

 21世纪工业工程专业规划教材

苏 春 主编

数字化设计与制造

Digital Design

and Manufacturing



机械工业出版社
China Machine Press

21 世纪工业工程专业规划教材

数字化设计与制造

主 编 苏 春

参 编 黄 卫 王海燕

主 审 袁军堂

机 械 工 业 出 版 社

本书以实现机械产品的数字化开发为目标,系统地介绍现代产品开发中的数字化设计与制造的基础理论、基本方法、关键技术及其应用系统。

全书内容包括:数字设计与制造的产生背景、研究内容及其体系结构,数字化设计与制造系统的软硬件组成,产品数字化造型技术及其主流软件,数字化仿真技术(含有限元分析技术、优化技术、运动学及动力学仿真、虚拟样机技术),计算机辅助工艺规划技术,数控编程及其加工技术,逆向工程技术,快速原型制造技术,产品数字化开发的集成技术等。

本书内容新颖、体系完整、系统性强,注重基本原理、方法的讲解及其典型应用,力求反映产品数字化设计与制造技术的现状及其发展趋势。为方便查阅,书末附有缩略语表。

本书可以作为工业工程、机械工程及自动化、机械电子工程等专业的教材,也可供从事产品数字化设计与制造、数控加工、模具工程等领域的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字化设计与制造 / 苏春主编. —北京:机械工业出版社, 2005.9

21 世纪工业工程专业规划教材

ISBN 7-111-17496-8

I. 数... II. 苏... III. ①计算机辅助设计:机械设计—高等学校—教材②计算机辅助制造:机械制造—高等学校—教材 IV. ①TH122②TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 113113 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:张敬柱 责任编辑:邓海平 版式设计:冉晓华

责任校对:刘志文 责任印制:洪汉军

北京原创阳光印业有限公司印刷

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·9.875 印张·383 千字

定价:28.00 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) 68326294

封面无防伪标均为盗版



苏 春

1970年生人，东南大学机械工程系副教授。2001年，获东南大学机械制造及其自动化专业博士学位。2003~2004年，公派赴欧洲粒子物理研究所(CERN)、瑞士日内瓦大学从事科学研究、访问学者。主要研究方向为可靠性工程、制造系统建模与仿真、数字化设计与制造等。完成包括国家自然科学基金项目在内的科研课题10余项，发表论文20余篇，曾参编专著一部、主编出版教材一部。

21 世纪工业工程专业规划教材

编 审 委 员 会

名誉主任: 汪应洛 西安交通大学
主 任: 齐二石 天津大学
副 主 任: 夏国平 北京航空航天大学
易树平 重庆大学
钱省三 上海理工大学
苏 秦 西安交通大学
郭 伏 东北大学
薛 伟 温州大学
李泰国 首都经济贸易大学
吴爱华 山东大学
许映秋 东南大学
邓海平 机械工业出版社

秘 书 长: 易树平 重庆大学
秘 书: 张敬柱 机械工业出版社
委 员 (按姓氏笔画排序):

方庆琯	安徽工业大学	周跃进	南京大学
王卫平	东莞理工学院	姜俊华	南昌航空工业学院
王德福	东北农业大学	徐人平	云南理工大学
卢明银	中国矿业大学	徐瑞园	河北科技大学
李兴东	山东科技大学	海 心	南京工程学院
任秉银	哈尔滨工业大学	龚小军	西安电子科技大学
齐德新	辽宁工程技术大学	曹国安	合肥工业大学
刘裕先	北京机械工业学院	曹俊玲	机械工业出版社
李 萍	黑龙江科技学院	韩向东	南京财经大学
陈友玲	重庆大学	程国全	北京科技大学
陈 立	东北农业大学	蒋祖华	上海交通大学
张绪柱	山东大学	鲁建厦	浙江工业大学
张新敏	沈阳工业大学	戴庆辉	华北电力大学
周宏明	温州大学		

序

每一个国家的经济发展都有自己特有的规律，而每一个国家的高等教育也都有自己独特的发展轨迹。

自从工业工程（Industrial Engineering，简称 IE）学科于 20 世纪初在美国诞生以来，在世界各国得到了较快的发展。工业化强国在第一、二次世界大战中都受益于工业工程。特别是战后经济恢复期，日本、德国等均在工业企业中大力推广工业工程的应用和培养工业工程人才，获得了良好的效果。美国著名企业家艾柯卡先生，是美国福特和克莱斯勒汽车公司的首位总裁，他就是毕业于美国里海大学工业工程专业。日本丰田生产方式从 20 世纪 80 年代创建以来，至今仍风靡世界各国，其创始人 大野耐一的接班人——原日本丰田汽车公司生产调查部部长 中山清孝说：“所谓丰田生产方式就是美国的工业工程在日本企业的应用。”亚洲“四小龙”——韩国、新加坡、中国台湾和香港地区均于 20 世纪 60 年代起步工业工程，当时正值亚太地区经济快速发展时期（中国大陆因文化大革命而错过此次发展机会）。台湾的工业工程发展与教育是相当成功的，经过 30 年的努力，建立了工业工程的科研、应用和教育系统。20 世纪 90 年代初，全台湾 60 所大学有 48 所开设了工业工程专业，至今人才需求仍兴盛不衰。更重要的是于 1992 年设立了工业工程学门。目前，在大陆的台资企业都设有工业工程部和工业工程师岗位。在亚太所有地区的学校无一不广泛设立工业工程专业。工业工程高水平人才的培养，对国内外经济发展和社会进步起到了重要的推动作用。

1990 年 6 月中国机械工程学会工业工程研究会（现已更名为工业工程分会）的正式成立，以及首届全国工业工程学术会议在天津大学的胜利召开，标志着我国工业工程学科步入了一个崭新的发展阶段。人们逐渐认识到工业工程对中国管理现代化和经济现代化的重要性，并在全国范围内自发地掀起了学习、研究和推广工业工程的活动。更重要的是在 1993 年 7 月由原国家教委批准，天津大学、西安交通大学首批试办工业工程专业并招收本科生，由此开创了我国工业工程学科的先河。而后重庆大学等一批高校也先后开设了工业工程专业。时至今日，全国开设工业工程专业的院校至少有 140 所。发展速度之快，就像我国经济发展一样，令世界各国瞩目。我 2000 年 9 月应邀赴美讲学，2001 年应台湾工业工程学会邀请到台湾清华大学讲学，2003 年应

韩国工业工程学会邀请赴韩讲学，其题目均为“中国工业工程与高等教育发展概况”。他们均对中国大陆的工业工程学科发展给予了高度的评价，并表达了与我们保持长期交流与往来的意愿。

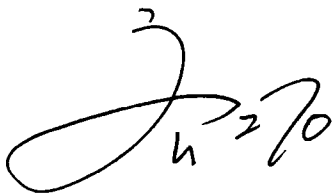
虽然我国工业工程高等教育自 1993 年就已开始，但教材建设却发展缓慢。最初，大家都使用由北京机械工程师进修学院组织编写的“自学考试”系列教材。至 1998 年时，全国设立工业工程专业的高校已达三四十所，但仍没有一套适用的专业教材。在这种情况下，工业工程分会与中国科学技术出版社合作出版了一套工业工程专业教材，并请西安交通大学汪应洛教授任编委会主任。这套教材的出版有效地缓解了当时工业工程专业高等教育教材短缺的压力，对我国工业工程专业高等教育的发展起到了重要的推动作用。

然而，近年来我国工业工程学科发展十分迅猛，开设工业工程专业的高校数量直线上升，同时教育部也不断出台新的政策，对工业工程的学科建设、办学思想、办学水平等进行规范和评估。在新的形势下，为了适应教学改革的要求，满足全国普通高等院校工业工程专业教学的需要，机械工业出版社推出的这套“21 世纪工业工程专业规划教材”是十分及时和必要的。在教材编写启动会上，编审委员会组织国内工业工程专家、学者对本套教材的学术定位、编写思想、突出特色进行了深入研讨，力求在确保高学术水平的基础上，适应普通高等院校教学的需求，做到适应面广，针对性强，专业内容丰富。同时，本套教材还将配备 CAI 课件，相应的实验、实习教程，案例教程以及企业现场录像，实现立体化。尽管如此，由于工业工程在我国正处于快速成长期，加上我们的学术水平和知识有限，教材中难免存在各种不足，恳请国内外同仁多加批评指正。

教育部管理科学与工程类学科教学指导委员会主任

中国机械工程学会工业工程分会主任

天津大学管理学院院长



于天津大学

前 言

在人类的发展进程中,计算机的诞生具有划时代意义。以“0”和“1”为基础的数字化信息给人们的生产、生活带来了深刻而持久的变革,并推动人类由传统的工业文明跨入信息时代。今天,知识和信息已成为一个企业乃至一个国家综合竞争能力的核心标志。

就制造业而言,以计算机为基础的数字化技术正在改变着制造业的面貌。几十年来,以计算机图形学为基础,逐渐演变成为数字化产品设计技术群;以数控机床及数控编程为基础,逐渐演变成为数字化制造技术群。数字化设计技术、数字化制造技术以及数字化管理技术的交叉、融合和集成,共同构筑了产品的数字化开发技术。

目前,数字化设计与制造技术已成为推动制造业进步的重要动力源。国家科技部启动了我国制造业信息化工程重大项目,其中,以三维 CAD 系统为代表的数字化设计技术被列为七项关键技术之首。

产品的数字化模型构成了制造企业信息化的信息之源。以产品数字化模型为基础,可以进行数字化仿真和动态优化,可以进行模具设计和完成零件的数控加工。数字化设计、数字化仿真以及数字化制造等功能模块的集成,已成为提升企业新产品开发能力的利器。

本书从产品数字化开发的角度出发,系统地阐述数字化设计、数字化仿真以及数字化制造技术的基本原理及方法。全书共分 8 章。其中,第 1 章介绍数字设计与制造的产生背景、研究内容及其体系结构;第 2 章介绍数字化设计与制造系统技术的发展历程及软硬件组成;第 3 章介绍计算机图形学基本理论;第 4 章系统地阐述产品数字化造型技术;第 5 章介绍数字化仿真技术;第 6 章介绍数字化制造技术;第 7 章介绍逆向工程及快速原型制造技术;第 8 章介绍产品数字化开发的集成技术。附录为缩略语表。

本书第 1、2、4、5、7、8 章由苏春编写,第 3 章由王海燕编写,第 6 章由黄卫编写。全书由苏春担任主编,由南京理工大学袁军堂教授担任主审。

在教材编写过程中，编者参考了大量文献，南京汽车集团有限公司技术中心提供了相关资料，在此谨向他们深表感谢。袁军堂教授对全书作了细致的审阅，并提出不少有益的建议，在此编者特表示由衷的谢意。

数字化设计与制造技术尚处于发展、完善的过程中，由于编者水平所限，书中难免有不足及错误之处，敬请读者批评、指正。

作 者
于东南大学

目 录

序 前言

第 1 章 数字化设计与制造技术引论	1
1.1 产品开发与数字化开发技术	1
1.2 数字化设计与制造的内涵及学科体系	5
1.3 数字化设计与制造技术的特点	8
1.4 数字化设计与制造技术的应用实例	10
习题	14
第 2 章 数字化设计与制造系统的组成	15
2.1 数字化设计与制造技术的发展	15
2.1.1 数字化设计与制造技术的历史	15
2.1.2 数字化设计与制造技术的发展趋势	23
2.2 数字化设计与制造系统的组成	25
2.3 数字化设计与制造系统的建立	29
2.3.1 软件系统的开发流程	30
2.3.2 软硬件系统的选型	32
习题	34
第 3 章 计算机图形学基础	35
3.1 概述	35
3.1.1 计算机图形学的研究内容	35
3.1.2 坐标系统	36
3.1.3 窗口与视口	39
3.2 图形变换	40
3.2.1 图形变换的数学基础	41
3.2.2 二维图形的几何变换	41

3.3 图形裁剪	44
3.3.1 线段的裁剪	45
3.3.2 Cohen-Sutherland 线段裁剪算法	46
3.4 曲线及曲面的表示	46
3.4.1 曲线和曲面的基本概念	47
3.4.2 曲线和曲面的参数化方程	48
3.4.3 参数曲线的代数形式和几何形式	50
3.4.4 参数化曲线	53
3.4.5 参数化曲面	58
3.5 图形显示的渲染技术	61
3.5.1 消除隐藏线及隐藏面	61
3.5.2 光照模型	63
3.5.3 纹理处理	67
3.5.4 颜色处理	68
习题	69
 第4章 产品数字化造型技术	71
4.1 产品数字化造型技术概述	71
4.2 形体在计算机内部的表示	72
4.2.1 几何信息和拓扑信息	72
4.2.2 形体的定义及表示形式	73
4.3 基于线框、曲面及实体的产品造型技术	75
4.3.1 线框造型	75
4.3.2 曲面造型	77
4.3.3 实体造型	79
4.4 产品的特征及参数化造型技术	83
4.4.1 特征造型	83
4.4.2 参数化造型	85
4.4.3 参数化特征造型	87
4.5 产品的数字化装配技术	91
4.5.1 数字化装配的基本概念	91
4.5.2 数字化装配的功能及操作	92
4.6 数字化设计软件中的关键技术及研究热点	96
4.6.1 数字化设计软件中的关键技术	96
4.6.2 数字化设计软件中的研究热点	98

4.7 产品数据与产品数据交换标准	99
4.7.1 产品数据与产品数据交换	99
4.7.2 常用的产品数据交换标准	101
4.8 主流数字化造型软件介绍	107
习题	109
第5章 数字化仿真技术	110
5.1 数字化仿真技术概述	110
5.1.1 仿真技术及其分类	110
5.1.2 数字化仿真的基本步骤	112
5.1.3 数字化仿真软件	114
5.2 数字化仿真技术中的有限元法	116
5.2.1 有限元法的基本概念	116
5.2.2 有限元法的基本原理及求解步骤	117
5.2.3 有限元分析软件	122
5.3 基于计算机的产品优化设计技术	126
5.3.1 优化设计及其发展	126
5.3.2 优化设计的数学模型	126
5.3.3 优化问题的分类	129
5.3.4 优化设计的步骤及注意事项	130
5.3.5 优化设计举例	133
5.4 塑料模具成型过程的数字化仿真实例	135
5.4.1 数字化仿真技术与塑料模具开发	135
5.4.2 仿真技术在注射模具成型过程中的应用	136
5.5 虚拟样机技术	144
5.5.1 虚拟样机技术概述	144
5.5.2 虚拟样机分析软件介绍	145
习题	152
第6章 数字化制造技术	154
6.1 数字化制造技术概述	154
6.2 计算机辅助工艺规划技术	155
6.2.1 计算机辅助工艺规划的基本概念	155
6.2.2 CAPP 的基本功能与模块组成	155
6.2.3 CAPP 的类型	157

6.2.4 CAPP 与企业信息集成	158
6.3 成组技术	159
6.4 数控加工技术概述	161
6.4.1 数控加工的基本概念	161
6.4.2 数控机床的组成及分类	162
6.5 数控编程技术	168
6.5.1 数控机床的坐标系统	168
6.5.2 数控编程的基本功能指令	173
6.5.3 数控编程的高级编程功能	187
6.5.4 数控编程的基本步骤及方法	193
6.5.5 数控编程的后置处理	197
6.5.6 DNC 技术	199
6.6 数控高速切削加工技术	204
习题	208
第 7 章 逆向工程与快速原型制造技术	209
7.1 逆向工程技术概述	209
7.2 逆向工程的研究内容及基本步骤	210
7.3 实物逆向工程及其关键技术	214
7.3.1 实物逆向对象的坐标数据采集	214
7.3.2 实物逆向的数据处理及模型重构	219
7.4 逆向工程技术应用实例	225
7.5 逆向工程软件模块介绍	228
7.6 快速原型制造技术	232
7.6.1 快速原型制造技术概述	232
7.6.2 典型快速原型制造工艺及装备	239
7.6.3 快速原型制造技术的发展趋势	249
7.6.4 基于逆向工程的快速原型制造	251
习题	252
第 8 章 产品数字化开发的集成技术	254
8.1 计算机集成制造系统	254
8.1.1 计算机集成制造系统的定义及组成	254
8.1.2 CIMS 的分类	259
8.1.3 CIMS 的开发模式及实施	260

8.2 并行工程	261
8.2.1 并行工程的产生和定义	261
8.2.2 并行工程的特点	262
8.2.3 并行工程的关键技术	265
8.2.4 并行工程的实施模式	270
8.3 协同设计与网络化制造	271
8.3.1 计算机支持的协同设计技术	271
8.3.2 网络化制造技术	282
8.4 产品全生命周期的数字化管理技术	287
8.4.1 产品全生命周期管理的定义	287
8.4.2 PLM 的管理功能分析	288
8.4.3 主流 PLM 软件介绍	290
习题	294
附录 缩略语表	295
参考文献	299

数字化设计与制造技术引论

@ 1.1 产品开发与数字化开发技术

产品开发是人类出于生产或生活的需要，而从事的一种创造性劳动。在几千年的演化过程中，人类经历了农业文明、传统工业文明、现代工业文明等不同发展阶段，产品开发的能力不断增加，由此也改善了人们的生活及生产条件。

1946 年，世界上第一台计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator, ENIAC) 在美国宾夕法尼亚大学研制成功，对人们的生产、生活带来深远影响。几十年来，不论计算机的结构、功能和规模如何变化，“0”和“1”始终是构成计算机信息的基础。通常，人们将以“0”和“1”为特征的信息称为数字化信息。在 21 世纪来临的时候，人类开始进入以数字化信息为特征的信息社会。

新技术的推动使生产力得到极大提高，传统的卖方市场已不复存在，取而代之的是日益明显的买方市场。随着世界经济一体化的形成，制造企业面临的竞争已是全球范围内的竞争。这种竞争反映到不同层面上，如产品之间、企业之间、国家之间、不同地理区域之间等。激烈的市场竞争对制造企业提出诸多新的挑战，主要表现在：① 产品复杂性不断增加；② 竞争激烈导致产品生命周期不断缩短，对产品开发时间提出更高要求；③ 设计风险和各种不确定因素增加；④ 产品设计要更多地考虑环境和社会等因素。

制造企业要想在竞争中取胜，就必须生产出比竞争对手交货期 (Time to market, T) 更短、质量 (Quality, Q) 更高、成本 (Cost, C) 更低、服务质量 (Service, S) 更优以及满足环境保护要求 (Environment, E) 的新产品，简称为 TQCSE。TQCSE 已经成为企业竞争力的主要表现形式和追求目标。

企业要适应上述挑战，并在激烈的市场竞争中处于有利位置，就必须依赖于相关技术的发展。正确、适时地运用高新技术，可以使掌握先进技术的制造企业获取高额利润；反之，对高新技术不恰当投入和对市场的不当预测，会使企业面临巨大风险，甚至导致血本无归，在竞争中迅速败落。正是在上述背景下，如何改善、发展新的产品设计和制造方法在工业发达国家受到普遍重视。

近年来，以计算机为基础的数字化技术已被广泛地应用到产品开发中，成为

提高企业综合竞争力的有效工具。数字化开发技术有着丰富的内涵及研究内容。其中,以计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工程分析(Computer Aided Engineering, CAE)为基础的数字化设计(Digital Design, DD)技术和以计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)为基础的数字化制造(Digital Manufacturing, DM)技术,是产品数字化开发技术的核心。

从人类发展的历史进程看,产品数字化开发技术的成熟和广泛应用具有深远意义。它使得以直觉、经验、图样、手工计算等为特征的产品开发模式逐渐淡出历史舞台。要准确地理解产品的数字化开发技术功用及价值,我们有必要仔细地分析产品开发的主要环节及过程。典型的产品开发周期如图1-1所示。

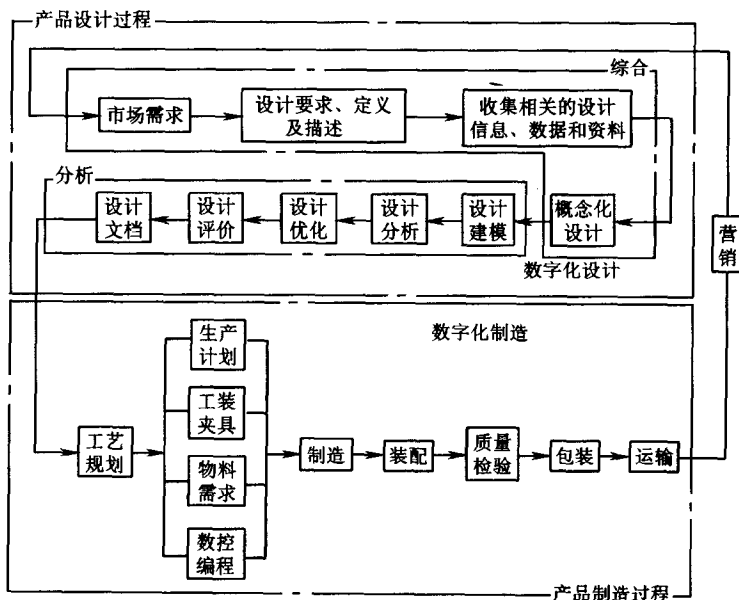


图1-1 产品开发周期与数字化开发技术之间的关系

由图1-1可以看出,产品开发源于用户及市场需求。总体上,从市场需求到最后产品经历两个主要过程:设计过程(Design Process)和制造过程(Manufacturing Process)。其中,设计过程源于客户及市场需求,止于产品的设计文档,包括产品工程图、三维模型等;制造过程从产品的设计文档开始,直到实际的产品包装、运输为止。

就产品的设计过程而言,又可以大致地分为两个阶段:综合(Synthesis)阶段和分析(Analysis)阶段。其中,早期的产品设计活动(如市场需求的描述、分析,相关设计信息的收集与整理,概念化设计方案等)都属于综合阶段。综合阶段的结果就是产品的概念化设计方案。概念化设计往往是设计人员对各种可能方

案进行讨论和评价的结果,可以勾勒出产品的初步布局和草图,定义出产品各部件之间的内在联系及约束关系。

综合阶段主要用于确定产品的工作原理和功能,在很大程度上决定了产品开发的成本和所需费用,对于分析阶段乃至整个设计过程都至关重要。综合子过程所涉及的信息多是定性的,因而较难被计算机系统所描述、接受和利用。近年来,专家系统(Expert System)和知识基系统(Knowledge-based System)等在解决上述问题上取得一定进展。

为预测和评价产品概念设计的性能,需要以定量方法对概念化设计模型进行描述,这就是产品建模。产品建模为进行产品分析创造了条件。分析阶段是产品设计过程的重要组成部分。设计人员对产品模型进行分析、优化和评价后,并综合各方面因素,决定最终的产品设计方案。在计算机环境下,可以利用各种算法、软件对设计方案进行设计、分析和优化,有利于作出更好的决策。典型的产品分析包括:应力分析,以确定结构的强度是否满足要求;装配体中零件的干涉分析,以检查运动和装拆时是否会发生碰撞;运动学分析,以检查产品是否满足规定的运动要求。分析阶段的结果是生成设计文档,包括图样、材料明细表(Bill Of Materials, BOM)、成本分析及其他文件,为产品的制造过程作准备。

如图1-1所示,制造过程以产品的设计文档为基础,起始于工艺规划(Process Planning),结束于实际产品。工艺规划的内容包括:采用何种加工工艺、路线和加工方法,确定合理的工艺参数,根据生产条件选择合适的加工设备等,以便将毛坯加工成为符合设计要求的产品。制造工艺规划的结果包括:生产计划(Production Planning)、物料需求计划(Materials Requirement Planning)以及工装夹具设计等。与从综合阶段到分析阶段之间转换相似,从工艺规划到制造过程中也有很多不确定因素,如人的经验、定性决策等。一旦工艺规划制定完毕,零件将按照实际的质量要求完成加工和检测。经质量检测合格的零件将被装配起来,并经过功能测试、包装等环节后,最终运送到市场和消费者手中。

图1-1不仅清楚地描述了典型的产品开发过程,还描述了数字化设计与数字化制造技术在产品开发中的地位和作用。从图1-1可知,数字化设计是产品设计过程的一个子集。当设计者的思维中形成了产品的概念化设计模型时,可以利用CAD软件及相关建模工具定义产品的几何模型,将设计者的思想表达出来。几何建模技术是CAD技术及数字化设计的核心。为使建模过程更加简洁,各种CAD软件都提供颜色、网格、目标捕捉等造型辅助工具。例如:为方便用户从不同视角更好地观察模型,CAD软件提供了多种图形变换和视图观察功能;为便于设计者表达概念设计理念、交流思想和检验干涉等,CAD软件提供了渲染、动画等可视化操作。另外,工程图绘制、尺寸及公差标注、物料单生成等也是CAD软件的基本功能。本书第4章将介绍主要的几何建模技术及常用造型软件。