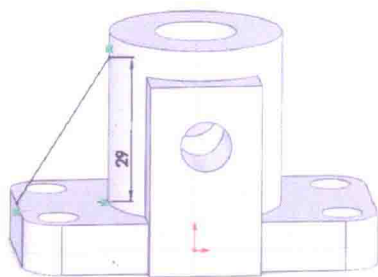
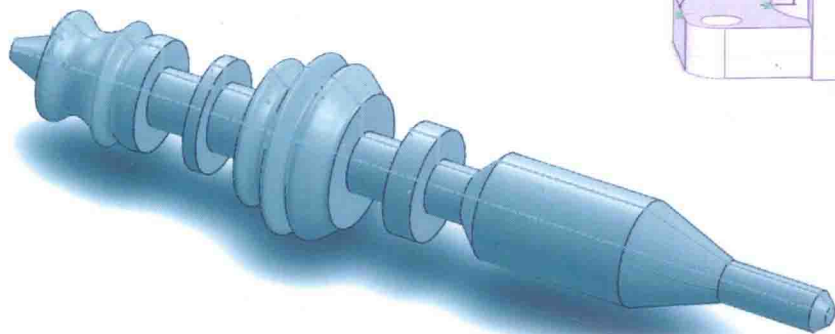




普通高等教育“十三五”应用型本科规划教材



CAD/CAM 技术基础及应用

薛九天 沈建新 崔 祚 编著



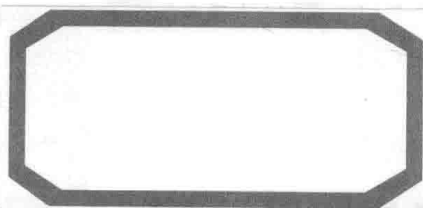
配有课件
习题答案



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十三五”应用型本科规划教材



CAD/CAM 技术基础及应用

薛九天 沈建新 崔 祚 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了以 CAD、CAPP、CAM 为重点的 CAD/CAM 基础理论及应用技术,共 9 章,主要内容包括 CAD/CAM 技术概述、CAD/CAM 数学基础、曲线曲面基本理论、产品建模技术、计算机辅助工艺过程设计、计算机辅助工程、计算机辅助数控加工、产品数据交换技术和计算机辅助生产管理与控制。在内容编排上,力求全面,使读者能系统地掌握 CAD/CAM 技术领域的基本原理、概念和方法,为进一步深入学习和研究奠定基础。

本书可作为高校本科机械类、近机类专业 CAD/CAM 课程的教材,亦可供有关专业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

CAD/CAM 技术基础及应用 / 薛九天, 沈建新, 崔祚编
著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5124-2691-7

I. ①C… II. ①薛… ②沈… ③崔… III. ①计算机
辅助设计—应用软件—高等学校—教材 IV. ①TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 055431 号

版权所有,侵权必究。

CAD/CAM 技术基础及应用

薛九天 沈建新 崔 祚 编著

责任编辑 赵延永 甄 真

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编:100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京宏伟双华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:486 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-2691-7 定价:49.00 元

前 言

CAD/CAM 技术产生于 20 世纪 50 年代后期发达国家的航空和军事工业中。随着计算机科学技术的发展, CAD/CAM 技术成为提高产品设计和制造品质、缩短产品开发周期和降低产品开发成本的重要手段。21 世纪以来, 国家制造业进入了快车道, 高度集成化、智能化、柔性化和网络化成为新世纪制造业的典型特征, 追求在最短时间内以最低成本生产出满足用户需求的产品。而 CAD/CAM 技术无疑是 21 世纪制造业的一个重要的技术。

CAD/CAM 技术属于高科技的范畴, 技术复杂, 涉及许多学科领域的知识, 如计算机科学与工程、计算数学、工程设计方法学, 人-机工程、计算机图形显示等技术, 以及具体应用工程领域的专业知识。另外, CAD/CAM 技术还在不断发展, 有许多新的理论和技术需要不断地去探索。根据国内外 CAD/CAM 技术发展过程和经历, 为了尽快发展我国的 CAD/CAM 技术, 使它产生更大的社会和经济效益, 必须尽快地培养一批掌握 CAD/CAM 技术理论和方法的工程技术人员。解决这个问题的基本途径是在高等工科院校普遍开设与 CAD/CAM 技术有关的课程, 使在读的大学生获得较系统的 CAD/CAM 技术的基本理论和技能, 特别是对非计算机专业的工科学子增设计算机和 CAD/CAM 方面的课程。另外, 对从业的有关工程技术人员进行 CAD/CAM 技术培训, 更新他们的知识。为此, 我们编写了这本书, 以适应广大工程技术人员学习该技术的需求, 以便于使读者较系统地掌握 CAD/CAM 技术的基本概念、基础知识和方法, 了解该技术的特点和发展状况, 开发技术思路, 拓宽知识面和改善知识结构, 从而为进行 CAD/CAM 技术的研究和应用打下良好的基础。

在广泛征求了意见的基础上, 本书在编写过程中借鉴了国内同类教材, 引入了 CAD/CAM 的最新科技信息与成果, 简要介绍了流行的实用工程软件, 相关章节引入了适当的工程实例和思考题, 使该课程力争成为一本适于全国高等学校机械类、近机类专业计算机辅助设计与制造课程, 具有应用型特色的教材。

本书有以下特点:

(1) 突出应用型特色。本书以机械类专业人才为培养对象, 以实际、实用、实践为原则, 突出工程应用的特点。

(2) 保持系统性。在内容安排上依次按照工程中产品设计、工艺、加工制造三个主要环节的顺序进行, 保持知识的系统性, 尽可能贴近工程实际, 力求讲解准确、清晰、简洁、易懂。

(3) 注重实践性。注重介绍计算机在工程图绘制、产品造型、工艺规程编制、数控编程中的应用和实践, 强调完成一定量的相关实验和软件运用, 通过二次开发、软件制作、课程设计和模拟仿真等实践性教学环节, 以求提高学生的工程动手能力, 尽量缩短学生进入企业后的适应期。

(4) 提高创造性高新技术与方法。通过多样化的设计制造方法及工程实例启发学生的创新思维, 培养学生分析和解决工程实际问题的能力。使学生了解 CAD/CAM 的发展与前沿,



开阔思路。提高他们从事技术研究和工程应用的创造性思维能力。

鉴于机械类、近机类各专业的要求与教学时数相差较大,本书的内容编排力求满足本科机械类不同专业的教学要求,课时适用于 30~60 学时,同时又可供自学提高和远程教育之用。第 1 章由沈建新编写,第 2~3 章和第 9 章由薛九天编写,第 4~5 章和第 7 章由崔祚编写,第 6 章和第 8 章由贾赟编写,薛九天负责全书的统稿。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不当之处,恳请读者不吝批评指正。

编 者

2018 年 3 月

目 录

第 1 章 CAD/CAM 技术概述	1
1.1 CAD/CAM 基本概念	1
1.1.1 CAD 技术	1
1.1.2 CAE 技术	2
1.1.3 CAPP 技术	2
1.1.4 CAM 技术	3
1.1.5 CAD/CAM 集成技术	3
1.2 CAD/CAM 技术的发展	4
1.2.1 20 世纪 50 年代:CAD/CAM 技术的准备和酝酿阶段	4
1.2.2 20 世纪 60 年代:CAD/CAM 技术的初步应用阶段	5
1.2.3 20 世纪 70 年代:CAD/CAM 技术开始广泛使用	6
1.2.4 20 世纪 80 年代:CAD/CAM 技术走向成熟	7
1.2.5 20 世纪 90 年代:微机化、标准化、集成化发展时期	9
1.3 数字化设计与制造的功能分析	11
1.3.1 数字化设计制造基础	11
1.3.2 数字化设计与制造的基本流程	15
1.3.3 数字化设计与制造的基本功能	18
1.4 CAD/CAM 系统的硬件和软件	22
1.4.1 CAD/CAM 系统的硬件	22
1.4.2 CAD/CAM 系统的软件	24
1.4.3 CAD/CAM 系统选型的原则	26
1.5 数字化设计与制造技术的发展趋势和研究热点	27
1.5.1 数字化设计与制造技术的发展趋势	27
1.5.2 数字化设计与制造技术的研究热点	29
1.6 数字化设计制造在飞机制造行业的典型应用	30
1.6.1 波音 777 研制过程是数字化设计制造的经典	30
1.6.2 JSF 拓展了数字化设计制造的应用	32
1.6.3 数字化设计制造已成为我国飞机研制技术的基本选择	33
思考题	34
第 2 章 CAD/CAM 数学基础	35
2.1 CAD/CAM 基础——CAGD	35
2.1.1 CAGD 的研究对象与核心问题	35
2.1.2 形状数学描述的发展主线	36
2.1.3 形状数学描述的要求	37
2.2 曲线和曲面的矢量方程与参数方程	40



2.2.1	矢量、点与直线	40
2.2.2	曲线的矢量方程和参数方程	42
2.2.3	矢函数的导矢及其应用	43
2.2.4	曲线的自然参数方程	46
2.2.5	曲线论的基本公式	47
2.2.6	曲率和挠率	50
2.2.7	曲面的矢量方程和参数方程	53
2.2.8	曲线上的曲线及其切矢和曲面上的法矢	54
	思考题	56
第3章	曲线曲面基本理论	57
3.1	三次样条曲线与参数样条曲线	57
3.1.1	三次样条函数及其力学背景	57
3.1.2	三次样条曲线	58
3.1.3	三次样条的局限性、解决办法及使用中的几个问题	61
3.1.4	参数样条曲线	63
3.1.5	弗格森曲线	68
3.2	孔斯曲面与定义曲面的基本方法	70
3.2.1	概 述	70
3.2.2	具有给定边界的孔斯曲面	72
3.2.3	具有给定边界及其跨界斜率的孔斯曲面	75
3.2.4	双三次曲面	76
3.2.5	三种定义曲面的基本方法	79
3.3	贝齐埃曲线与曲面	80
3.3.1	引 言	80
3.3.2	贝齐埃曲线的定义	81
3.3.3	贝齐埃曲线的几何性质	82
3.3.4	贝齐埃曲线的几何作图法	86
3.3.5	贝齐埃曲线的合成	87
3.3.6	贝齐埃曲面	88
3.3.7	贝齐埃曲面的合成	92
3.4	B样条曲线与曲面	96
3.4.1	均匀 B 样条曲线	96
3.4.2	非均匀 B 样条曲线及其他	104
3.4.3	双三次 B 样条曲面	117
3.4.4	B 样条曲面的构造	120
3.5	非均匀有理 B 样条曲线和曲面	122
3.5.1	NURBS 曲线、曲面的定义	123
3.5.2	NURBS 曲线的几何性质	124
3.5.3	NURBS 曲线形状的修改	126
3.5.4	圆锥曲线、圆弧及圆的 NURBS 表示	126



3.5.5 一些常用曲面的 NURBS 表示	129
思考题	132
第 4 章 产品建模技术	134
4.1 基本概念	134
4.1.1 计算机内部表示及建模技术	134
4.1.2 建模的方法及其发展	135
4.2 产品建模的基本方法	137
4.2.1 几何模型	137
4.2.2 特征建模	138
4.2.3 特征造型系统的基本要求	139
4.2.4 参数化与变量化设计	140
4.3 数字化定义	141
4.3.1 数字化定义模板	141
4.3.2 相关性设计	142
4.3.3 模型关系定义	144
4.4 装配建模	144
4.4.1 装配信息	144
4.4.2 装配结构	145
4.4.3 装配关系定义	145
4.4.4 大装配模型的简化	145
4.4.5 可装配性检查	146
4.4.6 装配顺序规划和装配路径规划	147
4.5 常用 CAD/CAM 系统简介	147
4.5.1 CATIA	148
4.5.2 Unigraphics	150
4.5.3 Solidworks	151
4.5.4 AutoCAD	151
4.5.5 CAXA	152
思考题	152
第 5 章 计算机辅助工艺过程设计	153
5.1 CAPP 的发展概况及系统结构组成	153
5.1.1 CAPP 的基本概念	153
5.1.2 CAPP 的结构组成	154
5.1.3 CAPP 的基础技术	156
5.1.4 CAPP 发展趋势	156
5.2 零件信息的描述与输入	157
5.2.1 CAPP 系统对零件信息描述技术的要求	157
5.2.2 零件信息描述的基本方法	158
5.3 交互型 CAPP 系统	160
5.3.1 概 述	160



5.3.2	系统的总体结构	160
5.3.3	系统的数据结构	161
5.4	变异型 CAPP 系统	164
5.4.1	变异型 CAPP 系统的基本工作原理	165
5.4.2	变异型 CAPP 系统的设计过程	165
5.4.3	变异型 CAPP 系统的工作过程	168
5.4.4	变异型 CAPP 系统的基本构成	168
5.5	创成型 CAPP 系统	169
5.5.1	基本原理和系统构成	169
5.5.2	工艺决策	170
5.5.3	设计和工作过程	172
5.6	智能型 CAPP 系统	175
5.6.1	智能型 CAPP 系统的体系结构	175
5.6.2	工艺设计进程中的决策过程	175
5.6.3	智能型 CAPP 系统的实例	178
5.6.4	智能型工艺设计系统开发工具	180
5.7	工艺数据库和知识库	183
5.7.1	工艺数据和知识的类型及特点	183
5.7.2	工艺数据和知识的获取与表示	185
	思考题	186
第 6 章	计算机辅助工程	187
6.1	有限元分析	187
6.1.1	有限元法的功用	187
6.1.2	有限元法的解题思路与步骤	188
6.1.3	有限元法的前置处理	190
6.1.4	有限元法的后置处理	192
6.1.5	通用有限元分析软件	192
6.1.6	有限元法在机械工程中的应用	193
6.2	优化设计	193
6.2.1	优化设计的基本概念和术语	193
6.2.2	优化设计的数学模型	195
6.2.3	常用优化设计方法	196
6.2.4	优化设计的一般过程	198
6.2.5	优化设计应用实例	199
6.3	可靠性分析	200
6.3.1	可靠性的概念和基本理论	200
6.3.2	可靠性指标	201
6.3.3	可靠性技术	203
6.3.4	机械可靠性设计方法	204
6.4	系统动态分析	206



6.4.1 动态分析简介	206
6.4.2 动态设计	207
6.4.3 动态分析的发展趋势	208
6.4.4 动态分析实例	209
6.5 虚拟样机技术	211
6.5.1 虚拟样机技术的特点	211
6.5.2 虚拟样机系统的体系结构	213
6.5.3 虚拟样机技术建立的基础	214
6.5.4 国内外有关虚拟样机的研究应用情况	215
6.5.5 虚拟样机结构分析实例	216
思考题	219
第7章 计算机辅助数控加工	220
7.1 数控机床概述	220
7.1.1 数控机床的基本工作过程与组成	220
7.1.2 数控机床的分类	222
7.1.3 数控加工的特点和适应性	224
7.2 计算机辅助数控编程	225
7.2.1 数控语言自动编程	225
7.2.2 图形交互自动编程	229
7.2.3 CAD/CAM 集成编程	232
7.3 数控加工工艺处理	234
7.3.1 零件样图的分析	235
7.3.2 确定加工方案的原则	236
7.3.3 刀具及夹具的选择	237
7.3.4 确定切削用量	238
7.3.5 确定程序编制的允许误差	239
7.4 前置处理与后置处理	240
7.4.1 前置处理	240
7.4.2 后置处理	241
7.5 加工仿真	242
7.5.1 加工仿真的含义	242
7.5.2 加工过程仿真系统的总体结构	243
7.5.3 刀位仿真的总体结构	244
7.5.4 加工过程仿真中的干涉碰撞检验	244
7.5.5 加工仿真的形式	244
思考题	245
第8章 产品数据交换技术	246
8.1 产品数据交换的方式	246
8.1.1 专用数据格式的交换(点对点交换)	246
8.1.2 标准数据格式的中性文件的交换(星式交换)	246



8.1.3 统一的产品数据模型交换	247
8.2 DXF 文件的图形数据交换	247
8.2.1 DXF 概述	247
8.2.2 DXF 文件的输入和输出命令	248
8.2.3 DXF 文件的结构	248
8.2.4 基于 DXF 文件的应用开发	256
8.3 IGES 文件的图形数据交换	260
8.3.1 IGES 标准概述	260
8.3.2 IGES 产品模型	260
8.3.3 IGES 文件的结构	261
8.3.4 IGES 应用中存在的问题	262
8.4 STEP 标准	263
8.4.1 STEP 标准概述	263
8.4.2 STEP 标准的基本内容	263
8.4.3 描述方法	263
8.4.4 集成信息资源	265
8.4.5 应用协议	266
8.4.6 实现方法	267
8.4.7 STEP 应用	270
8.5 其他格式的数据交换	271
思考题	271
第 9 章 计算机辅助生产管理与控制	273
9.1 概 述	273
9.1.1 生产管理的概念	273
9.1.2 工业企业的生产类型及特点	274
9.1.3 计算机辅助生产管理(CAPM)	275
9.1.4 制造业的生产流程	276
9.2 制造计划管理	278
9.2.1 制造计划	278
9.2.2 数字化制造计划系统	281
9.3 生产调度	286
9.3.1 生产任务的静态排序	286
9.3.2 生产任务的动态排序	288
9.3.3 资源的实时动态调度	288
9.4 制造执行控制	289
9.4.1 制造执行系统在数字化生产管理系统中的地位和作用	290
9.4.2 制造执行控制的功能	291
9.4.3 制造执行过程的管理	292
思考题	293
参考文献	294

第 1 章 CAD/CAM 技术概述

1.1 CAD/CAM 基本概念

CAD/CAM 技术是制造工程技术与计算机技术紧密结合、相互渗透而发展起来的一项综合性应用技术,具有知识密集、学科交叉、综合性强、应用范围广等特点。CAD/CAM 技术是先进制造技术的重要组成部分,它的发展和应用使传统的产品设计、制造内容和工作方式等都发生了根本性的变化。CAD/CAM 技术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之一。

1.1.1 CAD 技术

由于在不同时期、不同行业中,计算机辅助设计(Computer Aided Design,CAD)技术所实现的功能不同,工程技术人员对 CAD 技术的认识也有所不同,因此很难给 CAD 技术下一个统一的、公认的定义。早在 1972 年 10 月,国际信息处理联合会(IFIP)在荷兰召开的“关于 CAD 原理的工作会议”上给出如下定义:CAD 是一种技术,其中人与计算机结合为一个问题求解组,紧密配合,发挥各自所长,从而使其工作优于每一方,并为应用多学科方法的综合性协作提供了可能。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、分析和文件处理等方面的内容。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。显然,CAD 技术的内涵将会随着计算机技术的发展而不断扩展。

就目前情况而言,CAD 是指工程技术人员以计算机为工具,运用自身的知识和经验,对产品或工程进行方案构思、总体设计、工程分析、图形编辑和技术文档整理等设计活动的总称,是一门多学科综合应用的新技术。CAD 是一种新的设计方法,它采用计算机系统辅助设计人员完成设计的全过程,将计算机的海量数据存储和高速数据处理能力与人的创造性思维和综合分析能力有机结合起来,充分发挥各自所长,使设计人员摆脱繁重的计算和绘图工作,从而达到最佳设计效果。CAD 对加速工程和产品的发展、缩短设计制造周期、提高质量、降低成本、增强企业创新能力发挥着重要作用。

一般认为,CAD 系统应具有几何建模、工程分析、模拟仿真、工程绘图等主要功能。一个完整的 CAD 系统应由人机交互接口、图形系统、科学计算和工程数据库等组成。人机交互接口是设计、开发、应用和维护 CAD 系统的界面,经历了从字符用户接口、图形用户接口、多媒体用户接口到网络用户接口的发展过程。图形系统是 CAD 系统的基础,主要有几何(特征)建模、自动绘图(二维工程图、三维实体图等)、动态仿真等。科学计算是 CAD 系统的主体,主要包括有限元分析、可靠性分析、动态分析、产品的常规设计和优化设计等。工程数据库是对设计过程中使用 and 产生的数据、图形、图像及文档等进行存储和管理。就 CAD 技术目前可实现的功能而言,CAD 作业过程是在由设计人员进行产品概念设计的基础上从建模分析,到完



成产品几何模型的建立,然后抽取模型中的有关数据进行工程分析、计算和修改,最后编辑全部设计文档,输出工程图。从 CAD 作业过程可以看出,CAD 技术也是一项产品建模技术,它是将产品的物理模型转化为产品的数据模型,并把建立的数据模型存储在计算机内,供后续的计算机辅助技术所共享,驱动产品生命周期的全过程。

1.1.2 CAE 技术

从字面上理解,计算机辅助工程(Computer Aided Engineering,CAE)是计算机辅助工程分析,准确地讲,就是指工程设计中的分析计算、分析仿真和结构优化。CAE 是从 CAD 中分支出来的,起步稍晚,其理论和算法经历了从蓬勃发展到日趋成熟的过程。随着计算机技术的不断发展,CAE 系统的功能和计算精度都有了很大提高,各种基于产品数字建模的 CAE 系统应运而生,并已成为工程和产品结构分析、校核及结构优化中必不可少的数值计算工具;CAE 技术和 CAD 技术的结合越来越紧密,在产品设计中,设计人员如能将 CAD 与 CAE 技术良好融合,就可以实现互动设计,从而保证企业从生产设计环节上达到最优效益。分析是设计的基础,设计与分析集成是必然趋势。

目前 CAE 技术已被广泛应用于国防、航空航天、机械制造、汽车制造等各个工业领域。CAE 技术作为设计人员提高工程创新和产品创新能力的得力助手和有效工具,能够对创新的设计方案快速实施性能与可靠性分析;进行虚拟运行模拟,及早发现设计缺陷,实现优化设计;在创新的同时,提高设计质量,降低研究开发成本,缩短研发周期。

1.1.3 CAPP 技术

计算机辅助工艺设计(Computer Aided Process Planning,CAPP)是根据产品设计结果进行产品的加工方法设计和制造过程设计。一般认为,CAPP 系统的功能包括毛坯设计、加工方法选择、工序设计、工艺路线制定和工时定额计算等。其中工序设计包括加工设备和工装的选用、加工余量的分配、切削用量选择、机床和刀具的选择、必要的工序图生成等内容。工艺设计是产品制造过程中技术准备工作的一项重要内容,是产品设计与实际生产的纽带,是一个经验性很强且随制造环境的变化而多变的决策过程。随着现代制造技术的发展,传统的工艺设计方法已经远远不能满足自动化和集成化的要求。

随着计算机技术的发展,CAPP 受到了工艺设计领域的高度重视。其主要优点在于:可以显著缩短工艺设计周期,保证工艺设计质量,提高产品的市场竞争能力。CAPP 使工艺设计人员摆脱大量、烦琐的重复劳动,将主要精力转向新产品、新工艺、新装备和新技术的研究与开发。CAPP 可以提高产品工艺的继承性,最大限度地利用现有资源,降低生产成本。CAPP 可以使没有丰富经验的工艺师设计出高质量的工艺规程,以缓解当前机械制造业工艺设计任务繁重、缺少有经验工艺设计人员的矛盾。CAPP 有助于推动企业开展的工艺设计标准化和最优化工作。CAPP 在 CAD、CAM 中起到桥梁和纽带作用:CAPP 接受来自 CAD 的产品几何拓扑信息、材料信息及精度、粗糙度等工艺信息,并向 CAD 反馈产品的结构工艺性评价信息;CAPP 向 CAM 提供零件加工所需的设备、工装、切削参数、装夹参数以及刀具轨迹文件,同时接受 CAM 反馈的工艺修改意见。



1.1.4 CAM 技术

计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)到目前为止尚无统一的定义。一般而言, CAM 是指计算机在制造领域有关应用的统称, 有广义 CAM 和狭义 CAM 之分。所谓广义 CAM, 是指利用计算机辅助完成从生产准备工作到产品制造过程中的直接和间接的各种活动, 包括工艺准备、生产作业计划、物流过程的运行控制、生产控制、质量控制等主要方面。其中工艺准备包括计算机辅助工艺过程设计、计算机辅助工装设计与制造、NC 编程、计算机辅助工时定额和材料定额的编制等内容; 物流过程的运行控制包括物料的加工、装配、检验、输送、储存等生产活动。而狭义 CAM 通常指数控程序的编制, 包括刀具路线的规划、刀位文件的生成、刀具轨迹仿真以及后置处理和 NC 代码生成等。本书采用 CAM 的狭义定义。

CAM 中核心的技术是数控加工技术。数控加工主要分程序编制和加工过程两个步骤。程序编制是根据图纸或 CAD 信息, 按照数控机床控制系统的要求, 确定加工指令, 完成零件数控程序编制; 加工过程是将数控程序传输给数控机床, 控制机床各坐标的伺服系统, 驱动机床, 使刀具和工件严格按执行程序的规定相对运动, 加工出符合要求的零件。作为应用性、实践性极强的专业技术, CAM 直接面向数控生产实际。生产实际的需求是所有技术发展与创新的原动力, CAM 在实际应用中已经取得了明显的经济效益, 并且在提高企业市场竞争能力方面发挥着重要作用。

1.1.5 CAD/CAM 集成技术

自 20 世纪 70 年代中期以来, 出现了很多计算机辅助的分散系统, 如 CAD、CAE、CAPP、CAM 等, 分别在产品设计自动化、工艺过程设计自动化和数控编程自动化等方面起到了重要作用。但是这些各自独立的系统不能实现系统之间信息的自动交换和传递。例如, CAD 系统的设计结果不能直接为 CAPP 系统所接受, 若进行工艺过程设计, 仍需要设计者将 CAD 输出的图样文档转换成 CAPP 系统所需要的输入信息。所以, 随着计算机辅助技术日益广泛的应用, 人们很快认识到, 只有当 CAD 系统一次性输入的信息能为后续环节(如 CAE、CAPP、CAM)继续应用时才能获得最大的经济效益。为此, 提出了 CAD 到 CAM 集成的概念, 并首先致力于 CAD、CAE、CAPP 和 CAM 系统之间数据自动传递和转换的研究, 以便将已存在和使用的 CAD、CAE、CAPP、CAM 系统集成起来。有人认为: CAD 有狭义及广义之分, 狭义 CAD 就是单纯的计算机辅助设计, 而广义 CAD 则是 CAD/CAE/CAPP/CAM 的高度集成。不论何种计算机辅助软件, 其软件功能不同, 其市场定位不同, 但其发展方向却是一致的, 这就是 CAD/CAE/CAPP/CAM 的高度集成。

CAD/CAM 集成技术的关键是 CAD、CAPP、CAM、CAE 各系统之间的信息自动交换与共享。集成化的 CAD/CAM 系统借助于工程数据库技术、网络通信技术以及标准格式的产品数据接口技术, 把分散于机型各异各个 CAD、CAPP、CAM 子系统高效、快捷地集成起来, 实现软件、硬件资源共享, 保证整个系统内信息的流动畅通无阻。

CAD/CAM 集成技术是各计算机辅助单元技术发展的必然结果。随着信息技术、网络技术的不断发展和市场全球化进程的加快, 出现了以信息集成为基础的更大范围的集成技术, 例如将企业内经营管理信息、工程设计信息、加工制造信息、产品质量信息等融为一体的计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)。



1.2 CAD/CAM 技术的发展

1946 年,出于快速计算弹道的目的,美国宾夕法尼亚大学成功研制出世界上第一台电子数字计算机。计算机的诞生极大地解放了生产力,并逐渐成为工程、结构和产品设计的重要辅助工具。

20 世纪 50 年代以后,以美国为代表的工业发达国家出于航空和汽车等工业的生产需求,开始将计算机应用于机械产品开发。其中,数字化设计技术起步于计算机图形学(CG),经历了计算机辅助设计(CAD)阶段,最终形成涵盖产品设计大部分环节的数字化设计技术;数字化制造技术从数控(NC)机床及数控编程的研究起步,逐步扩展到成组技术(GT)、计算机辅助工艺规划(CAPP)、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)以及网络化制造等领域。值得指出的是,在数字化设计与数字化制造的发展早期,两者是相对独立、各自发展的。

几十年来,数字化设计与制造技术大致经历了以下几个发展阶段。

1.2.1 20 世纪 50 年代:CAD/CAM 技术的准备和酝酿阶段

20 世纪 50 年代,计算机还处于电子管阶段,编程语言为机器语言,计算机的主要功能是数值计算。要利用计算机进行产品开发,首先需要解决计算机中的图形表示、显示、编辑以及输出的问题。

1950 年,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)研制出旋风 I 号(Whirlwind I)图形显示器,可以显示简单的图形。1958 年,美国 Calcomp 公司研制出滚筒式绘图仪,Gerber 公司研制出平板绘图仪。20 世纪 50 年代后期,出现了图形输入装置——光笔。20 世纪 50 年代的计算机主要为第一代电子管计算机,采用机器语言编程,主要用于科学计算,图形设备只有简单的输出功能。总之,此阶段中的数字化设计主要解决计算机中的图形如何输入、显示和输出问题,处于构思交互式计算机图形学的准备阶段。

采用数字控制技术进行机械加工的思想,最早在 20 世纪 40 年代提出。为了制造飞机机翼轮廓的板状样板,美国飞机承包商 John T Parsons 提出用脉冲信号控制坐标镗床的加工方法。美国空军发现这种方法在飞机零部件生产中的潜在价值,并开始给予资助和支持。

1949 年,Parsons 公司与美国 MIT 伺服机构实验室(servomechanisms laboratory)合作开始数控机床的研制工作。数控机床的开发从自动编程语言(Automatically Programming Tools, APT)的研究起步,利用 APT 语言,人们可以定义零件的几何形状,指定刀具的切削加工路径,并自动生成相应的程序,利用一定的介质(如穿孔纸带、磁盘等),可以将程序传送到机床中。程序经过编译后,可以用来控制机床、刀具与工件之间的相对运动,完成零件的加工。

1952 年,MIT 以 APT 编程思想对一台三坐标铣床的改造,成功研制出利用脉冲乘法器原理、具有直线插补和连续控制功能的三坐标数控铣床,首次实现了数控加工。这就是第一代数控机床。

第一代数控机床的控制系统采用电子管元件和继电器,体积大,功耗高,价格昂贵,可靠性低、操作不便,极大地限制了数控机床的使用。之后,美国空军等继续资助 MIT 对 APT 语言及数控加工的研究,解决诸如三坐标以上数控编程及连续切削、数控程序语言通用性差、系统功能弱、标准化程度不高、数控机床使用效率低等问题。



1953 年, MIT 推出 APT I, 并在电子计算机上实现了自动编程。1955 年, 美国空军花巨资定购数控机床。此后, 数控机床在美国、苏联、日本等国家受到高度重视。20 世纪 50 年代末, 出现商品化数控机床产品。

1958 年, 我国第一台三坐标数控铣床由清华大学和北京第一机床厂联合研制成功, 此后有众多的高校、研究机构和工厂开展数控机床的研制工作。

1958 年, 美国航空空间协会(AIA)组织 10 多家航空工厂, 与 MIT 合作, 推出 APT II 系统, 进一步增强了 APT 语言的描述能力。美国电子工业协会(Electronic Industries Association, EIA)公布了每行 8 个孔的数控纸带标准。

为进一步提高数控机床的加工效率和质量, 1958 年美国 Keany & Trecker 公司在世界上首次成功研制带自动刀具交换装置(Automatically Tools Changer, ATC)的数控机床, 即加工中心, 有效地提高了数控加工的效率。1959 年, 晶体管控制元件研制成功, 数控装置中开始采用晶体管和印刷电路板, 数控机床开始进入第二个发展阶段。

1.2.2 20 世纪 60 年代: CAD/CAM 技术的初步应用阶段

1962 年, 美国 MIT 林肯实验室(Lincoln Laboratory)的伊万·萨瑟兰(Ivan E. Sutherland)发表了“SketchPad: 一个人机图形化的通信系统(A man machine graphical communication system)”的博士论文, 首次系统地论述了交互式图形学的相关问题, 提出了计算机图形学(CG)的概念, 确定了计算机图形学的独立地位。他还提出了功能键操作、分层存储符号、交互设计技术等新思想, 为产品的计算机辅助设计准备了必要的理论基础和技术。SketchPad 系统的出现是 CAD 及数字化设计发展史上的重要里程碑, 它表明利用阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)显示器进行交互创建图形和修改对象的可能性。因此, 伊万·萨瑟兰也被公认为交互式计算机图形学和计算机辅助绘图技术的创始人。

1963 年, 在美国计算机联合会上, 美国 MIT 机械工程系的孔斯(Coons)提交了“计算机辅助设计系统的要求提纲(An outline of the requirements for a computer aided design system)”的论文, 首次提出了 CAD 的概念。

在此阶段, 计算机图形学在理论上主要研究映射、放样、旋转、消隐等算法问题; 在硬件方面, 主要研究 CRT 显示、光笔输入、随机存储器等设备和系统, 为计算机图形学的初步应用奠定了基础。

20 世纪 60 年代中期, 美国 MIT、通用汽车(GM)、贝尔电话实验室、洛克希德飞机公司(Lockheed aircraft)以及英国剑桥大学等都投入大量精力从事计算机图形学的研究。1964 年, 美国 IBM 公司推出商品化计算机绘图设备, 通用汽车公司成功研制出多路分时图形控制台, 初步实现各阶段的汽车计算机辅助设计。1965 年, 美国洛克希德飞机公司推出全球第一套基于大型机的商品化 CAD/CAM 软件系统——CADAM。1966 年, 美国贝尔电话实验室(Bell telephone laboratory)开发了价格低廉的实用交互式图形显示系统 GRAPHIC I, 促进了计算机图形学和计算机辅助设计技术的迅速发展。1966 年, IBM 公司推出一种集成电路辅助设计系统, 利用 IBM 360 计算机完成集成电路的设计工作。

20 世纪 60 年代, 交互式计算机图形处理得到深入研究, 相关软硬件系统也开始走出实验室而趋于实用。商品化软硬件的推出促进了数字化设计技术的发展, CAD 的概念开始为人们接受。人们开始超越计算机绘图的范畴, 转而重视如何利用计算机进行产品设计。据统计, 至



20 世纪 60 年代末,美国安装的 CAD 工作站已有 200 多台。

与此同时,数字化制造技术也取得进展。1961 年,以美国人贝茨(E A Bates)为首进行新的 APT 技术研究,并于 1962 年发表 APT III。美国航空空间协会也继续对 APT 程序进行改进,并成立了 APT 长远规划组织(APT Long Range Program, APTLRP),数控机床开始走向实用。从 20 世纪 60 年代开始,日本、德国等工业发达国家陆续开发、生产和使用数控机床。1962 年,人们在机床数控技术的基础上成功研制出第一台工业机器人,实现了自动化物料搬运。

计算机辅助工艺设计(CAPP)是通过向计算机输入被加工零件的几何信息(形状、尺寸等)和工艺信息(材料、热处理、批量等),利用计算机来进行零件加工工艺过程的制订,把毛坯加工成工程图纸上所要求的零件,是产品制造的重要准备工作之一。

由于各种原因,CAPP 是制造自动化领域中起步最晚、进展最慢的部分。1969 年,挪威推出世界上第一个 CAPP 系统——AUTOPROS,并于 1973 年推出商品化的 AUTOPROS 系统。

在我国,由于电子元件质量差、元器件不配套和制造工艺不成熟等原因,数控技术研究受到很大影响。从 1960 年开始,国内的数控技术研究大多停滞下来,只有少数单位坚持下来。1966 年,国产品体管数控系统研制成功,并实现某些品种数控机床的小批量生产。

1965 年,随着集成电路技术的发展,世界上出现了小规模集成电路。它体积更小,功耗更低,使数控系统的可靠性进一步提高,数控系统发展到第三代。1966 年,出现了用一台通用计算机集中控制多台数控机床的直接数字控制(Direct Numerical Control, DNC)系统。

1967 年,英国 Molins 公司成功研制出由计算机集成控制的自动化制造系统 Molins-24。Molins-24 由 6 台加工中心和 1 条由计算机控制的自动运输线组成,利用计算机编制数控程序和制定作业计划,它可以 24 h 连续工作。实际上,Molins-24 是世界上第一条柔性制造系统(FMS),它标志着制造技术开始进入柔性制造时代。

FMS 是以数控机床和计算机为基础,配以自动化上下料设备、立体仓库以及控制管理系统构成的制造系统。FMS 中的设备能 24 h 自动运行;当加工对象改变时,无须改变系统的设备配置,只需改变零件的数控程序和生产计划,就能完成不同产品的制造任务。因此,FMS 具有良好的柔性,适应了多品种、中小批量生产的需求。

1.2.3 20 世纪 70 年代:CAD/CAM 技术开始广泛使用

20 世纪 70 年代后,存储器、光笔、光栅扫描显示器、图形输入板等 CAD/CAM 软硬件系统开始进入商品化阶段,出现了面向中小企业的“交钥匙系统(turnkey system)”,其中包括图形输入/输出设备、相应的 CAD/CAM 软件等。这种系统的性能价格较高,能提供基于线框造型(wireframe modeling)的建模及绘图工具,用户使用维护方便,曲面模型(surface modeling)技术得到初步应用。同时,与 CAD 相关的技术,如质量特征计算、有限元建模、NC 纸带生成及检验等技术得到广泛的研究和应用。

1970 年,美国 Intel 公司在世界上率先开发出微处理器。1970 年,在美国芝加哥国际机床展览会上,首次展出了第四代数控机床系统——基于小型计算机的数控系统。

之后,微处理器数控系统的数控机床开发迅速发展。1974 年,美国、日本等先后研制出以微处理器为核心的数控系统,以微型计算机为核心的第五代数控系统开始出现。通常,将以一台和多台计算机作为数控系统核心组件的数控系统称为计算机数控系统(Computer Numeri-