



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



# 计算机辅助制造 (第三版)

卜 昆 等 编著



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

# 计算机辅助制造

(第三版)

卜 昆 刘维伟 单晨伟 姚倡锋  
蔺小军 田荣鑫 程云勇 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是计算机辅助制造(CAM)教学用书,较为系统地介绍了计算机辅助制造的原理及应用。

全书共八章,以计算机辅助制造技术的手工编程和图像编程、后置处理等为主要内容。书中首先介绍了CAD/CAM系统的基本知识及其发展现状,然后重点介绍了CAM技术。书中内容包括CAD/CAM概述,数控机床的基本概念,数控加工工艺设计及加工参数选择,使用丰富的图例介绍了数控加工程序手工编制、从平面图像编程到多坐标图像编程方法和轨迹验证,介绍了四、五坐标数控加工程序的后置处理算法和通用后置处理系统的原理、数控测量机及精密数字化测量与数据处理,以及快速原型制造技术、电火花加工等特种加工技术。

本书适合高等院校的机械专业学生使用,也可作为从事计算机辅助制造工作的科研人员和数控机床编程及操作人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助制造/卜昆等编著. —3版. —北京:科学出版社,2014.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-041712-1

I. ①计… II. ①卜… III. ①计算机辅助制造-高等学校-教材  
IV. ①TP391.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第196548号

责任编辑:朱晓颖 / 责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年9月第二版 印张:18

2014年11月第三版 字数:412 000

2014年11月第四次印刷

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

当今世界先进制造技术迅速发展,计算机集成制造技术、并行工程技术以及虚拟制造技术(Virtual Manufacturing)正在为企业提高产品质量、赢得市场竞争发挥重要作用。由于市场竞争的日趋激烈,企业对客户严格、多变的需求必须作出快速响应,这已成为企业赢得竞争的必要条件。

近年来,数控技术发展得十分迅速,数控机床的普及率越来越高,数控系统的功能越来越丰富,而同时计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术的发展更是突飞猛进。现代数控加工技术的普遍应用,使产品的加工周期大幅度缩短,提高了产品的加工质量,加速了产品的更新换代,增强了产品的竞争能力。数控技术已是衡量一个国家机械制造业水平的重要标志之一,更是体现一个机械制造企业技术水平的重要标志,许多制造行业都已经采用数控加工的方式来提高产品的竞争力。

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室(原 CAD/CAM 国家重点实验室)于 1974 年率先开展了 CAD/CAM 方向的研究,1981 年获首批博士学位授予权,并培养出本学科国内第一位博士。参与本书第一、二、三版编写的作者刘维伟、汪文虎和任军学及其他作者参加了多项包括航空工业总公司重大项目“航空发动机涡轮叶片精铸模具 CAD/CAM 系统”、“航空发动机关键零件计算机辅助制造系统”及“航空发动机关键制造技术”、“航空发动机整体叶盘制造技术”等项目,获得 2006 年国家科技进步奖二等奖,入选中国高等学校十大科技进展,在计算机辅助制造方面具有丰富的实践经验。

本书在前两版的基础上进行了大幅度改版,依据制造技术的最新发展,从计算机辅助制造(CAM)的基本概念入手,较为系统地介绍了计算机辅助制造的原理及应用,增加了数控加工工艺介绍,加强了多坐标数控编程、后置处理算法、数字化测量与数据处理、特种加工技术等章节内容。通过使用本书,可使学生掌握计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)方面的基本知识、概念,CAM 的初步应用途径和方法,相关新技术的原理和发展方向等。为学生在毕业后从事 CAD/CAM 或与之有关的工作打下基础。本书可作为高等工科院校学生的教材,也可作为数控机床编程及操作人员的参考书。

全书共分 8 章,第 1 章由卜昆编写,第 2 章由刘维伟编写,第 3 章由姚倡锋编写,第 4 章和第 5 章由单晨伟编写,第 6 章由田荣鑫编写,第 7 章由蔺小军和程云勇编写,第 8 章由卜昆、姚倡锋编写,全书由卜昆统稿。

由于计算机辅助制造技术不断发展,而编者的资料及水平有限,书中难免有不足甚至错误之处,敬请读者不吝赐教。

编 者

2014 年 7 月

# 目 录

## 前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 CAD/CAM 概述 .....       | 1  |
| 1.1 引言 .....                 | 1  |
| 1.2 CAD/CAM 系统 .....         | 2  |
| 1.2.1 CAD/CAM 系统的类型 .....    | 3  |
| 1.2.2 CAD/CAM 系统应具备的功能 ..... | 8  |
| 1.3 CAD/CAM 系统的组成 .....      | 10 |
| 1.3.1 系统的组成 .....            | 10 |
| 1.3.2 系统的选择与配置 .....         | 13 |
| 1.4 CAD/CAM 的发展趋势 .....      | 14 |
| 1.4.1 CIMS 技术 .....          | 14 |
| 1.4.2 PDM 技术简介 .....         | 17 |
| 1.4.3 并行工程 .....             | 20 |
| 1.4.4 计算机支持的协同工作 .....       | 23 |
| 1.4.5 网络化制造 .....            | 27 |
| 1.4.6 虚拟制造 .....             | 30 |
| 1.4.7 敏捷制造 .....             | 34 |
| 1.4.8 绿色制造技术 .....           | 38 |
| 第 2 章 数控机床的基本概念 .....        | 42 |
| 2.1 数控机床的定义 .....            | 42 |
| 2.2 数控机床的组成 .....            | 43 |
| 2.2.1 数控装置 .....             | 44 |
| 2.2.2 控制介质 .....             | 44 |
| 2.2.3 伺服系统 .....             | 45 |
| 2.2.4 机床本体 .....             | 45 |
| 2.3 数控机床的分类 .....            | 46 |
| 2.3.1 按工艺用途划分 .....          | 46 |
| 2.3.2 按工作过程运动轨迹划分 .....      | 46 |
| 2.3.3 按伺服系统控制方式划分 .....      | 48 |
| 2.3.4 按同时控制的坐标轴划分 .....      | 49 |
| 2.3.5 按数控装置类型划分 .....        | 50 |
| 2.4 数控加工的几个基本概念 .....        | 50 |
| 2.4.1 机床的切削运动 .....          | 50 |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 2.4.2 | 数控机床的插补 .....         | 51  |
| 2.4.3 | 刀具补偿 .....            | 51  |
| 2.4.4 | 加工坐标系基准和刀位点 .....     | 51  |
| 2.4.5 | 数控编程方法 .....          | 52  |
| 2.5   | 数控机床的特点与发展趋势 .....    | 52  |
| 2.5.1 | 数控机床的特点 .....         | 53  |
| 2.5.2 | 数控机床的发展趋势 .....       | 53  |
| 2.6   | 高速铣削技术 .....          | 54  |
| 2.6.1 | 高速切削技术的发展 .....       | 54  |
| 2.6.2 | 高速切削原理 .....          | 55  |
| 2.6.3 | 高速铣削机床结构 .....        | 57  |
| 2.6.4 | 高速数控铣削的程序处理 .....     | 59  |
| 2.6.5 | 高速铣削技术的应用 .....       | 59  |
| 第3章   | 数控加工工艺 .....          | 61  |
| 3.1   | 数控加工工艺设计 .....        | 61  |
| 3.1.1 | 零件数控加工基本过程 .....      | 61  |
| 3.1.2 | 数控加工的工艺过程设计 .....     | 62  |
| 3.1.3 | 数控加工专用技术文件的编写 .....   | 70  |
| 3.2   | 数控加工夹具 .....          | 71  |
| 3.2.1 | 数控加工夹具概述 .....        | 72  |
| 3.2.2 | 数控加工中的基准 .....        | 73  |
| 3.2.3 | 工件的定位和夹紧 .....        | 75  |
| 3.2.4 | 数控加工常用夹具 .....        | 80  |
| 3.3   | 数控加工刀具 .....          | 83  |
| 3.3.1 | 数控加工刀具材料 .....        | 83  |
| 3.3.2 | 数控刀具分类及要求 .....       | 87  |
| 3.3.3 | 数控车削刀具 .....          | 88  |
| 3.3.4 | 数控铣削刀具 .....          | 93  |
| 3.4   | 数控加工切削参数选择 .....      | 100 |
| 3.4.1 | 数控加工切削参数 .....        | 100 |
| 3.4.2 | 切削参数选择方法 .....        | 101 |
| 3.5   | 叶片类零件数控加工工艺 .....     | 104 |
| 3.5.1 | 叶片加工结构特点 .....        | 104 |
| 3.5.2 | 叶片数控加工工艺规划 .....      | 105 |
| 3.5.3 | 叶片数控加工关键工艺 .....      | 106 |
| 第4章   | 数控加工程序编制基础 .....      | 109 |
| 4.1   | 数控编程基本知识 .....        | 109 |
| 4.1.1 | 数控机床坐标系和运动方向的规定 ..... | 109 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.1.2 | 数控加工坐标系的找正 .....          | 110 |
| 4.1.3 | 数控加工中的常用术语 .....          | 111 |
| 4.2   | 数控程序常用功能字及格式 .....        | 115 |
| 4.2.1 | 数控加工程序的结构形式 .....         | 115 |
| 4.2.2 | 数控程序常用功能字 .....           | 115 |
| 4.2.3 | 常见程序段格式简介 .....           | 120 |
| 4.2.4 | 数控程序输入方式 .....            | 121 |
| 4.3   | 数控编程的工艺及数学处理 .....        | 121 |
| 4.3.1 | 数控编程的内容与步骤 .....          | 121 |
| 4.3.2 | 数控编程的工艺处理 .....           | 122 |
| 4.3.3 | 二维轮廓编程的数学处理 .....         | 127 |
| 4.3.4 | 切削参数的数学计算 .....           | 129 |
| 4.4   | 简单二维轮廓加工数控编程 .....        | 130 |
| 4.4.1 | 二维轮廓加工注意事项 .....          | 130 |
| 4.4.2 | 二维轮廓加工程序格式 .....          | 131 |
| 4.4.3 | 二维轮廓加工数控编程实例 .....        | 133 |
| 4.4.4 | 孔加工数控编程实例 .....           | 139 |
| 4.5   | 数控车床的程序编制 .....           | 140 |
| 4.5.1 | 数控车削编程特点 .....            | 140 |
| 4.5.2 | 数控车床的程序编制 .....           | 140 |
| 4.5.3 | 数控车床加工程序举例 .....          | 142 |
| 第 5 章 | 计算机辅助数控编程 .....           | 144 |
| 5.1   | 计算机辅助数控编程概述 .....         | 144 |
| 5.1.1 | 数控编程发展历程 .....            | 144 |
| 5.1.2 | 数控编程过程 .....              | 145 |
| 5.1.3 | 数控加工刀具轨迹的构成 .....         | 146 |
| 5.1.4 | 数控编程相关要素 .....            | 148 |
| 5.2   | APT 语言编程概述 .....          | 151 |
| 5.2.1 | 几何定义语句 .....              | 151 |
| 5.2.2 | 轮廓控制方式 .....              | 153 |
| 5.2.3 | 刀具运动语句 .....              | 154 |
| 5.2.4 | 其他控制语句及应用举例 .....         | 156 |
| 5.2.5 | 宏指令语句简介 .....             | 157 |
| 5.3   | 二维轮廓数控加工编程 .....          | 158 |
| 5.3.1 | 二维轮廓数控加工特点及应用 .....       | 158 |
| 5.3.2 | 二维外形轮廓刀具轨迹生成 .....        | 161 |
| 5.3.3 | 二维型腔刀具轨迹生成 .....          | 163 |
| 5.3.4 | 二维字符刀具轨迹生成 .....          | 166 |
| 5.3.5 | 二维图像 NC 编程中应特别注意的问题 ..... | 166 |



|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 5.4   | 三坐标数控编程            | 168 |
| 5.4.1 | 三坐标加工的特点和应用        | 168 |
| 5.4.2 | 三坐标加工中的术语          | 169 |
| 5.4.3 | 三坐标加工刀具轨迹生成方法      | 170 |
| 5.5   | 多坐标数控编程            | 178 |
| 5.5.1 | 四坐标加工的特点及应用        | 178 |
| 5.5.2 | 五坐标加工的特点及应用        | 181 |
| 5.5.3 | 五坐标加工的刀具轨迹生成方法     | 182 |
| 5.5.4 | 五坐标数控编程实例          | 184 |
| 5.6   | 刀具轨迹验证与仿真          | 185 |
| 5.6.1 | 刀具轨迹验证与仿真简介        | 185 |
| 5.6.2 | 刀具轨迹验证             | 186 |
| 5.6.3 | 机床运动仿真             | 187 |
| 第6章   | 数控加工程序的后置处理        | 189 |
| 6.1   | 基本概念               | 189 |
| 6.2   | 后置处理的一般过程          | 189 |
| 6.3   | 后置处理算法             | 193 |
| 6.3.1 | 四坐标机床后置处理算法        | 193 |
| 6.3.2 | 双直摆工作台五坐标机床后置处理算法  | 195 |
| 6.3.3 | 直摆头加摆盘式五坐标机床后置处理算法 | 196 |
| 6.3.4 | 斜摆头加摆盘式五坐标机床后置处理算法 | 197 |
| 6.3.5 | 后置处理中的其他问题         | 199 |
| 6.4   | 数控加工程序逆后置处理和程序转换   | 200 |
| 6.4.1 | 数控加工程序转换过程         | 200 |
| 6.4.2 | 后置和逆后置处理算法构造       | 202 |
| 6.4.3 | 数控加工程序坐标转换算法       | 206 |
| 6.4.4 | 算法实例               | 207 |
| 6.5   | 通用后置处理系统的原理及实现途径   | 208 |
| 6.5.1 | 通用后置处理系统原理         | 208 |
| 6.5.2 | 通用后置处理程序系统设计的前提条件  | 209 |
| 6.5.3 | 通用后置处理系统程序结构设计     | 210 |
| 第7章   | 数字化精密测量            | 213 |
| 7.1   | 三坐标测量机             | 213 |
| 7.2   | 测量机的组成、结构形式及精度评价指标 | 215 |
| 7.2.1 | 测量机的组成             | 215 |
| 7.2.2 | 测量机的结构形式           | 215 |
| 7.2.3 | 测量机的精度评价指标         | 218 |
| 7.3   | 测量机的探测系统           | 219 |



|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 7.3.1 | 测头的分类            | 219 |
| 7.3.2 | 接触式测头            | 220 |
| 7.3.3 | 光学探测系统           | 221 |
| 7.4   | 测量机曲面测量路径规划      | 225 |
| 7.4.1 | 曲面测量模式           | 225 |
| 7.4.2 | 测量路径规划原则         | 225 |
| 7.4.3 | 常见的几种路径规划方法      | 225 |
| 7.4.4 | 叶片型面测量路径规划       | 225 |
| 7.5   | 测量机测头半径补偿        | 226 |
| 7.6   | 航空发动机叶片测量数据处理方法  | 228 |
| 7.6.1 | 叶片型面公差           | 228 |
| 7.6.2 | 等高法测量数据处理        | 229 |
| 7.7   | 在机测量             | 230 |
| 7.7.1 | 在机测量的概念          | 230 |
| 7.7.2 | 在机测量系统的组成        | 230 |
| 7.7.3 | 在机测量系统的工作原理      | 231 |
| 7.7.4 | 在机测量系统的功能        | 232 |
| 7.8   | CT 测量            | 233 |
| 7.8.1 | CT 测量的概述         | 233 |
| 7.8.2 | CT 测量系统组成        | 234 |
| 7.8.3 | 测量点云的获取          | 234 |
| 7.9   | 点云数据的处理          | 235 |
| 7.9.1 | 点云拼合             | 235 |
| 7.9.2 | 点云去噪             | 235 |
| 7.9.3 | 点云三角化            | 235 |
| 7.9.4 | 偏差分析             | 235 |
|       | 思考题              | 236 |
| 第 8 章 | 计算机辅助特种加工技术      | 237 |
| 8.1   | 计算机辅助快速成形制造      | 237 |
| 8.1.1 | 快速成形技术的原理        | 237 |
| 8.1.2 | 快速成形过程           | 238 |
| 8.1.3 | 快速成形机及成形方法       | 238 |
| 8.1.4 | 快速成形机的选择         | 242 |
| 8.1.5 | 快速成形的后处理         | 243 |
| 8.1.6 | 快速成形的精度、效率与标准    | 244 |
| 8.2   | 计算机辅助电火花加工       | 246 |
| 8.2.1 | 电火花加工的基本原理及机床    | 246 |
| 8.2.2 | 电火花加工编程、加工工艺及实例  | 249 |
| 8.2.3 | 电火花线切割编程、加工工艺及实例 | 252 |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 8.3 其他计算机辅助特种加工技术发展趋势..... | 255 |
| 8.3.1 电化学加工 .....          | 255 |
| 8.3.2 激光加工技术 .....         | 258 |
| 8.3.3 电子束加工技术 .....        | 261 |
| 8.3.4 离子束加工技术 .....        | 263 |
| 8.3.5 超声波加工技术 .....        | 265 |
| 8.3.6 超高压水射流加工技术 .....     | 267 |
| 8.3.7 复合加工技术 .....         | 269 |
| 参考文献.....                  | 277 |

# 第 1 章 CAD/CAM 概述

## 1.1 引 言

计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)和计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM),是指以计算机为主要技术手段来生成和运用各种数字信息和图形信息,并进行产品设计和制造。它是人类智慧与计算机系统硬件和软件功能的巧妙结合。它可以将远非单纯人脑所能承担的设计和制造任务当作日常工作处理,其处理的复杂程度,将随着一代又一代新的计算机硬件和软件的出现而不断提高。

CAD/CAM 技术是 20 世纪中后期迅速发展起来的一门新兴的综合性计算机应用系统技术。20 世纪 40 年代出现第一台计算机,50 年代出现第一台数控机床,60 年代出现交互式图像显示设备、定义自由曲面的方法和力学计算的有限元法,70 年代出现工作站(Workstation)和造型技术(Wireframe Modeling、Solid Modeling、Surface Modeling)、数据库技术,80 年代出现智能机器人技术和专家系统,CAD/CAM 历经了形成、发展、提高和集成各个阶段。市场环境(企业竞争,产品市场寿命短)、设计环境(开发新产品的成功率要高而设计周期短)、制造环境(多品种、小批量和高质量)的变化是 CAD/CAM 技术发展的动力。今天 CAD/CAM 已渗透到工程技术和人类生活的几乎所有领域,并日益向纵深发展。迄今为止,在计算机技术的应用领域中,CAD/CAM 的覆盖率可达 60%以上。

CAD/CAM 技术主要服务于机械、电子、宇航、建筑、轻纺等产品的总体设计、外形设计、结构设计、优化设计、运动机构的模拟设计、有限元分析的前后置处理、物体质量特性计算、工艺过程设计、数控加工、检验测量等环节。它涉及计算机科学、计算数学、计算几何、计算机图形学、数据结构、数据库、数控技术、软件工程、仿真技术、机器人学、人工智能等学科领域。

CAD/CAM 技术具有高智力、知识密集、更新速度快、综合性强、效益高、初始投入大等特点。CAD/CAM 技术的发展,不仅深刻地改变了人们能够借以设计和制造各种产品的常规方式,而且影响到企业的管理和商业对策。因此,任何一个企业和研究机构要想保持设计和制造中的竞争能力,就必须努力研究、开发或使用 CAD/CAM 技术。

设计、制造和市场被看作是从设计思想形成到交付产品的生产过程中三个不可分割的组成部分(图 1-1)。市场把产品的需求信息提供给设计部门,设计部门将产品的定义数据和各种参数传送到制造部门,制造部门中的计划职能单位将产品的定义数据(如几何数据、加工信息等)转换成工艺定义数据和有关产品制造的

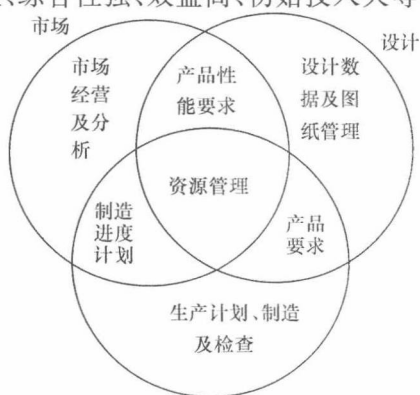


图 1-1 市场、设计和制造的相互关系

说明,然后将这些信息传送到工厂的加工现场,工厂据此进行生产。以计算机为基础的计划和管理工作,直接定出进度计划并监视制造过程和控制产品质量。

## 1.2 CAD/CAM 系统

物质世界的各种发明创造,都是为了满足人类的需要而产生的。在各种情况下,总是先有某种需要,而后产生一种怎样才能满足那种需要的思想,最后经过努力将其变为现实。人们从需要到产生思想,再把这种思想变成实物,一般称其为设计和制造过程。这一过程包括市场需求分析、产品性能要求的确定、总体设计模型的建立、模型的综合分析、结构设计、方案优选、评估决策、工程描述、工艺规程设计、加工、装配和检测等环节(图 1-1),或者概括地说,产品设计和制造是指从市场需求分析开始,直到成为产品所必需的一系列有序活动。

从计算机科学的角度看,设计和制造过程是一个信息处理、交换、流通和管理的过程。因此,人们能够对产品从构思到投放市场的整个过程进行分析和控制,即对设计和制造过程中信息的产生、转换、存储、流通、管理进行分析和控制。CAD/CAM 系统实质上是一个有关产品设计和制造的信息处理系统。

产品的类型虽然成千上万,但其设计和制造的时间顺序模式却大同小异。从图 1-1 可以看出,任何设计制造过程,都是从对一种需求的识别开始。认识一种需求本身就是一个创造过程。设计者常在竞争形势的观察中察觉出大量的需求。在对需求进行了认真的分析后,才能进入创造性的工程设计阶段。是重新设计还是改型设计,都应从方案(总体)设计入手,使设计产品模型化,然后进行结构设计。一旦结构设计和性能分析等工作结束,就要与所要求的设计性能进行比较并得到最后的经过优选的各种参数。然后,即可进入零部件的设计和制造。

为了提高设计师或一个群体解决设计、制造问题的创造性和工作效率,已经提出了多种辅助手段。CAD/CAM 技术就是一种被人们广泛采用的主要辅助手段。这是工业革命以来工程技术领域中发生的最重大的变化之一。

CAD/CAM 系统是围绕着产品的设计与制造两大部分独立发展起来的。CAD 从方程求解计算和绘图入手,发展到现在的诸项内容:建立数学模型、工程分析、产品设计(包括方案设计、总体设计、零部件设计)、动态模拟、自动绘图等;CAM 从手工编程、自动编程,到现在的诸项内容:工艺装备设计、数字化(图形化)控制、工艺过程计划(Computer Aided Process Planning, CAPP)、机器人、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、工厂管理以及一些企业正在发展的 CIMS 项目。

到目前为止,计算机辅助制造有狭义和广义的两个概念。CAM 的狭义概念指的是从产品设计到加工制造之间的一切生产准备活动,它包括 CAPP、NC 编程、工时定额的计算、生产计划的制定、资源需求计划的制定等。这是最初 CAM 系统的狭义概念。到今天,CAM 的狭义概念甚至更进一步缩小为 NC 编程的同义词。CAPP 已被作为一个专门的子系统,而工时定额的计算、生产计划的制定、资源需求计划的制定则划分给 MRPII (Manufacturing Resource Planning, 制造资源计划)/ERP (Enterprise Resource Planning, 企业资源计划)系统来完成。CAM 的广义概念包括的内容则多得多,除了上述 CAM 狭义定义所包含的所有内容外,它还包括制造活动中与物流有关的所有过程(加工、装配、检验、存储、输送)的监视、控制和管理。

纵观 CAD/CAM 发展的历史,国内外的情况都是先由数控机床的出现,进而发展了 CAM,由于 CAM 的要求,促进了 CAD 的发展。过去复杂外形零件生产方面的致命弱点是模拟量的信息传递,CAM 中自动编程的出现,迫切要求用数学方法来定义零件。此外,CAD 系统的出现彻底改变了设计工作过程的流程,也改变了与生产相关的处理。1963 年图形显示器的出现使原来的 CAD 工作发生了根本的变革,通过数学方法建立产品的统一、完整的三维几何模型,信息流直接从 CAD 流到 CAM,即 CAD 的输出正好是 CAM 的输入,达到了真正的 CAD 与 CAM 的结合。

### 1.2.1 CAD/CAM 系统的类型

根据功能的不同,目前市场上流行的商业性 CAD/CAM 系统,大体上可划分为以下两种类型。

#### 1. 通用性系统

典型的通用性系统有 CADAM、UG-II、CATIA、Pro-E、I-DEAS 等。

##### (1) CADAM

CADAM 系统是美国洛克希德飞机公司 1965 年开始研制的绘图加工系统,1972 年投入生产使用,1975 年进入市场。目前国际上已有近百家飞机公司和其他部门采用,我国也有十余套 CADAM 系统在使用。CADAM 系统是在 IBM 大型机系列和 IBM2250 光笔图形显示终端上开发的。

CADAM 的设计思想是使新的计算机绘图方式尽量保持原来工程制图的习惯,用三面投影图描述三维形体。其内部的存储格式是  $2\frac{1}{2}$  坐标的,如存放一个视图的 Z 平面位置以及各点的 x、y 坐标值。该系统可以在屏幕上百分之百地完成一幅工程图的图面设计,包括标注尺寸线和全部图注,可以方便地存储、调用和修改图纸,同时还能对所设计的产品做几何分析、构造有限元模型、生成数控加工指令等。

##### (2) UNIGRAPHICS

UG(UNIGRAPHICS)是麦道公司(后并入电子资讯系统有限公司(EDS),现更名为 UGS 公司)1984 年起推出的商品化 CAD/CAM/CAE 系统软件,它最早是在 VAX 计算机的通用环境下开发的,后来逐渐转移到 UNIX 工作站上,如 SGI 工作站。目前推出的 UG 系统从 15 版本开始已经可以在微机上运行,从 16 版本开始已经完全抛开 UNIX 操作系统,而采用 Windows NT 或 Windows 2000,且用户界面与 Windows 的界面风格相统一。但可以仿 UNIX,使 UG 除了可以在一般的微机(至少 64MB 内存)上运行外,也可以在工作站上运行。

UG 是业界最实用的工业设计软件包之一,它提供给用户一个灵活的复合建模模块。UG 作为一个 CAD/CAE/CAM 系统,主要提供了以下功能:工程制图模块、线框、实体、自由曲面造型模块、特征建模、用户自定义 CAD/CAE/CAM 系统特征、装配、虚拟现实及漫游、逼真着色、WAVE 技术(参数化产品设计平台)、几何公差等 CAD 模块。

UG 还有较强的 CAM 功能,主要有车削加工、型芯和型腔铣削、固定轴铣削、清根切削、可变轴铣削、顺序铣、后置处理、切削仿真、线切割、图形刀轨编辑器、NURBS(非均匀 B 样条)轨迹生成器。

提供的 CAE 部分主要有如下功能:有限元分析、机构分析、注塑模分析等模块。另外,

UG 还提供了较为完善的钣金件的设计、制造、排样及高级钣金的设计功能。

此外,UG 还提供了用户进行二次开发的接口及用户界面的设计工具 UG OPEN/API 等。值得一提的是 UG 的一个特色产品 IMAN。

UG 的 IMAN 是一种经过生产验证的 PDM 解决方案,目前在各种不同行业的大、小型企业中得到了广泛应用。IMAN 可以从很少的用户扩展到非常多的用户,并能够管理单站和多站企业环境。其产品可靠的结构使客户可以持续以最少的数据移植成本充分利用数据和信息技术所带来的新优势。

IMAN 还是提供虚拟产品开发(VPD)和支持一体化产品开发过程和环境的技术产品,能够保证工程师们在提供端到数据端管理的无缝电子产品开发环境中密切合作。除了与工程应用和实用工具如 CAD/CAM 的紧密集成外,IMAN 还具备将信息与后处理系统如采购管理和企业资源规划系统的链接能力。

### (3) CATIA

CATIA 是由法国著名飞机制造公司 Dassault 开发并由 IBM 公司负责销售的 CAD/CAM/CAE/PDM 应用系统,CATIA 起源于航空工业,其最大的标志客户即美国波音公司。波音公司通过 CATIA 建立起了一整套无纸飞机生产系统,取得了重大的成功。现在的 CATIA 软件分为 V4 版本和 V5 版本两个系列。V4 版本应用于 UNIX 平台,V5 版本应用于 UNIX 和 Windows 两种平台。V5 版本的开发开始于 1994 年,UNIX 平台下的 V4 版本尽管功能强大,但也有其缺点,即菜单较复杂,专业性太强等。一个设计人员熟练掌握 CATIA V4 版本往往需要两三年甚至更长的时间。为了使软件能够易学易用,Dassault System 于 1994 年开始重新开发全新的 CATIA V5 版本,新的 V5 版本界面更加友好,功能也日趋完善,并且开创了 CAD/CAE/CAM 软件的一种全新风格。

CATIA 提供了下面几种功能:

- 1) 提供基于规则驱动的实体建模、混合建模以及钣金件设计,相关装配与集成化工程制图产品等。
- 2) 提供了一系列易用的模块来生成、控制并修改结构及自由曲面物体。
- 3) 提供了最先进的高级电子样机检查及仿真功能;知识工程产品能帮助用户获取并重复使用本企业的经验,以优化整个产品生命周期。
- 4) 在产品设计过程中集成并交换电气产品的设计信息。
- 5) 提供了容易使用,面向设计者的零件及其装配的应力与频率响应等分析。
- 6) 提供面向车间的加工解决方案。
- 7) 用户制造厂房设施的优化布置设计工作。
- 8) 提供各类数据转换接口,与 CATIA V4 的集成帮助将 V4 与 V5 有效地组合成为一个集成的混合环境。

CATIA 软件是与 UG 软件功能类似的 CAD/CAE/CAM 系统,但 CATIA 主要应用于航空航天工业,而 UG 主要在汽车、船舶等行业应用广泛。在最近几年,UG 在航空航天工业也占有一席之地,且有与 CATIA 平分秋色之势。

### (4) Pro-Engineer

Pro-E(Pro-Engineer)和 Solidworks 在机械制造领域中大量使用。

Pro-E 是 PTC 公司(Parametric Technology Corporation)的著名产品。它备有统一的数

据库,并具有较强的参数化设计、组装管理、生产加工过程及刀具轨迹等功能;它还提供各种现有标准交换格式的转换器以及与著名的 CAD/CAE 系统进行数据交换的专用转换器,所以也具有集成化功能。该系统的另一个特点是硬件独立性,它可以在 DEC、HP、IBM、SUN、SGI 等各种工作站上运行。Pro-E 采用实体造型技术,从 8.0 版本开始增加了参数化曲面造型功能,并具有用户自定义形状特征的模块。

#### 1) 参数化设计和特征功能。

Pro-E 是采用参数化设计的、基于特征的实体模型化系统,工程设计人员采用具有智能特性的基于特征的功能去生成模型,如腔、壳、倒角及圆角,也可以随意勾画草图,轻易改变模型。这一功能特性给工程设计者提供了在设计上从未有过的简易和灵活。

#### 2) 单一数据库。

Pro-E 建立在统一基层的数据库上,不像一些传统的 CAD/CAM 系统建立在多个数据库上。所谓单一数据库,就是工程中的资料全部来自一个库,使得每一个独立用户可为一件产品造型而工作,不管他是哪一个部门的。换言之,在整个设计过程的任何一处发生改动,亦可以前后反应在整个设计过程的相关环节上。例如,一旦工程样图有改变,NC(数控)工具路径也会自动更新;组装的工程图如有任何变动,也完全同样反应在整个三维模型上。这种独特的数据结构与工程设计的完整结合,使得一件产品的所有设计完全结合起来。这一优点,使得设计更优化,成品质量更高,产品能更好地推向市场,价格也更便宜。

### (5) I-DEAS

I-DEAS 是由美国国家航空及宇航局(NASA)支持开发,是 SDRC 公司于 1979 年发布的第一个完全基于实体造型技术的大型软件,目前属于 EDS 公司(2001 年,EDS 宣布收购合并 UGS 与 SDRC)。I-DEAS 提供一套基于 Internet 的协同产品开发解决方案,包含全部数字化产品开发流程。I-DEAS 是可升级的、集成的、协同电子机械设计自动化(Manufacturing Design Automatically,MDA)解决方案。I-DEAS 使用数字化主模型技术,这种技术将帮助用户在设计早期阶段就能从“可制造性”的角度更加全面地理解产品。纵向及横向的产品信息都包含在数字化主模型中,这样,在产品开发流程中的每一个部门都将更容易地进行有关全部产品信息的交流。这些部门包括:制造与生产、市场、管理及供应商等。

数字化主模型帮助用户开发及评估多种设计概念,使得设计的最终产品更贴近用户的期望。质量成为设计过程自身的一部分。通过为相关产品开发任务提供公共基础的方法,整个团队实现并行工作。数字主模型能够使不同职能部门的多个团队在产品开发早期共同工作,它替代了在同一时期不同团队只能建立各自数据的模式,这样就大大地缩减了产品的上市时间。它在航空航天、汽车运输、电子及消费品和工业设备等方面拥有众多的用户。

I-DEAS 除了基本的 CAD 造型及 CAM 功能以外,在 I-DEAS 的新版本中又增加了以下一些功能,主要包括:

#### 1) CAD 方面。

① 复杂曲面建立能力,包括模压/凸台、复杂角结构圆角以及变量化扫描。

② 产品修改工具,包括增强的选取意图捕捉及几何映射。

#### 2) CAM 方面。

机床仿真、笔尖铣削、光顺的高速加工连接、交互的图形化刀具轨迹编辑以及自动孔加工等。



### 3) CAE 方面。

基于网格区域的几何提取、装配的有限元模型构造等。

由于 I-DEAS 和 UG 的内核都是 Parasolid,因此 I-DEAS 和 UG 实现两个产品基于 Parasolid/ eXT 技术的互操作就成为可能。在 2001 年推出的 I-DEAS 9 中,已实现了 I-DEAS 与 UG 之间的互操作。两个系统彼此能互相访问,在一个系统中进行设计,另一个系统可以对该设计进行分析或加工。用户可以充分利用两套软件的优势来优化自己的产品研发流程,获取更高的价值。两套系统之间可进行双向变更的相关通知及更新,并保护设计意图,实现对历程树等的智能跟踪。两套软件将按阶段逐步实现针对几何、模型文件、TDM 数据的互操作性。互操作功能将使用户运用两个产品的互补性以改善其企业的设计过程。

### (6) PARASOLID

PARASOLID 是英国 EDS(Electronic Data Systems)公司推出的 CAD/CAM 开发平台,它是由英国剑桥的 Shape Data 公司研制的,其前身是早期的实体造型先驱 Romulus 系统(Romulus 最早期工作要追溯到 20 世纪 70 年代在剑桥大学的开发)。Shape Data 公司在 1985 年推出了一个面向工程师的新产品项目,此项目的目标是在以复杂曲面为边界的实体造型领域提供通用的开发平台,由此诞生了 PARASOLID。目前,PARASOLID 在世界上已有 7 000 多个基于它的最终用户产品,其应用范围主要集中在机械 CAD/CAM/CAE 领域,它的用户群包括系统开发商、企业、大学、研究机构等。UG、Solidworks、SolidEdge、PATRAN、ANSYS 及众多 CAD/CAE 系统都是以它作为图形核心系统。应用 PARASOLID 的主要公司有 EDS-UG,ICAD,Siemens-Nixdorf,Fujitsu,General Electric 和 General Motors 等。

PARASOLID 支持流形造型与生成形拓扑(非流形造型、单元体造型、混合维造型),提供了布尔运算、局部操作、显示、查询等功能。PARASOLID 的造型能力强而丰富,其主要特色表现在以下方面:

#### 1) 复杂过渡。

PARASOLID 提供了丰富的边、面高级过渡和倒圆功能(如, Rolling Ball、Variable-Radius、Curvature Continuous、Conic-Section 等)。

#### 2) 容差造型。

PARASOLID 从其他 CAD 系统导入数据(尤其是裁剪曲面)时无须对模型进行修补,而是采用了独特的容差造型(Tolerant Modeling)技术。通过为每个边赋予不同的容差,使模型交换可靠、精确,避免了几何数据的丢失、缝隙的产生及其他误差。

#### 3) 抽壳、等距和变厚。

抽壳、等距和变厚是生成薄壁零件的三种操作,作为可靠的造型器,PARASOLID 支持复杂几何操作,并允许结果模型的拓扑与原始模型的拓扑相差很大。

#### 4) 拔模。

PARASOLID 支持复杂零件的拔模操作,支持对复杂曲面几何的变形操作。这些功能与非均匀变化的结合,为各种模具设计提供了强有力的工具。

### 2. 单功能系统

较典型的单功能系统有如下几种。

#### (1) MasterCAM

MasterCAM 是由美国 CNC Software 公司开发的基于微机的 CAD/CAM 软件,V5.0 以

上版本运行于 Windows 操作系统。由于其价格较低且功能齐全,因此有很高的市场占有率。

系统的主要功能有:

1) 造型功能。

① 采用先进的 NURBS 样条设计。

② 对 Spline 或曲线可做熔接(Blend)、补正(Offset)。

③ 多边形、椭圆等图形都有新的画法,切线平行线等绘制更加方便。

④ 曲面处理可由两个曲面及三个曲面产生熔接曲面,可对三个曲面做过渡处理。

⑤ 可提供曲线与曲面、平面与曲面、曲面与曲面倒圆角功能(所有曲面皆可为多重曲面)。

⑥ 在以剖切、边界线、交线、投影线等方式产生曲线时亦可切换至多重曲面的选择功能。

⑦ 基本曲面由举升(Loft)、孔斯(Coons)、直纹(Ruled)、旋转(Revolved)、扫描(Swept)、牵引(Draft)等方式产生,还可以用实体基本元件的方式,产生立方体、圆柱、圆锥、球、环及拉伸等封闭的曲面。

2) 加工功能。

① 加工方式由 2~5 轴,分外形、挖槽、钻孔、单一曲面、多重曲面及五轴加工等项。

② 除可使用原来的加工方式,如平行加工、外形加工、挖槽等加工方式外,MasterCAM V6 提供两种新的多重曲面加工方式,辐射加工(Radial)及多重曲面投影加工(Project)。

③ 零件采用辐射粗、精加工,刀具路径对回转中心呈辐射状,解决了行切加工陡壁零件时效果不好的问题。

④ 加工中可设定起始角度、旋转中心及起始补正距离,以切削方向容差及最大角度增量控制表面精度。

⑤ 对于极不规则零件,可先做 2D 刀具路径,然后把刀具路径投影至多重曲面进行加工。

另外,新版软件还提供了一个有用的功能——批次加工。当有多个刀具路径需生成时,可采用此方式,设置好每个任务的加工参数,调整加工次序,即可让系统按照次序自动执行每一个处理过程。

3) 仿真模拟。

可模拟实际的切削过程,通过设定毛坯及刀具的形状、大小及不同颜色,可以观察到实际的切削过程。

系统同时给出有关加工情况,去除材料量、加工时间等,并检测出加工中可能出现的碰撞、干涉并报告错误在刀具轨迹文件中的位置。

模拟完成后,即可测量零件的表面精度。

4) 显示屏幕。

① 新版软件界面上方有灵活方便的工具棒,可自由设定其中的 98 个按钮,随意调用各种功能。

② 图形可实时用鼠标拖动旋转,彩色渲染图可控制旋转、平移及缩放,可清楚地观察建立的三维模型。

③ 图素选取可用多边形框选,也可取消选择。

④ 在操作过程中,若有疑问,可随时用“?”或“Alt-H”呼叫 HELP,即可显示当前使用功能的详细说明。

5) 数据接口。

软件提供多种图形文件接口,包括 DXF、IGES、STL、STA、ASCII 等。