

“十五”国家重点图书

# 数字制造基础

杨文玉 尹周平 孙容磊 等编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书围绕产品开发过程系统地介绍了数字制造研究中的相关建模技术。全书共分 8 章,分别介绍了数字制造发展概况、数字产品开发过程、数字产品建模、产品快速成型、基于物理的建模与仿真、三维形状形式化表示与计算、制造知识获取与应用和生产调度。

本书可供从事数字制造研究方向的教师、研究人员和研究生使用。

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目(CIP)数据

数字制造基础/杨文玉等编著. —北京:北京理工大学出版社,2005.11

“十五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 7 - 5640 - 0416 - 9

I ④数... II ④杨... III ④数字技术 - 应用 - 机械制造工艺

IV ④TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 135491 号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / [chiefeditor@bitpress.com.cn](mailto:chiefeditor@bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 16.25

字 数 / 387 千字

版 次 / 2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数 / 1~3000 册

定 价 / 28.00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 李绍英

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

数字制造研究和发展的源头可以追溯到 20 世纪 50 年代,当时,美国麻省理工学院(MIT)研究和开发出了第一台数控铣床和第一套计算机图形学系统,标志着数字制造装备和数字产品开发技术的出现。数字制造日益成为一个受到关注的学科和研究方向是最近一段时期的事情。

目前,高新技术产品变得日益精密复杂,如微机电系统(MEMS)、IC 制造装备等,围绕产品创新与开发能力的竞争变得十分激烈。人们认识到数字制造是推动先进制造技术发展的关键驱动因素,将成为提高产品开发能力的一种重要手段。这些发展趋势促进了产品设计制造从部分定量、定性化逐步转向全面数字量化,在这个过程中产生了一系列的数字制造基础理论和关键技术问题。

数字制造是一门交叉边缘学科,所涉及的学科领域从制造信息的形式化表示与处理、数字产品开发、数字制造装备、数字制造技术到网络环境下的数字制造模式与管理等。目前,数字制造尚是一个开放的研究领域,也是一个快速发展的研究领域。有关数字制造的研究还很不系统。本书力图围绕产品开发过程系统地介绍数字制造关键技术中的相关建模技术,为从事相关研究的教师和科研人员提供较系统的参考资料。

全书共分 8 章。主要介绍产品开发中产品、制造装备和制造过程的数字化表达、建模、计算、分析和仿真问题,各章之间既相对独立又相互联系。第 1 章概述了数字制造的基本特征;第 2、3、4、5、6 章围绕数字产品开发的问题,分别讨论数字产品开发过程、快速产品开发装备、反求工程技术、面向制造的设计、基于物理的建模与仿真、三维形状的形式化表示和计算方法等;第 7、8 章讨论制造知识的获取和应用和智能调度等问题。

作者所在课题组在数字制造技术与基础研究方面先后承担了多项国家自然科学基金项目(No.50335020, No.50175036, No.50390063, No.50390064, No.59990470, No.50405032),得到了国家自然科学基金委员会长期大力支持,在此我们向国家自然科学基金委员会表示感谢。同时,本书得到国家重点基础研究发展计划(973)项目资助(No.2003CB716207)。

本书第 1 章、第 5 章和第 6 章由杨文玉执笔,第 2 章、第 4 章由尹周平执笔,第 7 章、第 8 章由孙容磊执笔,第 3 章由刘宇执笔,全书由杨文玉统稿。此外,本书包含了实验室研究生近年来的部分研究内容,在此一并表示感谢。

数字制造是一个新的研究方向,许多问题有待进一步探讨和继续发展。由于作者水平有限,本书的疏漏和错误之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

作 者

# 目 录

|                    |        |
|--------------------|--------|
| 第 1 章 绪 论          | ( 1 )  |
| § 1.1 制造业的数字化趋势    | ( 1 )  |
| 1.1.1 产生背景         | ( 1 )  |
| 1.1.2 产品开发需求       | ( 2 )  |
| 1.1.3 发展趋势         | ( 3 )  |
| § 1.2 数字制造技术的基本特征  | ( 5 )  |
| § 1.3 数字产品设计与开发    | ( 7 )  |
| § 1.4 数字制造装备       | ( 10 ) |
| § 1.5 制造过程的建模和仿真   | ( 11 ) |
| § 1.6 本书主要内容       | ( 12 ) |
| 第 2 章 数字化产品开发      | ( 13 ) |
| § 2.1 引言           | ( 13 ) |
| 2.1.1 快速产品开发       | ( 13 ) |
| 2.1.2 正向工程与反求工程    | ( 14 ) |
| 2.1.3 产品开发的数字化     | ( 15 ) |
| § 2.2 虚拟原型         | ( 16 ) |
| 2.2.1 虚拟原型的概念      | ( 17 ) |
| 2.2.2 虚拟原型系统体系结构   | ( 18 ) |
| 2.2.3 虚拟原型的关键技术    | ( 19 ) |
| 2.2.4 虚拟原型的应用      | ( 20 ) |
| § 2.3 快速原型         | ( 21 ) |
| 2.3.1 快速原型概述       | ( 21 ) |
| 2.3.2 典型的快速原型工艺和系统 | ( 27 ) |
| 2.3.3 快速制模         | ( 35 ) |
| § 2.4 网络制造         | ( 38 ) |
| 2.4.1 分散网络化生产系统    | ( 39 ) |
| 2.4.2 网络设计         | ( 42 ) |
| 2.4.3 网络数控         | ( 44 ) |
| 第 3 章 反求工程技术       | ( 48 ) |
| § 3.1 反求工程概述       | ( 48 ) |
| § 3.2 三维数字测量       | ( 51 ) |
| § 3.3 点数据处理        | ( 54 ) |
| 3.3.1 多视数据拼合       | ( 54 ) |

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| 3.3.2 点云三角网格化 .....        | ( 59 )  |
| 3.3.3 点云分割 .....           | ( 61 )  |
| § 3.4 曲线曲面的构造 .....        | ( 62 )  |
| 3.4.1 曲线曲面的连续性定义 .....     | ( 62 )  |
| 3.4.2 常用曲线曲面 .....         | ( 63 )  |
| 3.4.3 曲线的拟合与曲面的构建 .....    | ( 67 )  |
| 3.4.4 曲线与曲面的编辑与光顺 .....    | ( 71 )  |
| 3.4.5 曲线与曲面的误差评定 .....     | ( 74 )  |
| § 3.5 CAD模型的构造 .....       | ( 76 )  |
| 3.5.1 几何造型 .....           | ( 76 )  |
| 3.5.2 正向工程与反求工程的集成 .....   | ( 77 )  |
| § 3.6 反求工程中的特征与参数化技术 ..... | ( 79 )  |
| 3.6.1 特征的定义与分类 .....       | ( 79 )  |
| 3.6.2 参数化设计方法 .....        | ( 81 )  |
| 3.6.3 球面过渡特征的参数估计 .....    | ( 83 )  |
| 第 4章 面向制造的设计 .....         | ( 89 )  |
| § 4.1 DFM概述 .....          | ( 89 )  |
| 4.1.1 DFM的概念 .....         | ( 89 )  |
| 4.1.2 DFM的方法 .....         | ( 90 )  |
| 4.1.3 计算机辅助 DFM .....      | ( 92 )  |
| 4.1.4 可制造性分析与评价 .....      | ( 94 )  |
| § 4.2 几何可注塑性分析 .....       | ( 96 )  |
| 4.2.1 问题的提出与形式化 .....      | ( 97 )  |
| 4.2.2 倒陷特征的识别 .....        | ( 100 ) |
| 4.2.3 分型方向和分型线 .....       | ( 114 ) |
| 第 5章 基于物理的建模与仿真 .....      | ( 122 ) |
| § 5.1 概述 .....             | ( 122 ) |
| 5.1.1 仿真的一般过程 .....        | ( 122 ) |
| 5.1.2 在制造中的应用 .....        | ( 122 ) |
| § 5.2 碰撞检测中的几何算法 .....     | ( 124 ) |
| 5.2.1 刚体碰撞检测 .....         | ( 125 ) |
| 5.2.2 可变形体接触检测 .....       | ( 126 ) |
| § 5.3 行为约束描述方法 .....       | ( 127 ) |
| 5.3.1 状态空间 .....           | ( 127 ) |
| 5.3.2 约束动力学 .....          | ( 131 ) |
| § 5.4 可变形模型 .....          | ( 136 ) |
| 5.4.1 形状和运动的描述 .....       | ( 136 ) |
| 5.4.2 基于能量的模型 .....        | ( 137 ) |
| 5.4.3 离散模型 .....           | ( 139 ) |

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| § 5.5.5 基于数字样机的产品性能仿真 ..... | ( 141) |
| 5.5.5.1 数字样机技术简介 .....      | ( 141) |
| 5.5.5.2 机器人移动性能仿真实例 .....   | ( 142) |
| 第 6 章 三维形状的形式化表示和计算 .....   | ( 147) |
| § 6.1 形状表示 .....            | ( 147) |
| 6.1.1 凸分析中的相关定义 .....       | ( 147) |
| 6.1.2 计算几何中的三角形与网格 .....    | ( 149) |
| § 6.2 表面逼近与重建 .....         | ( 152) |
| 6.2.1 点集形状的表达 .....         | ( 153) |
| 6.2.2 表面重建方法 .....          | ( 155) |
| § 6.3 网格的子划分与计算 .....       | ( 161) |
| 6.3.1 子划分曲面的性质 .....        | ( 161) |
| 6.3.2 子划分曲面的绘制方法 .....      | ( 162) |
| § 6.4 曲面可视方向计算 .....        | ( 164) |
| 6.4.1 问题的背景 .....           | ( 164) |
| 6.4.2 嵌入式应用系统开发 .....       | ( 166) |
| 6.4.3 曲面零件信息模型 .....        | ( 167) |
| 6.4.4 曲面几何信息计算 .....        | ( 168) |
| 第 7 章 制造知识的获取与应用 .....      | ( 175) |
| § 7.1 制造中的知识 .....          | ( 175) |
| § 7.2 知识的获取 .....           | ( 176) |
| 7.2.1 概述 .....              | ( 176) |
| 7.2.2 AQ11 学习算法 .....       | ( 177) |
| 7.2.3 ID3 学习算法 .....        | ( 179) |
| § 7.3 知识的更新 .....           | ( 180) |
| 7.3.1 AQ15 递增学习算法 .....     | ( 180) |
| 7.3.2 不可扩展 DNF 学习算法 .....   | ( 182) |
| 7.3.3 ID4 学习算法 .....        | ( 191) |
| § 7.4 推理系统 .....            | ( 192) |
| 7.4.1 产生式系统 .....           | ( 193) |
| 7.4.2 模糊逻辑推理与控制 .....       | ( 197) |
| 7.4.3 人工神经网络 .....          | ( 203) |
| § 7.5 应用实例 .....            | ( 209) |
| 7.5.1 反应式离子蚀刻过程的故障诊断 .....  | ( 209) |
| 7.5.2 磨削条件选择的混合智能系统 .....   | ( 212) |
| 第 8 章 制造系统的智能调度 .....       | ( 217) |
| § 8.1 概述 .....              | ( 217) |
| § 8.2 生产调度的定义及研究方法 .....    | ( 218) |
| 8.2.1 生产调度及其复杂性 .....       | ( 218) |



- 8.2.2 调度问题的研究方法 ..... ( 219)
- § 8.2.3 规则调度 ..... ( 221)
  - 8.2.3.1 定义及分类 ..... ( 221)
  - 8.2.3.2 简单调度规则 ..... ( 223)
  - 8.2.3.3 典型规则调度模型与算法 ..... ( 225)
- § 8.2.4 基于状态性能反馈的规则调度 ..... ( 229)
  - 8.2.4.1 制造系统运行状态及其分类 ..... ( 230)
  - 8.2.4.2 制造系统运行性能及度量性能的关键因素 ..... ( 230)
  - 8.2.4.3 调度目标函数 ..... ( 232)
  - 8.2.4.4 反馈规则调度原理 ..... ( 233)
  - 8.2.4.5 迭代优化调度应用举例 ..... ( 235)
- § 8.2.5 面向多工艺规划的调度 ..... ( 238)
  - 8.2.5.1 多工艺规划表示及其柔性评价 ..... ( 238)
  - 8.2.5.2 结点优先级判据 ..... ( 239)
  - 8.2.5.3 应用举例 ..... ( 240)
- 参考文献..... ( 243)

# 第 1 章 绪 论

## § 1.1 制造业的数字化趋势

发展数字制造是全球数字化浪潮中的重要一环。1998年 1月 31日戈尔在美国加利福尼亚科学中心发表了题为“数字地球——理解 21世纪我们这颗地球”的创意演说,各国政府和科技界专家、学者迅速对其做出积极反应,这一趋势对数字化时代的制造技术也产生了广泛的影响。目前,先进制造技术与信息科学、材料科学、管理科学等学科不断交叉融合,在产品、制造装备和系统的描述、规划和操作等方面都发生了深刻的变化,出现了数字化趋势。

### 1.1.1 产生背景

20世纪 50年代麻省理工学院为美国海军研制成功三坐标数控铣床,它标志着数控机床的出现。随后相继出现了数控三坐标测量机与工业机器人,它们与数控机床一起形成重要的数字化加工、测量和操作装备,成为数字制造的基础之一。在 20世纪 90年代中期,通过并联机构与数控技术的结合,产生了并联机床(Parallel Machine Tool),又称虚(拟)轴机床(Virtual Axis Machine Tool),其应用逐渐扩展到虚拟轴坐标测量机、六维力传感器等精密测量设备。从机械结构和控制方式来看,数控机床、坐标测量机和工业机器人具有共同的特点:都可看作数控多坐标装备,运动副都是移动副和转动副,运动链以串联开环为主。其本质是用数字控制代替凸轮行程控制,实现了运动数字化(Motion Digitized)。

伴随着微型计算机的产生和发展,计算机数控技术与数控机床得到广泛应用和提高。目前,数控系统已由 NC 计算机数控时代进入了基于 PC 的开放式数控和网络数控时代,日趋智能化、柔性化和开放性,不断将各种新工艺、新技术、新方法集成于控制系统平台之上。值得注意的是数控技术发展还促进了各种装备的性能提升和更新换代,出现了所谓的“数字装备”,如电子制造装备,使得微米级、亚微米级芯片的批量生产成为可能。

在 20世纪 50年代末期,以美国麻省理工学院林肯实验室研制的空中防御系统为标志,诞生了交互式图形生成技术,以此为基础,计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)技术几乎与数控机床相平行地发展起来。在 CAD技术发展过程中,经历了几个重要发展阶段。60年代出现的三维 CAD系统只是简单的线框式系统,它实现了基本几何信息的数字化表达。进入 70年代,飞机和汽车工业的蓬勃发展遇到了大量的自由曲面形状描述和表达问题。在形状信息的计算机表示、分析和综合中,核心问题是计算机表示。贝齐尔(Bézier)方法的提出使得自由曲线及曲面的计算机表达与处理成为可能,为计算机辅助几何设计的发展奠定了坚实的基础。同时,法国达索(Dassault)飞机制造公司也基于此算法开发出以表面模型为特点的三维造型系统 CATIA,标志着首次实现以计算机完整描述产品零件的主要信息,改变了以往只能借助油泥模型来近似表达曲面的工作方式。随后,通过 CAGD算法的不断发展,在 CAD系统中实现了形体表面信息和几何数据间拓扑关系的有效表达,使得 CAE 及 CAM 技术有了实现基础。作为 CAD系统核心的几何造型系统从线框造型技术、边界表面造型技术、实体造型技术

发展到参数化技术和变量化技术。一批专门经营 CAD/CAM 系统硬件和软件的公司相继开发了功能模块齐全、价格相对便宜的系统,使 CAD/CAM 技术得到迅速发展和广泛应用。CAD/CAM 技术的产生和发展实现了在计算机系统的支持下,根据开发流程进行数字化产品设计和制造的技术,为产品设计和制造技术人员提供了把知识、经验与 CAD/CAM 系统中的软件功能相结合的平台。

在制造装备的发展过程中,20 世纪 80 年代问世的快速成形(Rapid Prototyping, RP)技术是继 CAD/CAM 后的又一项数字制造技术,标志着生长型制造技术(或称可控添加材料制造)取得突破性创新成果,为制造工艺带来巨大的变革。快速成形是在数字仿形技术的基础上,利用 3D 激光扫描测量仪等数字测量设备实现零件形状特征等几何量的数字化,然后通过数据预处理、表面建模、实体建模、后置处理等过程生成 STL 文件(或数控代码)驱动快速成型机(或数控机床)加工出新零件。90 年代中末期是 RP 技术迅速发展的阶段,推动了快速制模(Rapid Tooling, RT)和快速制造(Rapid Manufacturing, RM)的发展,实现了由三维 CAD 模型直接驱动 RPM 系统制造原型的技术。从 3D 系统公司与克莱斯勒公司的第一次合作开始,RP 技术已经在许多领域里得到了应用,其应用范围主要在设计检验、市场预测、工程测试(应力分析、风道等)、装配测试、模具制造、医学、美学等方面。快速成形与制造诞生以来已成功地实现了面向市场的产品造型设计与产品试制的敏捷化,并通过与反求工程、CAD/CAM 的结合形成了重要的快速产品开发装备和技术。

时至今日,加工、测量和装配系统逐步形成以机器人或机器人化机器(robotized machine)为基础构造的数字表达体系、计算模型、信息系统结构和约束求解策略,具有可编程、自主规划能力、可协调性和传感控制的特点。通过与 CAD/CAM 有机结合,具备了与整个制造的上、下游过程进行数字信息交换的潜在能力,为逐步形成数字产品开发技术、数字制造系统和数字企业提供了广泛的可能性。

## 1.2.2 产品开发需求

随着跨国公司全球战略的实施,越来越多的制造业转移到中国这样的新兴市场,主要原因是出于对成本控制的考虑。近年来,除传统产业外,IT 等高科技产业也有向发展中国家转移的倾向。全球性的经济竞争,为数字化时代的制造企业,尤其是正处于工业化过程中的国家或地区的制造企业,提供了新的发展机遇。然而,当前世界正处在由资源消耗型的工业经济向以信息为基础的知识经济转变的过程中,可持续发展策略、知识经济趋势为制造技术的发展提出新的问题,提高产品创新和开发能力成为我国制造业可持续发展的迫切需要。

21 世纪初制造业面临的新形势是:知识—技术—产品的更新周期不断缩短。众所周知,一个产品的高额利润收益是在产品生命周期的早期获得。图 1-1 表示各个时期一些代表性产品的开发周期、更新速度与收益变化的趋势,产品开发周期、产品生命周期和投资回收时间都不断缩短。在影响投资者收益的诸多因素中,创新水平越高,开发周期越短,产品质量越优,在市场上占有率和单位产品的收益就越高。近几十年来,制造业竞争的焦点已从早期的降低产品成本的竞争,20 世纪 70 年代提高企业整体效率及产品质量的竞争,80 年代全面满足顾客在交货期、质量、价格和服务等方面要求的竞争,发展到 90 年代乃至 21 世纪初创新能力的竞争。这种态势必然导致市场竞争焦点集中在产品开发速度和创新能力上。为了提高快速产品开发和创新能力,数字化战略已是指导各跨国制造公司产品创新的首选战略,例如波音公司用达索

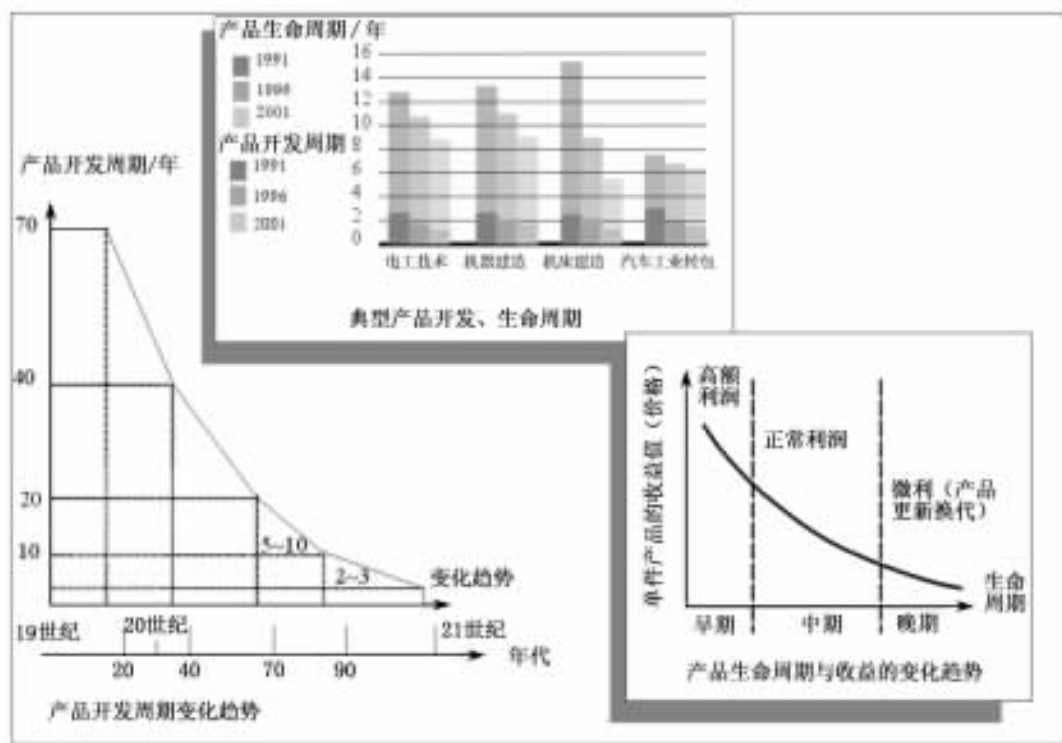


图 1-1 市场竞争对快速产品开发、产品创新的需求

(Dassault)系统公司的 CAD/CAM 软件 CATIA 来设计波音 777。

随着产品结构越来越复杂,功能越来越趋向集成化和复合化,新产品开发所需要的信息量越来越多。这些问题对数字产品开发技术和基础理论研究的挑战是全面的、深刻的,几乎涉及产品开发的各个环节和各个方面。既有设计的,也有制造的;既有技术的,也有管理的;既有单元技术层次的,也有系统层次和管理层次的。数字产品开发日益成为提高竞争力的重要手段。

## 1.1.2 发展趋势

时至今日,由于信息技术的发展,制造业发生了重大的变化,导致了制造业的数字化趋势不断加强,为数字制造的形成与发展提供了客观条件与环境。制造技术与信息技术呈现交叉、融合的趋势,如图 1-2 所示,信息支撑技术的高速发展将对 21 世纪的制造技术起到了巨大的推动作用。

近 30 年来,制造业和制造学科正逐步发展成为跨学科的大制造业和大制造学科。从大制造的观点看,数字制造不仅包括加工和装配过程,还包括围绕整个生产实现过程的上、下游功能。现代制造系统正在成为一个巨大的信息处理系统,制造系统信息组织与结构呈现多层次性和信息度量的多维性。

制造信息的表征、存储、处理和传递发生了深刻的变化。涉及如何把技术和“诀窍”转换为计算机能够理解的数字化表示形式,实现制造知识、信息和 3D 产品模型的数字化描述、共享与转换,如何有效处理不同抽象层次的多源、多维信息;发展设计与制造的虚拟环境方法,在产

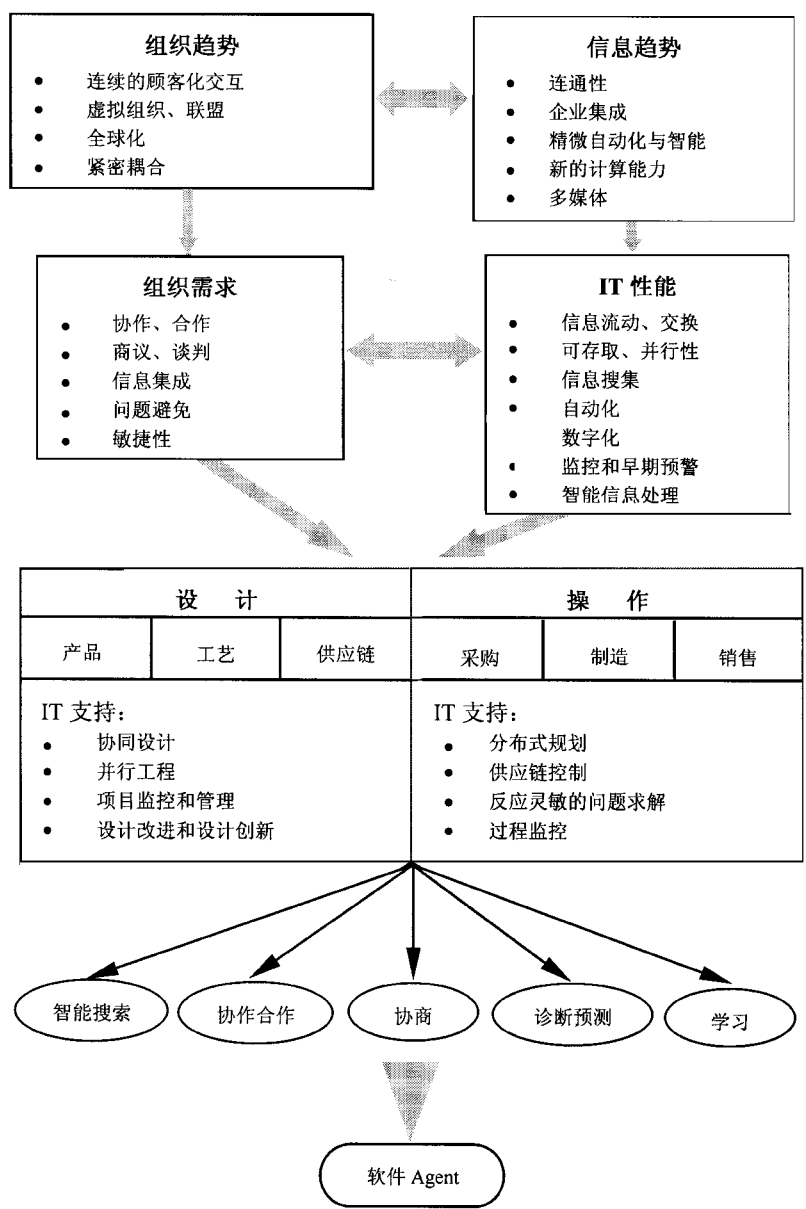


图 102 制造技术与信息技术交叉、融合的趋势

品开发过程中基于数字样机技术对产品性能进行表达、调整和控制,基于计算机仿真预测产品性能和改善制造过程;基于信息技术基础结构( IT infrastructure)与网络系统进行制造系统动态组织结构建模、生产调度与规划,实现数字化物流管理和企业决策。

数字制造装备从运动数字化、几何量数字化发展到物理量数字化。产品、制造过程和制造装备的形式化、数字化描述与处理成为当前研究热点,例如在数字产品建模中,基于激光测量数据的海量信息处理和三维模型重构、基于物理的建模与仿真(包括有限元方法、三角网格划分、复杂边界物理方程求解等),制造过程数字建模的研究从单纯的几何量(位移、多坐标联动

位移、运动形状、微观形状等)数字描述,发展到对制造过程物理量(温度、流量场、应力场、热变形、密度、物质材料等)的数字描述以及工艺过程本质的探索等,数字制造装备,包括数控机床、工业机器人、RPM和CMM,已从单纯的制造执行实体逐步发展为综合信息处理装置。另一个重要的发展趋势是加工对象的尺度变化,由毫米(mm)、微米( $\mu\text{m}$ )到纳米(nm),陆续出现了显微数字图像处理设备、电子制造装备(包括光刻机、键合机、黏接机等)等微米、纳米级识别率和分辨率的精密数字制造装备。

进入20世纪90年代以来,先进制造技术在传统制造技术的基础上,越来越多地利用与融入计算机技术、网络技术、控制技术、传感器技术与机、光、电一体化技术等方面的最新进展,并贯穿整个制造系统,逐步形成数字制造这一新的领域,并产生出新概念、方法和哲理,促进了新的制造机理、制造手段和装备的不断涌现。数字化时代的制造在制造系统、过程和产品的核心技术方面带来一系列变革,推动先进制造技术的数字化、网络化过程。

## § 1.2 数字制造技术的基本特征

数字制造革新了传统制造的科学基础,使产品设计制造从部分定量、部分经验、定性化逐步转向全面数字量化,产生了一系列的基础理论和关键技术问题,如产品信息的数字化表示、制造过程的建模与仿真、数字样机技术、开放式数字控制技术等。上述概念用于产品设计和制造过程,形成数字产品、数字制造装备、数字制造技术等研究领域。与数字制造紧密相关的概念有虚拟制造、网络制造和智能制造等。虚拟制造的核心思想是用虚拟原型代替物理原型,目标是达到可制造性的设计;网络制造主要研究制造业内部的信息交流和共享,以及外部的网络应用服务;智能制造则主要研究不确定性和不完全信息下的制造问题求解。数字制造从不同角度综合了上述制造技术的部分属性。目前,数字制造尚是一个开放的研究领域,也是一个快速发展的研究领域。

Takehisa Seino等提出,在数字制造中,隐含知识的二义性必须彻底消除,必须表示为计算机能够处理的形式,例如数值和/或方程,最终转化为数字值(digital values)。数字制造具有以下基本属性:产品数字表达的无二义性、可重用性;产品开发过程的可预测性;制造活动对于距离和时间的独立性等。

从实现的角度来看,国内的一些学者提出数字制造就是在计算机/网络和相关软件支持下,将支持产品全生命周期的营销、管理和技术活动,用数字来定量、表述、传递、存储、处理、物化和管理。典型的数字化制造技术包括:CAD/CAM、CNC、FMC、FMS、CAI、MIS、MRPⅡ、ERP、PDM、VM、web-M等。

上述文献从不同侧面描述了数字制造的特征。其主要特征可以归纳为以下几个方面:制造信息的形式化表示与处理;产品开发和制造过程的数据、建模和建模系统;网络环境下的数字制造模式与管理。

数字制造的一个重要特征是制造信息的形式化表示与处理。在制造系统中,与制造活动有关的信息包括其涉及的信号、数据、经验和知识等。数字制造过程中不仅要处理大量的常规文字信息,还需要处理图形信息和某些非符号化的主体经验信息,例如需要把技术和技术诀窍转化为实际的能够被计算机理解或实现的知识、数据,以建立生产过程条件和现象的数字化描述。在构成制造系统的物质、能量和信息三大要素中,信息这一要素正在成为制约现代制造系

统的主导因素。制造信息的获取、集成与融合呈现立体的性质、信息度量的多维性以及信息组织的多层次性:从市场分析、加工制造、经营管理到售后服务是由信息系统贯穿起来的(横向信息);企业各部门之间从最高层的决策级直到制造设备级的控制之间都是由信息流联系成的一个可控系统(纵向信息);制造自动化、智能化的水平主要由不同层次的信息结构体现。制造自动化的开放式体系结构、制造自动化系统和自动化关键技术等三个层次反映出信息组织和结构的多层次性;对于现代制造系统来说,由于所需信息经常分布在不同地域并表现为不同形式和编码,需要提出系统的方法来处理由此产生的信息多样性问题,以获取不同形式的信息并转化为计算机可以利用的形式。作为探讨制造信息的表述、配置和运作规律的一门学科——制造信息学正成为制造工程科学的重要组成部分。

数字制造的另一个重要特征是改善产品开发和制造过程的数据、建模和建模系统。制造系统中数据量急剧增长,需要通过建模与仿真的方法以改善对数据的理解,优化产品设计和制造过程。实现产品的数字化设计与开发的必要条件是用计算机能够处理的方式给出产品的描述,建立产品的数字模型,进行产品信息的表示、转换、获取、传递和一致性约束实现产品全生命周期中数据的一致性和集成。建模系统涉及以下几个基本问题:产品几何、产品性能的数字化建模,制造数据基于特征的存取、操作与分析。即从数据中提取相关工程含义,以处理和利用它,例如从生产线中提取有关生产和质量的数据,转化为有意义的生产信息;一致性约束(integrity constraint)的规范与执行,集成产品数据库与知识库,通过在整个产品开发过程中共享有关数据模型,集成所有类型的制造信息。集成产品数据库主要为各种表示之间提供一致的处理传播,例如如果在CAD中修改零件图的一部分,那么这一修正对NC程序、原料单、工艺规划、库存控制、成本计算等的影响都必须立即获悉并自动传播。

目前,在产品数字表达方面,研究最多的模型有几何模型、物理模型、知识模型和样机模型,其中几何模型和知识模型多是静态描述性模型,主要用于产品的设计与制造,而物理模型、样机模型是动态仿真模型,面向产品的性能分析。获取产品几何信息数字化模型的主要手段包括CAD反求工程以及集成两者的混合方法。数字样机(Digital Mock-up)技术是数字产品开发的一个重要研究内容。通过对分布在不同地区、不同领域的多维、多层次信息进行数字化建模,研究设计过程中的产品状态信息数字化和可视化技术、多约束分析与求解方法,实现对产品性能的预测与评价。计算几何是建立数字样机工具的主要基础理论之一。美国乔治亚理工大学几何中心、海军研究院、NASA几何研究中心等国际著名研究机构都十分重视计算几何的工程应用研究,并在数字样机技术的应用方面取得较大进展。产品数字样机的一个关键理论问题是约束分析与约束求解,即如何在满足功能、几何、物理、工艺等多约束的前提下实现时间、成本等产品开发指标的多目标全局优化。目前,数字样机技术的应用研究已具备初步条件,但仍然缺少解决物理和工程问题的有效算法。

数字制造过程建模研究制造装备驱动过程的数字建模、多约束条件下的运动规划、基于传感信息的参数识别以及对工况变化的自主适应能力等问题。对于制造过程中运动部件的摩擦、间隙、变形、温度以及光、电信号的时滞等多种非线性和不确定性因素问题,基于先验模型的控制理论和方法难以奏效。这些问题的解决取决于动力学建模、基于传感信息的系统辨识、智能规划和自律控制理论与方法的研究。

网络技术和全球经济环境使得制造企业面临的一个突出问题是企业之间和企业内部的信息流和物流变得日益复杂。企业的信息流不仅包括产品制造的过程,还涉及所提供的服务、

相关工程和公司组织。制造过程面临日益变化、不确定性环境下的复杂制造系统运行问题。网络环境下的数字制造模式的研究将对于缩短开发周期、提高产品质量、降低成本均有显著效果,例如电子商务、数字化物流管理过程和动态的企业组织结构等。

计算机网络为数字制造信息的传递、制造资源的共享、制造系统的优化运作提供了重要条件。制造信息的数字化表示,使得制造信息可在不同平台上进行存储、处理并通过网络协议进行传递。网络环境下制造业内部的信息交流和共享,以及外部的网络应用服务等问题促进了数字化企业的研究。网络环境下的数字化企业(Digital Enterprises)的实施,需要通过建立智能决策支持系统(Intelligent decision support systems)来应对所面临的不确定性、复杂性问题。针对制造业的上游、中游及下游活动,利用计算机所提供的虚拟环境及互联网技术,优化及协调生产的各个环节,缩短产品的开发周期,改善企业对外的应变能力,并迅速回应顾客及市场的需求。

数字化企业的运行,不仅涉及技术方面,而且涉及企业经营运作模式的转变。从一定意义上说,在现代高性能 IT 基础上,实现事务数据的解释、理解和分析并不是真正的障碍,真正的障碍是实现组织的解决方案(Organizational Solution),即重新设计公司的流程和修订管理计划以提升和促进基于数据模型和建模系统的竞争策略。随着网络技术和网络平台的快速发展,现代企业离不开与国际市场的信息、技术、资源和产品的交换,经济活动将按网络加以组织。从这个意义上说,生产过程和企业已经不再局限于本地,而是具有动态、分布式的特征。面对网络经济时代制造环境的变化,传统的制造模式已与之不相适应,包括组织结构相对固定、制造资源相对集中、以区域性经济环境为主导、以面向产品为特征制造过程、生产调度、生产组织形式、供应链管理和需提供的服务都必须适应新制造模式的变化,需要建立由市场需求驱动的、具有快速响应机制的数字制造模式。

数字制造的进一步发展将以制造过程的知识、信息和数据的数字化表达为基础,以数字化建模、仿真、预测与优化为特征,以数字装备和网络共享的发展和应用为条件。随着数字技术的进步,制造系统、过程和产品的数字化描述理论、方法及数字装备的发展,数字制造技术将逐渐成熟,其内涵还将不断地丰富和发展。

## § 1.1 数字产品设计与开发

数字产品设计以 CAD/CAM 为典型代表。在计算机辅助设计过程中由计算机辅助完成需求分析、可行性分析、方案论证、总体构思、结构设计、详细设计、分析计算和评价以及设计定型后的产品信息传递。CAM 技术指计算机辅助自动生成刀具路径、自动生成测量路径、数控加工和机器人装配。CAD 与 CAM 开始是从设计、制造领域独立发展起来的,逐渐彼此靠拢,并综合起来,实现数据共享、通讯、交换和信息表达的完备性。

CAD/CAM 技术本身是一项综合性的、技术复杂的系统工程,涉及许多学科领域,如计算机科学和工程、计算数学、几何造型、计算机图形显示、数据结构和数据库、仿真、数控、机器人和人工智能学科和技术以及产品设计和制造有关的专业知识等。CAD/CAM 技术在实现设计加工自动化、提高加工精度和加工质量、缩短产品研制周期等方面发挥着重要作用,在航空工业、汽车工业等领域有着大量的应用。

### 1 集成 CAD/CAM 系统

CAD 系统产生并储存的数据主要包括零件的几何和拓扑信息,以及表面精度、公差和材料等制造信息。计算机辅助几何设计研究形状数学描述的计算机表达和实现方法。在定义零件几何时,CAD 系统通常采用线框模型、边界表示模型(B-rep)和实体模型(CSG)。边界表示的基本思想是通过物体的边界面来定义物体,而边界面又借助于无边界限制的具有数学意义的表面、曲线以及点等基元实体来表示,用这些基元实体一起来定义面,它是计算机表示三维物体使用最广泛的一种方法。

CAM 系统集三维设计、分析、NC 加工于一体,如 CATIA UGII Intergraph PRO/ENGINEER MasterCAM 等系统。这些系统把曲面造型与数控编程集成在一起,具有几何造型、零件几何形状的显示、交互设计、修改和生成刀具轨迹、加工过程仿真、干涉检查等功能,推动了 CAD/CAM 技术的一体化。

针对机电产品设计制造的 CAD/CAM 系统,一般具有以下几个方面的处理能力。

- (1) 交互图形输入和输出,主要用来生成和编辑图形。
- (2) 几何造型包括曲线、曲面造型与实体造型,是 CAD/CAM 图形处理系统的核心。
- (3) 有限元分析系统包括前处理、分析计算和后处理部分,核心部分是分析计算模块。
- (4) 优化设计。
- (5) 数控编程与加工过程动态仿真。
- (6) 统一的数据管理功能。

CAD/CAM 系统在设计过程中不仅要处理大量数据,而且涉及多种数据类型,其中包括数值型和非数值型数据、全局静态数据和随着过程产生与变化的动态数据。工程数据库管理系统统一管理和维护 CAD/CAM 系统中的数据。

### 2 基于反求工程的数字产品建模

反求工程可以定义为根据已存在的零件或模型获得产品 CAD 模型的过程。反求工程包括产品数字化和模型重构两个阶段。产品数字化过程是根据现有的模型或参考零件,用测量设备获取其表面各点的空间坐标值,模型重构过程则由获得的测量数据构造出产品的 CAD 模型。反求工程技术作为一个交叉学科融合的成果,从发展的初期就以计算机视觉和计算机图形学作为研究基础,以 CAD/CAM 和快速产品开发、产品物理仿真为应用对象。

建立数字化产品模型的研究趋势之一是将它有机融入整个数字化设计环境中,利用虚拟仿真在设计早期发现设计中存在的重大问题。因此发展快速测量、建模技术,并将之有机融入数字化产品开发系统中,将大大加快产品开发过程。目前,在很多大型 CAD/CAM 系统中已经集成了反求模块,其出发点是从曲面测量入手,通过曲面拟合、优化技术完成零件三维表面的重建,并和 CAD/CAM 自身的造型模块相结合,形成数字化产品开发的一体化平台。在已有产品测量数据的基础上进行产品设计和开发,需要对海量测量数据进行模型重构。这一工作往往十分困难,容易成为整个产品快速开发过程中的瓶颈。所面临的主要问题是点云数据的预处理、精简、分割、拼合和重构,涉及三角网格划分、多分辨率网格模型、数据滤波、拓扑映射和特征提取等算法的研究。近年来,计算几何(Computational Geometry)研究从着重算法复杂性理论逐渐发展到以大规模数据处理的稳定、高效算法为中心,为三维重建、虚拟环境建模的研究提供了有效的几何计算工具。

### 3. 可制造性分析

可制造性分析 (Manufacturability analysis) 强调在设计阶段就要充分考虑制造中的一些问题, 以保证产品具有良好的工艺性、便于加工, 减少由于设计错误而导致的返工。这显然是提高设计效率、缩短产品的开发周期、降低产品成本的有力手段。可制造性分析方法的基本思想是从产品设计参数中提取与制造过程相关的信息, 如产品形状, 对制造过程的可行性进行分析, 以改善设计。

特征技术被认为是现代制造系统中沟通 CAD 与 CAM 的关键因素。研究者们从 CAD、CAPR、NC 和 CAM 等不同领域的认识角度出发, 对特征做了多种定义, 反映了特征含意的不同侧面。为达到设计与制造之间的紧密集成, 必须能够获得设计与制造特征之间的映射方法。特征识别可以看作一种映射工具。在基于特征的产品建模方法中, 特征作为设计使用的基本单元, 通过操作特征产生设计。由此带来的一个缺点是, 基于特征的设计受到特征库中可获得的特征类别数目的限制。从几何模型中获取加工特征的方法主要有以下几种: 交互式指点、模式识别、几何推理、从设计特征映像与特征推理, 其中后两种方法是以基于特征的产品模型为基础的, 如何对特征进行分类与表达依赖于各应用领域的要求。一种通过对不同领域的特征表达进行转换来实现集成设计与制造的框架如图 1-8 所示。

目前, 特征的概念已在集成设计与制造领域引起广泛的关注。在现代工业中, 产品实现的复杂性造成了特征的多视域性。特征不仅依赖于应用领域, 而且在一个特定领域的各个专家也可能提出对于特征的不同视角。在一个特定的应用领域, 如 DFM 或者 DFA 领域规则或约束常常影响特征分解或表达。由于特征的领域依赖性, 应用基于特征方法中的一个关键问题是如何解释多特征观点, 特别是特征表达之间的转换。

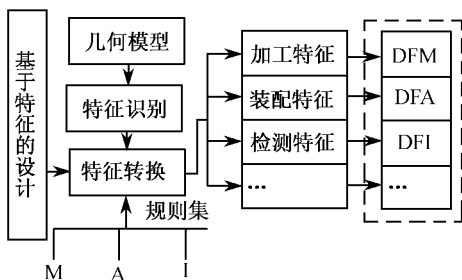


图 1-8 集成 CAD/CAM 环境下的特征转换

### 4. 曲面加工过程仿真

在数控机床上通常由多轴坐标联动在刀具与工件之间形成有效轨迹, 自动路径规划以解决好路径优化、干涉处理为目标。由于自由曲面具有可变的几何形态, 使刀具路径形状适应具体的曲面形状特征一直是路径生成与优化的一个重要问题。

数控加工过程仿真包括几何仿真和物理仿真两个方面。几何仿真技术是随着几何造型技术、计算几何和几何推理而发展起来的, 包括干涉校验计算和图形显示。目前常用的方法有直接实体造型法, 基于图像空间的方法和离散矢量求交法。几何仿真通过对机床—刀具—工件之间的运动学建模和几何计算, 来验证 NC 程序的正确性。切削过程的力学仿真属于基于物理的仿真范畴, 建立仿真模型时需要考虑切削环境物理因素的影响, 如切削参数、切削力等。它通过仿真切削过程的动态力学特性来预测刀具破损、刀具振动、控制切削参数, 从而达到优化切削过程的目的。目前, 在加工过程建模、碰撞检测、仿真计算和虚拟环境等方面相关研究正从几何模型向物理模型、实时仿真计算等方向发展。数控加工过程仿真技术的研究使得有可能逐步代替实物试切。

## § 1 数字制造装备

### 1 机器人与数控机床

机器人科学是一门与计算机科学、信息科学、认知科学、生命科学等高度相关的学科。著名机器人和人工智能专家 Brady 教授在其所编著的“机器人科学”(Robotics Science, MIT Press, 1989)中,从传感技术、视觉与触觉、设计、机动性、机器人操作、推理、几何推理和机器人系统等9个方面论述了开发、使用和研究先进机器人的关键问题。在较高层次,机器人可以视为一种有“感知、思维和行动”的机器,是自动化技术向集成化和智能化发展的综合成果。由于机器人具有自主规划、可编程、可协调作业和基于传感器控制等特点,成为数字制造生产装备及系统的重要组成部分。

随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深,机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点,人们发展了各式各样的具有感知、决策和行动能力的特种机器人、智能机器人和自动化装备,例如应用于微创医疗手术的具有感觉能力的远程操作机器人,应用于电子制造中的微操作机器人,这些机器人从外观上已远远脱离了最初工业机器人所具有的形状,更加符合应用领域的特殊要求,其功能和智能程度也大大超出了工业机器人的范围,从而使机器人及自动化技术呈现出更加广阔的发展空间。

数控机床、坐标测量机和工业机器人具有共同的特点,从运动规划方面来看,都可看作操作对象与执行机构的相对位置、几何约束下的控制和规划问题。工具与工件之间相对运动的空间描述方法及计算机表达模型是研究、设计和应用数字制造装备的基础,例如运用数控机床加工复杂的曲面,需要实现连续的轨迹规划与控制。刀具插补运算就是要解决在一定几何约束条件下的刀具运动规划问题。虚(拟)轴机床基于并联机器人运动学模型,尤其适合于三维复杂曲面的加工、测量。

为了满足不断发展的产品开发需求,数字制造装备将逐渐具备运动规划、状态检测、自律控制、自维护和自重组的功能。数字制造装备的研究包括制造装备驱动过程的数字建模、多约束条件下的运动规划、基于传感信息的参数识别以及对工况变化的自主适应能力等方面。

### 2 数字化测量设备

物体表面三维信息的获取设备基本上可分为两大类,即接触式与非接触式,如 CMM 设备、激光测距传感设备、立体视觉三维成像设备等。当前测量硬件的发展非常迅速,大大地提高了对零件三维表面数据的快速获取能力。对于复杂形状零件,以自由曲面轮廓及复杂结构零件的测量为典型,目前的研究趋势是将激光扫描仪、视觉系统、三坐标测量机设备及相关的应用软件有机结合,构建一个快速测量建模环境。

### 3 快速成形设备

快速成形与制造技术是一种基于离散/堆积成形思想的新型成形技术,在集成计算机、数控、激光和新材料技术的基础上发展起来。RP 底层支撑技术包括:材料成形工艺、数控技术、激光技术、图形交互与可视化技术、计算几何技术、几何建模技术、数据库技术、软件技术。快速成形工艺技术,如激光立体光刻、分层实体制造、三维立体印刷等均与计算机技术密切相关,具有与反求工程技术相结合,形成机器人化设备的发展趋势。