

# Jixie CAD/CAM Jishu yu Yingyong



高等教育机械大类“十三五”规划教材

## 机械 CAD/CAM 技术与应用

主编 ▲ 范淇元 覃羨烘



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>





高等教育机械大类“十三五”规划教材

# 机械 CAD/CAM 技术与应用

Jixie CAD/CAM  
Jishu yu Yingyong

▲主审 林颖

▲主编 范淇元 覃羨烘

▲副主编 李俏 黄永程 叶金虎



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉



## 内 容 简 介

本书从机械 CAD/CAM 技术的基本知识开始,对机械 CAD 技术、计算机辅助工程(CAE)分析技术、计算机辅助工艺过程设计(CAPP)技术及机械 CAM 技术的理论进行阐释。同时,对机械 CAD/CAM 技术在机械工程中的应用通过实例进行介绍,从而对机械 CAD/CAM 技术的了解和应用作了全面的分析。本书内容以由浅入深、循序渐进及通俗易懂的指导思想与原则组织编写。本书采取理论、技术应用与实训教学相结合的方式,参考机械 CAD/CAM 领域涉及的系统和方法,通过绘图、设计、分析、模拟测试及判断、优化解决实际问题。

机械 CAD/CAM 技术在机械、航空、电子、造船、汽车、石油、建筑、地质、测绘及轻工等行业得到了应用及深层次的推广。普及和推广这一新兴学科,促进我国科学技术的迅速发展,提高产品设计和制造水平,已势在必行。本书力争使广大读者对机械 CAD/CAM 技术的基本应用有一较全面的了解,为进一步学习机械 CAD/CAM 技术打下坚实的基础。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械 CAD/CAM 技术与应用/范洪元,覃羨烘主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.1  
高等教育机械大类“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5680-4946-7

I. ①机… II. ①范… ②覃… 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. ①TH122 ②TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 012699 号

机械 CAD/CAM 技术与应用  
Jixie CAD/CAM Jishu yu Yingyong

范洪元 覃羨烘 主编

策划编辑:彭中军

责任编辑:段亚萍

封面设计:原色设计

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)  
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.25

字 数:324千字

版 次:2019年1月第1版第1次印刷

定 价:39.00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

机械 CAD/CAM 技术在我国出现在 20 世纪 70 年代,现在已经在机械、航空、电子、船舶、汽车、石油、建筑、地质、测绘及轻工等行业得到了应用及深层次的推广。普及和推广应用这一新兴学科,促进我国科学技术的迅速发展,提高产品设计和制造水平,已势在必行。本书采取理论、技术应用与实训教学相结合的方式,参考当今机械 CAD/CAM 领域涉及的系统和方法,通过绘图、设计、分析、模拟测试及判断、优化解决实际问题,系统地阐述了机械 CAD/CAM 的基础理论、基本方法、关键技术及应用系统。

本书内容新颖,体系完整,系统性强,注重基本原理、方法和典型应用的介绍,并力求反映机械 CAD/CAM 技术最新的发展趋势。全书分为 11 章,本着由浅入深、循序渐进及通俗易懂的指导思想与原则,从机械 CAD/CAM 技术的基本介绍开始,对机械 CAD 技术、计算机辅助工程(CAE)分析技术、计算机辅助工艺过程设计(CAPP)技术及机械 CAM 技术的理论进行阐述,同时对机械 CAD/CAM 技术在机械工程中的应用通过实例进行说明,从而对机械 CAD/CAM 技术的了解和应用作了全面的分析,还对计算机辅助生产管理与控制及计算机辅助管理系统(PPMS)进行了介绍,最后讲解了企业智能制造(EMI)、虚拟制造(VM)、并行工程(CE)与计算机集成制造系统(CIMS)的相关内容。本书力争使广大读者对机械 CAD/CAM 技术的基本应用有一较全面的了解,为进一步学习机械 CAD/CAM 技术打下基础。每章后附有一定数量的思考题,方便广大读者自学。

本书由华南理工大学广州学院范淇元、广东理工学院覃羨烘任主编并负责全书的统稿及修改,广东理工学院李俏、黄永程及罗定职业技术学院叶金虎担任副主编。本书第 10、11 章由范淇元编写,第 3、4、9 章由覃羨烘编写,第 2、5、8 章由李俏编写,第 1、6、7 章由黄永程、叶金虎编写。本书引用了一些文献中的内容,在此编者谨对这些被引用的文献的作者表示衷心的感谢!

本书由华南理工大学林颖教授主审。

本书可作为高等学校机械制造、机械设计、机电工程专业本科学生的教材,也可供相关专业的本科生、研究生以及工程技术人员参考。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有不足和疏漏之处,敬请广大师生及读者批评指正,以便再版时完善。

编者

2019 年 1 月

第 1 章 机械 CAD/CAM 技术概述	1
1.1 机械 CAD/CAM 基本概念及发展史	1
1.2 机械 CAD/CAM 系统的作用与组成	5
1.3 机械 CAD/CAM 系统工作流程	8
1.4 机械 CAD/CAM 技术应用现状及发展趋势	10
第 2 章 机械 CAD 技术概述	13
2.1 设计过程分析和设计类型	13
2.2 CAD 技术发展趋势——先进设计技术	15
第 3 章 图形处理基础	17
3.1 图形处理概述	17
3.2 图形学的数学基础	18
3.3 二维图形变换	20
3.4 三维图形的几何变换	26
第 4 章 机械 CAD 技术在机械工程中的应用	31
4.1 常用机械 CAD 应用软件介绍	31
4.2 机械产品的 CAD 技术应用实例	36
4.3 零件设计在 SolidWorks 中的实现	46
4.4 装配设计在 SolidWorks 中的实现	49
第 5 章 计算机辅助工程分析技术	56
5.1 CAD 模型的基本分析处理方法	56
5.2 有限元分析方法	58
5.3 优化设计方法	66
5.4 优化设计的一般过程	74
5.5 可靠性设计方法	75
第 6 章 机械 CAM 技术概述	80
6.1 机械制造系统与 CAM 的介绍	80
6.2 先进制造技术	82
第 7 章 计算机辅助工艺过程设计技术	88
7.1 计算机辅助工艺过程设计概述	88
7.2 工艺过程设计的基础知识	89
7.3 CAPP 技术的发展概况及系统的工作原理	91
7.4 CAPP 技术在机械工程中的应用	95
第 8 章 数控加工技术	97
8.1 数控加工及编程	97

8.2	数控加工工艺基础	104
8.3	数控程序的编制方法	114
8.4	数控加工功能及自动编程	125
<b>第9章 机械 CAM 技术在机械工程中的应用</b>		138
9.1	常用机械 CAM 应用软件介绍	138
9.2	零件加工在 UG 中的实现	139
9.3	零件加工在 MasterCAM X 中的实现	149
<b>第10章 计算机辅助生产管理与控制</b>		167
10.1	计算机辅助生产概述	167
10.2	CAPMS 的组成	167
10.3	制造资源计划 MRP II	169
10.4	生产管理技术的发展趋势	173
<b>第11章 先进制造生产模式</b>		176
11.1	制造业生产模式的演变	176
11.2	先进制造生产模式	180
<b>参考文献</b>		187

Computer aided design and manufacturing 是一门多学科综合性技术,是当今先进的生产力,被国际公认为是现代工程技术领域重要的科技成就之一。它的出现改变了传统的产品制造方式,并对制造业的生产模式和人才知识结构等产生了重大影响。

CAD/CAM 系统包括计算机辅助设计(computer aided design, CAD)、计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)、计算机辅助工艺过程设计(computer aided process planning, CAPP)和计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)等技术。计算机技术在设计制造中的应用已经从往日的计算、绘图、NC 加工发展到当今的三维建模、优化设计、计算机辅助工程分析和虚拟设计、计算机辅助工艺过程设计 CAPP、CAD/CAM 一体化自动数控编程、柔性制造系统 FMS、计算机集成制造系统 CIMS、计算机辅助生产管理与控制、智能制造与虚拟制造等技术。

一方面,随着人类的不断进步,人类的需求不断产生变化,推动了制造业的不断发展,促使机械 CAD/CAM 技术的产生和进步。另一方面,人类科学技术的每次革命,必然引起与之密切相关的制造技术的不断发展。

## 1.1 机械 CAD/CAM 基本概念及发展史

自 1946 年世界上第一台电子计算机在美国问世后,人们就不断地将计算机技术引入机械设计、制造领域。正是由于计算机技术的发展,设计和生产的方法都在发生着显著变化。以前一直只能靠手工完成的简单作业,逐渐通过计算机实现了高效化和高精度化,并逐渐出现了计算机辅助设计、计算机辅助工艺过程设计及计算机辅助制造等一系列概念。这些新技术的发展和应用,使得传统的产品设计方法与生产组织运作模式发生了深刻的变化,给古老的工程设计和制造学科增添了新的动力,促进了企业生产力的提升,产生了巨大的社会和经济效益,而 CAD/CAM 技术正是先进制造体系的重要组成部分。

### 1. CAD/CAM 的基本概念

CAD——computer aided design 以计算机为辅助手段完成整个产品的设计过程。广义的 CAD 包括设计与分析两个方面。在机械设计和制造领域,它是指用计算机来辅助一项机械产品设计的建立、修改、分析和优化,即整个机械产品设计工作先由设计人员构思,再利用计算机进行产品的二维、三维数学模型建立,然后根据产品的功能和性能要求进行产品的相关计算和分析、各种设计方案比较以及优化设计,以获得满意的机械产品设计结果。CAD 系统一般包括以下几个方面的功能:草图设计、零件设计、工程分析、装配设计、产品数据交换等。CAD 系统功能模型如图 1-1 所示。

CAM——computer aided manufacturing 通过计算机与生产设备直接或间接的联系,进行产品制造的规划、设计、管理和控制产品的生产制造过程。它有狭义和广义两种定义。狭义

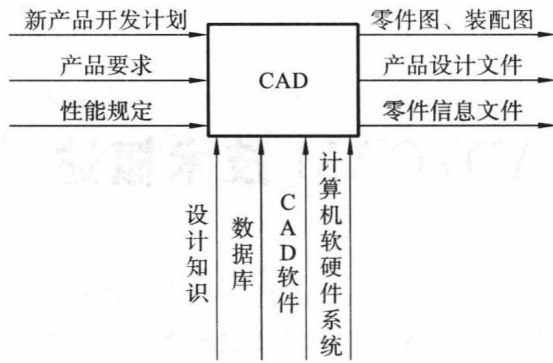


图 1-1 CAD 系统功能模型

CAM: 数控编程与数控加工, 包括刀具路径规划、刀位文件生成、刀具轨迹仿真及数控代码生成等。广义 CAM: 利用计算机来代替人去完成制造以及与制造系统有关的工作, 除数控外还包括计算机辅助工艺过程设计、制造过程仿真(MPS)、自动化装配、车间生产计划、制造过程检测、故障检测、产品装配等。通常认为, CAM 可以定义为能通过直接或间接的与工厂生产资源接口的计算机来完成制造系统的计划、操作工序控制和管理工作的计算机系统。

机械 CAD/CAM 指的是以计算机作为主要技术手段, 处理各种数字信息与图形信息, 辅助完成产品设计和制造中的各项活动。从计算机科学的角度看, 设计与制造的过程是一个关于产品的信息产生、处理、交换和管理的过程。人们利用计算机作为主要技术手段, 对产品从构思到投放市场的整个过程中的信息进行分析和处理, 生成和运用各种数字信息和图形信息, 进行产品的设计与制造。CAD/CAM 技术不是传统设计、制造流程方法的简单映像, 也不是局限于个别步骤或环节中部分地使用计算机作为工具, 而是将计算机科学与工程领域的专业技术以及人的智慧和经验以现代的科学方法为指导结合起来, 在设计、制造的全过程中各尽所长, 尽可能地利用计算机系统来完成那些重复性高、劳动量大、计算复杂以及单纯靠人工难以完成的工作, 辅助而非代替工程技术人员完成整个过程, 以获得最佳效果。CAD/CAM 系统以计算机硬件、软件为支持环境, 通过各个功能模块(分系统)实现对产品的描述、计算、分析、优化、绘图、工艺规程设计、仿真以及 NC 加工。而广义 CAD/CAM 集成系统还应包括生产规划、管理、质量控制等方面。

20 世纪 50 年代, 美国麻省理工学院(MIT)首次成功研制出了数控机床, 通过数控程序可对零件进行加工。后来, MIT 又成功研制出了名为“旋风”的计算机, 该计算机采用阴极射线管(CRT)作为图形终端, 加之后来研制成功的光笔, 为交互式计算机图形学奠定了基础, 也为 CAD/CAM 技术的出现和发展铺平了道路。在计算机图形终端上直接描述零件, 标志着 CAD 的开始。MIT 用计算机制作数控纸带, 实现 NC 编程的自动化, 标志着 CAM 的开始。整个 20 世纪 50 年代, CAD/CAM 技术都处在酝酿、准备的发展初期。

1962 年, 美国麻省理工学院的研究生 I. E. Sutherland 发表了《人机对话图形通信系统》的论文, 首次提出了计算机图形学、交互式技术等理论和概念, 并研制出 Sketchpad 系统, 第一次实现了人机交互的设计方法, 使用户可以在屏幕上进行图形的设计与修改, 从而为交互式计算机图形学理论及 CAD 技术奠定了基础。此后, 随着交互式计算机图形显示技术和 CAD/CAM 技术的迅速发展, 美国许多大公司都认识到了这一技术的先进性和重要性, 看到了它的应用前景, 纷纷投以巨资, 研制和开发了一些早期的 CAD 系统。例如, IBM 公司开发出具有绘图、数控编程和强度分析等功能的基于大型计算机的 SLT/MST 系统; 1964 年, 美国通用汽车公司研制了用于汽车设计的 DAC-1 系统; 1965 年, 美国洛克希德飞机公司推出了 CAD/CAM 系统; 贝

尔电话公司推出了 GRAPHIC-1 系统等。在制造领域,1962 年,在数控技术的基础上研制成功了世界上第一台机器人,实现了物料搬运自动化;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,初步形成了 CAD/CAM 产业。

20 世纪 70 年代,交互式计算机图形学及计算机绘图技术日趋成熟,并得到了广泛的应用。随着计算机硬件的发展,以小型机、超小型机为主机的通用 CAD 系统,以及针对某些特定问题的专用 CAD 系统开始进入市场。这些 CAD 系统大多以 16 位的小型机为主机,配置图形输入/输出设备,如绘图机等其他外围设备,与相应的应用软件进行配套,形成了所谓的交钥匙系统(turnkey system)。在此期间,三维几何造型软件也发展起来了,出现了一些面向中小企业的 CAD/CAM 商品软件系统。在制造方面,美国辛辛那提公司研制了一条柔性制造系统,将 CAD/CAM 技术推向了一个新阶段。受到计算机硬件的限制,该技术中的软件只是二维绘图系统及三维线框系统,所能解决的问题也只是一些比较简单的问题。

20 世纪 80 年代,CAD/CAM 技术及应用系统得到了迅速的发展,促进这一发展的因素有很多,主要是计算机硬件性能的大幅度提高,32 位字长的工作站及计算机的性能已达到甚至超过了过去的小型机及中型机;计算机外围设备(如彩色高分辨率的图形显示器、大型数字化仪、大型自动绘图机、彩色打印机等)性能大幅度提高,而且品种繁多,已经形成了系列产品;计算机网络技术得到广泛应用,为将 CAD/CAM 技术推向更高水平提供了必要的条件。此外,企业界已普遍认识到 CAD/CAM 技术对企业的生产和发展具有巨大促进作用,在 CAD/CAM 软件功能方面也对销售商提出了更高的要求,需要将数据库、有限元分析优化及网络技术应用于 CAD/CAM 系统中,使 CAD/CAM 不仅能够绘制工程图,而且能够进行三维造型、自由曲面设计、有限元分析、机构及机器人分析与仿真、注塑模设计制造等各种工程应用。与此同时,还出现和发展了与产品设计制造过程相关的计算机辅助技术,如计算机辅助工艺过程设计、计算机辅助质量控制(CAQ)等。

20 世纪 80 年代后期,在各种计算机辅助技术的基础上,人们为了解决“信息孤岛”问题,开始强调信息集成,出现了计算机集成制造系统,将 CAD/CAM 技术推向了一个更高的层次。

20 世纪 90 年代,CAD/CAM 技术已走出了它的初级阶段,进一步向标准化、集成化、智能化及自动化方向发展。为了实现系统集成,更加强调信息集成和资源共享,强调产品生产与组织管理的自动化,从而出现了数据标准和数据交换问题,随之出现了产品数据管理(PDM)软件系统。在这个时期,国外许多 CAD/CAM 软件系统更趋于成熟,商品化程度大幅度提高,如美国洛克希德飞机公司研制的 CAD/CAM 系统、法国 Dassault 公司研制开发的 CATIA 系统、法国 Mhtra Datuviston 公司开发的 EUCLro 系统、美国 SDRC 公司开发的 I-DEAS 系统、美国 PTC 公司推出的 Pro/E 系统等。这些系统大都运行在 IBM、DEC、Sun、SGI 等大中型机及工作站上。

进入 21 世纪,CAD/CAM 技术更加注重其在工程中的实际运用,把系统集成的焦点集中在新的设计与制造理念上,如基于知识工程的 CAD/CAM 技术、面向制造与装配的 CAD/CAM 技术等,使得 CAD/CAM 技术更贴近工程实际和工程技术人员的需要。同时,CAD/CAM 技术一方面与 CAE/CAPP 更紧密地集成,另一方面向逆向工程、快速成型等技术延伸,使得 CAD/CAM 技术在机械行业中的地位日趋巩固。

## 2. CAD 的发展

CAD 技术的发展和形成至今有 50 多年的历史,自 20 世纪 60 年代在美国诞生了第一个计算机绘图系统,开始出现具有简单绘图输出功能的被动式的计算机辅助设计技术,即 CAD 技

术。到目前,CAD的发展经历了四次技术革命。

第一次 CAD 技术革命——曲面造型系统。在 20 世纪 60 年代出现的三维 CAD 系统只是极为简单的线框式系统。它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。进入 20 世纪 70 年代,只能采用多截面视图、特征纬线的方式来近似表达所涉及的自由曲面。随着计算机的发展,当三维曲面造型系统出现时,标志着计算机辅助设计技术从单纯模仿工程图纸的三视图模式中解放出来,首次实现以计算机完整描述产品零件的主要信息,促使了第一次 CAD 技术革命的发生。

第二次 CAD 技术革命——实体造型技术。从 20 世纪 70 年代末到 20 世纪 80 年代初,随着计算机技术的前进,同时在 CAD 技术方面也进行了许多开拓,1979 年世界上出现了第一个完全基于实体造型技术的大型 CAD 软件——I-DEAS。由于实体造型技术能够精确表达零件的全部属性,在理论上有助于 CAD 的模型表达,给设计带来了惊人的方便性。它代表着未来 CAD 技术的发展方向。

第三次 CAD 技术革命——参数化技术。随着实体造型技术逐渐普及,CAD 技术的研究又有了重大进展。在 20 世纪 80 年代中期,人们提出了参数化实体造型的方法。进入 20 世纪 90 年代,参数化技术变得比较成熟起来,充分体现出其在许多通用件、零部件设计上存在的简便易行的优势。

第四次 CAD 技术革命——变量化技术。计算机技术的不断成熟使得现在的 CAD 技术和系统都具有良好的开放性,图形接口、图形功能日趋标准化。在 CAD 系统中,综合应用正文、图形、图像、语言等多媒体技术和人工智能、专家系统等技术大大提高了自动化设计的程度,出现了智能 CAD 新学科。智能 CAD 把工程数据库及其管理系统、知识库及其专家系统、拟人化用户接口管理系统集于一体。在 CAD 发展历史中可以看到其技术一直处于不断的发展与探索之中,促使了 CAD 技术的繁荣。

目前,CAD 技术仍在不断发展,未来的 CAD 技术将为产品设计提供一个综合性的环境支持系统。它能全面支持异地的、数字化的设计,可采用不同的设计哲理与方法来工作。

### 3. CAM 的发展

虽然从实际生产角度来看 CAD 是整个生产过程的第一步,但是在探究 CAD/CAM 发展时无疑应该从 CAM 技术开始,因为 CAD/CAM 的发展历史正是从 CAM 开始的。

CAM 技术从产生发展到现在,无论是在硬件平台,还是在系统结构上,CAM 在其功能和特点上都发生了较大的变化。从 CAM 的发展历程看,CAM 在其基本处理方式与目标对象上可分为两个主要发展阶段。

第一阶段的 CAM:APT。20 世纪 60 年代 CAM 以大型机为主,在专业系统上开发编程机(如 FANUC、Siemens 编程机)及部分编程软件,系统结构为专机形式,基本的处理方式是以人工或计算机辅助式直接计算数控刀路为主,而编程目标与对象也都直接是数控刀路。因此,其缺点是功能相对比较差,而且操作困难,只能专机专用。

第二阶段的 CAM:曲面 CAM 系统。在第一阶段缺陷的基础上,人们又不断完善,创造出了曲面 CAM 系统。系统结构一般是 CAD/CAM 混合系统,较好地利用了 CAD 模型,以几何信息作为最终的结果,自动生成加工刀路。在此基础上,自动化、智能化程度取得了较大幅度的提高,具有代表性的是 UG、DUCT、Cimatron、MasterCAM 等。其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的关系。

科技不断发展,因此 CAM 技术也是一个不断发展的过程。随着 CAM 技术的提高,其自动化、智能化水平也不断提高。由于第二阶段的 CAM 存在一定的缺陷性,人们正在酝酿最新一代的 CAM,可以认为是第三阶段的 CAM:不仅可继承并智能化判断工艺特征,而且具有模型对比、残余模型分析与判断功能,使刀具路径更优化,效率更高。同时面向整体模型的形式也具有对工件包括夹具的防过切、防碰撞修理功能,提高操作的安全性,更符合高速加工的工艺要求,并开放工艺相关联的工艺库、知识库、材料库和刀具库,使工艺知识积累、学习、运用成为可能。

## 1.2 机械 CAD/CAM 系统的作用与组成

### 1. 系统的作用

CAD/CAM 系统需要对产品设计、制造全过程的信息进行处理,包括设计、制造中的任务的规划、方案的设计、结构设计、数值计算、设计分析、绘图、工程数据库的管理、工艺设计、加工仿真以及生产加工制造等各个方面。因此,CAD/CAM 系统可完成的任务可分为以下几个主要方面。

#### 1) 零件造型

CAD/CAM 系统能够进行实体造型和曲面造型,且具有定义和生成基本体素(如立方体、圆柱体、球体、锥体、环状体等)的能力,设计人员在其支持下可以根据自己的设想将零件从计算机中逐步“制作”出来,这就是所谓的零件造型。零件造型能够描述基本几何实体(如大小)及实体间的关系(如几何信息),能够进行图形、图像的技术处理(如着色、渲染等)。零件造型是 CAD/CAM 系统的核心,它为产品的设计、制造提供基本数据和原始信息。

#### 2) 计算分析

CAD/CAM 系统能根据三维模型计算相应物体的几何特征(如体积、表面积、质量、重心位置、转动惯量等)和物理特征(如应力、温度、位移等)。如图形处理中变换矩阵的运算,几何造型中体素之间的交、并、差运算,工艺规程设计中工序尺寸、工艺参数的计算,结构分析中应力、温度、位移等物理量的计算等,为系统进行工程分析和数值计算提供必要的基本参数。因此,不仅要求 CAD/CAM 系统对各类计算分析的算法正确、全面,而且数据计算量大,要有较高的计算精度。

#### 3) 工程绘图

工程绘图是 CAD 系统的重要环节,是产品最终结果的表达方式。CAD/CAM 系统有处理二维图形的能力,包括基本图元的生成、标注尺寸、图形编辑(比例变换、平移、复制、删除等)以及显示控制、附加技术条件等功能,保证生成符合生产实际要求也符合国家标准工程图。

除此之外,系统还应具备从几何造型的三维图形直接向二维图形转换的功能。根据三维零件图和装配图造型自动生成三视图、投影图、辅助图、剖面图和局部视图,并能自动标注尺寸。工程图与零件造型密切相关。

#### 4) 结构分析

CAD/CAM 系统中结构分析常用的方法是有限元法。这是一种数值近似解的方法,用来解决结构形状比较复杂的零件的静态、动态特性计算,强度、振动、热变形、磁场、温度场强度、应力分布状态等计算分析。在机械设计中,尤其是复杂机构的设计,结构分析非常重要,它直接关系到一个机械产品是否能够满足用户的要求,是否能够保证其生产使用寿命,是否能够保证用

户安全使用而不出事故。因此,结构分析非常重要。

### 5) 优化设计

CAD/CAM 系统应具有优化求解的功能,也就是在某些条件的限制下,使产品或工程设计中的预定指标达到最优。优化设计包括总体方案的优化、产品零件结构的优化、工艺参数的优化等。优化设计是现代设计方法学中的一个重要的组成部分,也是 CAD/CAM 系统的一个主要任务。

### 6) 计算机辅助工艺过程设计

设计的目的是加工制造,而工艺设计是为产品的加工制造提供指导性的文件。因此 CAPP 是 CAD 与 CAM 的中间环节。CAPP 系统应根据建模后生成的产品信息及制造要求,人机交互或自动决策加工该产品所采用的加工方法、加工步骤、加工设备及加工参数。CAPP 的设计结果一方面能被生产实际应用,生成工艺卡片文件,另一方面能直接输出信息,为 CAM 中的 NC 自动编程系统接收、识别,直接转换为刀位文件。CAPP 的功能模型如图 1-2 所示。

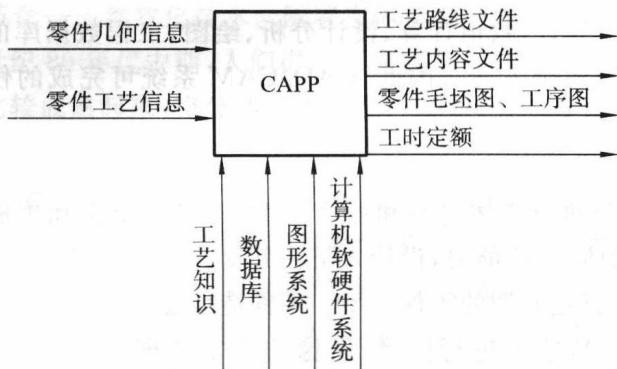


图 1-2 CAPP 功能模块

### 7) 计算机辅助 NC 自动编程

在分析零件图和制定出零件的数控加工方案之后,采用专门的数控加工语言(如 APT 语言)对加工路径、加工参数、刀具参数等进行描述,然后,计算机对数控程序进行分析处理并生成 NC 代码,最后输入数控系统控制加工。

### 8) 模拟仿真

能进行加工轨迹仿真、机构运动学仿真、运动轨迹干涉检查以及工件、机床、刀具、夹具的碰撞、干涉检验等,以便预测产品的性能,模拟产品的制造过程和可制造性,避免损坏,减少制造投资。

### 9) 工程数据管理、信息传输与交换

由于 CAD/CAM 系统中数据量大、种类繁多,又不是孤立的系统,因此 CAD/CAM 系统能提供有效的管理手段,支持工程设计与制造全过程的信息传输与交换。随着并行作业方式的推广应用,还存在着几个设计者或工作小组之间的信息交换问题,因此,CAD/CAM 系统具备良好的信息传输管理功能和信息交换功能。目前,CAD/CAM 系统中多采用 PDM(product data management)系统或工程数据库系统作为统一的数据管理环境,实现各种工程数据的管理。

### 10) 特征造型

传统的几何造型仅从几何的角度定义零件的形状。它只有零件的几何尺寸,没有加工、制造、管理需要的信息,因而给计算机辅助制造带来不便。

特征造型技术是几何造型技术的自然延伸,它是从工程的角度,对形体的各个组成部分及

其特征进行定义,使所描述的形体信息更具有工程意义。通过特征造型,可定义零件的形状特征(具有一定工程意义的形状)、精度特征(尺寸公差、表面精度等)、材料特征和其他工艺特征(材料类型、材料性能、表面处理、工艺要求等),从而为有关设计和制造过程的各个环节提供充分的信息。特征造型是 CAD/CAM 技术发展的一个里程碑。

## 2. 系统的组成

### 1) 系统运行硬件环境

CAD/CAM 硬件系统主要包括主机、外存储器、输入输出设备及其他通信接口,实现对 CAD/CAM 软件系统的产品设计、三维建模、数控加工程序编制以及输入与输出等的支持。

#### (1) 主机。

主机是主处理计算机。它是 CAD/CAM 系统的中心。目前,主机一般采用小型机或超级小型机、超级微机及个人微机三个档次。选用何种机型,要视产品的生产规模、复杂程度、设计工作量大小等情况而定。

①小型机或超级小型机系统——这种系统采用小型机或超级小型机为主机,利用分时处理原理,一台主机带几个至几十个图形终端的 CAD/CAM 系统。它的优点是资源共享较多;缺点是投资大,主机坏了则整个系统就处于瘫痪状态。一般使用于大、中型设计部分。这类系统在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 80 年代初发展较快,现在市场占有率不断减少。生产这类产品的公司主要有 DEC、HP、CV、DG、IBM 等公司。

②以超级微机组成的工程工作站——这是一种介于个人微机和超级小型机之间的系统,它的基础是高性能超级微机。由于采用了分布式超级微机网络,它的总体性能达到超级小型机 CAD/CAM 系统,但它的价格却比后者低得多。同时,它为工程人员提供一种网络环境,使工程技术人员能高效、方便地从事工程设计和计算、程序编制、文件书写、交互绘图、信息存放、合作通信、资源共享等。

工程工作站中精简指令集计算机(RISC)将成为主流体系。专用图形工作站采用多处理结构,即采用多个 CPU 并行工作,系统日趋开放,使它成为未来 CAD/CAM 系统的主流,市场占有率不断上升。它也是我国许多企业的主要选择方案。它的主要厂商有 Sun 公司、DEC 公司、SGI 公司及 IBM 公司。国产工程工作站起步不久,主要有华胜公司 4075 系列和华奇公司 IN-DIGO 两大系列工程工作站。

③个人微机系统——由于个人微机发展异常迅速,目前采用个人微机进行 CAD/CAM 不仅成为可能,而且发展较快,很有潜力。这套系统一般采用高档个人微机,配置 20 in 高分辨率(1280×1024)图形显示器、鼠标器、打印机、绘图机等,组成一个微机 CAD/CAM 工作站,并采用局域网络将多台微机连接起来,以实现部分硬、软件资源共享。

值得一提的是个人微机功能尚有限,用个人微机进行 CAD/CAM 仅适用于产品结构比较简单且产品系列化、通用化和标准化程度较高的企业。通过联网,使个人微机与超级微机工程工作站等相连,使之成为一个整体,针对具体工作环境形成高、中、低档的优化组合,这样才能充分发挥各类系统的作用。

#### (2) 外存储器。

由于 CAD/CAM 要处理的信息量特别多,因此大容量外存储器显得特别重要。主机要处理的大量信息,如各种软件、图形库和数据库等都存放于外存储器,通过主机调入内存接受 CPU 处理。目前,外存储器主要有磁盘、软磁盘、磁带机、光盘、磁光盘以及最新推出的 DVD 光盘。光盘、DVD 光盘以其容量大、保存时间长等特点将在 CAD/CAM 中发挥独特的作用。

### (3) 输入输出设备。

CAD/CAM 系统以它独有的特点要求输入输出设备精度高、速度快。输入设备有数字化仪、图形输入板、图形扫描输入仪及键盘等；输出设备有绘图仪、打印机、笔绘仪、硬拷贝机等。光学图形扫描输入仪有取代数字化仪的趋势，因为光学图形扫描输入仪精度高、速度快，扫描的图形可进行矢量化后再作编辑处理。此外，图形显示器(CAD/CAM 系统一般采用 20 in、分辨率为  $1024 \times 768$  或  $1280 \times 1024$  的图形显示器)、通信接口及生产装置(如数控机床、自动检测装置等)也是 CAD/CAM 系统重要的硬件设备。

### (4) 网络通信能力。

为达到系统集成，使位于不同地点和不同生产阶段的各部门之间能够进行高速的信息交换与协同工作，需要计算机网络将其连接，形成网络化的 CAD/CAM 系统。

CAD/CAM 系统网络的硬件设备主要包括网络适配器、传输介质以及调制解调器等。

### 2) 系统运行软件环境

系统软件主要负责管理硬件资源以及各种软件资源，是应用和开发 CAD/CAM 系统的软件平台，主要包括操作系统、网络系统等。目前，在微机上流行的操作系统有 Windows、Linux 等，工作站上流行 UNIX 系统，苹果机上运行 Mac 操作系统等。

### 3) 系统软件分类

CAD/CAM 软件功能主要包括二维绘图、三维绘图、分析及优化、数控编程及加工控制等。目前市场流行的 CAD/CAM 软件主要有如下一些。

(1) Unigraphics(简称 UG)——UG 是美国 EDS(Electronic Data Systems)公司的产品。该公司汇集了美国航空航天、汽车工业的丰富设计经验，开发出了当今世界一流的集成化 CAD/CAM 系统。目前，在我国占有较大的市场份额。

(2) Pro/ENGINEER(简称 Pro/E)——Pro/E 是美国 PTC 公司开发的机械设计自动化软件，也是最早实现参数化、特征化的软件，在全球拥有广泛的影响，在我国也是使用最为广泛和最受市场欢迎的 CAD/CAM 软件之一。

(3) MasterCAM——MasterCAM 是美国 CNC Software 公司开发的集设计和制造、数控机床自动编程于一体的 CAD/CAM 软件。它是目前世界上，也是在我国应用最为广泛的 CAD/CAM 软件之一。

(4) CAXA 系列软件——CAXA 系列软件是我国华正软件工程研究所开发的 CAD/CAM 软件。它包括 CAXA 电子图板、CAXA 制造工程师、CAXA 线切割、CAXA 数控车等模块式软件，在国内外占有一定的市场份额。

CAD/CAM 软件还有 SolidWorks、Solid Edge、I-DEAS、MDT、CATIA、PowerMILL、Cimatron 等。它们都各有特长，占有一定的市场份额。

## 1.3 机械 CAD/CAM 系统工作流程

CAD/CAM 系统是设计、制造过程中的信息处理系统，它充分利用了计算机高效准确的计算功能、图形处理功能以及复杂工程数据的存储、传递、加工功能，在运行过程中，结合人的经验、知识及创造性，形成一个人机交互、各尽所长、紧密配合的系统。CAD/CAM 系统输入的是设计要求，输出的是制造加工信息。一个较为完整的 CAD/CAM 系统的工作过程如图 1-3 所示，它包括以下几个方面。

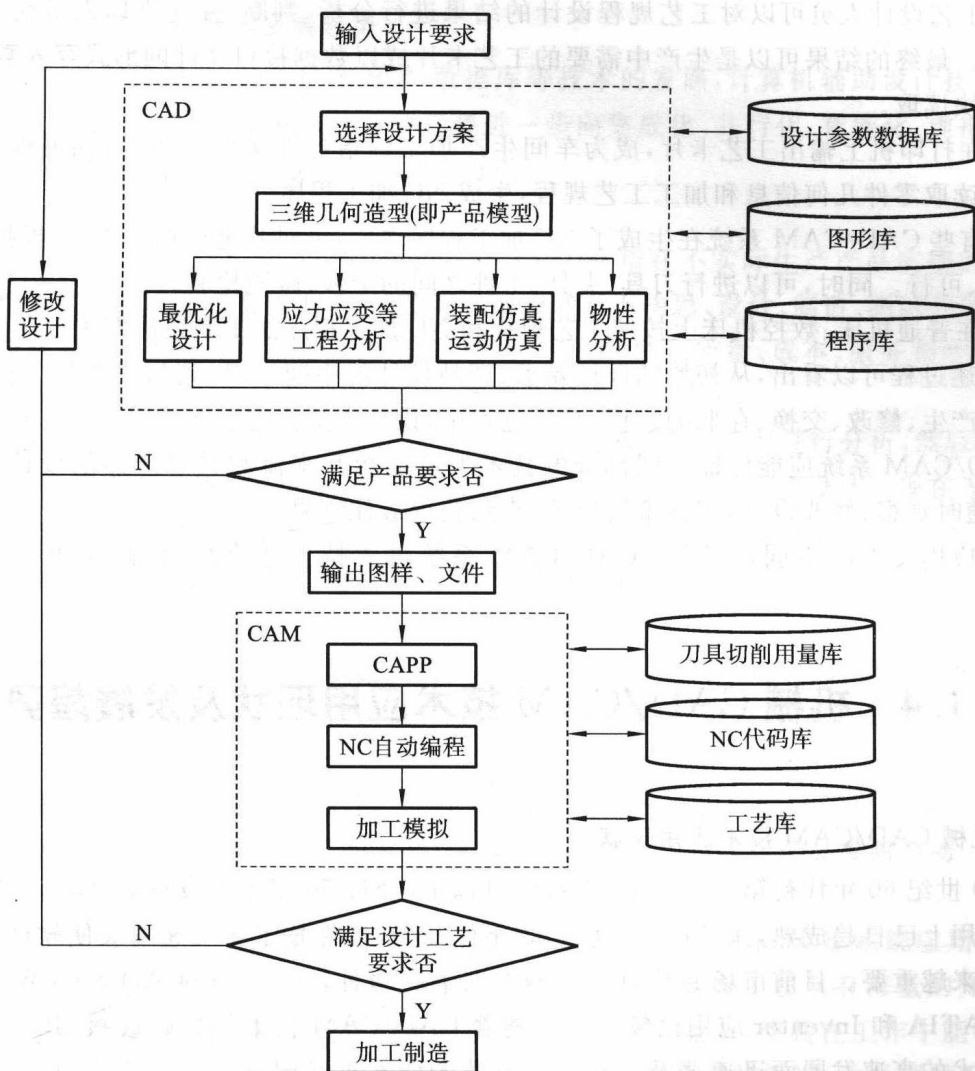


图 1-3 CAD/CAM 系统的工作过程

(1) 通过市场需求调查以及用户对产品性能的要求,向 CAD 系统输入设计要求。在 CAD 系统中首先进行设计方案的分析和选择,然后利用几何建模功能构造出产品的几何模型,计算机将此模型转换为内部的数据信息,存储在系统的数据库中。

(2) 调用 CAD/CAM 系统程序库中的各种应用程序对产品模型进行详细设计计算及结构方案优化分析,以确定产品总体设计方案、零部件的结构及主要参数,同时调用 CAD/CAM 系统中的图形库,将设计的初步结果以图形的方式输出在显示器上。

(3) 通过计算机辅助工程分析计算功能对产品进行性能预测、结构分析、工程计算、运动仿真和装配仿真,即通过计算机数值分析求解速度快、效率高的优势,对设计产品的结构和性能指标进行必要的工程分析、计算和仿真。

(4) 根据计算机显示的结果,设计人员对设计的初步结果作出判断,如果不满意,可以通过人机交互的方式进行修改,直至满意为止。修改后的产品设计模型仍存储在 CAD/CAM 系统的数据库中,并可通过绘图机输出设计图和有关文档。

(5) CAD/CAM 系统从产品数据库中提取产品的设计制造信息,在分析其零件几何形状特点及有关技术要求后,对产品进行工艺规程设计,设计的结果存入系统的数据库,同时在屏幕上显示输出。

(6) 工艺设计人员可以对工艺规程设计的结果进行分析、判断,并允许以人机交互的方式进行修改。最终的结果可以是生产中需要的工艺卡片或以数据接口文件的形式存入数据库,以供后续模块读取。

(7) 在打印机上输出工艺卡片,成为车间生产加工的指导性文件。NC 自动编程子系统从数据库中读取零件几何信息和加工工艺规程,生成 NC 加工程序。

(8) 有些 CAD/CAM 系统在生成了 NC 加工程序之后,可对其进行加工仿真、模拟,验证其是否合理、可行。同时,可以进行刀具、夹具、工件之间的干涉、碰撞检验。

(9) 在普通机床、数控机床上按照工艺规程和 NC 加工程序加工制造出有关产品。

由上述过程可以看出,从初始的设计要求、产品设计的中间结果,到最终的加工指令,都是信息不断产生、修改、交换、存取的过程,在该过程中,设计人员仍起着非常重要的作用。一个优良的 CAD/CAM 系统应能保证不同部分的技术人员能相互交流和共享产品的设计及制造信息,并能随时观察、修改设计,实施编辑处理,直到获得最佳结果。

根据应用要求的不同,实际的 CAD/CAM 系统可支持上述全部过程,也可仅支持部分过程。

## 1.4 机械 CAD/CAM 技术应用现状及发展趋势

### 1. 机械 CAD/CAM 技术应用现状

从 20 世纪 60 年代初第一个 CAD 系统问世以来,经过 50 多年的发展,CAD/CAM 系统在技术和应用上已日趋成熟,尤其从 20 世纪 80 年代开始,硬件技术的飞速发展使软件在系统中的地位越来越重要。目前市场上 CAD/CAM 软件有很多种,其中 AutoCAD、SolidWorks、UG、Pro/E、CATIA 和 Inventor 应用比较广泛。随着 CAD/CAM 技术的日趋成熟,其应用将随着计算机技术的高速发展而迅速普及。在工业发达的资本主义国家,CAD/CAM 技术的应用已迅速从最初的军事工业向民用工业扩展,由大型企业向中小企业推广,由高技术领域的应用向家用电器、轻工产品的设计和制造普及。

我国从 20 世纪 60 年代开始引进 CAD/CAM 技术,20 世纪 70 年代才开始应用,但是受计算机发展水平的限制,起初该技术仅仅被用来做产品设计时的分析计算,到 20 世纪 90 年代,我国开始自主开发 CAD/CAM 软件,并且得到了快速的发展。20 多年间,我国的 CAD/CAM 技术就取得了可喜的成就,市场上出现了越来越多的拥有自主知识产权的 CAD/CAM 软件,如中科院凯思软件集团的 PICAD 系统及系列软件、清华大学的高华 CAD、北京航空航天大学 CAXA 系列和华中科技大学的 CAD 等。但总体上我国 CAD/CAM 技术的研究应用与发达国家相比还有较大差距,主要表现在:CAD/CAM 应用集成度低,很多企业的应用仍停留在绘图、NC 编程等单项技术的应用;CAD/CAM 系统的软、硬件均依靠进口,拥有自主知识产权的较少;缺少设备和技术力量,二次开发能力弱,其引进的先进软件功能得不到充分发挥。

在当前日益激烈的市场竞争环境下,用户对产品精益求精的追求对制造企业提出了更高的要求。CAD/CAM 的技术发展必须始终与工程实际相结合,使其在发展过程中产生巨大的经济效益和社会效益,其在我国的应用必将对制造企业产生深远的影响,对提高我国制造企业核心竞争力起到举足轻重的作用。因此,我们应结合实际国情,积极主动开展 CAD/CAM 技术的研究与推广工作。

## 2. 机械 CAD/CAM 技术发展趋势

随着计算机、外围设备、计算机图形学、数据库等技术的发展,计算机辅助设计技术得到空前提高,使得 CAD/CAM 技术发展的主要趋势进一步向集成化、并行化、智能化、虚拟化、网络化和标准化等方向迈进,主要体现在以下几个方面。

### 1) 虚拟产品开发

虚拟产品开发(virtual product development, VPD)是指在不实际生产产品实物的情况下,利用计算机模拟仿真产品生命周期全过程,即在虚拟状态下构思、设计、制造、测试和分析产品,以有效避免在实际生产过程中会出现的问题,提高产品在时间、质量、成本、服务和环境等多目标中的决策水平,达到缩短产品开发周期和一次性开发成功的目的。

实施 VPD 技术的技术人员完全在计算机上建立产品模型,对模型进行分析,然后改进产品设计方案,用数字模型代替原来的实物原型,进行分析、试验、改进原有的设计。现在 VPD 技术已在汽车、航天、机车、医疗用品等诸多领域成功地应用,对传统的工业生产结构产生了巨大的冲击。如采用 VPD 技术后,汽车工业中新车型开发的时间可由 36 个月缩短到 24 个月以内,缩短了开发周期,节约了成本,使企业的竞争力显著增强。

实施 VPD 技术还可以通过网络通信,将从事产品设计、分析、制造、仿真和支持等技术人员组建成“虚拟”的产品开发小组,并将其与工程师分析专家、供应厂商以及客户连成一体,实现异地合作开发。

企业通过 VPD 这种新技术把握住产品开发过程,这样的企业就能对客户的需求变化做出快速灵活的反应,并且完全按照规定的时间、成本和质量要求快速地将产品推向市场。

### 2) 智能化 CAD/CAM 系统

随着 CAD/CAM 技术的发展,除了集成化之外,将人工智能技术、专家系统应用于 CAD/CAM 系统中,就形成智能的 CAD/CAM 系统。其最大的特点就是不仅具有海量的知识储备,而且具有专家的经验,相当于赋予其智能化的视觉、听觉、语言能力,使其在工作中能够通过推理、联想和判断去解决那些以前必须由人类专家才能解决的概念设计问题,并且同时不断学习、增长经验。这是一个具有重大意义的发展方向,它可以在更高的创造性思维活动层次下,给予设计人员有效的辅助。

### 3) 并行工程

并行工程是对产品及其相关过程(包括制造和支持过程)进行集成的并行设计的系统化工作模式。这种模式力图使产品开发人员从设计一开始就考虑到产品生命周期(从概念形成到报废)中的各种因素,包括质量、成本、进度及用户需求。基于并行工程原理的面向产品生命周期的并行产品设计,不能简单地理解为时间上的并发,并行工程的核心是基于分布式并行处理的协同求解,以及服务产品整个生命周期各进程活动的产品设计结果的评价体系和方法,在两者支持下,面向产品整个生命周期寻求全局最优决策。

### 4) 网络化设计与制造

网络化制造作为一种全新的制造模式,以数字化、柔性化、敏捷化为基本特征,表现为结构上的快重组、性能上的快响应、过程中的并行性与分布式决策。其优势在于:由金字塔式的多层次管理结构向扁平式的网络管理结构转变,减少层次和中间环节,加快信息的传递速度;并行工作方式将逐渐替代系统的顺序方式,缩短工作周期,提高工作效率;企业将向规模小型化和组织分子化方向发展,即在大型企业中,企业内部的单元对市场需求信息也将拥有快速自主的反应权利和能力;企业可以通过网络组织、虚拟企业等形式建立灵活多样的企业间联盟,实现企业内