



普通高等学校“十四五”规划机械类专业精品教材

顾问 杨叔子 李培根

CAD/CAM 技术及应用

CAD/CAM JISHU JI YINGYONG

主编 肖艳秋 崔光珍 孙春亚



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校“十四五”规划机械类专业精品教材

CAD/CAM 技术及应用

主 编 肖艳秋 崔光珍 孙春亚

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)是计算机技术、信息技术、网络技术与设计制造理论及方法相结合的一门多学科综合性技术。其在制造业的广泛应用,极大地促进了制造模式的转变。CAD/CAM 技术的研究、开发与应用水平已经成为衡量一个国家工业现代化水平的重要标志之一。本书主要介绍 CAD/CAM 的基本概念、CAD/CAM 的发展历程、CAD/CAM 功能、CAD/CAM 技术的应用和 CAD/CAM 技术新的发展方向。

本书可作为普通高等学校本科及研究生机械、智能制造、机器人工程等专业“CAD/CAM 技术”课程的教材,也可供从事 CAD/CAM 技术应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

CAD/CAM 技术及应用/肖艳秋,崔光珍,孙春亚主编. —武汉:华中科技大学出版社,2022.3
ISBN 978-7-5680-7905-1

I. ①C… II. ①肖… ②崔… ③孙… III. ①计算机辅助设计-应用软件-高等学校-教材 ②计算机辅助制造-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TP391.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 038558 号

CAD/CAM 技术及应用
CAD/CAM Jishu ji Yingyong

肖艳秋 崔光珍 孙春亚 主编

策划编辑:万亚军

责任编辑:吴 晗

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉开心印印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.5

字 数:456 千字

版 次:2022 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:49.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

CAD/CAM(计算机辅助设计与制造)是制造工程技术与计算机信息技术结合发展起来的一门先进制造技术,它的应用使传统的产品设计与制造的内容和工作方式等都发生了根本性的变化,为制造业带来了巨大的经济效益和社会效益,被视为工业化与信息化深度融合的重要支撑技术。目前 CAD/CAM 技术广泛应用于机械、电子、航空航天、汽车、船舶、纺织、轻工及建筑等各个领域,它的研究与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。为了在新时代的竞争中取得领先地位,主动应对未来的 CAD/CAM 技术竞争,各国都提出了相应的制造业发展战略,如德国的“工业 4.0”战略,美国的“工业互联网”战略,我国的“中国制造 2025”战略等。这些发展战略均以新的信息技术对传统制造业进行变革,使制造变得智能、安全、高效、绿色。在此背景下,为主动应对新一轮科技革命和产业变革,支撑国家的“中国制造 2025”等一系列战略,结合“新工科”及“一流专业”建设目标,开展“CAD/CAM 技术”课程教材改革及优化具有重要意义。为此,本书结合当前 CAD/CAM 技术及趋势,并将“以学生为中心”的教学理念贯穿于编写过程,以适应当前学生培养形式,使学生了解掌握 CAD/CAM 前沿技术,培养其利用学科交叉解决问题的思维模式。

全书共 8 章。第 1 章主要对 CAD/CAM 的基本概念、CAD/CAM 的发展历程及其发展方向、CAD/CAM 系统的概念和软硬件进行了介绍。第 2 章对 CAD/CAM 系统中数据的管理方法、常用的数据结构、工程数据库及其应用等基础知识做了较全面的讲解。第 3 章对计算机图形显示及建模技术进行了介绍,如图形显示基本原理、图形的几何变换方法、图形的真实感处理方法、几何建模方法、图形剪裁技术和图形消隐技术等基础知识。第 4 章对计算机辅助产品设计技术进行了介绍,结合当前计算机辅助产品设计发展情况及作者科研经历,对专家系统和智能 CAD 在产品中的应用进行了说明,并结合三维建模软件 Creo 实例,进一步深化讲解了计算机辅助产品设计技术的理论与方法。第 5 章介绍计算机辅助工程(CAE)分析技术相关知识,包括有限元分析方法、优化设计理论、计算机仿真技术及相应的仿真软件等内容,为了方便教学,给出相应的 CAE 分析案例。第 6 章对计算机辅助工艺过程设计技术中的零件信息的描述和输入、派生式 CAPP 系统、创成式 CAPP 系统、CAPP 专家系统等内容做了较全面的介绍。第 7 章对计算机辅助制造、计算机辅助数控编程技术的基本原理、内容和步骤进行了介绍,主要包括数控机床选择及其坐标系确定、加工刀具补偿方法、数控铣削编程基本术语、数控程序结构以及常用数控指令等知识讲解。第 8 章对产品数据管理及集成技术的相关知识做了较全面的介绍,主要包括产品数据管理概念、PDM 系统的体系结构及功能、产品结构与管理、工作流与过程管理的概念及 PDM 在现代企业中的集成作用等相关内容。

本书由肖艳秋、崔光珍、孙春亚主编,王鹏鹏、郭志强、李安生参编。实验室研究生张伟

利、蔡一洲、路华、赵轩、杨军胜、周志成、张旭帮、安卓雅、禹建坤等参加了部分章节的文字及图表的校订工作。

本书的出版得到了河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(HNYJS2020KC09)的资助,在此表示衷心的感谢。在本书编写过程中,作者参考了其他版本同类书和相关技术标准、文献资料等,在此对其作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有疏虞之处,敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

2022 年 3 月

目 录

第 1 章 CAD/CAM 技术概述	(1)
1.1 CAD/CAM 技术	(1)
1.2 CAD/CAM 技术的应用与发展	(3)
1.3 CAD/CAM 系统	(11)
习题	(34)
第 2 章 CAD/CAM 系统常用数据结构	(35)
2.1 概述	(35)
2.2 常用数据结构	(37)
2.3 数据库系统及应用	(51)
习题	(55)
第 3 章 计算机图形显示及建模技术	(56)
3.1 计算机图形显示基本原理	(56)
3.2 图形元素生成的基本原理	(58)
3.3 几何建模方法	(79)
习题	(105)
第 4 章 计算机辅助产品设计	(106)
4.1 概述	(106)
4.2 产品设计过程分析	(110)
4.3 参数化与模块化设计	(116)
4.4 CAD 软件介绍(Creo)	(125)
4.5 三维建模实例——基于 Creo 的自上而下的管片拼装机组件设计	(130)
习题	(136)
第 5 章 计算机辅助工程分析	(137)
5.1 概述	(137)
5.2 有限元法	(138)
5.3 优化设计	(152)
5.4 计算机仿真	(160)
习题	(168)
第 6 章 计算机辅助工艺设计	(170)
6.1 计算机辅助工艺设计的概述	(170)
6.2 零件信息和计算机辅助工艺设计的步骤	(174)
6.3 派生式 CAPP 系统	(181)
6.4 创成式 CAPP 系统	(189)
6.5 CAPP 专家系统	(196)
习题	(205)

第 7 章 计算机辅助制造技术	(207)
7.1 计算机辅助制造概述	(207)
7.2 数控加工技术及数控机床	(208)
7.3 数控编程	(217)
7.4 智能制造	(243)
7.5 柔性制造	(245)
习题.....	(247)
第 8 章 产品数据管理及集成技术	(249)
8.1 产品数据管理概述	(249)
8.2 PDM 系统的体系结构与功能.....	(255)
8.3 产品结构与管理	(257)
8.4 工作流与过程管理	(260)
8.5 PDM 在现代企业中的集成应用.....	(262)
习题.....	(270)
参考文献	(271)

第 1 章 CAD/CAM 技术概述



本章要点

CAD/CAM 是计算机辅助设计/计算机辅助制造(computer aided design/computer aided manufacturing)的简称,是计算机技术、信息技术、网络技术与设计制造理论及方法相结合的一门多学科综合性技术。其核心是利用计算机高效快速地处理各种信息,进行产品的设计与制造,它彻底改变了传统的设计和制造模式,并广泛应用于制造业,极大地促进了制造模式的转变。CAD/CAM 技术的研究、开发与应用水平已经成为衡量一个国家工业现代化水平的重要标志之一。本章主要介绍 CAD/CAM 的基本概念、CAD/CAM 的发展历程以及 CAD/CAM 技术的基本概念和软硬件。

1.1 CAD/CAM 技术

1.1.1 CAD/CAM 技术的基本概念

1. 计算机辅助设计(CAD)

计算机辅助设计(computer aided design,CAD)是指以计算机图形学为基础,以计算机为工具,辅助设计人员完成产品的总体设计、机构仿真、工程分析、图形编辑等工作,帮助设计人员完成数值计算、处理实验数据,达到提高产品设计质量、缩短产品开发周期、降低产品成本的目的。CAD 系统的主要功能包括几何建模、装配设计、机构运动仿真、工程分析、优化设计、工程绘图和数据管理等。

2. 计算机辅助工艺设计(CAPP)

计算机辅助工艺设计(computer aided process planning,CAPP)是指在 CAD/CAM 系统中,根据产品设计阶段所给信息和产品制造工艺要求,人机交互或者自动地完成产品加工方法的选择和工艺过程的设计。CAPP 的功能主要包含:毛坯设计、加工方法选择、工艺路线制定、工序设计、刀夹具设计等。

3. 计算机辅助制造(CAM)

计算机辅助制造(computer aided manufacturing,CAM)是指数控(numerical control,NC)编程等生产准备过程,可以直接利用 CAD 模型进行 NC 程序自动编制。按照应用范围 CAM 分为广义 CAM 和狭义 CAM。广义 CAM 是指工程技术人员利用计算机辅助系统和工具,完成从生产准备到制造的整个活动的过程,包括生产作业计划、工艺规划、NC 自动编程、工装设计、生产过程控制、质量检测与控制等;而狭义 CAM 一般是指产品加工的 NC 程序编制,包括选择机床、选择刀具、加工参数设置、刀具路径规划、刀具轨迹仿真和 NC 代码生成等。

4. 计算机辅助工程(CAE)

计算机辅助工程(computer aided engineering,CAE)是以计算力学为基础,以计算机数据处理为手段的工程分析技术,为实现产品优化提供支持。CAE 的主要任务是对工程、产品和结构未

来的工作状态和运行行为进行模拟仿真,及时发现设计中的问题和缺陷,实现产品优化设计。

1.1.2 CAD/CAM 技术的特点

CAD/CAM 技术具有如下特点:

(1) 提高技术创新能力。将工程技术人员从大量烦琐、重复的劳动中解放出来,以集中精力进行创造性的劳动,有利于发挥技术人员的创造性。

(2) 增强企业的市场竞争力。有利于提高产品设计自动化、生产过程自动化的水平,最大限度地获得满足客户需求的产品,有利于企业提高应变能力和市场竞争力。

(3) 提高生产效率。减少设计、计算、制图、制表所需的时间,修改设计方便,数控编程效率高,可缩短产品设计、制造周期。

(4) 提高产品的质量。利用有限元分析和装配运动仿真技术,可以从多个产品设计方案中进行分析、比较,选出最佳方案,有利于实现设计方案的优化。同时,减少人为设计、加工误差,可提高产品的设计制造质量和可靠性。

(5) 有利于标准化。利用 CAD/CAM 系统进行产品设计制造,必须对相关数据进行整理、规范,以便于信息的描述、转换和传递,有利于实现产品的标准化、通用化和系列化。

(6) 为实现产品数据管理(product data management,PDM),进而为实现产品生命周期管理(product lifecycle management,PLM)奠定基础。CAD/CAM 一体化,使产品的设计、制造过程形成一个有机的整体,通过信息的集成,给企业在经济上、技术上带来巨大的综合效益。

1.1.3 CAD/CAM 与先进制造的关系

先进制造技术(advanced manufacturing technology,AMT)是衡量一个国家科技发展水平的重要标志,是当今世界经济和社会发展的重要推动力。制造技术的进步与发展催生并促进了 CAD/CAM 技术,而 CAD/CAM 技术广泛、深入的应用对制造技术也产生了巨大影响。CAD/CAM 技术是 20 世纪全球最杰出的工程技术成果之一。先进的设计与加工技术是先进制造技术的核心之一。作为先进制造技术的重要组成部分和制造业信息化的重要工具,CAD/CAM 在制造业中从产品工程设计、工程分析、工艺规划到产品加工和装配整个过程中占有重要的地位。图 1-1 所示为制造企业信息化基本结构框图,表明了 CAD/CAM 技术在企业信息化中的作用与地位。

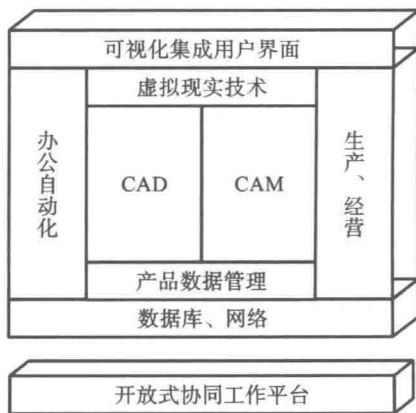


图 1-1 制造企业信息化基本结构

随着制造技术水平不断发展和提高,我国在先进制造技术发展方面已经具有了相当的规模和实力。但是在产品质量、品种、成本、效率和售后服务等方面与国外先进水平相比还有一定的差距,国际竞争力不强。目前,制造业仍然是我国的支柱产业,将先进的 CAD/CAM 技术应用于制造业,朝着全球化、数字化、网络化、智能化、集成化和绿色化等方向发展,提升我国制造业的国际竞争力,将有力推动我国从“制造业大国”向“制造业强国”转型,促进国民经济实现又好又快地发展。

1.2 CAD/CAM 技术的应用与发展

1.2.1 CAD/CAM 技术的发展历程

1. CAD 的发展历程

CAD 技术的发展与计算机技术、计算机图形技术的发展密切相关。20 世纪 50 年代后期,随着计算机图形学的诞生,利用阴极射线管(cathode ray tube, CRT)实现了图形的动态显示, CAD 技术处于准备和酝酿阶段,被动式的图形处理是此阶段 CAD 技术的特征。进入 20 世纪 60 年代,交互技术、分层存储符号的数据结构等新思想的提出为 CAD 技术的进一步发展和应用奠定了理论基础。人们主要用传统的三视图方法,即二维计算机绘图技术来表达零件。随着在计算机上绘图变为可行,采用线框造型来表示三维实体的 CAD 技术,即线框造型技术出现了。

进入 20 世纪 70 年代,为解决飞机及汽车制造中遇到的大量自由曲面问题,人们开发出了以表面模型为特征的自由曲面造型技术,推出了三维曲面造型系统,使得 CAD 技术得到蓬勃发展并进入应用时期。20 世纪 80 年代初,为了准确表达零件的各种集合和物理特性,人们提出了实体造型技术,开发了一批实体造型 CAD 软件系统。实体造型系统的出现,标志着 CAD 技术从单纯模仿工程图纸的绘图模式中解放出来,使产品开发手段有了质的飞跃,新产品开发速度大幅度提高。

20 世纪 80 年代中期, CAD 技术的研究又有了重大进展,人们提出了参数化实体造型技术。它的主要特点是:基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改。此时, CAD 技术进入迅猛发展时期, CAD 技术的应用也从大中企业向小企业扩展,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。

在 20 世纪 90 年代初期,人们对现有各种造型技术进行了充分的分析和比较,以参数化技术为蓝本,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。变量化技术既保持了参数化技术的原有优点,同时又克服了它的许多不足之处。变量化技术的成功应用,为 CAD 技术的发展提供了更大的空间和机遇。90 年代以后 CAD 技术进入开放式、标准化、集成化的发展时期,该阶段的 CAD 系统都具有良好的开放性,图形接口和功能也日趋标准化。微机加视窗操作系统与工作站加 Unix 操作系统在因特网环境下构成了 CAD 系统的主流工作平台。

进入 21 世纪后,伴随着计算机网络的普及,可视化、虚拟现实技术的应用与发展促使交互式三维实体建模实现了突破性的飞跃,产生了同步建模这一新技术。这种新技术在参数化、基于历史记录建模的基础上前进了一大步,同时与先前技术共存。同步建模技术实时检查产品模型当前的几何条件,并将它们与设计人员添加的参数和几何约束合并在一起,以便评估、构

建新的几何模型并对新模型进行编辑,无须重复全部历史记录。

2. CAPP 的发展历程

CAPP 是 20 世纪 60 年代后期出现并开始发展的一项新的技术,但其发展却大大落后于 CAD/CAM 软件系统。

世界上最早研究 CAPP 的国家是挪威,并于 1969 年完成了世界第一个 CAPP 系统——AUTOPROS。1976 年美国的国际计算机辅助制造公司所推出的 CAPP 系统——CAM-I'S Automated Process Planning 却是世界上最著名、应用最广泛的系统,成为 CAPP 系统发展的里程碑。随后,更多 CAPP 系统相继推出,进而出现了变异型 CAPP 和创成型 CAPP。随着 CAPP 系统的广泛应用,研究人员对 CAPP 的理论与方法进行了更加广泛、深入的研究。

20 世纪 80 年代末,为解决 CAPP 的自动化问题,人们探索了多种 CAPP 方法,开发了基于智能化和专家系统的 CAPP 系统,但片面强调工艺设计的自动化,即过分强调工艺决策、编制的自动化,忽略人在工艺决策中的作用和工艺工作的复杂性及个性化。到 20 世纪 90 年代中后期,人们重新衡量了 CAPP 软件在企业内应发挥的作用,逐步抛弃了传统 CAPP 的研究方法,开发重点从注重工艺过程的自动生成,转向为工艺设计人员提供软件工具,为企业的信息化建设提供服务。因此,CAPP 产品的研发开始活跃起来,CAPP 软件技术得到了迅速发展。

到 20 世纪 90 年代末,一些实用化的 CAPP 开始走向市场,但其开发方法和重点各不相同。有的 CAPP 系统在 CAD 图形平台的基础上开发,然后将生成的工艺数据传送到其他的数据库系统中;有的 CAPP 系统在某种特定的数据库系统上生成工艺数据,然后在 CAD 平台上生成工艺卡片;甚至有的 CAPP 系统是纯粹的工艺卡片的填写工具,其生成的工艺卡片是某种特定的文件。这些 CAPP 软件系统都为工艺人员提供了一定的服务与辅助功能。

现代 CAPP 系统基于网络、产品数据管理进行开发,面向企业信息化建设的网络化集成工艺设计平台将成为目前和今后 CAPP 研究开发的重点。我国对 CAPP 的研究始于 20 世纪 80 年代初,一些高等院校为提高科技创新意识,积极努力地投入到 CAPP 系统的开发中,开发出具有一定水准的 CAPP 系统,形成了中国 CAPP 系统的快速发展期。90 年代以来,随着计算机辅助生产国际学术会议的召开和《计算机辅助工艺规程设计(CAPP)导则》(JB/T 7701—1995)的颁布,我国 CAPP 水平开始有了进一步的发展并与国际接轨。时至今日,直接由二维或三维 CAD 设计模型获取工艺输入信息,基于知识库和数据库、关键环节采用交互式设计方式并提供参考工艺方案的 CAPP 工具系统蓬勃发展。此类系统在保持解决事务性、管理性工作优点的同时,在更高的层次上致力于加强 CAPP 系统的智能化工具能力,将 CAPP 技术与系统视为企业信息化集成软件中的一环,为 CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM 集成提供全面基础。

近年来,法国达索公司开发了数字企业精益制造交互式应用(digital enterprise lean manufacturing interactive application,DELMIA)软件产品,提供了当今业界可用的最全面、集成和协同的数字制造解决方案,通过以工艺为中心的技术,可定义、监测和控制各类生产系统。从单个的设备单元、生产线、工厂物流直到整个企业的生产过程,DELMIA 为企业用户提供了一套完整的数字化制造解决方案,将数字化制造分为工艺规划、工艺细化与验证、资源建模与仿真。

3. CAM 的发展历程

1952 年,美国麻省理工学院在世界上首次研制成功数控机床,并于 1955 年开发出了自动

编程工具系统——APT(automatically programmed tools),基本实现了 NC 程序编制自动化。APT 为第一代 CAM 系统,其处理方式是人工或辅助式计算数控刀路(包括编程目标与对象),其缺点是功能差、操作困难、专机专用。

随着曲面与实体 CAD 系统的出现,人们开发出了曲面 CAM 系统。其系统结构一般为 CAD/CAM 一体化系统,以零件的 CAD 模型为编程对象,自动生成刀路轨迹,使 NC 编程的自动化程度得到了大幅度提高。曲面 CAM 系统的基本特点是面向局部曲面的加工方式,表现为编程的难易程度与零件的复杂程度直接相关,而与产品的工艺特征、工艺复杂程度等没有直接关系。

目前,CAM 技术已经成为 CAX(CAX 指的是计算机辅助设计软件,即 CAD、CAM、CAE、CAPP、CAS、CAT、CAI 等各项技术的综合)体系的重要组成部分,可以直接在 CAD 系统上建立起来的参数化、全相关的三维几何模型上进行加工编程,生成正确的加工轨迹。典型的 CAM 系统有 UG、Creo、Cimatron、Mastercam 等。目前,以 Delcam 公司的 PowerMILL 和 WorkNC 为代表,采用面向工艺特征的处理方式,系统以工艺特征提取的自动化来实现 CAM 编程的自动化。当模型发生变化后,只要按原来的工艺路线重新计算,即可实现 CAM 的自动修改。

美国 UGS 公司于 2006 年发布了数字制造解决方案 Tecnomatix Production Management 系统。该系统是由多个领先的车间制造应用程序组成的,是制造行业内第一个把生产管理与整个 PLM 流程集成在一起的软件解决方案。每个解决方案都可以支持制造过程周期,包括从过程规划到详细设计再到生产执行。基于网络的软件工具可以使企业、工厂和供应商之间就制造过程信息进行通信和交流。Tecnomatix Production Management 弥补了产品设计与生产流程之间的差异,有效地扩展了 PLM 的价值,让制造商能够加快推出新产品的速度,促进精益制造,对流程进行持续改进。

4. CAE 的发展历程

CAE 技术利用计算机对产品进行性能与安全可靠性分析,并对其工作状态和运行行为进行模拟,及早发现设计缺陷,改进产品设计。CAE 技术的研究始于 20 世纪 50 年代中期,CAE 软件系统出现于 20 世纪 70 年代初期,到 80 年代中期,CAE 软件在可用性、可靠性和计算效率上基本成熟。90 年代是 CAE 技术成熟壮大阶段,这一时期的 CAE 软件一方面与 CAD 软件紧密结合,另一方面扩展自身的功能,并将有限元技术与实验技术有机地结合起来,开发了实验信号处理、实验与分析相关等分析能力。

近些年来,CAE 软件系统开发和商品化快速发展,其理论和算法日趋成熟,已成为航空、航天、机械、土木结构等领域工程和产品结构分析中必不可少的数值计算工具,同时也是分析连续过程各类问题的一种重要手段。其功能、性能、前后置处理能力、单元库、解法库、材料库,特别是用户界面和数据管理技术等方面都有了巨大的发展。

CAE 软件现已可以在超级并行机,分布式微机群,大、中、小、微各类计算机和各种操作系统平台上运行。目前国际上先进的 CAE 软件,已经可以对工程和产品进行静力学和动力学的线性与非线性分析,包括对各种单一和复杂组合结构的弹性、弹塑性、塑性、蠕变、膨胀、几何大变形、大应变、疲劳、断裂、损伤,以及多体弹塑性接触在内的变形与应力应变分析。国际上知名的 CAE 软件有 NASTRAN、ANSYS、ASKA、MARC、MODULEF、DYN-3D 等。

5. 我国的 CAD/CAM 技术的发展

我国的 CAD/CAM 技术起步于 20 世纪 70 年代,当时仅有少数大型企业和科研单位及部

分高校参加研究,进展速度很慢。20 世纪 80 年代,国家提供了大量资金开展 CAD/CAM 技术研究。一些工厂、研究所和高校在引进、消化吸收国外 CAD/CAM 系统的基础上,开发了不同的接口软件和前后置处理程序。随后根据不同行业的需要二次开发了一些典型零件、典型产品的软件,并且应用到了生产实际之中。第一汽车制造厂和第二汽车制造厂、天津内燃机研究所共同完成了“汽车计算机辅助设计和辅助制造”项目,该项目重点是汽车车身的 CAD/CAM 的开发及应用、汽车结构的有限元分析和内燃机的 CAD 技术。

到 20 世纪 90 年代初,我国 CAD/CAM 软件市场基本上被国外产品所垄断。在我国政府的积极支持和引导下,CAD/CAM 技术的开发和应用于 90 年代中后期取得了长足的发展。除对许多国外软件进行了汉化和二次开发以外,一些高校开始开发具有自主知识产权的软件,在 CAD/CAM 支撑和应用软件的开发上担任了极其重要的角色,推出了不少具有自主知识产权的 CAD/CAM 系统。流行的国产 CAD/CAM 软件有:CAXA 电子图板和 CAXAME 制造工程师、高华 CAD、开目 CAD、凯图 CAD、PANDA 软件、CADMIS 系统等。这些国产软件实现了参数化特征造型、曲面造型、数控加工、有限元分析的集成。在数控方面,南京航空航天大学的超人 CAD/CAM 和华中科技大学的 GHNC 均实现了复杂曲面的造型和数控代码的自动生成。

21 世纪企业竞争的焦点是产品的创新。我国制造业的整体水平与发达国家相差较大,要想缩小这一差距,应加强 CAD/CAM 及相关技术的研究,开发先进的软件产品;并在现有的基础上,深化和普及 CAD/CAM 技术的应用,提高新产品开发的能力,进军国际市场,使我国的企业和产品在激烈的世界经济竞争中占有一席之地。

1.2.2 CAD/CAM 技术的应用现状

随着科学技术的发展,CAD/CAM 技术日趋成熟和完善,已经广泛应用于工程技术、机械制造等技术含量密集的领域。机械制造是 CAD/CAM 技术应用最早,也是应用最广泛的领域。CAD/CAM 技术的发展使得其在建筑、电子、化工等领域也逐步得到应用。在 CAD/CAM 技术半个世纪的发展过程中,CAD 系统以其强大的冲击力,影响和改变着工业的各个方面,甚至社会的各个方面,使传统的产品技术、工程技术发生了深刻的变革;CAE 系统的应用解决了产品的设计分析问题,使设计人员在产品设计早期阶段就可对产品的设计及制造过程中的各种问题进行预测仿真,提高产品的性能、质量,节省大量资金;CAM 的应用解决了实际产品的生产、加工问题,提高了产品的制造质量。CAD、CAE、CAPP、CAM 技术的应用,极大地提高了产品质量,充分发挥了计算机及外围设备的能力,把计算机的高速度、准确性和大存储量与技术人员的思维能力、综合分析能力结合起来,从而大幅度地提高了生产效率,缩短了产品的研发周期,提高了设计和制造的质量,节约了原材料和能源,加速了产品的更新换代,提高了企业的竞争能力。

国外对 CAD/CAM 技术的研究非常重视,CAD/CAM 技术应用也非常广泛,形成了先进的现代设计和制造技术体系。国外的航空、航天、船舶、机床制造等工业部门都较早地应用了 CAD/CAM 技术。美国的波音飞机制造公司、法国 Dassault 飞机公司、麦道、克莱斯勒、宝马、奔驰等一大批知名企业都较早就应用 CAD/CAM 技术,可以说 CAD/CAM 技术的应用从大型的波音 747/777 飞机、火箭发动机、汽车到化妆品的包装盒,几乎涵盖了所有的制造业产品。如波音飞机公司应用 CAD/CAM 技术在波音 777 飞机上对全部零件进行了三维实体造型,设计了除发动机以外的全部机械零件,与传统设计和装配流程相比较,节省了 50% 的时间。汽

车工业水平代表着一个国家机械制造业发展的水平,一直是 CAD/CAM 技术应用的先锋和大户。早在 1993 年,福特汽车公司提出了 C3P(CAD/CAE/CAM/PDM)概念。国外的赛车、跑车、轿车、卡车、商用车、有轨电车、地铁列车、高速列车等各种车辆都应用 CAD/CAM 技术实现了数字化制造。

我国的 CAD/CAM 应用始于 20 世纪 70 年代,起步晚但发展迅速,已取得了良好的经济效益。到 90 年代中期 CAD 技术得到了普及,80%的企业实现了“甩图板”。少数大型企业,如一汽、二汽等,已建立起比较完整的 CAD/CAM 系统,其应用水平也接近国际先进水平。许多中小企业应用 CAD/CAM 技术在保证产品质量、提高劳动生产率等方面也取得了显著的经济效益。北京第一机床厂是国内推广应用 CAD/CAE/CAM 技术领先、成效显著的企业。近些年来,我国的一些飞机制造公司、汽车制造厂、国家重点实验室等单位完成了飞机关键零件、飞机吹风模型、高能加速器和正负电子对撞机关键部件、光学仪器用各类凸轮、汽车结构件模具等的数控加工。特别是利用 CAM 技术完成了波音飞机 737-700 垂直尾翼梁间肋铝合金结构件的数控加工,实现了高难度的薄壁结构件的数控加工技术,产品开发的周期比未采用 CAD/CAE/CAM 时平均缩短 32%,提高了设计效益,为产品抢占市场发挥了不可替代的作用。

随着市场竞争的日益激烈,用户对产品的质量、成本、上市时间提出了越来越高的要求。事实证明,CAD/CAM 技术是加快产品更新换代、增强企业竞争能力的有效手段,同时也是实施先进制造和 CIMS 的关键及核心技术。制造业应紧抓机遇,大力推广应用 CAD、CAE、CAPP、CAM 技术,彻底改造现有的开发、设计和生产状况,建立自己的产品数字化开发支持技术体系,使新产品的开发、设计、制造在市场竞争中处于有利的位置,以取得明显的经济效益和社会效益。CAD/CAM 技术应用效益的量化统计如表 1-1 所示。

表 1-1 CAD/CAM 技术应用效益

项目	量化值
降低设计成本	(15~30)%
缩短产品开发周期	(30~60)%
提高产品质量	2~5 倍
提高劳动生产率	(40~70)%
提高设备利用率	2~3 倍
减少加工过程	(30~60)%
降低人力成本	(5~20)%

1.2.3 CAD/CAM 技术的发展趋势

近年来,随着计算机技术的迅猛发展,CAD/CAM 技术得到不断研究、开发与广泛应用,计算机和网络赋予了 CAD/CAM 更新的内涵,对 CAD/CAM 技术的要求也越来越高,这进一步推动了 CAD/CAM 系统日新月异的发展。CAD/CAM 技术向着集成化、参数化、智能化、网络化、标准化、虚拟化和绿色化方向发展。

1. 集成化发展

CIMS(computer integrated manufacturing systems)以计算机网络和数据库为基础,利用信息技术(包括计算机技术、自动化技术、通信技术等)和现代管理技术将制造企业的经营、管

理、计划、产品设计、加工制造、销售及服务等全部生产活动集成起来,将各种局部自动化系统集成起来,将各种资源集成起来,将人、机系统集成起来,实现整个企业的信息集成,保证企业内的工作流、物质流和信息流畅通无阻,达到实现企业的全局优化。CIMS 集成主要包括人员集成、信息集成、功能集成、技术集成。现代制造企业积极实施 CIMS 等先进的制造模式,从而提高企业效益,提高企业市场竞争力。

国内外大量的经验表明,CAD 系统的效益往往不是从其本身,而是通过与 CAM 和 PPC (production planning and control)系统集成体现出来,CAM 系统如果没有 CAD 系统的支持,先进设备往往很难得到有效的利用。随着 CAD/CAM 技术不断进步,CAD、CAE、CAPP、CAM 等孤岛技术应用,很难发挥具有团队精神的并行设计模式的优点,而 PDM 系统提供了很好的集成平台。PDM 系统的基本功能是将产品整个生命周期内的数据,按照一定的数学模式加以定义、组织和管理,使产品数据在其整个生命周期内保持一致、最新、共享和安全。这是实现产品设计、制造与管理并行工程的基础,从根本上解决了各个环节数据交换和共享的问题。PDM 系统与 ERP 系统连接,可实现并行设计制造和并行异地设计制造。

并行工程是随着 CAD、CIMS 技术发展提出的一种新的系统工程方法,即并行地、集成地设计产品及其开发产品的过程。要求产品开发人员在设计阶段就考虑产品整个生命周期的所有要求,包括质量、成本、进度、用户要求等,以便更大幅度地提高产品开发效率及一次成功率。并行工程的关键是用并行设计方法代替串行设计方法。在并行工程运行模式下,设计人员之间可以相互进行通信,根据目标要求既可随时响应其他设计人员要求而修改自己的设计,也可要求其他设计人员响应自己的要求。通过协调机制,群体设计小组的多种设计工作可以并行协调地进行。

2. 参数化发展

参数化设计概念的提出和应用最早都是在工业设计领域解决构件匹配问题。在参数化设计系统中,设计人员根据工程关系和几何关系来指定设计要求,要满足这些设计要求,不仅需要尺寸或工程参数的初值,而且要在每次改变这些设计参数时来维护参数间的基本关系,即将参数分为两类:其一为各种尺寸值,称为可变参数;其二为几何元素间的各种连续几何信息,称为不变参数。参数化设计的本质是在可变参数的作用下,系统能够自动维护所有的不变参数。

参数化是实现机械设计自动化的前提和基础。一直以来参数化设计是 CAD 系统所追求的目标,参数化设计的应用能极大地提高机械设计效率和质量,对企业的经济效益与产品创新效率的提高有很大帮助。通过尺寸驱动,既能为用户提供设计对象的直观、准确的反馈,又能随时对设计对象加以修改。在先进的 CAD 软件中,设计过程中涉及的所有参数都可以当作变量,可以建立相互间的约束和关系式,增加程序逻辑。这些变量间的关系可以跨越 CAD 软件的不同模块,从而实现设计数据的全相关。

3. 智能化发展

随着世界制造业竞争的加剧,创新产品的开发已成为竞争的关键所在,而创新产品的竞争优势在于其所拥有的知识含量。基于知识的产品建模将专家的设计经验和设计过程的有关知识表示在产品信息模型中,为实现产品设计智能化、自动化提供有用的信息。因此,智能 CAD 是 CAD 发展的必然方向。当前各国对于制造业发展愈发重视,纷纷加快推动技术创新,促进制造业转型升级,智能制造可以缩短产品研制周期、降低资源能源消耗、降低运营成本、提高生产效率、提升产品质量,智能制造由此不断升温。科学技术的快速发展,使得人工智能技术被

广泛应用于生产制造中,智能制造技术也日趋成熟。智能制造(intelligent manufacturing, IM)源于人工智能的研究成果,是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统。该系统在制造过程中可以进行分析、推理、判断、构思和决策等智能活动,同时基于人与智能机器的合作,扩大、延伸并部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。智能制造更新了自动化制造的概念,使其向柔性化、智能化和高度集成化扩展。智能制造包括智能制造技术与智能制造系统(intelligent manufacturing system, IMT)。

智能制造技术是指利用计算机模拟制造专家的分析、判断、推理、构思和决策等智能活动,并将这些智能活动与智能机器有机融合,使其贯穿应用于制造企业的各个子系统(如经营决策、采购、产品设计、生产计划、制造、装配、质量保证和市场销售等)的先进制造技术。该技术能够实现整个制造企业经营运作的高度柔性化和集成化,取代或延伸制造环境中专家的部分脑力劳动,并对制造业专家的智能信息进行收集、存储、完善、共享、继承和发展,从而极大地提高生产效率。

智能制造系统是由部分或全部具有一定自主性和合作性的智能制造单元组成,在制造活动全过程中表现出相当智能行为的制造系统,其最主要的特征是在工作过程中对知识的获取、表达与使用。根据其知识来源,智能制造系统可分为两类:一是以专家系统为代表的非自主式制造系统,该类系统的知识由人类的制造知识总结归纳而来;二是建立在系统自学习、自进化与自组织基础上的自主式制造系统,该类系统可以在工作过程中不断自主学习完善与进化自有的知识,因而具有强大的适应性以及高度开放的创新能力。随着以神经网络、遗传算法与遗传编程为代表的计算机智能技术的发展,智能制造系统正逐步从非自主式智能制造系统向具有自学习、自进化、自组织特征与持续发展能力的自主式智能制造系统过渡发展。

4. 网络化发展

自20世纪90年代以来,计算机网络技术飞速发展,使独立的计算机能按照网络协议进行通信,实现资源共享。CAD/CAM技术日趋成熟,可应用于越来越大的项目,这类项目往往不是由一个人,而是由多个人、多个企业在多台计算机上协同完成,所以分布式计算机系统非常适用于CAD/CAM的作业方式。网络化可以充分发挥系统的总体优势,共享昂贵的设备,节省投资,借助现有的网络,用户可以用高性能的PC代替昂贵的工作站,不同设计人员可以在网络上方便地交换设计数据。基于CAD的创新设计通过网络与现代企业管理能力(ERP、PDM)的集成,已成为企业信息化的重点,它的集成不仅实现了产品CAD、零件CAPP、关键零部件的CAE、数控加工工件CAM的信息一体化、集成化与网络化。同时还实现了产品开发部门与管理部門的双向信息传输。

随着Web技术的不断发展,支持Web协同设计方案的CAD软件已经出现并趋于成熟。借助于互联网的跨地域、跨时空的沟通特性和近乎无限的接入能力,CAD软件可以直接利用互联网充分发挥团队协作能力。成熟的5G技术赋能于工业生产的网络化,工业领域使用的无线通信协议和传统通信行业相比,存在协议众多、标准缺失、兼容性差等弊端,制约了工业设备的全面互联互通。基于5G网络的工业移动专网具有大带宽、广连接、高可靠、低时延特性,同时能够实现私网部署、生产数据不外流的密闭性和安全性,成为支撑工业互联网的无线网络不二之选。将5G技术与工业PON、MEC(移动边缘计算技术)等相结合,能够降低工业场景下的协议转换和设备接入难度,提升工业互联网异构数据接入能力,有效解决设备互联的问题。

通过实现工业网络化可以将分散在不同地区的智力资源和生产设备资源迅速组合,建立

包括骨干核心单位和可能的参加者的动态联盟制造系统,以适应不同地区的现有智力资源和生产设备资源的迅速组合。建立动态联盟制造系统将成为全球化制造系统的发展趋势。

5. 标准化发展

随着社会、经济的发展,制造业对国民经济越来越重要。与制造业相关的标准也日益显示出巨大作用。如今,标准化与先进制造业在全球产业链中占据着重要的位置。与产品设计制造相关的 CAD/CAM 系统一般集成在一个异构的工作平台之上,只有依靠标准化技术才能解决各系统支持异构跨平台的环境问题。复杂机械产品的生产需要不同企业、部门分工协作来完成。产品信息在不同的地点、不同的计算机和不同的 CAD/CAM 系统中生成,造成同一产品的信息表达差异。产品信息在各系统之间的集成现在主要采用标准格式交换法,如 IGES (Initial Graphics Exchange Specification)标准、PDDI 标准、PDES 标准和 STEP(Standard for the Exchange of Product)标准等。但是在朝着集成化目标发展的过程中,尤其是在解决面向 CAD/CAE/CAPP/CAM、CIM、CE 等的集成(信息交换、语义集成、功能集成)问题方面,遇到了很大的困难。随着 CAD/CAM 技术的普及应用,为实现资源共享,便于信息交流,世界各国业界共同合作,推出了许多标准和规范,技术标准越来越成为产业竞争的制高点。对于先进制造业来说,经济效益更多地取决于技术创新和知识产权,技术标准逐渐成为专利技术追求的最高体现形式。在工业设计方面,面向应用的标准零部件库、标准化设计方法已成为 CAD/CAM 系统中的必备内容,且向合理化工程设计的应用方向发展。

6. 虚拟化发展

随着三维图形技术的发展,在计算机内部建立相应的三维实体模型能够更直观、更全面地反映设计意图。在三维模型的基础上可以进行装配、干涉检查、有限元分析、运动分析等高级的计算机辅助设计工作。虚拟设计是一种新兴的多学科交叉技术,其以虚拟现实技术为基础,以机械产品为对象,使设计人员能与多维的信息环境进行交互。利用虚拟设计技术可以极大地减少实物模型和样品的制作。虚拟设计系统是以 CAD 为基础,利用虚拟现实技术发展而来的一种新的设计系统,可分为增强的可视化系统和基于虚拟现实的 CAD 系统。

CAD/CAM 技术与 VR 技术的有机结合,能够快速地显示设计内容、设计对象的性能特性,以及设计对象与周围环境的关系,设计者可与虚拟设计系统进行自然的交互,灵活方便地修改设计,大大提高设计效果与质量。在大型工业项目中,将规划方案转换为虚拟场景,在虚拟场景中可以打破现实当中物理成本的限制,对各种设计思路进行模拟试验,从而保证方案的先进性和可靠性。再通过高精度的场景模型对已完成的设计方案进行全面的检查和评估,可以实现精确到细节的综合考量。同时,随着产品升级更新步伐的不断加快,产品本身的构造变得日益复杂,在将某一新技术应用于现有产品时,二维工程图和静态三维模型已无法形象地表达设计者的全部意图,利用 VR 技术以三维形式把产品的现实场景动态地演示出来,技术人员置身于尚无实物的设计概念中,借助 VR 设备感受新产品的合理性和操作的便捷性,从而全面评估新技术的稳定性和契合程度,避免了仓促使用某些新技术而带来的不可挽回的损失。虚拟现实技术对缩短产品开发周期、节省制造成本有着重要的意义,不少大公司,例如通用汽车公司、波音公司、奔驰公司、福特汽车公司等的产品设计中,都采用了这项先进技术。随着科技日新月异的发展,虚拟设计在产品的概念设计、装配设计、人机工程学等方面必将发挥更加重大的作用。

7. 绿色化发展

在当今世界,气候变化在全球范围内造成了规模空前的影响,极端天气给我们的日常生产