注设置 | 112 |
| 一、附加线 | 74 | 第二节 生成二维视图 | 112 |
| 二、流线 | 76 | 一、创建视图 | 112 |
| 三、交线 | 77 | 二、编辑视图 | 119 |
| 四、分型线 | 78 | 三、生成中心线 | 121 |
| 五、投影曲线 | 78 | 四、识别图元和输出二维 视图 | 122 |
| 六、断面线 | 80 | 五、其他 | 123 |
| 七、创建拟合样条曲线 | 81 | 第三节 尺寸与符号的标注 | 124 |
| 八、创建相切样条曲线 | 82 | 一、标注尺寸 | 124 |
| 第二节 编辑曲线 | 82 | 二、编辑尺寸 | 134 |
| 一、拟合和分解 | 83 | 三、符号标注 | 136 |
| 二、连接曲线 | 84 | 第四节 明细表、序号及标题栏、 图框 | 142 |
| 三、曲线的精度控制及反向 | 84 | 一、创建明细表数据库、零件 属性和零件参照 | 142 |
| 第三节 创建曲面 | 85 | 二、定位和编辑明细表 | 145 |
| 一、概述 | 85 | 三、定位和编辑引出序号 | 146 |
| 二、基本曲面 | 89 | 四、创建和编辑零件参照 | 148 |
| 三、运动曲面 | 91 | 五、添加标题栏和图框 | 148 |
| 四、表皮曲面 | 93 | 第五章 装配造型 | 151 |
| 五、衍生曲面 | 95 | 第一节 装配造型概述 | 151 |
| 六、由 AutoCAD 实体生成 曲面 | 98 | | |
| 第四节 编辑曲面 | 99 | | |
| 一、全面编辑 | 99 | | |

| | | | |
|---|-----|--|------------|
| 第二节 部件装配环境的设置及 部件装配界面 | 152 | 五、编辑装配约束 | 195 |
| 一、部件装配环境的设置 | 152 | 第八节 场景 | 197 |
| 二、部件装配界面及部件装配 工具条简介 | 153 | 一、场景的设置及场景 工具条 | 197 |
| 第三节 装配目录 | 155 | 二、创建和编辑场景 | 198 |
| 一、“全部”选项卡的功能 | 155 | 三、场景分解系数及零部件 的位置参数 | 199 |
| 二、“外部”选项卡的功能 | 157 | 四、零部件分解轨迹线 | 201 |
| 第四节 装配 | 159 | 五、场景举例 | 202 |
| 一、装配树的建立 | 160 | 第六章 Working Model 基本 操作 | 204 |
| 二、零部件的自由度 | 160 | 第一节 Working Model 的 窗口组成 | 204 |
| 三、三维操纵器 | 161 | 一、Working Model 的 主菜单 | 205 |
| 四、装配约束 | 162 | 二、工具条 | 208 |
| 五、编辑装配约束 | 168 | 三、对象管理器 | 208 |
| 六、零部件的质量特性和 干涉检查 | 170 | 四、仿真控制播放器 | 209 |
| 第五节 在部件装配环境中编辑 零部件 | 172 | 五、坐标栏与状态区 | 209 |
| 一、编辑内部零部件 | 173 | 第二节 Working Model 的基本 概念 | 209 |
| 二、编辑外部零部件 | 173 | 一、坐标系统 | 209 |
| 第六节 装配实例一——以内部件 的方式装配内燃机曲柄 活塞机构 | 174 | 二、编辑栅格 | 210 |
| 一、装配零部件的创建 ——建立装配树 | 174 | 三、视图操作 | 213 |
| 二、“曲柄活塞机构”的 装配 | 183 | 四、线框模式与渲染模式 | 214 |
| 三、曲柄活塞机构干涉检查 | 189 | 五、仿真环境的辅助控制 命令 | 215 |
| 第七节 装配实例二——以外部 参照的方式装配钳子 | 189 | 六、实例 | 217 |
| 一、通过引用外部参照零件 建立装配树 | 189 | 第七章 实体、约束与实体的装配 | 223 |
| 二、装配钳子 | 191 | 第一节 实体与实体属性 | 223 |
| 三、质量特性 | 193 | 一、实体 | 223 |
| 四、在位编辑外部参照零件 | 194 | 二、实体的属性 | 226 |
| | | 第二节 点坐标与约束 | 235 |
| | | 一、创建并附着点坐标 | 236 |

| | |
|--------------------|-----|
| 二、点坐标属性 | 237 |
| 第三节 约束 | 238 |
| 一、约束分类 | 238 |
| 二、创建约束 | 239 |
| 三、约束窗口 | 241 |
| 四、定制约束 | 243 |
| 第四节 约束类型与属性 | 248 |
| 一、刚性联接 | 248 |
| 二、移动副 | 250 |
| 三、空间移动副 | 251 |
| 四、回转副 | 252 |
| 五、圆柱副 | 253 |
| 六、平面低副 | 255 |
| 七、球面低副 | 256 |
| 八、球销高副 | 257 |
| 九、球面高副 | 259 |
| 十、线性弹簧/阻尼 | 260 |
| 十一、旋转弹簧/阻尼 | 262 |
| 十二、线性激励 | 264 |
| 十三、旋转电动机 | 265 |
| 十四、绳铰 | 267 |
| 十五、分离器 | 268 |
| 十六、杆铰 | 269 |
| 十七、力 | 270 |
| 十八、力矩 | 271 |
| 第五节 创建装配仿真模型 | 271 |
| 一、设置仿真环境 | 271 |
| 二、创建机构的仿真模型 | 273 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第八章 运行、控制仿真及与 CAD 的集成 | 285 |
| 第一节 运行仿真及控制仿真 | 285 |
| 一、仿真播放控制器 | 285 |
| 二、仿真环境 | 286 |
| 三、打印仿真当前帧 | 287 |
| 四、控制仿真精度 | 287 |
| 五、播放幻灯演示 | 289 |
| 六、显示矢量 | 289 |
| 第二节 控制仿真属性 | 290 |
| 一、输入标尺及输入标尺 控制的属性参数 | 290 |
| 二、定制输入标尺 | 292 |
| 三、使用输入标尺 | 293 |
| 第三节 输出仿真 | 293 |
| 一、创建图表 | 293 |
| 二、定制图表 | 294 |
| 三、输出图表数据 | 297 |
| 四、输出 AVI 视频文件 | 298 |
| 五、实例 | 299 |
| 第四节 Working Model 与 CAD 集成 | 303 |
| 一、导入 CAD 模型到 Working Model 中 | 304 |
| 二、Working Model 与 CAD 集成 | 307 |
| 三、实例 | 311 |
| 参考文献 | 322 |

第一章 CAD/CAE 技术概论

第一节 CAD 概念的产生和发展

CAD (Computer Aided Design) 指使用计算机系统进行设计的全过程, 包括资料检索、方案构思、零件造型、工程分析、工程制图、文档编制等。在设计各个阶段计算机都能发挥它的辅助作用, 因此 CAD 概念一产生, 就成为一门新兴的学科, 引起了工程界的关注和支持, 迅速地得到发展并日益地完善起来。

20 世纪 60 年代初, 美国麻省理工学院 MIT 开发了名为 Sketchpad 的计算机交互图形处理系统, 并描述了人机对话设计和制造的全过程, 这就是 CAD/CAM 的雏型, 形成了最初的 CAD 概念: 科学计算、绘图。随着计算机软、硬件的发展, 计算机逐步应用于设计过程, 形成了 CAD 系统, 同时给 CAD 概念加入新的含义, 逐步形成了当今应用十分广泛的 CAD/CAE/CAM 集成的 CAD 系统。从 CAD 概念产生至今, CAD 经历了多个发展时期。

从 20 世纪 60 年代初到 70 年代中期, CAD 从封闭的专用系统走向商品化, 主要技术特点是二维、三维线框造型, 只能表达基本的几何信息, 不能有效表达几何数据间的拓扑关系, 需配备大型计算机系统, 价格昂贵。此时期有代表性的产品是: 美国通用汽车公司的 DAC-1, 洛克希德公司的 CADAM 系统。CAD 开始进入应用阶段。

20 世纪 70 年代后期, 进入发展时期。由于集成电路的问世, CAD 系统价格下降。同时, 此时正值飞机和汽车工业蓬勃发展时期, 飞机和汽车制造中遇到了大量的自由曲面问题, 法国达索飞机制造公司率先开发出以表面模型为特点的自由曲面建模方法, 推出了三维曲面造型系统 CATIA, 采用多截面视图、特征纬线的方式来近似表达自由曲面。该阶段的主要技术特点是自由曲面造型。曲面造型系统为人类带来了第一次 CAD 技术革命。一些受到国家财政支持的军用工业相继开发了 CAD 软件, 如美国洛克希德公司的 CADAM、美国通用电气公司的 CALMA、美国波音公司的 CV、美国国家航空及宇航局 (NASA) 支持开发的 I-DEAS、美国麦道公司开发的 UG

20 世纪 80 年代初，由于计算机技术的大跨步前进，CAE、CAM 技术也开始有了较大的发展，由于表面模型技术只能表达形体的表面信息，难以准确地表达零件的其他属性，如质量、质心、惯性矩等，对 CAE 十分不利，最大的问题在于分析的前处理特别困难。基于对 CAD/CAE 一体化技术发展的探索，SDRC 公司第一个开发了基于实体造型技术的 CAD/CAE 软件 I-DEAS。由于实体造型技术能够精确地表达零件的全部属性，在理论上有助于统一 CAD、CAE、CAM 的模型表达，因此称之为 CAD 发展史上的第二次技术革命。但由于当时的硬件条件还不能满足实体造型技术所带来的数据计算量极度膨胀的需求，使实体造型技术没能很快在整个行业中全面推广开来。

20 世纪 80 年代中期，CV 公司的一些人提出了参数化实体造型方法，其特点是：基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改等。策划参数化技术的这些人成立了一个参数技术公司（Parametric Technology Corp, PTC），开始研制 Pro/ENGINEER 的参数化软件。进入 20 世纪 90 年代，PTC 在 CAD 市场份额中名列前茅。可以认为，参数化技术的应用主导了 CAD 发展史上的第三次技术革命。

20 世纪 90 年代初期，SDRC 公司在摸索了几年参数化技术后，开发人员发现参数化技术尚存在许多不足之处。“全尺寸约束”这一硬性规定就干扰和制约着设计者创造力及想象力的发挥。为此，SDRC 的开发者提出了一种比参数化技术更为先进的实体造型技术——变量化技术，并历经 3 年时间，投资一亿多美元，推出了全新体系的 I-DEAS Master Serise 软件。变量化技术成就了 SDRC，也驱动了 CAD 技术发展的第四次技术革命。

目前，CAD 技术日益完善，许多发达国家相继推出成熟的 CAD/CAE/CAM 集成化的商品软件，在设计理论、设计方法、设计环境、设计工具等各方面出现许多成熟的现代 CAD 技术。当今 CAD 技术是计算机在工程中最有影响的应用技术，它作为现代工程制造技术的重要组成部分，是促进科研成果的开发和转化，促进传统产业和学科的更新与改造，实现设计自动化，增强企业及其产品在市场上的竞争力，加强国民经济发展的一项关键性高新技术。

CAD 概念在各个时期有所不同，1973 年国际信息联合会给出“CAD 是将人和机器混编在解题作业中的一种技术，从而使人和机器的最好特性联系起来。”的定义。到 20 世纪 80 年代初，第二届国际 CAD 会议上认为 CAD 是一个系统的概念，包括计算、图形、信息自动交换、分析和文件处理五个方面的内容。1984 年召开的国际设计及综合讨论会上，认为 CAD 不仅是设计手段，而且是一种新的设计方法和思维。可见 CAD 概念是一个变化的、不断发展的概念。

第二节 CAE 概念的产生和发展

CAE 是 Computer Aided Engineering (计算机辅助工程) 的缩写, 是以现代计算力学为基础, 以计算机仿真为手段的工程分析技术, 是实现产品优化设计的主要支持模块。CAE 技术的主要内容包括有限元分析法、边界法、运动机构分析、气动或流场分析、电磁场分析等, 其中有限元分析在机械 CAD 中应用最广泛。几十年来, 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; 分析的对象由弹性材料扩展到塑性粘塑性和复合材料等; 分析的领域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, 并且和计算机辅助设计技术的结合越来越紧密, 因此, 有些学者认为, CAE 应属于广义 CAD 的重要组成部分。

CAE 技术的发展大体经历了以下三个阶段:

20 世纪 60~70 年代, CAE 技术处在探索发展阶段。这一时期的有限元技术主要针对结构分析问题进行发展, 以解决航空航天技术发展过程中所遇到的结构强度、刚度以及模拟实验和分析问题。1963 年 Dr.Richard MacNeal 和 Mr.Robert Schwndler 投资成立 MSC 公司, 开发了称之为 SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods) 的结构分析软件。1967 年在美国 NASA 支持下, SDRC 公司成立, 并于 1968 年发布世界上第一个动力学测试及模态分析软件包。1971 年推出商用有限元分析软件 Supertab(后并入 I-DEAS)。1970 年 SASI 公司成立(后来重组改称 ANSYS 公司), 开发了 ANSYS 软件。

20 世纪 70~80 年代是 CAE 技术蓬勃发展时期。1977 年 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, ABAQUS 软件应用于结构非线性分析。1982 年 CSAR 成立, 其 CSA/Nastran 软件主要针对大结构, 流一固耦合、热及噪声分析。1987 年 LSTC 成立, 其产品 LS-DYNA 及 LS-NIKE3D 用隐式算法求解低高速动态及特征问题。1989 年 Engineering Software Kesemoch and Devdopment 公司成立, 致力发展 P 法有限元程序。这一时期 CAE 发展有以下几个特点:

- 软件的开发主要集中在计算精度、硬件及速度平台的匹配, 计算机内存的有效利用及磁盘空间利用。

- 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。从电学模型开始拓展到各种物理场(如温度场、电磁场、声波场等)的分析。从

线性分析向非线性分析（如材料的非线性、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。出现了许多著名的分析软件，如 Nastran、I-DEAS、ANSYS、ADINA、SAP 系列、DYNA3D、ABAQUS、NIKE3D 与 WECAN 等。

20 世纪 90 年代是 CAE 技术成熟壮大阶段。CAE 软件发展商积极发展与各 CAD 软件的专用接口并增强软件的前后置处理能力。如 MSC/Nastran 在 1994 年收购了 Patran 作为自己的前后置处理软件，并先后开发了与 CATIA、UG 等 CAD 软件的数据接口。同样，ANSYS 也在大力发展其软件 ANSYS/Prepost 前后置处理功能，而 SDRC 公司利用 I-DEAS 自身 CAD 功能强大的优势，积极开发与别的设计软件的 CAD 模型传输接口，先后投放了 Pro/E to I-DEAS、CATIA to I-DEAS、UG to I-DEAS 等专用接口，在此基础上再增强 I-DEAS 的前后置处理功能。CAE 走上了 CAD/CAE/CAM 集成的道路。

CAE 技术的发展趋势：

(1) 应用领域越来越宽。使用对象从以专家为主转向普通设计者和开发工程师。

(2) 集成程度越来越高。软件功能从单一 CAE 功能转向 CAD/CAE 设计/分析一体化。

(3) 分析人员的工作重点转向前后置处理。如果把整个分析过程分解为前处理、求解和后处理，则前处理包括建立几何模型、几何模型输入输出准备、网格划分、定义边界条件，而求解和后处理相对简单。1997 年 SDRC 公司对分析人员整个分析过程中各个阶段所占的时间百分比做了调查。由于计算机硬件速度的提高以及分析软件计算方法的改进，求解时间仅占 4%。前处理占用了 87% 的时间，后处理占用了 9% 的时间。由此可见目前影响分析效率的主要环节是前后置处理。解决的方法有：

- 采用 CAD/CAE 一体化软件，解决大多数的分析任务。
- 提高分析软件的前后置处理能力，压缩整个分析过程的前后置处理时间。
- 采用同一有限元模型进行多种分析。

目前在产品开发中，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，从用户需求 — 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。采用评估与产品开发过程并行的方式，保证分析结果更为客观，更为可靠。CAE 技术将发挥越来越重要的作用。

第三节 CAD/CAE 集成与虚拟样机设计

CAD 经过三十多年的发展,经历了从线框 CAD 技术到曲面 CAD 技术,再到参数化技术,直到目前的变量化技术,为 CAE 技术的推广应用打下了坚实的基础。CAD 软件开发商一方面大力发展本身 CAD 软件的 CAE 功能,如世界排名前几位的 CAD 软件 CATIA、CADD5、UG 都增加了基本的 CAE 前后置处理及一般线性、模态分析功能,或者通过并购另外的 CAE 软件来增加其软件的 CAE 功能。在 CAD 软件商大力增强其软件 CAE 功能的同时,各大分析软件也在向 CAD 靠拢。CAE 软件开发商也积极发展与各 CAD 软件的专用接口并增强软件的前后置处理能力。CAD、CAE 走上了 CAD/CAE/CAM 集成的道路。

分析是设计的基础,设计与分析集成是必然趋势。广义的 CAD 包括设计和分析两个方面。设计是指构造零件的几何形状、选择零件的材料,以及为保证整个设计的统一性而对零件提出的功能要求和技术要求等。设计一般分为概念设计、工程设计和详细设计三个阶段。概念设计是指设计者根据设计协议,把产品的功能、价格、使用寿命、尺寸轮廓要求、质量要求等量化成设计过程所需的参数信息。工程设计过程完成几何形状设计、完整的零件表及材料清单输出。详细设计给出符合功能要求、加工要求和装配要求的详细零件图和装配图。分析是指运用数学造型技术从理论上对产品的性能进行模拟、分析和测试,以保证产品设计的可靠性。所以广义 CAD,就是 CAD/CAE 集成的概念。本教材就 CAD/CAE 的集成作一个系统的介绍,分别介绍一种实用的 CAD 软件和一种实用的 CAE 软件,并把它们集成在同一个环境下,围绕着如何进行产品设计开发展开讨论。因为设计和制造总是联系的,设计要为制造提供信息,设计要考虑加工的要求,所以讲述 CAD/CAE 集成概念和方法时,总是和 CAD/CAE/CAM 的集成联系起来讲的。读者要从 CAD/CAE/CAM 集成的角度,来理解 CAD、CAE 的关键技术、集成方法和原理。

一、传统的机械产品设计方式

在机械产品设计过程中,传统的设计是构思、画草图、比较方案、设计计算、出工程图、加工制造,以实物样机为最终结果。这样不仅费时费钱,而且还可能要经过多次反复,才能达到产品定型生产阶段,如图 1-1 所示。