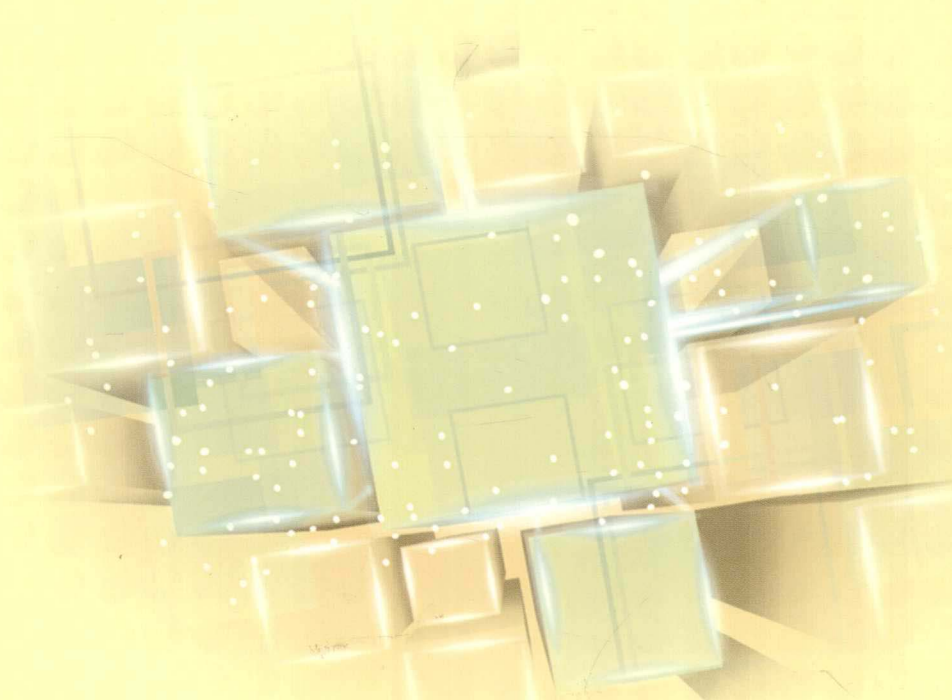



高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

材料成形计算机辅助工程

洪慧平 主编



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

材料成形计算机辅助工程

洪慧平 主编

图书在版编目(CIP)数据

材料成形计算机辅助工程 / 洪慧平主编. —北京: 冶金工业出版社, 2015. 3

工业出版社, 2015. 3

北京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本书为高等学校材料成形与控制工程专业教材,在内容组成上,重点突出材料成形过程计算机辅助工程(CAE)的功能及系统组成、材料成形过程各类CA技术及相互关系、材料成形过程CAD/CAM集成化技术、计算机辅助优化技术等;在CAE方法上,针对材料加工成形工艺,重点突出过程优化技术及其应用、材料成形CAD/CAM集成化技术以及计算机辅助孔型优化设计CARD等;在应用方面,重点介绍轧制过程CAE以及计算机辅助孔型设计技术的重要应用;在上机实践方面,以轧制过程CAE为算例突出应用CAE技术分析和研究材料成形专业问题的基本能力。

本书也可供材料成形领域的研究者及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形计算机辅助工程/洪慧平主编. —北京:冶金工业出版社, 2015. 5
高等学校规划教材
ISBN 978-7-5024-6850-7

I. ①材… II. ①洪… III. ①工程材料—成形—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TB3-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第039805号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 王雪涛 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6850-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年5月第1版,2015年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;11印张;266千字;168页

28.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着计算机辅助 (CA) 技术特别是计算机辅助工程 (CAE) 技术广泛深入的应用, 包括材料加工在内的几乎所有工程技术领域都发生了深刻的变革。与传统的经验直觉法和试错 (凑) 法 (Trial and Error Method) 不同, CAE 技术 (包括 CAD/CAM) 极大地促进了生产技术向模型化 (Modelling)、最优化 (Optimization)、集成化 (Integration)、柔性化 (Flexibility) 和智能化 (Intelligence) 的工程科学方向发展。CAE 作为设计工作者提高工程创新和产品创新能力的有效工具, 它可以对设计方案的实施性能进行可靠性分析并对虚拟样机 (Virtual Prototype) 进行模拟仿真, 超前再现加工制造过程, 及早发现实际缺陷, 获得预报性结果, 实现优化设计; 而且在创新的同时, 提高设计质量, 降低研究开发成本, 缩短研究开发周期。因此, CAE 技术不论在建设新的工程项目还是在改造现有企业、优化工艺规程、挖掘设备潜力、提高生产率等方面都有着极其重要的应用。

当前世界工业发达国家普遍地使用 CAE 技术。CAE 技术不仅能极大地促进国家工业现代化发展, 而且还为企业可持续发展提供了强有力的技术手段。CAE 技术已成为衡量一个国家工业生产技术水平和现代化程度的重要标志, 也是体现综合国力的重要方面。正因如此, 我国早在 1987 年就提出 863/CIMS 主题计划, 其核心技术包含 CAD/CAM/CAE 的现代集成制造系统。在 CAE 技术领域特别是材料加工方面我国起步虽晚但发展迅速。当前通过引进、消化、吸收和创新提高, 我国部分大型企业 CAE 技术已有较高的应用水平, 但全国总体应用水平还有待进一步提高, 特别是材料加工行业, 不少企业真正意义上的 CAE 几乎是空白。

进入 21 世纪后, 特别是随着我国正式加入 WTO 以后, 我国企业进入全球化市场氛围, 国际化竞争日趋激烈, 企业间的竞争表现为产品性能与制造成本的竞争。一个企业如果没有良好的 CAE 软硬件环境以及大批精通 CAE 技术的人才, 是难以在当今国际经济大循环中赶超世界先进水平的。因此, 当代理工科大学生、研究生和工程技术人员等极有必要掌握先进的 CAE 技术。

北京科技大学是国内最早开展计算机辅助工程科研与教学的单位之一, 并在“十五”期间开设的材料成形及控制工程专业设置了“材料成形计算机辅助工程”课程。本书汇集了北京科技大学此前为金属压力加工专业开设的

“轧制计算机辅助工程”、“计算机辅助孔型设计”、“轧制过程计算机模拟”、“工程优化基础”以及作者开设的全校公共选修课“计算机辅助工程与优化”等课程的相关教学内容。在编写过程中注重理论联系实际，将 CAE 领域中典型的研究成果和重要的 CAE 应用实例融入其中，从而加深对 CAE 技术应用的

理解。

本书由洪慧平主编，其中的前言、第 1 章、第 2 章、第 5 章和第 6 章由洪慧平编写；第 3 章和第 4 章由曲扬编写。本书的出版得到了教育部本科教学工程-专业综合改革试点项目经费和北京科技大学教材建设基金的资助。本书在编写过程中同时得到了北京科技大学和亚琛工业大学等院校老师和同仁们的帮助，在此一并致谢！

洪慧平

2014 年 12 月

于北京科技大学

目 录

1 概 论	1
1.1 计算机辅助工程 (CAE)	1
1.1.1 计算机辅助工程 (CAE) 的意义	1
1.1.2 CAE 在先进制造技术中的地位和作用	1
1.2 材料成形 CAE 的定义与组成	4
1.2.1 材料成形若干计算机辅助技术	4
1.2.2 材料成形 CAE 的定义	5
1.2.3 材料成形 CAE 的功能与组成	5
1.3 CAE 的历史与发展趋势	6
1.3.1 CAD/CAM/CAE 技术的发展历史	6
1.3.2 CAD/CAM 技术的发展趋势	8
1.4 CAD/CAM 系统的硬件和软件	9
1.4.1 CAD/CAM 系统的组成	9
1.4.2 CAD/CAM 系统的类型	10
1.4.3 CAD/CAM 系统的硬件组成	11
1.4.4 CAD/CAM 系统的软件组成	11
1.5 CAD/CAM 系统的选型原则	15
1.5.1 CAD/CAM 硬件选型原则	15
1.5.2 CAD/CAM 软件选型原则	16
思考题	17
参考文献	17
2 材料成形过程优化与模拟	18
2.1 概述	18
2.1.1 最优化的基本概念	18
2.1.2 材料成形过程优化的评价指标	18
2.1.3 最优化方法的主要分类	19
2.2 材料成形过程优化方法	21
2.2.1 优化问题的数学模型	21
2.2.2 线性规划方法	22
2.2.3 非线性规划方法	29
2.2.4 动态规划方法	45
2.3 材料成形过程模拟	54

2.3.1	材料成形物理模拟	54
2.3.2	材料成形计算机模拟	65
	思考题	75
	参考文献	75
3	计算机辅助工艺规程设计 (CAPP)	77
3.1	CAPP 的基本原理	77
3.2	CAPP 在 CAD/CAM 集成系统中的作用	77
3.3	CAPP 的基本构成	78
3.4	CAPP 的基本类型	79
3.5	CAPP 的基础技术	80
3.6	CAPP 的发展趋势	80
	思考题	80
	参考文献	80
4	计算机辅助质量系统 (CAQ)	81
4.1	计算机辅助质量系统的功能结构	81
4.1.1	质量计划	81
4.1.2	自动检测及质量数据采集	81
4.1.3	质量评价与控制	81
4.1.4	质量综合管理	82
4.2	集成质量系统	83
4.2.1	集成质量系统的信息流	83
4.2.2	集成质量系统的功能	83
4.3	计算机工艺过程监控	86
	思考题	88
	参考文献	88
5	CAD 建模及 CAD/CAM 集成化	89
5.1	CAD 建模技术	89
5.1.1	几何建模的基本概念	89
5.1.2	几何建模技术	91
5.2	计算机辅助数控加工	100
5.2.1	数控加工的概念	100
5.2.2	计算机辅助数控加工编程	100
5.2.3	数控程序的检验与仿真	103
5.3	虚拟制造技术	104
5.3.1	虚拟制造的概念	104
5.3.2	虚拟制造与实际制造的关系	105

5.3.3	虚拟制造的分类	105
5.3.4	虚拟制造的体系结构	106
5.3.5	虚拟制造的关键技术	108
5.3.6	虚拟产品的开发	108
5.4	CAD/CAM 集成化系统	112
5.4.1	CAD/CAM 集成的概念	112
5.4.2	CAD/CAM 系统集成的目标	113
5.4.3	CAD/CAM 系统的集成方式	113
	思考题	118
	参考文献	118
6	CAE 在材料成形技术中的应用举例	119
6.1	计算机辅助孔型设计	119
6.1.1	计算机辅助孔型设计 (CARD) 的意义	119
6.1.2	CARD 的发展概况	119
6.1.3	CARD 系统的总体结构	120
6.1.4	CARD 的主要类型	121
6.1.5	CARD 优化设计方案	123
6.1.6	CARD 中的变形模型及算法	127
6.1.7	连续式轧机 CARD 算法及程序框图	150
6.2	模具 CAD/CAM	152
6.2.1	概述	152
6.2.2	冲模 CAD/CAM 系统的流程与功能	153
6.2.3	模具结构设计软件系统	155
6.2.4	模具结构设计的基本方法	155
6.2.5	冲裁模具 CAD/CAM 集成	156
	思考题	157
	参考文献	157
附录	本书所用 CARD 变形参数计算模型	158

1 概 论

1.1 计算机辅助工程 (CAE)

1.1.1 计算机辅助工程 (CAE) 的意义

在科学技术的发展过程中,为解决重大的工程技术问题,人们曾经抛弃了经验直觉法,而广泛地使用了试错法 (Trial and Error Method)。例如,为了设计制造一个大型设备,先制造一台小型的,根据观测和检测的结果,再制造一台中型的,然后再制造一台大型的。在大型设备试生产一段时间后,再进行必要的修改。从冲压模具的设计、质量控制、生产线的建设到大型生产基地的决策等,多数都采用了这种方法。沿用经验直觉法进行决策而造成重大失误的风险是很大的,这种例证很多。由经验直觉法向试错法的转化在观念和方法上是一个重大进步。

现代化的材料加工工业,特别是轧制生产等塑性加工工业,是一个由冶金、机械、电气、自动控制和其他设施组成的高效率、高精度的化学冶金、物理冶金、机械加工等综合的生产系统,而且工艺和设备又不断革新。人们发现,试错法已不能满足要求。例如,异型断面轧制孔型和复杂形状的冲压模具的设计及反复修改是一个很耗时费力的工作;一种产品的质量控制,从连铸、连轧到成品生产线的协调性等都受到众多随机因素的影响,人们很难做出正确的决策;连续、高速生产过程中,各因素之间的制约关系,也难进行检测和判断;有时,小型设备并不能反映大型设备的问题,如用窄带钢难以模拟宽带钢的板型问题,用小锻件也难以模拟大型锻件的内部组织变化情况,等等。

近年来,随着计算机在工程领域中的深入应用,人们设法提出一种新的观念和方法。这种方法应做到,处理上述复杂技术问题时,在试验、制造、试生产之前,借助计算机辅助功能,对诸如规划、试验、设计等重大决策性问题提出预报性结论。它可以解决试错法的耗时费力问题、因素众多难以决策的问题和克服不能进行试验的困难。这种方法我们称为计算机辅助工程 (Computer-aided Engineering),简称 CAE。

由试错法发展到计算机辅助工程 (CAE),是由经验技术走向工程科学的质的飞跃,是材料加工领域的一个重大技术变革,它必将促进材料加工科学技术的快速发展,并带来巨大的经济效益。

1.1.2 CAE 在先进制造技术中的地位和作用

先进制造技术是制造业赖以生存、国民经济得以发展的主体技术,是当代科学技术发展最活跃的领域,是国际上高技术竞争的重要战场。一个以制造技术为焦点的技术竞争已在工业发达国家之间展开,许多发展中国家也深切体会到发展先进制造技术的重要性和紧迫性,因而制定了战略发展的规划。

20 世纪 90 年代初出现的虚拟制造技术是先进制造技术的重要标志之一。虚拟制造与实际制造在本质上完全不同,它是在计算机仿真与虚拟现实技术支持下,在计算机上进行产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验等,是在计算机上实现将原材料变成产品的虚

拟现实过程，使得制造技术走出主要依赖于经验的狭小天地，进入全方位预测、力争一次成功的新阶段，从而缩短了产品生产周期，减少了费用，提高了质量。可以预言，虚拟制造技术将继续计算机网络技术与数据库技术之后成为先进制造技术的第三大技术支撑环境。

新一代的材料加工技术是先进制造技术不可缺少的重要组成部分。据统计，全世界有 75% 的钢材经塑性加工，45% 的金属结构用焊接得以成形。我国有 6000 家以上的规模化专业铸造、锻压工厂和众多轧制生产线，材料加工是发展汽车、电力、石化、造船、工程机械等支柱产业的重要基础。据测算，进入 21 世纪汽车质量的 65% 以上仍将由钢材、铝合金、铸铁等通过锻压、焊接、铸造等材料加工方法而成形。

材料加工与以切削为主体的冷加工相比，其特点是：从质量评价标准上，在保证零件尺寸形状精度和表面质量的同时，更注重保证零件和结构内部组织性能和完整性；在产品 and 零件设计上，更强调设计复杂型腔和曲面的能力；在工艺过程中，除了运动和外力作用等因素，还涉及温度场、流场、应力应变场及内部组织的变化；生产环境恶劣，控制因素多样。以上特点反映了材料加工过程对综合自动化和信息集成的需求和复杂性，因此，了解材料加工过程计算机辅助工程（CAE）的现状以及在先进制造技术中的地位和作用，对于推动我国先进制造技术的进步，赶超世界先进水平，具有十分重要的意义。

长期以来，工程师们设计或开发一个产品，通常所采用的方法是：根据设计者的个人经验或采用一些比较简单的经验公式或设计规则，设计产品的工艺方案。因此，当产品的形状比较复杂和质量要求较高时，或需要开发新产品或新工艺时，设计人员只能在提出初步的工艺设计方案后，用费时、费钱的试错方法，在试生产中通过反复修改调试，方能获得较为满意的结果。传统的产品开发过程如图 1.1 所示。研究表明，许多关键的决策是在产品设计过程的前期，只花费了很少比例的开发经费时做出的，并往往决定了产品的最终市场的成败。因此，产品开发中早期决策的正确与否至关重要。

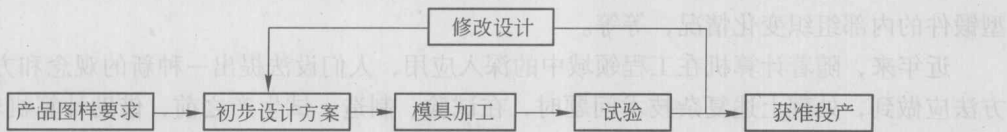


图 1.1 传统的产品开发过程

如今，世界范围内激烈的市场竞争，使产品开发者们面临着全新的产品设计和生产工艺，必须在很短的时间内，在几乎没有前人经验的情况下进行工作，由于产品的更新更加频繁，材料更难以加工，且越来越多的复杂零件需要精密成形，而允许用于进行实物实验的时间被大大地缩短，因此，必须有效地提高产品开发者们的工作效率，以适应市场竞争的需要。

生产率的高低由诸多因素决定，它包括技术、劳动力的构成和教育、资金的投入、所从事的工种、管理制度和劳动者的工作态度等，其中技术是决定性的因素，远比任何其他因素重要。据大多数专家认为，对于生产率的影响程度，劳动力占 14%，资金占 27%，而技术占 59%。为此，世界各国尤其是发达国家投入了大量资金，开发计算机辅助工程（CAE）软件，这些分析工具使产品开发者在制造和试验样品之前，能准确评价不同的设计，从而能选择最佳设计方案；工艺流程可以反复在计算机中通过工艺模拟来超前再现，而不是在实验室或车间中用实物模拟来实现，各种不同的设计方案可以在进行耗资的实物制造和试验之前，在计算机上模拟工艺的全过程，从而使设计者可以分析工艺参数与产品性能之间的关系，观察成形情况以及是否产生内部或外部的缺陷，进而修改工艺及模具直至满意状态。计算机优化与模拟在保

证产品质量, 减少材料消耗, 提高生产率及缩短产品开发周期等方面显示了显著的优越性, 因此, 传统的经验试错法 (Trial and Error Method) 正被以 CAE 为核心技术的方案优化设计、模拟预测和制造的产品开发新流程所取代 (图 1.2)。

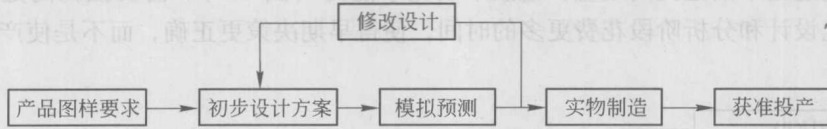


图 1.2 现代化的产品开发过程

制造系统是一个复杂系统, 具有层次性和结构性。从内部功能来看, 它包括市场决策分析、快速报价体系、生产计划管理、产品设计制造、物流与库存控制、销售信息系统、售后服务系统以及组织和实施生产的行为模式。然而“设计”和“制造”则是制造系统最基础的行为, 设计制造系统是制造的核心, 生产力的进步与发展最终体现在产品的设计和制造技术的进步与发展。

并行工程将设计制造紧密联系在一起, 而工艺模拟使并行工程成为可能 (图 1.3), 选用合适的 CAE 工具可使并行工程易于实现。使用 CAE 工具, 产品开发者可可在获得设计和加工更多知识的情况下, 选择更好的工艺, 并对早期工艺设计做出准确的关键决策。此外, 并行工程还有助于避免那些难以加工和不经济的工艺设计。

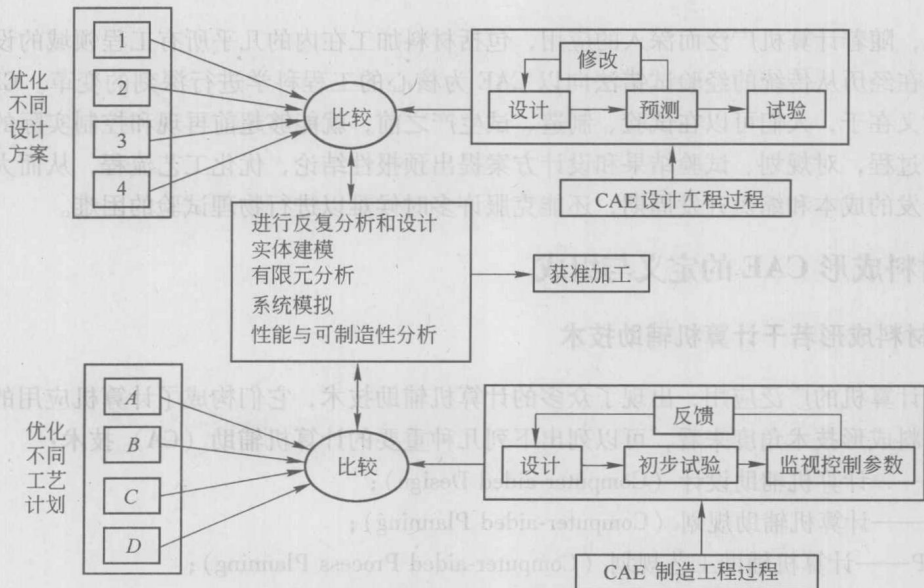


图 1.3 设计制造的并行工程与 CAE 的关系

当前随着 CAE 软件的不断发展, 已有可能将所有的主要单元集成为单一的 CAE 系统, 为产品开发者提供一个高效快速的设计制造平台, 以适应激烈的市场竞争的需要, 如图 1.4 所示。一个集成的 CAE 系统的单元主要包括: 图形系统, 如用于设计和显示所规划的加工工艺的三维实体造型器或 CAD 系统; 各种图形系统之间的数据传输程序; 根据存储零件的图形描述生成有限元模型的前处理器; 用于各有关的加工工艺的模拟分析工具; 加工工艺模拟结果的后处理或图形输出显示; 控制大量的图形、材料特性和前后处理输出的数据库管理; 在新技术

新方法方面的人员培训；软件系统的维护和技术支持，这对于复杂的加工过程的模拟尤为重要，当有问题时还需对用户热线支持。一个 CAE 系统总是随着时间的推移，由计算机软硬件的不断发展而逐渐发展和完善的。因此，对于其在制造业中的实施和应用也是分阶段的，这样才能保证制造业不断地提高效益，增强市场竞争能力（图 1.5）。需要强调的是，实施 CAE 方法将在工艺设计和分析阶段花费更多的时间，使得早期决策更正确，而不是使产品开发工作完全自动化。

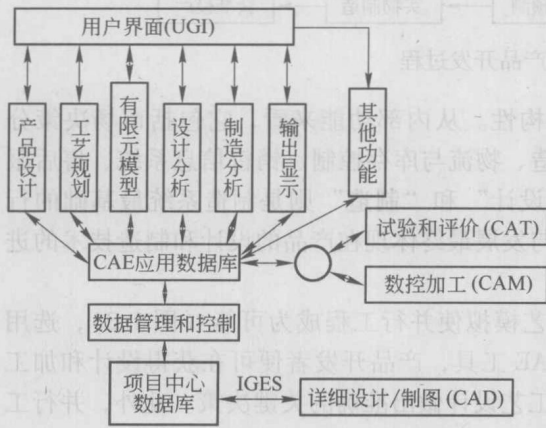


图 1.4 集成的 CAE 软件系统设计

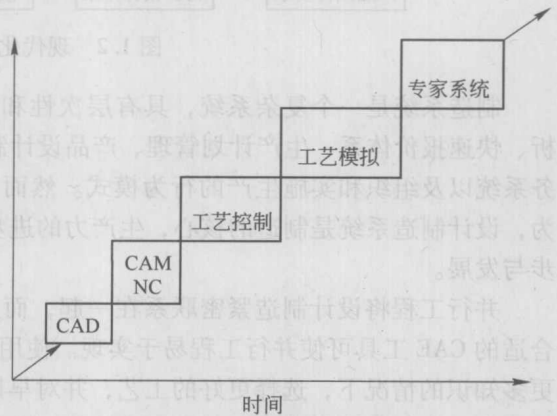


图 1.5 CAE 系统在制造业中的实施过程

总之，随着计算机广泛而深入的应用，包括材料加工在内的几乎所有工程领域的设计和生方法都在经历从传统的经验试错法向以 CAE 为核心的工程科学进行深刻的变革。CAE 技术的重要意义在于，人们可以在试验、制造、试生产之前，就能够超前再现和控制实际的加工制造等生产过程，对规划、试验结果和设计方案提出预报性结论，优化工艺流程，从而大幅度降低研究开发的成本和缩短开发周期，还能克服许多时候难以进行物理试验的困难。

1.2 材料成形 CAE 的定义与组成

1.2.1 材料成形若干计算机辅助技术

随着计算机的广泛应用，出现了众多的计算机辅助技术，它们构成了计算机应用的重要方面。从材料成形技术角度来看，可以列出下列几种重要的计算机辅助 (CA) 技术：

- CAD——计算机辅助设计 (Computer-aided Design)；
- CAP——计算机辅助规划 (Computer-aided Planning)；
- CAPP——计算机辅助工艺规划 (Computer-aided Process Planning)；
- CAM——计算机辅助制造 (Computer-aided Manufacturing)；
- CAQ——计算机辅助质量控制 (Computer-aided Quality Control)；
- CAT——计算机辅助检验 (Computer-aided Testing)；
- CAE——计算机辅助工程 (Computer-aided Engineering)；
- CIMS——计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System)。

上述各类材料成形 CA 技术在早期阶段大多是以独立的计算机辅助“岛方案” (Island Schema) 出现的。后来随着 CA 技术的进一步发展，人们将 CAD、CAPP、CAM 等功能模块通过计算机网络连接，形成 CAD/CAM 集成化 (或一体化) 系统 (图 1.6)。

1.2.2 材料成形 CAE 的定义

由于专业领域或研究出发点的不同，人们对各类 CA 技术的含义及其相互关系的理解也不尽相同，另外在不同发展阶段，也有不同理解。



图 1.6 CAD/CAM 一体化系统

日本学者雨宫好文和安田仁彦等认为，在许多情况下可将 CAD、CAM、CAE 有机结合，形成 CAD/CAM/CAE 系统，其中 CAD 是指用计算机进行几何设计、修改和绘图；CAM 是指工艺设计、数控编程、机器人编程等生产准备过程（狭义 CAM），甚至还利用计算机进行实际的制造（广义 CAM）；CAE 主要是指利用计算机在初步设计和详细设计等阶段进行模拟仿真和分析计算（狭义 CAE，即 CAE 分析）。

权威的 Encyclopedia Britannica 认为 CAE 在工业中是指在数字计算机的直接控制下将设计和制造集成的一个系统。CAE 系统将用计算机进行工业的设计工作，即计算机辅助设计（Computer-aided Design, CAD）与用计算机进行制造工序，即计算机辅助制造（Computer-aided Manufacturing, CAM）结合在一起。这个集成过程通常称作 CAD/CAM 集成化。CAD 系统通常由一台带一个或多个终端（其特点为视频显示器和交互图形输入设备）的计算机组成，其可用于设计工作（例如机器部件、服装样板或集成电路）。CAM 涉及使用数控机床以及高性能、可编程机器人。在 CAE 系统中，由设计过程开发和编辑的图样被直接转换成生产机器的加工指令，用于制造要求的产品。CAE 系统减少开发新产品所需要的时间，通过优化生产流程和操作规程以及在改变机器操作时提供更高的柔性来提高生产率。

结合当前 CAE 的发展及其在材料加工成形领域中的应用，可将 CAE 理解为应用计算机辅助技术进行规划、优化设计、模拟、加工制造和质量控制等的集成化、网络化系统。

1.2.3 材料成形 CAE 的功能与组成

CAE 的基本功能包括：（1）拟订方案，用专家知识协助工具和过程设计，规划并控制制造过程；（2）参数计算分析，运用最优化技术对目标函数寻优；（3）自动绘图；（4）编写文件；（5）模拟和试验，用计算机模拟仿真加速设计进程，减少试验次数；（6）生产资料准备，运用经济模型软件为报价等提供科学依据；（7）自动加工、装配和控制；（8）企业数据总结和管理，分析成本实时修正生产数据。

CAE 的基本组成如图 1.7 所示。其中 PS（Process Simulation）是过程模拟，Opt 是最优化（Optimization）。

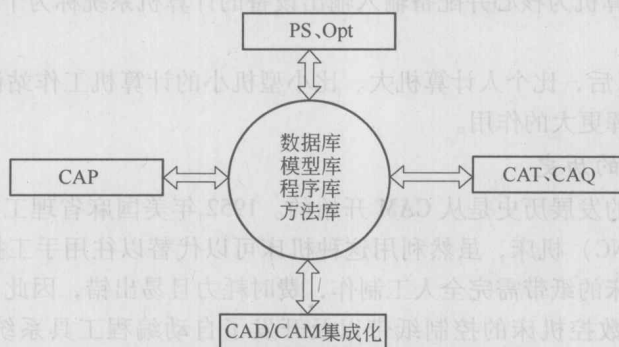


图 1.7 CAE 系统的基本组成

材料成形 CAE 的主要功能模块如图 1.8 所示。

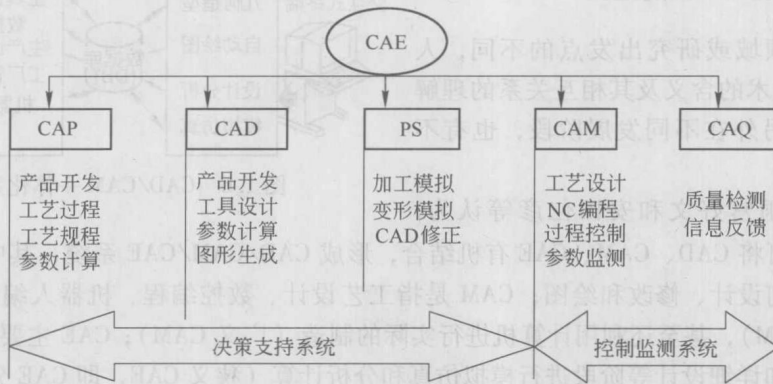


图 1.8 材料成形 CAE 的主要功能模块

1.3 CAE 的历史与发展趋势

1.3.1 CAD/CAM/CAE 技术的发展历史

1.3.1.1 计算机的简史

20 世纪 40 年代诞生了数字计算机，起初的计算机是电气机械式，当时最大的 MARK-I 型计算机，计算 23 位加减法和乘法分别需 0.3s 和 0.6s。1946 年在为美国陆军开发的 ENIAC 型计算机上开始用电子管代替了机械部分，形成“电子”计算机，即第 1 代计算机。这种 ENIAC 型计算机计算两个 10 位数乘法需要 1/40s，到了 50 年代中期进行同样的计算仅需 1/2000s。

20 世纪 50 年代末期，应用半导体的第 2 代计算机诞生了，其完成两个 10 位数乘法运算需要 1/10⁵s。

20 世纪 70 年代，将几千个半导体元件构成的电路压缩到一个小硅片上的集成电路（IC）开发成功后，诞生了采用集成电路的第 3 代计算机。这种计算机每秒可完成数百万次的计算。随着采用大规模集成电路（VLSI）的第 3.5 代计算机的开发应用，计算机技术正朝着高性能和低价格的方向发展。

在上述大型计算机（又称主机）发展的同时，以小型化为目标的计算机发展也异常迅速。20 世纪 60 年代紧凑式、操作方便的小型计算机（Minicomputer）开发成功，到了 20 世纪 70 年代计算机进一步小型化和微型化，出现了由一个或数个半导体芯片组成的微型计算机（Microcomputer）。以微型计算机为核心并配备输入输出设备的计算机系统称为个人计算机（PC），现正在普及应用。

20 世纪 80 年代以后，比个人计算机大、比小型机小的计算机工作站诞生了，工作站与其他计算机联网，可发挥更大的作用。

1.3.1.2 CAM 的历史

CAD/CAM/CAE 的发展历史是从 CAM 开始的。1952 年美国麻省理工学院（MIT）在世界上首次开发了数控（NC）机床，虽然利用这种机床可以代替以往用手工操作才能完成的加工过程，但控制这种机床的纸带需完全人工制作，费时耗力且易出错，因此 MIT 的研究人员开始研究利用计算机制作数控机床的控制纸带以及开发了自动编程工具系统（Automatically Programmed Tools, APT），其目的是根据被加工对象的几何形状来自动生成刀具的运动轨迹。这

可以说是 CAM 历史的开端。1957 年和 1962 年分别出现了 APT-II 和 APT-III, 1964 年以后以美国伊利诺伊理工学院为核心承担了 APT 的长期开发计划, 在 1969 年完成了 APT-IV 系统。APT 技术引入德国亚琛工业大学后, 在此基础上开发了 EXAPT-I、EXAPT-II、EXAPT-III 等系统。

与 CAM 技术密切相关的工艺设计自动化系统的发展较缓慢, 1969 年首先在挪威成功地开发出了真正意义上的与 CAM 技术密切相关的工艺设计自动化系统 AUTOPROS, 其对后来的工艺设计系统影响较大。但由于当时对于工艺设计中的处理方向不明确, 工艺设计自动化系统的发展较缓慢。

1.3.1.3 CAD 的历史

20 世纪 50 年代末期, MIT 的研究者不仅开发 APT 系统将计算机技术直接应用于加工过程, 而且还探索将计算机直接应用到设计过程。1963 年, 年仅 24 岁的 MIT 研究生 I. E. Sutherland 首先取得了这方面的研究成果, 他在美国计算机联合大会 (SJCC) 上宣读了题为“人机对话图形通讯系统”的博士论文。其核心内容是以“人机对话”方式在计算机上实现图形处理, 由他推出的二维素描板 (SKETCHPAD) 系统, 让设计者坐在图形显示器前通过操作光笔和键盘, 在显示屏上能方便地绘出直线、圆弧等二维图形, 再将这些计算机图形信息存储起来, 可作为绘图数据用于其他场合。此研究成果实现了 CAD 概念的第一步, 具有划时代的意义, 促进了 CAD 和 CAM 技术的发展。CAD 最初是在电路设计中得到成功应用, 60 年代末期, 电路变得异常复杂, 利用计算机图形处理功能极大地提高了电路设计的效率。之后 CAD 又以同样方法在许多工程领域得到应用。例如, 工业化农场的管路设计, 土木建筑业的桥梁、高速公路等的配置设计, 城市规划中的水管、电线、电话线、煤气管的配置设计等都是应用 CAD 的实例。

人们在成功实现二维 CAD 的基础上, 为适应设计和加工任务的要求, 又提出了三维 CAD 的构想, 因为若能将反映实物的三维立体图形存储在计算机里进行处理, 那么在计算机内即可进行复杂实体的设计了。1973 年, 在布达佩斯召开的国际会议上, 有两个研究小组分别提出了将三维立体图形存入计算机的方法。在计算机中, 表示三维物体的数据集称为实体模型 (Solid Model)。布达佩斯会议之后, 关于实体模型的研究不断发展, 目前, 三维 CAD 已经达到了实用化程度。

1.3.1.4 CAE 工程分析计算

在设计中, 利用计算机进行必要的分析计算几乎从计算机诞生就开始了。据说在 1953 年, 人们就已经能够利用某种收敛算法, 在计算机上进行电力变压器的设计计算了。此后, 作为 CAD/CAM/CAE 的组成部分并发挥重要作用的有限元法 (Finite Element Method, FEM) 于 50 年代后期诞生了。50 年代, 飞机逐渐由螺旋桨式向喷气式转变。为了确定高速飞行的喷气式飞机的机翼结构, 必须对其动态特性进行高精度分析计算, 而以往的计算手段满足不了要求。1956 年, 美国波音飞机公司的科技工作者开发了划时代的有限元计算方法。后来, 有限元法不断发展, 现在不仅用于结构分析计算, 而且还用于传热、流体、电磁场等许多方面的分析计算中。作为利用计算机进行分析计算的方法, 后来又开发了边界元法、模态分析法等新的计算方法。

但是到目前为止, 这些计算方法大多还是单独使用, 与 CAD、CAM 相结合的研究还很少。不过, 人们认识到了 CAD 过于侧重于计算机辅助图形处理, 因而提出了 CAE 分析计算的概念。随着计算方法的发展, CAE 分析计算技术的实用化也在不断进步, 现在已经可以与 CAD、CAM 相提并论了。

1.3.1.5 CAD/CAM 集成化

最初 CAD、CAM 和 CAE 分析计算几乎是独立发展，在实际生产现场中 CAD、CAM 和 CAE 分析计算也是互不相关的。因此，即使 CAD 设计的产品几何形状数据存储于计算机中，为了进行 CAM 也要对相同的工件进行数据计算，因而造成了浪费。由于这种浪费，使人们认识到了将 CAD、CAM 和 CAE 模拟分析技术进行集成化的重要性。但是，当时还缺乏实现这种集成化的关键技术。实体模型技术出现后，作为这种集成化的关键技术得到了普遍重视。因为一旦建立起实体模型，就能够以此为基础统一地进行模拟分析计算和生产准备等一系列工作。现在，以实体模型为核心的 CAD/CAM/CAE 的集成化不断进步，极大地促进了设计和生产向自动化和高效化方向发展。

1.3.2 CAD/CAM 技术的发展趋势

CAD/CAM 技术是一个发展着的概念。它不但可以实现计算机辅助设计中的各个分过程或者若干过程的集成，而且有可能把全生产过程集成在一起，使无图样制造成为可能。此外，随着快速成形技术的发展，快速模具制造技术也已诞生。人工智能技术也将引入 CAD/CAM 系统。CAD/CAM 技术的发展将包括如下几个方面：

(1) CAD/CAM 技术将成为 CIMS 的重要组成部分。计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 是指以企业为对象，借助计算机和信息技术，使经营决策、产品设计与制造、生产经营管理有机地结合为一个整体，从而缩短产品开发、制造周期，提高产品质量及生产率，充分利用企业的各种资源，获得更高的经济效益。图 1.9 是 CIMS 中的概念划分及关系。

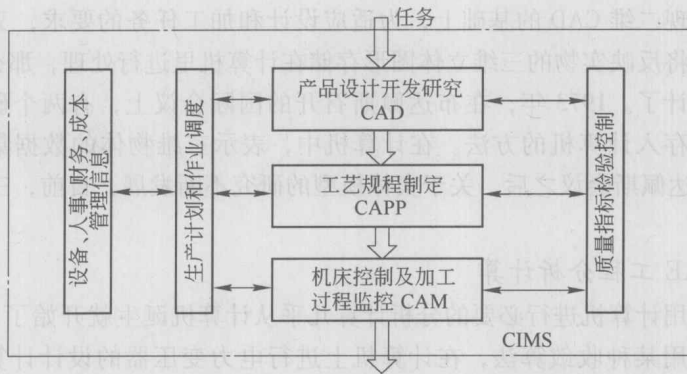


图 1.9 CIMS 中的概念划分及关系

CIMS 的主要特征是除了信息交流实现高度的集成外，在物料流、刀具流等方面也进行集成。CIMS 作为一门高新技术，也处于不断地发展和变化之中，一些新思想和新技术被引入到 CIMS 中来，CAD/CAM 技术将成为 CIMS 系统的一个重要组成部分。

(2) 无图样设计/制造技术。所谓无图样设计/制造技术是指依靠数字化设计，进行数字化预装配，开展并行工程，实现详细设计、系统安排、分析计算、工艺计划、工装设计和跟踪服务的并行发展。例如，1994 年，美国波音飞机公司向世界展示了 20 世纪最大的双发运输机 777。该机种就是采用无图样设计/制造技术的范例。

波音公司当时做出了两项重大决策：1) 将所有飞机零件在计算机上进行三维设计 (构造三维数字化模型)，并进行数字化预装配；2) 组织综合设计组和制造一体化组，开展并行工

程。这个决策,使设计人员在计算机上以三维方式设计全部零件,进行数字化预装配作为设计综合。公司的各个部门均可共享这些设计模型,尽早获得有关技术集成、可靠性、可维护性、工艺性等方面的反馈信息,从根本上改进了原有的设计方法。

波音公司在实施无图样设计/制造技术中,配置了 2200 台运行 CATIA 软件的 IBM RISC6000 工作站,并与 8 台主机联网,使 238 个综合设计组能在并行工作环境中协同工作。60 多个国家的飞机零件供应商能方便地通过网络数据库实时存取零件信息,使这种具有 300 万种以上零部件的飞机能顺利地装配起来。

(3) 快速成形制造技术。快速成形技术 (Rapid Part/Prototype Manufacturing, RPM) 是 20 世纪 80 年代末发展起来的一项新的制造技术。传统的机械加工工艺多采用去除多余材料 (如车削、铣削等) 以得到合乎要求的形状和尺寸的零件,而快速成形技术则是基于材料逐层叠加的原理,在无刀 (工) 具与工件之间相接触的情况下,直接由计算机的三维 CAD 数据文件制造出任意曲面的实物模型原型 (Part/Prototype)。这种原形零件可用于产品设计的评估、装配检验和工艺试验的迭代式改进过程,大大缩短了产品的设计开发周期,提高了产品的外观与性能的设计质量。基于快速成形技术并与传统的铸造、粉末烧结等工艺相结合而发展起来的快速模具制造技术,其制模周期为常规制模周期的 $1/3 \sim 1/5$,而成本仅为后者的 $1/2 \sim 1/4$ 。正因快速成形技术对制造业有如此潜在的巨大影响,国际上有学者把它与 20 世纪 60 年代发展起来的数控技术相媲美。目前,快速成形技术已在家电、汽车、机械制造、玩具、考古复制和医疗工程等行业获得了广泛的应用。

快速成形技术是用 CAD 技术设计出零件的三维曲面或实体模型,按一定的厚度对其进行分层,生成二维 (截面) 信息,再将分层后的数据进行处理,输入加工参数,生成加工代码;利用数控装置精确控制激光束 (或其他工具) 的运动,扫出铺在工作台上薄层成形材料每层截面形状,在其上面再铺新一层的成形材料,重复上一层操作,逐层叠加,直到形成整个零件。目前发展较成熟的快速成形方法主要有: 1) 主体平版印刷法 (Stereo Lithography Apparatus, SLA); 2) 分层实体制造 (Laminated Object Manufacturing, LOM); 3) 选择性激光烧结法 (Selective Laser Sintering, SLS); 4) 熔融沉积制造法 (Fused Depositions Modelling, FDM)。

1.4 CAD/CAM 系统的硬件和软件

1.4.1 CAD/CAM 系统的组成

CAD/CAM 系统由硬件 (Hardware) 和软件 (Software) 组成。其中硬件由计算机及其外设组成,是物质基础;软件是信息处理的载体,是整个 CAD/CAM 系统的“灵魂”。软件主要指计算机程序及相关文档。CAD/CAM 软件可分为系统软件、支撑软件和应用软件三个层次 (图 1.10)。

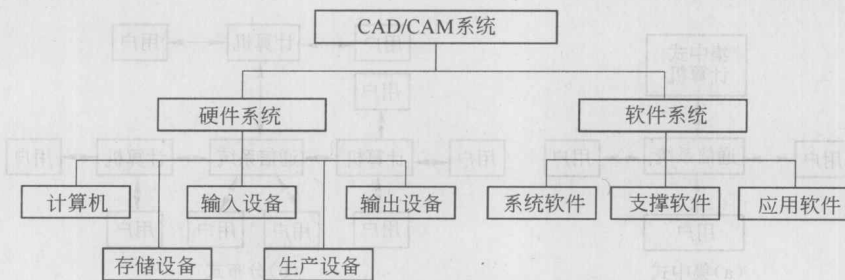


图 1.10 CAD/CAM 系统的组成