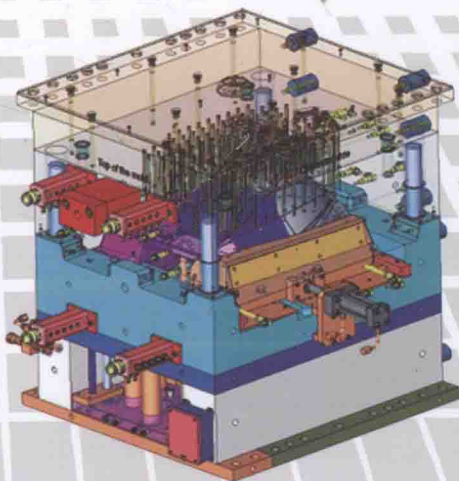




普通高等院校“十二五”规划教材

CAD/CAM 原理与技术

王学文 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等院校“十二五”规划教材

CAD/CAM 原理与技术

				王学文	主 编
姚平喜	李娟莉	杜 娟	白艳艳	张瑞亮	副主编
				闫献国	主 审

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书从原理和技术角度介绍了 CAD/CAM 的基本原理、概念、方法、技术及其在机械行业中的应用。全书共分 9 章, 内容包括 CAD/CAM 的基本概念与基本知识、数据处理、图形处理、几何建模、计算机辅助工程、计算机辅助工艺过程设计、计算机辅助制造、CAD/CAE/CAPP/CAM 集成技术、CAD/CAM 领域新技术等。

本书注重理论与实践相结合, 将 CAD/CAM 基本原理与 CAD/CAM 领域常用软件应用结合在一起, 力求培养机械类专业学生分析和解决工程实际问题的能力。本书内容重点突出, 难度适中, 知识面较宽, 反映了新科技发展概况, 是教学改革的一次尝试。

本书适合作为普通高等院校机械设计制造及自动化专业本科和研究生的教学用书, 也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

CAD/CAM 原理与技术/王学文主编. —北京: 中国铁道出版社, 2014. 8

普通高等院校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-113-18392-9

I. ①C… II. ①王… III. ①计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TP391.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 153825 号

书 名: CAD/CAM 原理与技术

作 者: 王学文 主 编

策 划: 许 璐

读者热线: 400-668-0820

责任编辑: 潘星泉

编辑助理: 雷晓玲

封面设计: 付 巍

封面制作: 白 雪

责任校对: 汤淑梅

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 北京新魏印刷厂

版 次: 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 17 字数: 445 千

书 号: ISBN 978-7-113-18392-9

定 价: 33.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 51873659

前 言

CAD/CAM 技术是随着计算机技术和信息技术的发展而产生并逐步走向成熟的一门新技术,广泛应用于机械、车辆、建筑、电子、航空航天、船舶、纺织、轻工等领域,产品设计和制造的整个过程都可以由计算机辅助完成,其应用水平已成为衡量一个国家制造技术发展水平及工业现代化水平的重要标志。因此,随着 CAD/CAM 技术的推广應用和数字化集成设计与制造技术的发展,CAD/CAM 技术已成为未来工程技术人员必须掌握的基本工具。

CAD/CAM 技术涉及的内容十分广泛,本书以机械设计制造及其自动化专业的学生为教学对象,在学生已掌握计算机基本知识、计算机编程基本技能、计算机辅助绘图及工艺基本知识的基础上,系统学习 CAD/CAM 技术的基本原理与应用。本书共分 9 章,第 1 章从总体上介绍了 CAD/CAM 的基本概念、基本功能、主要任务、支撑环境和发展应用;第 2、3 章分别围绕数据处理技术和图形处理技术等基本原理进行了介绍;第 4、5、6、7 章分别针对 CAD、CAE、CAPP 和 CAM 等技术展开,介绍了各 CAx 系统的基本原理、方法和技术,并针对各系统典型应用软件 SolidWorks、Pro/E、ANSYS、KMCAPP 和 SolidCAM 等进行了实例分析;第 8 章介绍了 CAD/CAE/CAPP/CAM 集成技术和典型数据管理系统;第 9 章针对 CAD/CAM 领域的各种新技术(参数化设计、虚拟样机技术、虚拟现实、协同 CAE、逆向工程与快速成型、云制造、网络化制造、虚拟制造),介绍了其基本概念、基本原理、技术特征、技术应用和发展状况等,以拓宽学生的知识面。

本书由太原理工大学的王学文任主编,太原理工大学的姚平喜、李娟莉、白艳艳、张瑞亮和太原科技大学的杜娟任副主编,中北大学的张纪平、宋胜涛参编,太原科技大学闫献国任主审。其中,第 1 章和第 9.4 节由王学文编写,第 2 章和第 9.6 节由李娟莉编写,第 3 章和第 9.8 节由白艳艳编写,第 4 章和第 9.1 节由张瑞亮编写,第 5 章和第 9.5 节由张纪平编写,第 6 章和第 9.2 节由杜娟编写,第 7 章和第 9.7 节由姚平喜编写,第 8 章和第 9.3 节由宋胜涛编写。全书大纲由王学文和姚平喜拟定,王学文和李娟莉对全书进行了统稿。

由于编者水平所限,书中如有不足之处敬请读者批评指正,以便修订时改进。如读者在使用本书的过程中有其他意见或建议,恳请向编者(wangxuewen@tyut.edu.cn)提出宝贵意见。

编 者
2014 年 5 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 CAD/CAM 基本概念	1
1.2 CAD/CAM 发展概况	5
1.3 CAD/CAM 系统的基本功能	10
1.4 CAD/CAM 的主要任务	11
1.5 CAD/CAM 系统支撑环境	16
1.6 CAD/CAM 技术应用与发展趋势	23
习题	26
第 2 章 数据处理	27
2.1 概述	27
2.2 数据与数据结构	27
2.3 数据库技术	29
2.4 工程数据处理	33
2.5 工程数据库及其管理系统	42
2.6 数据交换标准	45
习题	51
第 3 章 图形处理	52
3.1 概述	52
3.2 图形学的数学基础	53
3.3 图形变换	57
3.4 真实感图形显示技术	77
3.5 交互技术	78
习题	81
第 4 章 几何建模	82
4.1 概述	82
4.2 CAD 建模技术	86
4.3 常用 CAD 建模软件介绍	91
4.4 SolidWorks 软件应用	94
4.5 Pro/E 二次开发	108
习题	114
第 5 章 计算机辅助工程	116
5.1 概述	116
5.2 有限元分析基础	117
5.3 最优化设计基础	118
5.4 ANSYS 14.0 结构有限元分析	121

习题	135
第 6 章 计算机辅助工艺过程设计	137
6.1 概述	137
6.2 零件信息描述与输入	140
6.3 派生式 CAPP 系统	142
6.4 创成式 CAPP 系统	153
6.5 CAPP 专家系统	156
6.6 KMCAPP 系统简介	161
习题	164
第 7 章 计算机辅助制造	165
7.1 数控机床概述	165
7.2 数控编程内容与发展	167
7.3 数控加工工艺	168
7.4 手工程序编制	171
7.5 自动程序编制	172
7.6 SolidCAM 软件应用	178
7.7 SolidCAM HSM	193
7.8 数控加工仿真	198
习题	199
第 8 章 CAD/CAE/CAPP/CAM 集成技术	200
8.1 概述	200
8.2 CAD/CAE/CAPP/CAM 集成总体规划	202
8.3 CAD/CAE/CAPP/CAM 数据交换与共享	207
8.4 产品数字化与产品数据管理	210
8.5 CAD/CAE/CAPP/CAM 与 ERP 协同应用	217
习题	225
第 9 章 CAD/CAM 领域新技术	226
9.1 参数化设计	226
9.2 虚拟样机技术	231
9.3 虚拟现实	237
9.4 协同 CAE	241
9.5 逆向工程与快速成型	245
9.6 云制造	250
9.7 网络化制造	255
9.8 虚拟制造	258
习题	262
参考文献	263

第1章 概 述

【教学目标】

通过本章的学习掌握 CAD/CAM 的基本概念；认识 CAD/CAM 系统的基本组成和支撑环境；了解 CAD/CAM 技术的产生、发展过程；了解 CAD/CAM 技术的应用领域和发展前景；理解 CAD/CAM 系统的工作过程和主要任务；了解硬件的类型、配置形式；熟悉软件的种类、功能；掌握 CAD/CAM 系统的选用原则；能够根据工作性质为一个具体部门配置一个相对完整的 CAD/CAM 系统。

【本章提要】

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。CAD/CAM 系统可完成的任务：几何造型、辅助绘图、辅助分析、模拟仿真、辅助工艺设计、自动编程和工程数据库管理等。

CAD/CAM 系统的功能：图形处理、输入/输出、信息存储与管理、人机接口与人机交互等。

1.1 CAD/CAM 基本概念

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，使得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 and 经济效益，而 CAD/CAM 技术正是先进制造体系的重要组成部分。

计算机辅助设计与计算机辅助制造 (CAD/CAM)，是指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各项活动的技术。其主要包含计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助工程 (CAE)、计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 和计算机辅助制造 (CAM)。

1.1.1 CAD 技术

CAD 即计算机辅助设计。狭义的计算机辅助设计 (CAD) 是指采用计算机开展机械产品设计的技术，主要应用于计算机辅助绘图 (Computer Aided Drafting)，广义的计算机辅助设计指借

助计算机进行设计、分析、绘图等工作，包括几何建模、装配及干涉分析 DFA、制造性分析 DM、产品模型的计算机辅助分析 CAE 等。

CAD 技术是一项集计算机图形学、数据库、网络通信等计算机及其他学科于一体的高新技术，也是提高设计水平、缩短产品开发周期、增强行业竞争能力的关键技术。CAD 技术在机械制造行业的应用最早，也最为广泛，采用 CAD 技术进行产品设计不但可以使设计人员“甩掉图板”，更新传统的设计思想，实现设计自动化，降低产品的成本，提高企业及其产品在市场上的竞争能力，还可以使企业由原来的串行式作业转变为并行式作业，建立一种全新的设计和生产管理体制，缩短产品的开发周期，提高劳动生产率。

CAD 本质上是一个设计过程，它在计算机环境下完成产品的创造、分析、设计和修改，以达到预期规划目标的过程。目前 CAD 技术可实现的功能包括：设计人员在进行产品概念设计的基础上从事产品的几何造型分析；完成产品几何建模；抽取模型中的有关数据进行工程分析和计算（例如有有限元分析、模拟仿真等）；根据计算结果决定是否对设计结果进行修改；修改满意后编辑全部设计文档；输出工程图。以上过程可以看出，CAD 技术也是一项产品建模技术，它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共享，驱动产品生命周期的全过程。

一般认为，CAD 系统的功能可归纳为几何建模、工程分析、模拟仿真、自动绘图等四大功能。实现这些功能的一个完备的 CAD 系统应该由科学计算系统、图形系统和工程数据库等组成。科学计算包括有限元分析、可靠性分析、动态分析、优化设计以及产品的常规计算分析等内容；图形系统用于几何造型、自动绘图（二维工程图、三维实体图）、动态仿真等设计过程；工程数据库则对设计过程中使用或产生的数据、图形、文档等信息进行存储和管理。

随着现代设计技术的快速发展，现代 CAD 系统逐步加入了人工智能和专家系统技术，让计算机模拟人类专家解决问题的思路和方法进行推理和决策，大大提高了设计自动化水平，并可实现对产品进行功能设计、总体方案设计等产品的概念设计过程，从而对产品设计过程提供支持。

一般而言，现代 CAD 技术是指在复杂的大系统环境（CIMS、并行工程、敏捷制造等）下，支持产品自动化设计的设计理论和方法、设计环境、设计工具等各相关技术的总称，其功能目标是使设计工作实现集成化、网络化和智能化，以达到提高产品设计质量、降低产品成本和缩短设计周期的目的。

1.1.2 CAE 技术

在设计过程中，利用计算机作为工具，帮助工程师模拟产品及零件的工况，对零件和产品进行工程校验、有限元分析、优化设计和计算机仿真，以及进行计算机辅助设计过程管理等一切实用技术的总和，称为计算机辅助工程（CAE）。它是计算力学、计算数学、工程分析技术、数字仿真技术、工程管理学与计算机技术相结合而形成的一种综合性、知识密集型技术。

CAE 的核心技术是有限单元数值计算方法。有限单元的基本思想是将物体（即连续的求解域）离散成有限个简单单元的组合，用有限个容易分析的单元来表示复杂的对象，用它们的集合来模拟或逼近原来的物体，从而将一个连续的无限自由度问题简化为离散的有限自由度问题。

图 1-1 所示为现代 CAE 软件的基本结构，可以看到，系统包含前处理模块、分析模块、后处理模块、用户界面模块、数据管理系统和数据库模块以及共享知识库等。

在前后处理、用户界面、单元库、材料库和数据管理等方面，一些大型的 CAE 软件开发商为了满足市场需求和适应计算机软、硬件技术的快速发展，通过并购 CAD 软件、突破与 CAD 软件的接口技术，尽可能靠近无缝集成，或者广泛使用面向对象设计软件自行开发等手段取得了巨大的进步；通过与 CAD/CAM/CAPP/PDM 和 ERP 等技术和软件的相互渗透和集成（见图 1-1），一些著名的 CAE 软件在可用性和运行环境的适应性方面有了大幅提升，极大地提升了用户的使用方便性、使用效率和使用兴趣。

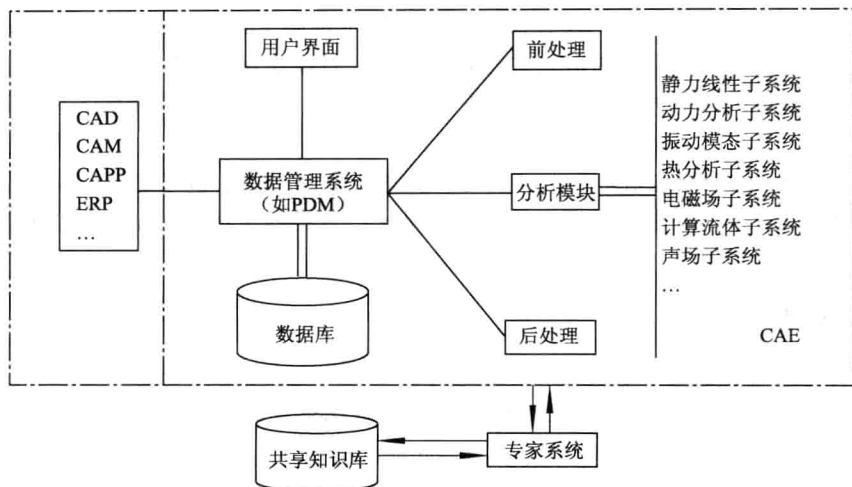


图 1-1 现代 CAE 软件结构

同时，CAE 软件在提升使用性和运行环境的同时，在应用功能、分析与模拟能力、可靠性等方面也在不断进步。CAE 软件的分析能力主要取决于单元库和材料库的丰富和完善程度，目前，知名的 CAE 软件一般都至少拥有上百种单元，并拥有一个比较完善的材料库，使其对工程和产品的物理、力学行为具有较强的分析模拟能力；CAE 软件的计算效率和计算精度，主要取决于解法库，解法库包含了不同种类的高性能求解算法，可对不同类型、不同规模的问题快速度、高精度响应结果。最近十几年，各主流 CAE 软件开发商都对单元库、材料库和求解器进行了改造、扩充和完善，分析能力大大提升。目前，各大型 CAE 软件已经可以对工程和产品进行以下性能分析、预报和运行行为模拟：静力和拟静力线性与非线性分析，如各种单一和复杂结构的弹性、弹塑性、塑性、蠕变、膨胀、几何大变形、大应变、疲劳、断裂、损伤、接触等；线性与非线性动力分析，如交变荷载、爆炸冲击荷载、随机地震荷载以及各种运动荷载作用下的振动模态分析、谱分析、屈曲模态分析、动力时程分析、谐波响应分析和随机振动分析等；稳态与瞬态热分析，如传导、对流和辐射状态下的热分析、相变分析和热/结构耦合分析等；静态和交变电磁场与电流分析，如电磁场分析、电流分析、压电行为分析和电磁/结构耦合分析等；流体计算，如层流、湍流、热/流耦合和流/固耦合等；声场与波的传播分析，如静动态声场、噪声计算，固体、流体和空气中波的传播分析等。

1.1.3 CAPP 技术

CAPP 即计算机辅助工艺过程设计，是指在人和计算机组成的系统中，根据产品设计阶段给出的信息，人机交互或自动地完成产品加工方法的选择和工艺过程的设计。

工艺设计是生产技术准备工作的第一步，也是连接产品设计与产品制造之间的桥梁，衔接了 CAD 和 CAM 技术。工艺规程是进行工装设计制造和决定零件加工方法与加工路线的主要依据，它对组织生产、保证产品质量、提高劳动生产率、降低成本、缩短生产周期及改善劳动条件等都有着直接的影响，因此是生产中的关键工作。

工艺设计必须分析和处理大量信息，既要考虑产品设计图上有关结构形状、尺寸公差、材料、热处理以及批量等方面的信息，又要了解加工制造中有关加工方法、加工设备、生产条件、加工成本及工时定额，甚至传统习惯等方面的信息。

高速发展的计算机科技为工艺设计的自动化奠定了基础。计算机能有效地管理大量数据，进行快速、准确的计算，进行各种形式的比较和选择，自动绘图，编制表格文件和提供便利的编辑手段等。计算机的这些优势正好是工艺设计所需要的，于是计算机辅助工艺设计（CAPP）便应运而生。

一般认为 CAPP 的功能包括：①毛坯设计；②加工方法选择；③工艺路线制定；④工序设计；⑤刀夹量具设计等。其中工序设计又包含：机床、刀具的选择，切削用量选择，加工余量分配以及工时定额计算等。

1.1.4 CAM 技术

CAM 即计算机辅助制造，有狭义和广义之分。

狭义上的 CAM 指计算机辅助编程，即一个从零件图纸到获得数控加工程序的全过程，主要任务是计算加工走刀中的刀位点（Cutter Location Point），包括三个主要阶段：首先是工艺处理，即分析零件图，确定加工方案，设计走刀路径等；其次是数学处理，即处理、计算刀具路径上全部坐标数据；最后是自动编制出加工程序，即按数控机床配置的数控系统的指令格式编制出全部程序。

广义上的 CAM 包括狭义 CAM 的各项任务，同时还包括计算机辅助质量控制（Computer Aided Quality, CAQ）和计算机辅助生产管理（Computer Aided Production Management, CAPM）。CAQ 分为试制与批量质量管理，试制质量管理注重产品零部件的加工质量，排除产品试生产阶段性能的不确定性；批量生产过程的质量控制强调降低废品率。CAPM 是针对生产管理的任务和目标，及时、准确地采集、存储、更新、管理与生产有关的产品信息、制造资源信息、生产活动信息等，并进行及时的信息分析、统计处理和反馈，为生产系统的管理决策提供快捷、准确的信息资料、数据和参考方案。内容包括工厂生产计划、车间作业计划和物料供应计划的制订与管理，以及库存管理、销售管理、财务管理、人事管理和技术管理等。

1.1.5 CAx 系统集成技术

所谓计算机信息集成，是指不同计算机及其功能模块之间的信息自动交换与共享，其目的是最大限度地减少数据的反复人工输入与输出，减少失误，提高工作效率，保证信息的正确性和一致性。因此，集成化地使用计算机，实现信息共享，也是当代计算机应用的基本理念。

CAx 系统集成实质上是指在各 CAx 系统之间形成相关信息的自动传递与转换。集成的 CAx 系统借助公共的工程数据库、网络通信技术以及标准格式的中性文件接口，把分散于机型各异的计算机中的 CAD/CAM 模块高效地集成起来，实现软、硬件资源共享，保证系统内信息的流动畅通无阻。

随着信息技术的不断发展,为使计算机辅助技术给企业带来更大的效益,人们又提出了要将企业内分散的信息系统进行集成,不仅包含生产信息,还包括生产管理过程所需的全部信息,从而构成一个计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS),而 CAx 系统集成技术则是计算机集成制造系统的一项核心技术。

可以说 CAx 系统集成技术是信息技术发展所导致的必然结果,也是相关设计、计算、生产制造人员在实际生产中的愿望。随着 CAD/CAM 技术的不断发展,制造业将真正实现产品设计制造过程的一体化和自动化。

1.2 CAD/CAM 发展概况

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,美国学者 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 CADAM 系统;贝尔电话公司推出的 GRAPHIC-1 系统,等等。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(FMS),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很多,主要是计算机硬件性能的大幅度提高,自产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的巨大促进作用,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 (CAPP)、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 (CIMS),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 CADAM 系统、法国 tatlls 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 系统及美国 UNIGRAPHICS 公司研制的 UG11 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。

1.2.1 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 50 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 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设计的自由曲面。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、语音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设计工作。

CAD 系统既可以按系统的功能分类, 也可以按系统中使用的计算机的性能和类型分类。目前, CAD 已在电子和电气、科学研究、机械设计、软件开发、机器人、服装业、出版业、工厂自动化、土木建筑、地质、计算机艺术等各个领域得到广泛应用。

1.2.2 CAE 的发展

CAE 起源于 20 世纪 40 年代, 1943 年数学家 Courant 尝试用定义在三角形区域上的分片连续函数的最小位能原理来求解 St. Venant 扭转问题, 此后, 一些应用数学家、物理学家和工程师便开始频频涉足有限元的概念。

20 世纪 60 年代, 随着计算机的广泛应用和发展, 有限元技术依靠数值计算方法, 迅速发展起来, 但这一时期的有限元技术仍然处于发展阶段, 研究方向主要集中在结构力学, 特别是飞机结构, 因此, 此时的 CAE 属于探索发展时期。

20 世纪 70 年代到 80 年代是 CAE 的独立蓬勃发展时期, 这一时期有限元技术在结构分析和场分析领域获得了巨大的成功, 从力学模型开始扩展到各类物理场 (如温度场、电磁场、声波场等) 分析, 从线性分析扩展到非线性分析 (材料非线性、几何非线性和状态非线性分析等), 从单一场分析扩展到耦合场分析, 这一时期出现了很多著名的 CAE 分析软件, 如 ANSYS, NAS-TRAN、ABAQUS 等。

20 世纪 90 年代是 CAE 的发展壮大与成熟时期, 这一时期, CAE 与 CAD 相辅相成, 共同发展。

20 世纪末期到现在, CAE 技术有了新的发展和应用, 这一时期, 虚拟样机技术 (VP)、协同仿真技术、云计算与云仿真等 CAE 技术在各科研机构被广泛讨论, 获得了许多学术成果, 并在工程中应用。

1.2.3 CAPP 的发展

CAPP 技术也是在历史上较早尝试自动化的项目之一。1969 年, 挪威已经成功地开发出了最早的、真正意义的工艺设计自动化系统 AUTOPROS。但是, 工艺设计中究竟应该进行哪些处理并不明确。因此, 工艺设计自动化系统的发展很缓慢, 它是 CAD/CAM 技术中发展最缓慢的部分。

CAPP 是在 20 世纪 60 年代后期出现的。第一个 CAPP 系统是挪威在 1969 年推出的 AUTOPROS 系统, 它是根据成组技术原理, 利用零件的相似性去检索和修改标准工艺来制定相应的零件规程, 1973 年正式推出商品化 AUTOPROS 系统。美国是 20 世纪 60 年代末 70 年代初开始研究 CAPP 的, 并于 1976 年由 CAM-I 公司推出颇具影响力的 CAM-I'S Automated Process Planning 系统, 成为 CAPP 发展史的里程碑。以上早期的 CAPP 软件采用的都是所谓的“标准工艺法”, 即派生式 (Variant) CAPP 系统, 图 1-2 所示为派生式系统工作原理图。

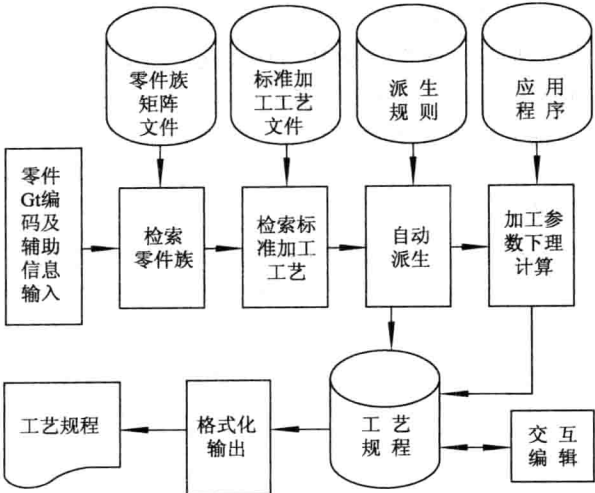


图 1-2 派生式系统工作原理

20 世纪 70 年代中期开始了创成式（Generative）系统的研究和开发，而且很快被认为是最有前途的方法，图 1-3 所示为创成式系统工作原理图。理想的创成式 CAPP 系统是通过决策逻辑效仿人的思维，在无须人工干预的情况下自动生成工艺。1977 年，Wysk 首次提出了一个创成式 CAPP 系统 APPAS。可是经过多年的努力，这种理想的 CAPP 系统也未能达到真正意义上的创成式。因此，有人提出了半创成式系统，即综合派生式和创成式，在多数情况下使用派生式，在没有典型工艺的情况下使用创成法生成工艺。这种半创成式系统目前被认为是最有前途的发展方向之一。

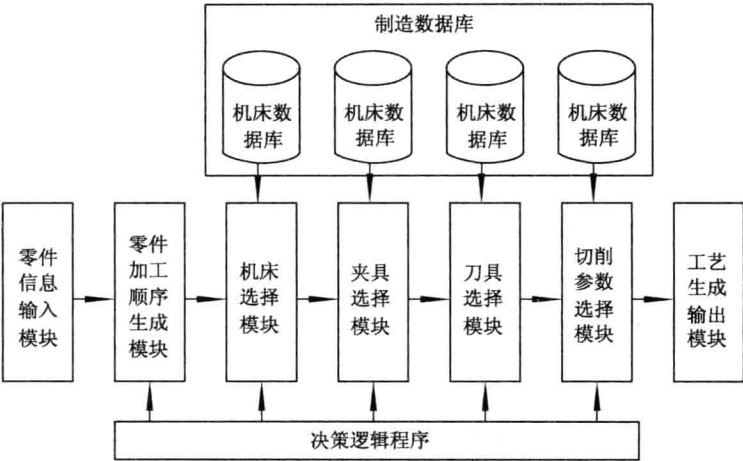


图 1-3 创成式系统工作原理

我国对 CAPP 的研究始于 20 世纪 80 年代初，1982 年上海同济大学正式推出了我国第一个 CAPP 系统——TOJICAP。在此之后，国内掀起了研究 CAPP 的热潮。特别在“九五”期间随着机械设计“甩图板”工程和计算机辅助技术的应用，企业对 CAPP 的需求更加迫切。近几年来，我国市场上出现了几种有代表性的 CAPP 软件，包括武汉开发 CAPP 软件，上海思普 SIPM/CAPP 软件系统和清华天河 CAPP 软件系统等，在一定程度上满足了国内企业的需求。CAPP 研究的发展历程如图 1-4 所示。

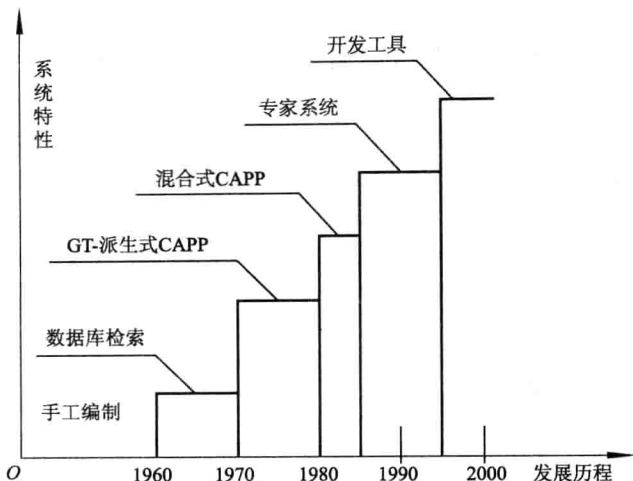


图 1-4 CAPP 研究的发展历程

1.2.4 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，在专业系统上开发的编程机及部分编程软件如：FANOC、Semems 编程机，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是直接数控刀路。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、MarsterCAM 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。

科技在不断的发展，因此 CAM 技术也是一个不断发展的过程。通过提高 CAM 的技术，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。

1.3 CAD/CAM 系统的基本功能

在 CAD/CAM 系统中, 计算机主要帮助人们完成产品结构描述、工程信息表达、工程信息传输与转化、结构及过程的分析与优化、信息管理与过程管理等工作。由于 CAD/CAM 系统所处理的对象不同, 对硬件的配置、选型不同, 所选择的支撑软件不同, 因此对系统功能的要求也会有所不同, 系统总体与外界进行信息传递与交换的基本功能是靠硬件提供的, 而系统所能解决的具体问题是由软件保证的。CAD/CAM 系统应具有计算机辅助图形处理、输入/输出、信息存储和管理及人机交互等基本功能。

1.3.1 计算机辅助图形处理

计算机辅助图形处理技术是 CAD/CAM 的重要组成部分, 它的发展有力地推动了 CAD/CAM 的研究和发展, 为 CAD/CAM 提供了高效的工具和手段, 而 CAD/CAM 的发展又不断对其提出新的要求和设想, 因此, CAD/CAM 的发展与计算机辅助图形处理技术的发展有着密不可分的关系。计算机辅助图形处理就是利用计算机存储、生成、处理和显示图形, 并在计算机控制下, 把过去由人工一笔一画完成的绘图工作由自动绘图机等图形输出设备来完成。CAD/CAM 是一个人机交互的过程, 从产品的造型、构思、方案的确定、结构分析到加工过程的仿真, 系统随时保证用户能够观察、修改中间结果, 实时编辑处理。用户的每一次操作, 都能从显示器上及时得到反馈, 直到取得最佳的设计结果。图形显示功能不仅能够对二维平面图形进行显示控制, 还应当包含三维实体的处理。在机械产品设计中, 涉及大量的图形图像处理任务, 如图形坐标的变换、裁剪、渲染、消隐处理等, 无论是 CAD、CAPP、CAM, 都需要用到这项功能, 是 CAD/CAM 系统所必备的。

1.3.2 输入/输出功能

在 CAD/CAM 系统运行中, 用户需不断地将有关设计的要求、各步骤的具体数据等输入计算机内, 通过计算机的处理, 能够输出系统处理的结果, 且输入/输出的信息既可以是数值的, 也可以是非数值的 (例如图形数据、文本、字符等)。

在 CAD/CAM 系统中, 大量的信息是以人机交互方式输入系统的, 但也有许多情况是以计算机自动采集方式输入的, 如车间的运输与控制系统、质量保证系统、以反求工程为基础的造型系统等, 因此 CAD/CAM 系统应具备自动信息输入功能。

CAD/CAM 系统的信息输出包括各种信息在显示器上的显示、工程图的输出、各种文档的输出和控制命令输出等。图形和各种信息的显示是实现人机交互的基础; 工程图的输出是 CAD/CAM 系统的基本要求, 尽管在某些场合实现了无图加工, 但在工程设计中, 二维图形依然是表达工程信息最直观的手段, 在很多场合均需要输出二维图纸, 加人工审图、CAPP 中的工艺图、复杂的加工信息标注等; 文档的输出种类繁多, 如设计文档、工艺文档、数控程序、程序检验报告、各类调用单、质检单等; 控制命令包括设备驱动命令等。

1.3.3 信息存储与管理功能

由于 CAD/CAM 系统运行时数据量很大, 有很多算法都能生成大量的中间数据, 尤其是对图形的操作、交互式的设计以及结构分析中的网格划分等。为了保证系统能够正常的运行, CAD/CAM 系统必须配置容量较大的存储设备, 支持数据在模块运行时的正确流通。另外, 工程

数据库系统的运行也必须有存贮空间的保障。

由于 CAD/CAM 系统中数据种类繁多,既有几何图形数据,又有属性语义数据;既有产品定义数据,又有生产控制数据;既有静态标准数据,又有动态过程数据,且结构相当复杂。因此, CAD/CAM 系统应提供有效的管理手段,支持设计与制造全过程的信息流动与交换。通常, CAD/CAM 系统采用工程数据系统作为统一的数据环境,实现各种工程数据的管理。

1.3.4 人机接口与人机交互

在 CAD/CAM 系统中,人机接口是用户与系统连接的桥梁。友好的用户界面,是保证用户直接、有效地完成复杂设计任务的必要条件,除软件中界面设计外,还必须有交互设备实现人与计算机之间的不断通信。

任何设计都有需要注意的问题和需要遵循的原则,这是保证设计成功的必要前提,交互设计的原则如下:

1. 一致性与规格化设计

将所开发系统的交互功能设计成统一的模式和语义,以相同的命令语法和操作步骤工作,显示同样的屏幕状态格式。整个系统前后一致、规格统一。只要用户掌握了一个方面或一个模块的交互要求,就能举一反三,推广到系统的其他方面和模块,便于理解和掌握,避免因界面不统一带给用户的陌生感及由此给用户带来的学习工作量和难度的增加。

2. 反馈信息

所谓人机交互,就是在人将信息输入计算机后,计算机能有所反馈。人机交互的特点就在于所有计算机的反馈信息都是由人预先根据各种可能的输入而准备好存入计算机的。它告诉用户计算机是否接受了输入、输入前计算机正在做什么、操作的结果是什么、命令格式对不对、问题出在哪里、下一步怎样进行等,反馈信息应及时、明确,以免用户茫然不知所措。

3. 防错和改错功能

系统内部应设计完整性、合理性约束,具有较好的容错性。

4. 提示和帮助信息

一个 CAD/CAM 系统的运行是十分复杂的,它有一系列定义、描述手段,有各种操作规则、命令语法,有许多可能出现的问题和状况,因此一个良好的在线帮助功能是必不可少的。

5. 用户记忆量最小

交互式 CAD 系统是要找到人和机的最佳结合点,既利用计算机高精度、高速度、大容量的特点,又充分发挥人的聪明智慧,使设计达到高质、高效。但如果系统的使用命令数量多、格式烦琐,则不利于操作人员集中精力进行创造性工作,还容易出错,影响系统的推广和应用。因此,尽量使用户减小记忆负担、避免出错是交互设计的原则之一。其措施有合理设计菜单结构,使菜单的功能命令包容面为百分之百;增加中文提示;设置在线帮助和手册;统一交互模式和操作方式。

1.4 CAD/CAM 的主要任务

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、制造中的数值计算、分析、绘图、工程数据库的管理、工艺设计、模拟仿真等各个方面。

1.4.1 几何造型

在 CAD/CAM 系统中,对产品信息及相关过程信息的描述是一切工作的基础。对机械 CAD/