



机械科学与工程研究生教学用书

计算机辅助设计与制造技术

*Computer Aided Design and
Manufacturing Technology*

殷国富 杨随先 编著

BOOKS FOR GRADUATE STUDENTS

华中科技大学出版社

- | | |
|--------------------------------------|-----------------|
| • 时间序列分析的工程应用(上、下) (第二版) | • 工程系统建模与仿真 |
| • 机械工程测试·信息·信号分析 (第二版) | • 工程试验分析与设计 |
| • 机械振动系统
——分析·测试·建模与对策(上、下) (第二版) | • 计算机图形学算法与应用 |
| • 加工过程数控(第二版) | • 现代数控技术 |
| • 工程噪声控制学 | • 现代集成制造系统 |
| • 机电动力系统分析 | • 先进加工过程技术 |
| • 激光先进制造技术 | • 现代产品设计方法 |
| • 设备诊断学 | • 广义机械优化设计 |
| • 机器人学 | • 计算机辅助设计与制造技术 |
| • 现代控制理论 | • 现代工程塑性理论及有限元法 |

· 作者所在院校 ·



- ◎ 策划编辑: 万亚军
刘 锦
- ◎ 责任编辑: 张志华
- ◎ 封面设计: 刘 卉

ISBN 978-7-5609-4724-2



9 787560 947242 >

定价: 39.80元



机械科学与工程研究生教学用书

计算机辅助设计与制造技术

*Computer Aided Design and
Manufacturing Technology*

殷国富 杨随先 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助设计与制造技术/殷国富 杨随先 编著. —武汉:华中科技大学出版社, 2008年9月

ISBN 978-7-5609-4724-2

I. 计… II. ①殷… ②杨… III. ①计算机辅助设计-研究生-教材
②计算机辅助制造-研究生-教材 IV. TP391.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 103640 号

计算机辅助设计与制造技术

殷国富 杨随先 编著

策划编辑:万亚军 刘 锦

责任编辑:张志华

责任校对:朱 霞

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16 印张:27.25 插页:2 字数:517 000

版次:2008年9月第1版 印次:2008年9月第1次印刷 定价:39.80元

ISBN 978-7-5609-4724-2/TP·657

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

机械科学与工程研究生教学用书

· 编委会 ·

主 任: 杨叔子 华中科技大学
李培根 华中科技大学
熊有伦 华中科技大学

委 员: (以姓氏笔画为序)

王安麟 同济大学
史铁林 华中科技大学
江平宇 西安交通大学
刘继红 北京航空航天大学
杜凤山 燕山大学
姚英学 哈尔滨工业大学
姚振强 上海交通大学
殷国富 四川大学
宾鸿赞 华中科技大学

内 容 提 要

CAD/CAM 是一项能使机械产品设计、制造模式发生深刻变化的高新应用技术,是实施制造业信息化工程的基础和关键。本书围绕机械产品设计制造的实际需要,全面系统地论述了 CAD/CAM 技术基本概念、产品数字化造型技术、产品数字化分析与仿真技术、CAD 应用系统开发方法、数字化工艺设计技术、CAM 技术、PDM 技术、现代产品快速开发技术、网络化协同开发技术以及数字化企业等方面的基础理论与技术方法。

本书内容新颖,注重技术原理、应用方法和应用实例的结合,反映了当今 CAD/CAM 技术的新进展,融入了作者多年的教学科研成果。本书可作为机械工程学科专业研究生和高年级本科生的课程教材,亦可作为 CAD/CAM 系统研究、开发与应用人员的参考书。

序

今天,我国的教育正处在一个大发展的崭新时期,高等教育已跨入“大众化”阶段,蓬蓬勃勃,生机无限。在高等教育中,研究生教育的发展尤为迅速。党的十七大报告提出,要“努力造就世界一流科学家和科技领军人才,注重培养一线的创新人才”,强调了在建设创新型国家中教育的优先发展地位。我们可以清楚知道,研究生教育是培养创新人才的主渠道,对走自主创新道路,建设创新型国家,具有重要的战略意义。

前事不忘,后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明:一个国家的富强,一个民族的繁荣,最根本的是要依靠自己,要以自力更生、自主创新为主。《国际歌》讲得十分深刻,世界上从来就没有什么救世主,只有依靠自己救自己。寄希望于别人,期美好于外援,只是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然,我们绝不应该也绝不可能采取“闭关锁国”、自我封闭、固步自封的方式来谋求发展,重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。改革开放三十年所取得的辉煌成就,谱写的中华民族历史性跨越的壮丽史诗,就是铁证。正因为如此,我们清醒看到了,自助者人助天助,只有独立自主,自强不息,走以自主创新为主的发展道路,才有可能在向世界开放中,争取到更多的朋友,争取到更多的支持,充分利用好外部的各种有利条件,来扎扎实实地、而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于,我们要有数量与质量足够的高级专门人才,特别是拔尖创新人才。何况,在科技高速发展与高度发达,而知识经济已初见端倪的今天,更加如此。人才、高级专门人才、拔尖创新人才、领导人才,是我们一切事业发展的基础。

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用

书是培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多越快,人才的知识基础及其要求越来越广越高,因此,我一贯赞成与支持出版研究生教学用书,供研究生自己主动地选用。早在1990年,《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:

一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。

这就是我赞成要为研究生编写系列的“机械科学与工程研究生教学用书”的主要原因。今天,我仍然如此来看。

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这很有道理;但是,必须补充一句,“学中做”。既要在实践中学习,又要在学习中实践,学习与实践紧密结合,方为全面。重要的是,结合的关键在于引导学生思考、积极独立思考。我一贯认为,要造就一个人才,学习是基础,思考是关键,实践是根本,三者必须结合,缺一不可。当然,学生的层次不同,结合的方式、深度与广度就应不同,思考的深度也应不同。对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应是“研中学,学中研”,就更须而且也更应是“研中思,思中研”,在研究这一实践中,甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事情了。正因为如此,“机械科学与工程研究生教学用书”就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用。

在此,还应讲一点。作为一个研究生,来读“机械科学与工程研究生教学用书”中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读。因为知识是基础,有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识。但是,对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力来体悟知识所

承载的思维、方法、原则与精神等内涵,体悟知识所蕴含的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华。《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是知识所承载的内涵,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语言、比书本、比具体的知识,重要多了。当然,要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可缺的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机存储装置。

“机械科学与工程研究生教学用书”是“研究生教学用书”的延续和发展。“研究生教学用书”自从1990年问世以来,到今年已经历了不平凡的18个春秋,已出版了用书80多种,有5种已被教育部研究生工作办公室列入向全国推荐的研究生教材。为了满足当前的研究生教育培养创新人才的要求,华中科技大学出版社在已出版的机械类研究生教学用书的基础上进一步拓展,在全国范围内约请一大批著名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地出版“机械科学与工程研究生教学用书”系列教材。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。这套“机械科学与工程研究生教学用书”更不会例外。本套书出版后,这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批评。当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声。”这就是我们的肺腑之言。

当然,在这里,还应该深深感谢“机械科学与工程研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及

其全体同志);深深感谢对本套研究生教材的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的“机械科学与工程研究生教学用书”。让我们共同努力,深入贯彻落实科学发展观,建设创新型国家,为培养数以千万计高级人才、特别是一大批拔尖创新人才、领导人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士
丛书主编

杨占子

2008, 9, 14

(中秋笔)

前 言

在人类社会生产发展的历史长河中,蒸汽机和电机的应用延伸了人的体力劳动,催生了工业革命;而以计算机技术为核心的信息技术的应用则延伸了人的脑力劳动,导致了一次新的工业革命,使人类社会迈进了信息时代。

在机械制造业的发展变革过程中,实施制造业信息化工程,将信息技术用于机械产品设计、制造、管理和服务的全过程,是构建现代数字化企业,提高企业的产品创新能力、市场应变能力和全球竞争能力的有力保证。而计算机辅助设计与制造(Computer Aided Design and Manufacturing, CAD/CAM)是制造业信息化工程实施中的关键支撑技术和不可缺少的信息化软件支撑系统。

CAD/CAM 技术是计算机科学和数字化信息技术在工程设计、机械制造等领域中最有影响的一项高新应用技术, CAD/CAM 系统的发展和运用使传统的产品设计方法与生产模式发生了深刻的变化,对制造业的生产模式和人才知识结构等产生了重大的影响,并由此奠定了制造业信息化工程的基础。经过几十年的发展和应用,不仅 CAD/CAM 本身已形成规模庞大的产业,而且为制造业带来了巨大的社会效益和经济效益。目前 CAD/CAM 技术被广泛应用于机械、电子、汽车、模具、航空航天、交通运输、工程建设等各个领域,它的应用水平已成为衡量一个国家技术发展水平、工业现代化的重要标志之一。

数字化设计制造技术的推广应用带动了一批企业的技术改造和技术更新, CAD/CAM 技术必将成为产品设计制造工作中不可缺少的工具。学习掌握它的技术原理及其相应软件系统的应用方法,并与专业知识结合以解决所面临的工程技术问题,对于 21 世纪的工程技术人员来说是十分重要的。目前 CAD/CAM 技术的发展方向是集成化、智能化、数字化、虚拟化与网络化。以 Internet 网络技术为特征的新一代企业信息化体系正在引导着 CAD/CAM 技术的应用和发展, CAD/CAM 的理论研究与应用开发成果日新月异。因此,及时系统地反映 CAD/CAM 技术原理与应用方法,满足当前 CAD/CAM 技术研究、教学和推广应用的需要,是作者编写本书的基本目的。

本书编写的指导思想是以 CAD/CAM 技术的共性理论为基础,以机械工程应用为背景,以新技术、新方法为重点,论述 CAD/CAM 的基本原理、关键技术和应用方法,力求做到以下几点。第一,反映当代 CAD/CAM 技术的新进展和新成果,讨论 CAD/CAM 学科发展的一些前沿问题。第二,融入作者先后完成的国家自然

科学基金项目、国家高技术研究发展计划项目、高等学校博士学科点专项科研基金项目、四川省重点科学技术研究项目以及在机械制造企业中推广应用 CAD/CAM 技术等课题的研究成果。第三,理论联系实际,力求给出解决具体工程问题的体系结构、技术方法和应用实例,以期对读者的学习、实践产生指导意义和帮助作用。

本书体系结构与内容安排如下。第 1 章讨论 CAD/CAM 技术基础问题,对 CAD/CAM 技术的总体概貌和相关技术基础理论进行概述,介绍 CAD/CAM 技术的发展历程和趋势。第 2 章讨论产品数字化造型技术,包括建模基础理论、几何造型、特征建模技术和数据接口标准等问题。第 3 章论述产品数字化分析、优化与仿真技术,包括有限元法基础、产品系统仿真技术、产品优化技术和数字样机技术及其应用。第 4 章在介绍现代产品设计理论与方法的基础上,着重讨论基于知识工程的计算机辅助产品设计与系统开发方法、关键技术及其基于通用平台的专业 CAD 系统开发方法。第 5 章重点论述数字化工艺设计技术,包括 CAPP 概述、交互式 CAPP 系统、CAPP 数据库技术、网络化 CAPP 技术及其开发实例、面向远程协同工艺设计的 CAPP 系统等。第 6 章讨论计算机辅助制造技术与应用,介绍 CAM 体系结构、数控(NC)编程技术、常见 NC 系统、数控加工过程仿真技术以及主流数控系统。第 7 章讨论产品数据管理技术与应用,介绍 PDM 技术概况,PDM 系统构成、实现技术、主流产品及其发展趋势。第 8 章讨论现代产品快速开发技术,结合快速响应工程,着重讨论虚拟环境技术、虚拟原型技术、反求工程和快速原型制造等技术问题。第 9 章讨论网络化协同开发技术,包括网络化产品协同开发策略与技术支撑平台设计、基于 Web 服务的远程 CAE 应用技术以及网络化产品协同制造系统共享管理技术。第 10 章讨论数字化企业技术,介绍数字化企业的特点与构成、现代集成制造技术与应用,以及制造业信息工程技术与系统等。

本书是作者多年来在四川大学制造科学与工程学院教学、科研成果的基础上编著而成的。其中,殷国富教授编写第 1 章和第 5 章;徐雷副教授编写第 2、第 4 和第 7 章;杨随先教授编写第 3、第 6 和第 10 章,并负责全书统稿工作;胡晓兵教授编写第 8 章;陈珂博士编写第 9 章。全书由殷国富教授和杨随先教授担任主编,由西安交通大学机械工程学院江平宇教授担任主审。在编写过程中我们参考了国内外许多学者、专家的论著和文献资料,谨此致谢。

由于 CAD/CAM 技术内容十分丰富,技术发展日新月异,因此书中内容难以反映这一技术领域的全貌,不妥之处在所难免,诚请指正。

作 者

2008 年 6 月于成都

目 录

第 1 章 CAD/CAM 技术基础	(1)
1.1 CAD/CAM 技术概述	(1)
1.2 CAD/CAM 技术的基本概念	(7)
1.3 CAD、CAE、CAPP、CAM 及其集成技术	(9)
1.4 CAD/CAM 系统的工作过程与主要任务	(16)
1.5 CAD/CAM 系统的硬件与软件	(19)
1.6 CAD/CAM 技术应用成效	(26)
1.7 CAD/CAM 技术的发展趋势	(27)
习题	(29)
第 2 章 产品数字化造型技术	(30)
2.1 产品模型与建模技术的基本概念	(30)
2.2 三维几何造型的理论基础	(31)
2.3 产品几何造型方法	(36)
2.4 三维 CAD 系统的几何核心	(42)
2.5 实体造型方法	(48)
2.6 参数化造型	(56)
2.7 参数化特征造型技术	(61)
2.8 产品数据交换标准与接口技术	(92)
习题	(97)
第 3 章 产品数字化分析、优化与仿真技术	(98)
3.1 CAE 技术构成、现状与发展趋势	(98)
3.2 有限元分析原理与方法	(104)
3.3 CAE 的应用——铸件凝固过程温度场数值模拟	(113)
3.4 产品系统仿真技术	(120)
3.5 产品优化设计技术	(127)
3.6 数字样机技术	(137)
3.7 数字化仿真实例——汽车多学科协同优化与仿真	(141)
习题	(144)

第4章 现代产品设计技术及其CAD应用软件开发方法	(145)
4.1 现代产品设计	(145)
4.2 基于知识的工程	(148)
4.3 基于知识的CAD系统关键技术	(153)
4.4 基于知识的CAD系统的开发	(154)
4.5 专业CAD软件开发方法	(158)
4.6 基于通用平台的CAD专业软件开发方法	(158)
4.7 基于SolidWorks的三维CAD软件开发方法	(162)
4.8 CAD软件开发流程与文档资料要求	(181)
习题	(184)
第5章 计算机辅助工艺设计技术	(185)
5.1 计算机辅助工艺设计技术概况	(185)
5.2 CAPP系统中的工艺决策与工序设计	(193)
5.3 网络化CAPP系统的体系结构	(200)
5.4 CAPP的工艺数据库技术	(203)
5.5 基于知识的CAPP系统实现技术	(207)
5.6 CAPP系统的流程管理与安全模型	(213)
5.7 CAPP系统开发与应用实例	(216)
5.8 面向远程协同工艺设计的CAPP系统	(220)
5.9 CAPP技术研究的发展趋势	(222)
习题	(223)
第6章 计算机辅助制造技术与应用	(224)
6.1 CAM技术概述	(224)
6.2 数控编程技术	(226)
6.3 几种常见的NC系统	(244)
6.4 数控加工过程仿真	(249)
6.5 FANUC的数控系统简介	(252)
6.6 SIEMENS数控系统简介	(254)
6.7 EdgeCAM智能数控编程系统	(257)
习题	(262)
第7章 产品数据管理技术与应用	(264)
7.1 PDM技术概述	(264)
7.2 PDM系统的主要功能	(269)

7.3	产品数据管理系统的实现技术	(275)
7.4	实施 PDM 的几项关键技术	(278)
7.5	PDM 技术的主流产品	(285)
7.6	机械工程图档管理(M-EDM)系统	(289)
7.7	PDM 技术的发展趋势	(299)
	习题	(303)
第 8 章	现代产品快速开发技术	(304)
8.1	快速响应工程与快速设计	(304)
8.2	虚拟产品开发与虚拟环境技术	(305)
8.3	产品虚拟原型技术	(320)
8.4	反求工程	(324)
8.5	快速原型制造技术	(343)
	习题	(354)
第 9 章	网络化产品协同开发技术	(356)
9.1	网络化产品协同开发技术及其发展概况	(356)
9.2	网络化产品协同开发策略与技术支持平台设计	(358)
9.3	基于 Web 服务的远程 CAE 应用技术	(371)
9.4	网络化产品协同制造系统共享管理技术	(387)
	习题	(400)
第 10 章	企业信息化系统技术的发展与应用	(401)
10.1	数字化企业的特点	(401)
10.2	数字化企业的组成	(402)
10.3	CIM 的概念与现代集成制造系统	(405)
10.4	CIMS 工程的设计与实施	(409)
10.5	制造业信息工程技术与系统	(413)
	习题	(419)
	参考文献	(420)

第 1 章 CAD/CAM 技术基础

计算机辅助设计与制造(Computer Aided Design and Manufacturing, CAD/CAM)技术是计算机科学、电子信息技术与现代设计制造技术相结合的产物,是当代先进的生产力,被国际公认为 20 世纪 90 年代的十大重要技术成就之一。CAD/CAM 技术的发展应用,将对制造业的生产模式和人才知识结构等产生重大的影响,它不仅改变了制造业的设计和制造各种产品的传统作业方式,而且有利于提高企业的创新能力、技术水平和市场竞争能力,也是企业进一步向现代集成制造、网络化制造、虚拟制造等先进生产模式发展的重要技术基础。学习掌握 CAD/CAM 技术和 CAD/CAM 软件系统应用方法是十分重要的。本章在分析制造业信息化技术概况的基础上,介绍 CAD/CAM 技术原理、系统组成、软硬件环境、集成应用和发展趋势等内容,是后续章节的基础。

1.1 CAD/CAM 技术概述

市场竞争是制造业永恒的话题。从一百多年前福特(Ford)汽车的生产线开始,为提高企业的整体效益,针对不同时期的竞争焦点,制造业产生和应用了不同的技术和管理模式(见表 1-1),现在集成化的信息技术、自动化技术、制造技术和管理技术起着越来越重要的作用。21 世纪制造业竞争的特点,将是以知识为基础的新产品竞争。用 CAD/CAM、数字化设计制造、虚拟制造等高新技术实现制造业信息化,是提高机械制造企业创新能力和市场竞争能力的一条有效途径。

表 1-1 制造业不同时期的竞争焦点、相应的技术特征和管理模式

时 期	制造业竞争的焦点	相应的技术、管理对策与特点
早 期	降低产品成本	流水线、标准化
20 世纪 50~ 70 年代	提高企业整体效率及产品质量	统计质量工艺控制 SPC(Statistic Process Control)、数控(NC)技术和 CAD/CAM……
20 世纪 80~ 90 年代初	全面满足用户在交货期(Time to Market)、质量(Quality)、价格(Cost)与服务(Service)等方面的要求,称为 TQCS	JIT(Just in Time), CAD/CAM, MRP II , CIMS…… 特点:信息集成

续表

时 期	制造业竞争的焦点	相应的技术、管理对策与特点
20 世纪 90 年代	在 TQCS 与可持续发展条件下快速开发质量、性价比好的新产品	CAD/CAPP/CAM/PDM、并行工程 CE (Concurrent Engineering)、敏捷制造 AM (Agile Manufacturing) 特点:过程集成
21 世纪	以知识为基础的新产品	现代集成制造系统 (Contemporary Integrated Manufacturing System)、虚拟制造 (Virtual Manufacturing)、网络化制造 (Network Manufacturing) 特点:企业集成,制造业信息化

1.1.1 CAD/CAM 技术发展历程

加工飞机上复杂型面零件的社会需求使世界上第一台数控机床于 1952 年在美国麻省理工学院研制成功并很快投入航空工业使用。数控机床的出现使 CAM 先于 CAD 诞生,当时的 CAM 侧重于数控加工自动编程。随后,CAD 与 CAM 分别因各自的技术特征得到研究、发展和应用,其发展历程可分为如下五个阶段。

(1) CAD/CAM 技术诞生时期。

20 世纪 60 年代,CAD 的主要技术特点是交互式二维绘图和三维线框模型,即利用解析几何的方法定义有关图素(如点、线、圆等),用来绘制或显示由直线、圆弧组成的图形。这一时期里,最有代表意义的事件是 1962 年美国学者 Ivan Sutherland 研究出了名为 Sketchpad 的交互式图形系统,能在屏幕上进行图形设计与修改,由此出现了 CAD 这一术语。1964 年美国通用汽车公司宣布了它们的 DAC-1 系统,1965 年洛克希德飞机公司推出了 CADAM 系统,以及贝尔电话公司宣布了 GRAPHIC-1 系统,等等。初期的图形系统只能表达几何信息,不能描述形体的拓扑关系和表面信息,所以无法实现 CAM、CAE。而在制造领域,1962 年在机床数控技术的基础上研制成功了第一台工业机器人,实现了物料搬运的自动化;1966 年出现了用大型通用计算机直接控制多台数控机床的 DNC 系统。

(2) CAD/CAM 技术理论发展与初步应用时期。

20 世纪 70 年代,CAD 的主要技术特征是自由曲线曲面生成算法和表面造型理论。汽车和飞机工业的发展促进了自由曲线曲面的研究,使 Bezier、B 样条法等成功算法应用于 CAD 系统。法国达索飞机制造公司推出的三维曲面造型系统 CATIA 实现了曲面加工的 CAD/CAM 一体化。随着存储管式显示器以其低廉的价格进入市场,CAD 系统的成本下降了许多,出现了将硬、软件放在一起成套出售给用户的 Turnkey 系统(交钥匙系统),并很快形成了 CAD/CAM 产业。虽然表面造型技术可解决 CAM 表面加工的问题,但不能表达形体的质量、重心等特征,