

普通高等教育“十三五”规划教材

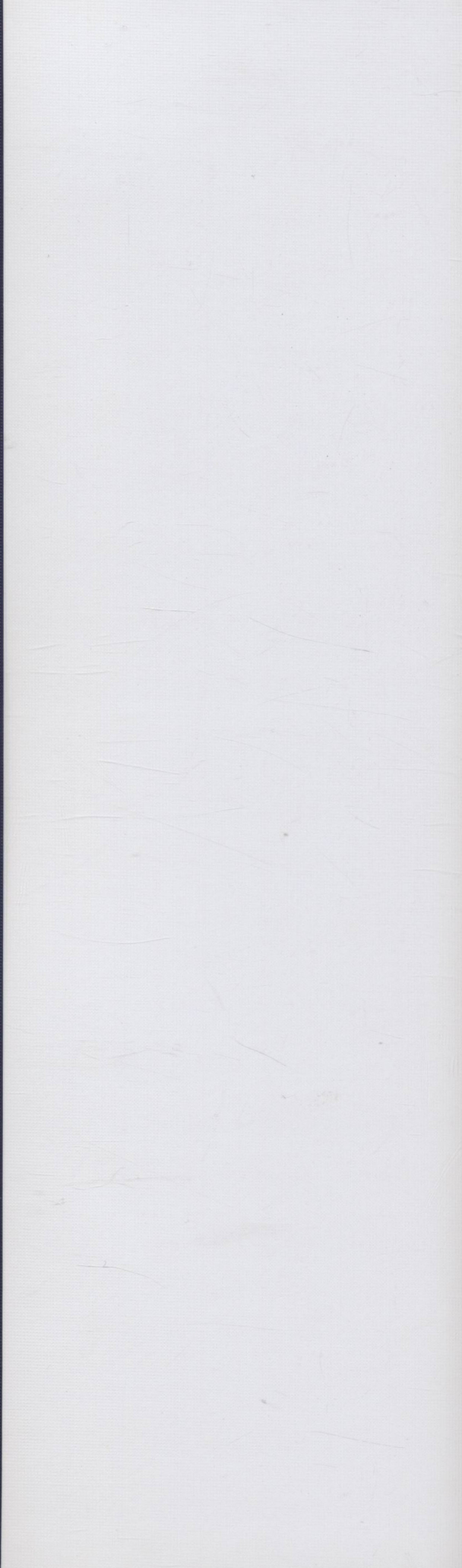
计算机辅助制造

Computer Aided Manufacturing

王红军◎主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

计算机辅助制造

主 编	王红军				
副主编	钟建琳	陈 晓			
参 编	许建新	左云波	刘忠和	刘国庆	
主 审	王先逵				



机械工业出版社

“计算机辅助制造”是机械设计制造及其自动化、车辆工程、机械电子工程等工科专业的一门专业课程。计算机辅助制造课程内容涉及的知识面宽、知识点多、综合性强，与工程实际结合紧密。本书包括计算机辅助制造的发展与趋势、计算机辅助制造的共性技术、成组技术及其零件分类编码、计算机辅助工艺设计、计算机辅助数控编程、计算机辅助质量系统、CAD/CAM 集成的数据交换标准、工业 4.0 与智能制造等内容。

本书可作为普通高等学校机械工程类各专业“计算机辅助制造”课程的本科教材，也可供高职高专院校机械类专业师生和从事机械工程技术的人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

计算机辅助制造/王红军主编. —北京：机械工业出版社，2018.7
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-59096-5

I. ①计… II. ①王… 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（2018）第 022180 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘小慧 责任编辑：刘小慧 安桂芳 商红云

责任校对：肖琳 封面设计：张静

责任印制：张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.75 印张·353 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-59096-5

定价：36.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

前 言

制造业是社会财富的主要来源之一，是国家经济的主导产业，是人民生活水平不断提高和改善的根本保障。制造业正朝着广义的“大制造业”的方向发展，其所涉及的概念和领域正发生着巨大的转变和整合。制造业构成的三大基本要素是“物质、能量和信息”。前两个要素为传统制造业早期的发展起到了不可磨灭的作用，并得到了充分的开发和利用；随着互联网+信息革命的到来，信息在制造业中的作用也日渐突出，信息同其他要素的良好集成成为制造业企业新的核心竞争力。

随着科学技术的发展，计算机技术在机械工业领域得到广泛应用。在人才培养方面，机械工程领域的相关专业均开设计算机辅助制造课程。本课程对于培养学生计算机辅助制造方面的基本能力，提高学生分析和解决工程实际问题的能力起着重要作用，并为后续专业课学习及毕业设计打下良好基础。

本书重点体现创新型、应用型人才的培养，理论与实际相结合，强调工程性和应用性。通过本课程的学习，学生能够掌握 CAPP 的基本概念、CAPP 系统的开发技术和计算机辅助制造 CAXA 编程软件，实现从建模到加工的切削用量选择、刀具的选择、加工轨迹的仿真和后置处理，培养学生解决工程实际问题的能力。本书注重引入最新的制造过程信息化技术成果，增加工业 4.0 与智能制造的相关内容，使学生了解计算机辅助制造的最新技术前沿。

本书由王红军任主编，并负责全书的筹划与统稿，由钟建琳、陈晓任副主编。全书由清华大学王先逵教授主审。本书的具体分工是：王红军编写第 1 章，陈晓编写第 2、3、8 章，王红军、许建新编写第 4 章，钟建琳编写第 5、6 章，王红军、左云波编写第 7 章。参加本书编写工作、搜集资料、整理素材的还有刘忠和、刘国庆等。

本书在编写过程中得到王先逵教授的热情指导和支持，他提出了许多宝贵的意见和建议；此外还得到北京信息科技大学机电工程学院机械工程系老师的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

本书的出版得到了北京市教学名师项目（PXM2014_014224_000080）的资助，同时也得到了 2013 年北京信息科技大学教材建设项目的支持，在此向北京市教委和北京信息科技大学表示衷心感谢。

本书在编写过程中参考了许多学者的资料和文献，编者已尽可能在参考文献中列出，谨向这些专家致以诚挚的谢意。

本书是在编者总结多年教学研究与科学研究、教学改革和教学实践的基础上编写而成的。由于编者水平和学识有限，时间仓促，书中难免存在不足和错误之处，敬请各位读者批评指正！

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 制造系统以及计算机辅助制造	1
1.1.1 制造系统的基本概念	1
1.1.2 计算机辅助制造的定义	4
1.1.3 计算机辅助制造技术的内容	4
1.2 计算机辅助制造技术的发展与趋势	9
1.2.1 计算机辅助制造技术的形成	9
1.2.2 计算机辅助制造技术的发展趋势	10
思考题与习题	13
第 2 章 计算机辅助制造的共性技术	14
2.1 移动终端	14
2.2 虚拟现实技术	15
2.3 计算机辅助制造的数据库系统	18
2.3.1 数据库的概念	19
2.3.2 数据库的系统结构	19
2.3.3 数据库的设计与访问技术	19
2.3.4 常用数据库系统管理软件 (DBMS) 简介	21
2.4 计算机辅助制造中数据库系统设计	24
2.4.1 系统数据库组成	24
2.4.2 系统数据库概念结构设计	26
2.4.3 系统数据库逻辑结构设计	27
2.5 计算机辅助制造的系统开发工具	28
2.5.1 Visual C++6.0 应用程序开发工具	28
2.5.2 JAVA 应用程序开发工具	29
2.5.3 MicroSoft. NET Framework	29
2.5.4 Python 应用程序开发工具	29
2.5.5 数据库与 Python	30
思考题与习题	31
第 3 章 成组技术及其零件分类编码	33

3.1 成组技术的基本原理	33
3.1.1 概述	33
3.1.2 零件的相似性	34
3.1.3 零件分组常用方法	35
3.1.4 成组技术的应用	37
3.2 零件分类编码系统	39
3.2.1 零件分类编码的概念	39
3.2.2 零件分类编码系统的结构	39
3.2.3 零件分类编码系统	41
3.3 零件分类编码的方法	44
3.3.1 零件编码分类法	44
3.3.2 分类编码法划分零件族的步骤	46
3.3.3 智能零件编码分类方法	47
3.4 柔性编码系统和计算机自动柔性编码	47
3.4.1 柔性编码系统	47
3.4.2 计算机自动柔性编码	48
3.5 零件的成组工艺设计与实施	49
3.5.1 成组工艺过程设计	49
3.5.2 成组工艺的实施	50
思考题与习题	50

第4章 计算机辅助工艺设计 51

4.1 CAPP 的基本概念与发展	53
4.1.1 CAPP 的发展历程	53
4.1.2 CAPP 的发展趋势	54
4.1.3 CAPP 的功能需求	55
4.1.4 CAPP 系统的基本组成	59
4.1.5 CAPP 系统的常用类型	61
4.2 CAPP 系统零件信息输入	65
4.2.1 分类编码描述法	65
4.2.2 语言描述与输入法	65
4.2.3 知识表示描述法	65
4.2.4 基于形状特征或表面元素的描述法	65
4.2.5 基于特征拼装的计算机绘图与零件信息的描述法	66
4.2.6 基于产品数据交换规范的产品建模与信息输入方法	66
4.3 CAPP 系统中的工艺决策与工序设计	66
4.3.1 创成式 CAPP 系统的工艺决策	67
4.3.2 基于专家系统 CAPP 的工艺决策	68
4.4 CAPP 的工艺数据库技术	77
4.4.1 工艺设计信息处理模式	78

4.4.2 工艺卡片的数据库模型	79
4.4.3 工艺资源数据库	80
4.4.4 工艺设计信息数据库	81
4.4.5 工艺知识的定义与分类	82
4.5 三维数字化工艺系统	85
4.5.1 系统总体架构	85
4.5.2 系统功能结构	86
4.5.3 简要功能说明	87
4.5.4 信息集成技术	97
4.6 开目 CAPP	98
4.6.1 工艺规程文件编制	100
4.6.2 用户界面介绍	100
4.6.3 可运用的资源	100
4.6.4 工序设计	104
4.6.5 文件储存	106
4.6.6 打印输出	107
思考题与习题	108

第5章 计算机辅助数控编程

109

5.1 数控编程基础	109
5.1.1 数控机床的坐标系	109
5.1.2 数控程序的结构及代码指令	112
5.2 数控编程方法	114
5.2.1 手工编程	115
5.2.2 数控语言自动编程	116
5.2.3 CAD/CAM 自动编程	118
5.3 基于 CAXA 的数控车削自动编程	121
5.3.1 数控车编程特点	121
5.3.2 CAXA 数控车 2013 用户界面及功能	122
5.3.3 CAXA 数控车 2013 的基本概念	126
5.3.4 CAXA 数控车 2013 的基本操作	128
5.3.5 CAXA 数控车 2013 的绘图实例	130
5.3.6 CAXA 数控车 2013 加工操作	132
5.3.7 CAXA 数控车 2013 加工实例	136
5.4 基于 CAXA 的数控铣削自动编程	142
5.4.1 CAXA 制造工程师 2013 用户界面及功能	143
5.4.2 CAXA 制造工程师 2013 的基本概念	145
5.4.3 CAXA 制造工程师 2013 的基本操作	146
5.4.4 CAXA 制造工程师 2013 的零件造型	148
5.4.5 CAXA 制造工程师 2013 铣削加工操作	150

5.4.6 CAXA 制造工程师 2013 加工实例	161
思考题与习题	175

第 6 章 计算机辅助质量系统..... 179

6.1 计算机辅助质量系统的基本概念	179
6.1.1 计算机辅助质量系统的基本功能	180
6.1.2 计算机辅助质量系统的系统框架	181
6.2 计算机辅助加工过程的监控	185
6.2.1 计算机辅助加工过程监测的内容	185
6.2.2 计算机辅助加工过程监测系统的基本结构	185
6.2.3 计算机辅助加工过程监测中常用的传感器	186
6.2.4 计算机辅助加工过程监测的一般方法	187
6.2.5 计算机辅助加工过程监测应用实例	188
6.2.6 误差补偿技术	190
6.3 计算机辅助质量检测	191
6.3.1 三坐标测量机	191
6.3.2 虚拟仪器	193
思考题与习题	194

第 7 章 CAD/CAM 集成的数据交换标准..... 195

7.1 CAD/CAM 集成与数据交换	195
7.1.1 CAD/CAM 数据交换技术的发展	195
7.1.2 CAD/CAM 数据交换的方式	195
7.2 常用的数据交换格式	196
7.2.1 初始图形信息交换规范	196
7.2.2 产品数据交换标准 STEP	200
思考题与习题	216

第 8 章 工业 4.0 与智能制造 217

8.1 工业 4.0	217
8.2 中国制造 2025	219
8.3 智能制造	221
8.3.1 国内外发展趋势	221
8.3.2 智能制造核心信息设备	222
8.3.3 我国智能制造的发展规划	223
思考题与习题	224

参考文献..... 225

第 1 章

绪论

1.1 制造系统以及计算机辅助制造

1.1.1 制造系统的基本概念

关于制造系统的概念，目前还没有确切的定义，它随着制造业的发展和人们认识的不断变化而变化。根据国际生产工程学会（CIRP）给出的定义：制造系统是制造业中形成的生产组织形式，在机电产业中，制造系统具有设计、生产、发运和销售的一体化功能。

也可以说，制造系统是人、机器和装备以及物料流和信息流的一个组合体。制造系统可从三个方面来定义：制造系统是一个包括人员、生产设施、物料加工设备和其他附属装置等各种硬件的统一整体；制造系统可定义为生产要素的转变过程，特别是将原材料以最大生产率变成产品；制造系统可定义为生产的运行过程，包括计划、实施和控制。

综合上述的几种定义，可将制造系统定义如下：制造系统是制造过程及其所涉及的硬件、软件和人员所组成的一个将制造资源转变为产品或半成品的输入/输出系统，它涉及产品生命周期（包括市场分析、产品设计、工艺规划、加工过程、装配、运输、产品销售、售后服务及回收处理等）的全过程或部分环节。其中，硬件包括厂房、生产设备、工具、刀具、计算机及网络等；软件包括制造理论、制造技术（制造工艺和制造方法等）、管理方法、制造信息及其有关的软件系统等。制造资源包括狭义制造资源和广义制造资源：狭义制造资源主要指物能资源，包括原材料、坯件、半成品、能源等；广义制造资源还包括硬件、软件、人员等。

制造业是指对制造资源（物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等），按照市场要求，通过制造过程，转化为可供人们使用和利用的大型工具、工业品与生活消费产品的行业。

制造业直接体现了一个国家的生产力水平，是区别发展中国家和发达国家的重要因素，制造业在世界发达国家的国民经济中占有重要份额。

制造业包括产品制造、设计、原料采购、仓储运输、订单处理、批发经营、零售。在主要从事产品制造的企业（单位）中，为产品销售而进行的机械与设备的组装与安装活动。制造业是国民经济强有力的支柱。制造业生产率的提高将为整个经济社会积累财富和创造就业机会。制造业是社会发展的强大经济基础，没有坚实的制造业基础，服务业和金融业都将崩溃。

制造系统作为一个整体，由几个相互作用和相互依赖的部分组成，包括物质流（存储、加工、检验等物质流动）、信息流（加工任务、加工要求以及确定的车间计划、调度、管理等信息流程）和能量流（制造系统中能量的消耗及其流程）。

先进制造业是在传统制造业基础上，吸收信息网络、先进材料和工艺以及现代管理等最新成果，广泛应用于产品研发设计、生产制造、营销管理、售后服务全过程的新型现代产业。其具有技术先进、知识密集、附加值大、成长性好、带动性强等特征，既是国家综合国力和核心竞争力的重要体现，也是国家未来国民经济发展的主导力量。

制造模式是一种为响应社会 and 市场需求变化而产生的革命性集成化生产模式，并且由于一种新的制造系统的创建使其成为可能。制造模式主要分为四种：手工生产；大量生产；大规模定制；全球化驱动的个性化生产和区域化生产。

(1) 手工生产模式 技术人员使用通用设备精准地制造客户所需要的产品，一次只生产一件。完全满足客户要求的产品。

从古代工艺品的加工，到 1850 年手工生产汽车，这种生产模式在生产规模和复杂性上达到极限。该种生产模式特征如下：

- 1) 品种多，产量低，根据订单生产。
- 2) 采用拉动式生产，即订单—设计—制造—销售。
- 3) 对工人的技术水平要求高。
- 4) 采用通用装备生产。

(2) 大量生产模式 20 世纪开始采用大量生产，1913 年亨利·福特的汽车装配流水生产线，标志着大批量生产的起点。大量生产降低了成本，降低了产品价格，在 20 世纪 50 年代达到巅峰时期。该种制造模式的特征如下：

- 1) 产品品种有限，产量很大，基于互换性技术实现了规模经济，实现低价格，并以此吸引客户。
- 2) 采用专用设备和流水线生产。
- 3) 对劳动力水平要求低。

(3) 大规模定制模式 随着产品的成熟，人们生活水平的提高，个性化需求日益增加，需要更多的产品种类。为了响应这种需求，制造商提供更多的产品选项。大规模定制的目标是以较低的成本来生产更多的产品。计算机使柔性自动化成为可能，同时柔性自动化又使大规模定制成为可能。

大规模定制意味着以大批量生产的低成本生产各式各样的变型产品。

(4) 全球化制造模式 制造全球化的到来大大加剧了全世界的竞争，下一代制造模式呈现两个趋势：个性化生产趋势和区域化生产趋势。

个性化生产要求交货时间短，适合国内生产，在 20 世纪末期达到成熟，以接近大量生产的成本，从给定的模块中选取组件，及时地按照订单生产定制产品，完全满足客户的需求。区域化生产满足区域性的产品需求。

随着时代变迁的制造模式转变见表 1-1。

表 1-1 随着时代变迁的制造模式转变

模式	手工生产	大量生产	大规模定制	个性化生产
开始时间	约 1850 年	约 1913 年	约 1980 年	约 2000 年
制造业竞争焦点	降低生产成本	降低生产成本	全面满足在交货期、质量、价格和服务上的要求	以知识为基础的新产品
社会需求	独一无二的产品	低成本的产品	品种多、质量好的产品	快速交货的产品

(续)

模式	手工生产	大量生产	大规模定制	个性化生产
技术	电	可互换性零件	计算机,计算机辅助设计和制造 (CAD/CAM)、准时生产 (JIT)、物料需求计划 (MRP II)、计算机集成制造系统 (CIMS)	信息技术和互联网、计算机辅助设计/计算机辅助工艺设计/计算机辅助制造/产品数据管理/并行工程/敏捷制造 (CAD/CAPP/CAM/PDM/CE/AM)
制造系统	电动机床	装配流水线专用机床,标准化	柔性制造系统 (计算机、数控机床、机器人)	可重构制造、虚拟制造、网络化制造、现代集成制造系统
特点	—	—	信息集成	企业集成,制造业信息化、网络化、智能化

第一次工业革命实现了机器对人力的替代，从此开始现代工业的机器时代，人类开始围绕机器工作。

第二次工业革命的核心是能源革命。第二次工业革命是通过石油和电力为核心的能源革命，大大提高了劳动生产率，实现了大规模生产。生产装备和生产组织都发生了革命性的变化。

第三次工业革命的核心是计算机的利用。第三次工业革命通过计算机的利用，实现信息的快速传播与交换，实现了工业生产的信息化，从而把工业生产从大规模生产提升到大规模定制生产。精益生产成为主要生产方式。这是延续到现在的信息化时代，代表性产物是计算机、联网、ERP 等管理信息系统的利用。

第四次工业革命将是智慧的革命。第四次工业革命通过信息物理的全面融合，实现人、物、信息的全面统一。智慧生产和智慧工业成为主要的工业生产方式，个性化定制需求得到极大满足。这一切的发生依赖于新一代信息技术革命的爆发，云计算、大数据、物联网、移动互联、3D 打印、工业机器人等新技术促成了工业的智慧革命。生产工具、生产方式、生产组织、生产要素都发生了革命性的变化。互联网与工业融合是制造业科技革命的突出特征，图 1-1 所示为制造业与计算机发展的历史轨迹。

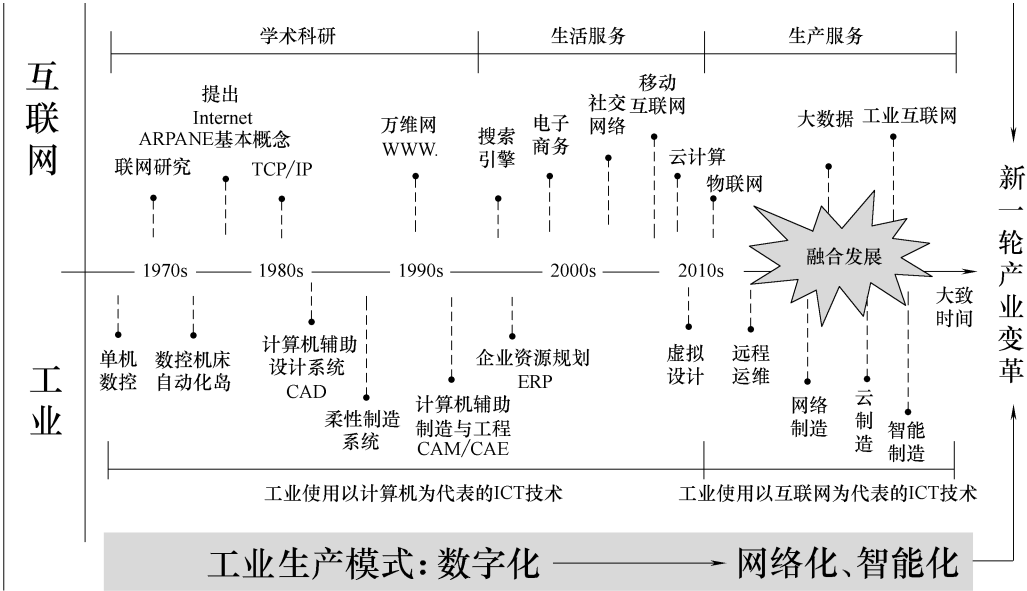


图 1-1 制造业与计算机发展的历史轨迹

制造业必须适应新的经济环境的快速变化。企业的响应速度是企业竞争力的关键。如何提高企业的竞争力,使制造业能够不断适应和响应快速变化的世界?计算机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的影响。

计算机辅助制造是一门多学科综合性技术,是当今先进的生产力,是提高制造水平的关键。

1.1.2 计算机辅助制造的定义

计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)是指应用计算机进行产品制造的所有工作的总称,分为广义的计算机辅助制造和狭义的计算机辅助制造两个概念。

广义的计算机辅助制造的概念,CAM包括计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Processing Planning, CAPP)和计算机辅助加工(Computer Aided Machining)等三个方面的内容。

广义的CAM是指利用计算机辅助完成从毛坯到产品的全部制造过程中的所有直接制造和间接制造过程,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、计算机辅助NC程序设计、工时定额和材料定额的编制等内容;生产作业计划通常分为厂、车间和班组三级作业计划形式,包括生产作业准备、制定期量标准、生产能力的核算与平衡、订货与库存、设备状况与维修计划、产品制造技术文件等内容;物流过程的运行控制包括加工、装配、检验、输送、储存等物流的管理,根据生产作业计划的生产进度信息控制物料的流动;生产控制贯穿于生产系统运动的始终,主要内容是对制造系统硬件的控制、生产进度控制、库存控制、质量控制、成本控制等;质量控制是指通过生产现场检测数据,当发现偏离或即将偏离预定质量指标时,向工序作业级发出指令予以校正。

狭义的计算机辅助制造的概念,CAM是指应用计算机来进行产品制造的统称,也就是说利用计算机辅助完成从原材料到产品的全部制造过程,在制造过程中的某些环节应用计算机,包括直接制造过程和间接制造过程,主要内容包括计算机辅助工艺过程设计和计算机辅助加工两大部分。

计算机辅助加工主要指机械加工,而且是数控加工(Numerical Control Machining)。输入信息是零件的工艺路线和工序内容,输出信息是刀具加工时的运动轨迹和数控程序。也应用于3D打印、激光立体成型等技术中。

1.1.3 计算机辅助制造技术的内容

计算机辅助制造技术是计算机科学、电子信息技术与现代设计制造技术相结合的产物,被国际公认为20世纪90年代的十大重要技术成就之一。CAM技术的发展与应用,对制造业的生产模式和人才知识结构等产生了重大影响,它不仅改变了制造业对产品设计、制造的传统模式,而且有利于提高企业的创新能力、技术水平和市场竞争能力,也是企业进一步向现代集成制造、网络化制造、虚拟制造等先进生产模式发展的重要技术基础。许多国家将CAM技术作为制造业的战略发展目标。

市场竞争是制造业永恒的话题。21世纪制造业竞争的特点,将是以知识为基础的新产品竞争,因此,将信息技术、自动化技术、现代管理技术与制造技术相结合的现代制造业信

息化技术，起着越来越重要的作用。用数字化设计制造、虚拟制造等高新技术实现制造业信息化，是提高制造企业创新能力和市场竞争能力的一条有效途径。

制造业信息化是将信息技术、自动化技术、现代管理技术与制造技术相结合，可以有效改善制造企业的经营、管理、产品开发和生产等各个环节，提高劳动生产率、产品质量和企业的创新能力（包括产品设计方法和设计工具的创新、企业管理模式的创新、制造技术的创新以及企业间协作关系的创新等），实现产品设计制造和企业管理的信息化、生产过程控制的智能化、制造装备的数控化以及咨询服务的网络化，从而全面提升制造业的竞争力。制造业信息化的内涵如图 1-2 所示，它主要包括产品设计信息化、企业管理信息化、加工制造信息化与自动化、信息集成化、制造网络化及资源共享和优化等内容。

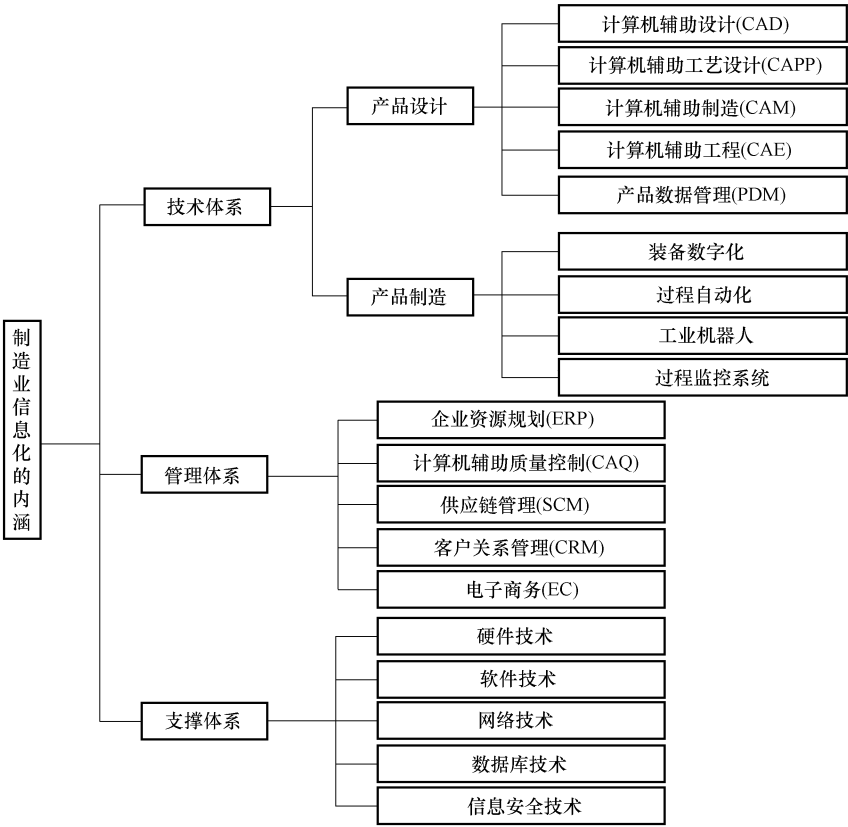


图 1-2 制造业信息化的内涵

制造业信息化的基本特点是制造业信息流的数字化，其重要特征如下：

- 1) 制造模型数字化。计算机技术在工程设计中的应用导致了工程图样向产品定义数据化的方向发展。工程设计由人工绘图到计算机绘图，“无纸”设计到 3D 数字化模型。
- 2) 制造过程数控化。随着计算机在制造过程中的应用，实现数字控制。在产品的设计制造过程的各个阶段引入计算机技术，产生了计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工程（CAE）、计算机辅助工艺设计（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）等单元技术。CAD、CAE、CAPP、CAQ（计算机辅助质量控制）以及 CAD/CAM 集成技术是支持企业进行产品

开发的关键技术，也是实施制造业信息化工程的基础。

产品制造是从工艺设计开始，经加工、检测、装配直至进入市场的整个过程。在这个过程中，工艺设计是基础，它包括了工序规划、刀具、夹具、材料计划以及采用数控机床时的加工编程等，然后进行加工、检验与装配。

目前大多 CAM 与计算机辅助设计 CAD 已经实现了集成，其工作过程如图 1-3 所示。

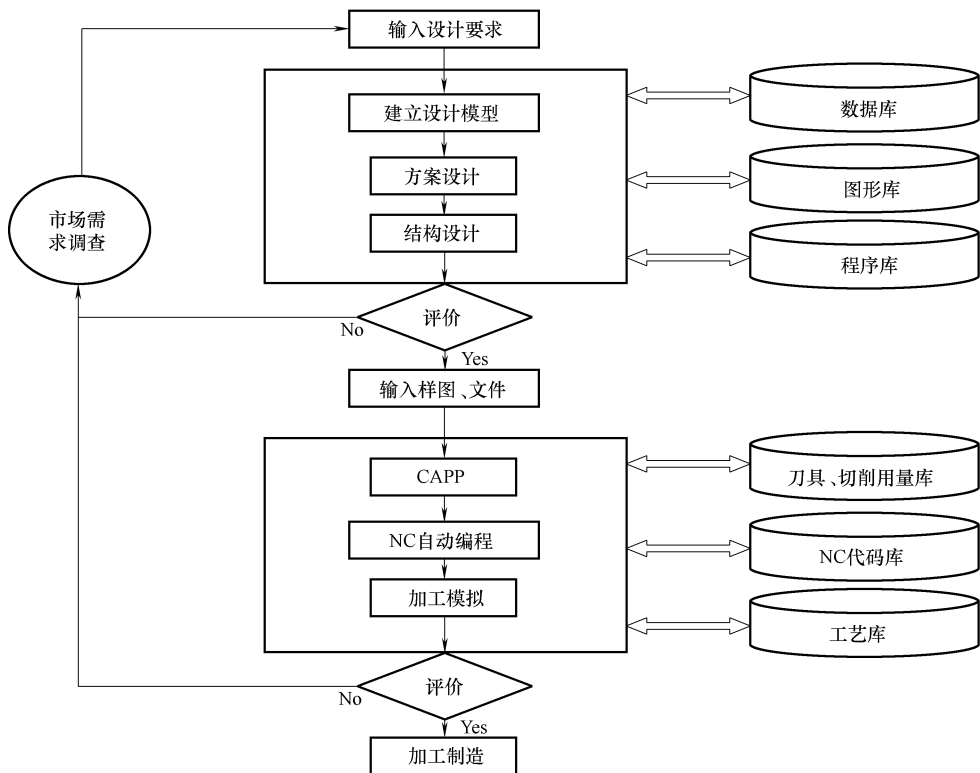


图 1-3 CAD/CAM 的工作过程

CAD/CAM 的工作过程包括以下几个步骤；

1) 通过市场需求调查以及用户对产品性能的要求，向 CAD 输入设计要求，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，以确定产品的总体设计方案及零部件的结构和主要参数，同时，调用系统中的图形库，将设计的初步结果以图形的方式输出在显示器上。

3) 根据屏幕显示的结果，对设计的初步结果做出判断，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，修改后的数据仍存储在系统的数据库中。

4) 系统从数据库中提取产品的设计制造信息，在分析其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中，同时在屏幕上显示输出。

5) 用户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中，以供

后续模块读取。

6) 利用外部设备输出工艺卡片,使其成为车间生产加工的指导性文件,或者计算机辅助制造系统从数据库中读取工艺规程文件,生成 NC 加工指令,在有关设备上开始加工制造。

7) 有些 CAM 系统在生成了产品加工的工艺规程之后,对其进行仿真、模拟,验证其是否合理、可行。同时,还可以进行刀具、夹具、工件之间的干涉、碰撞检验。

8) 在数控机床上或加工中心中制造出相关产品。

从上述过程可以看出,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,系统可以保证用户随时观察、修改阶段数据,实施编辑处理,直到获得最佳结果,因此,CAD/CAM 系统具备支持协同工作过程的功能。其主要功能如下:

(1) 几何造型 在产品构思阶段,系统能够描述基本几何形体及实体间的关系;能够提供基本要素,以便为用户提供所设计产品的几何形状、大小,进行零件的结构设计以及零部件的装配;系统还应能够动态地显示三维图形,解决三维几何建模中复杂的空间布局问题。另外,还能进行消隐、彩色浓淡处理等。利用几何建模的功能,用户不仅能构造各种产品的几何模型,还能够随时观察、修改模型或检验零部件装配的结果。几何建模技术是 CAD/CAM 系统的核心,它为产品的设计、制造提供基本数据,同时也为其他模块提供原始的信息。

(2) 计算分析 系统构造了产品的形状模型之后,能够根据产品几何形状,计算出相应的体积、表面积、质量、重心位置、转动惯量等几何特性和物理特性,为系统进行工程分析和数值计算提供必要的基本参数。CAD/CAM 系统中的结构分析需要进行应力、温度、位移等的计算和图形处理中变换矩阵的运算以及要素之间的交、并、差计算等,此外,在工艺规程设计中还有工艺参数的计算。因此,要求系统对各类计算分析的算法要正确、全面,有较高的计算精度。

(3) 工程绘图 产品设计的结果往往以机械图的形式表达,系统中的某些中间结果也是通过图形表达的。一方面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;另一方面还应有处理二维图形的能力,包括基本尺寸的生成、尺寸标注、图形的编辑(比例变换、平移、图形复制、图形删除等)以及显示控制、附加技术条件等功能,保证生成既满足生产实际要求、又符合国家标准机械图。

(4) 结构分析 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方法,用来解决复杂结构形状零件的静态、动态特性,以及强度、振动、热变形、磁场、温度场强度和应力分布状态等的计算分析。在进行静态、动态特性分析计算之前,系统根据产品的结构特点,划分网格,标出单元号、节点号,并将划分的结果显示在屏幕上。进行分析计算之后,系统将计算结果以图形、文件的形式输出,如应力分布图、温度场分布图、位移变形曲线等,使用户方便、直观地看到分析的结果。

(5) 优化设计 系统应具有优化求解的功能,也就是在某些约束条件的限制下,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。

(6) 工艺规程设计 工艺设计是为产品的加工制造提供指导性的文件。CAPP 系统应当