

# 先进制造技术与系统

李言 李淑娟 编著

陕西科学技术出版社

# 前 言

先进制造技术(Advanced Manufacturing Technology,简称 AMT)是美国在 20 世纪 80 年代末提出的新概念。它涉及制造技术的各方面,包括工程设计、制造自动化、制造工艺技术、现代管理技术以及相关支持环境和条件。把先进制造技术应用于制造系统各环节,则构成了先进制造系统(Advanced Manufacturing System,简称 AMS),它强调人、技术和管理的有机集成,以追求高质量、高柔性、高敏捷性、高响应速度、低成本和综合经济效益为目标。因此一经提出便受到各国政府、学术界和企业界的高度重视,成为目前最热门的研究课题之一。

制造业是国民经济的支柱产业,它一方面创造价值,生产物质财富,另一方面它为国民经济各部门和科学技术的进步与发展提供先进的手段和装备。提高国家的制造技术水平是增强综合国力的重要手段已成为人们的共识。正如美国麻省理工学院(MIT)的调查报告所说的“一个国家要生活得好,首先必须生产得好”和“振兴美国经济的出路在于振兴美国的制造业”那样,使大家真正认识了:“经济的竞争归根到底是制造技术和制造能力的竞争”的道理。为此美国政府采取了一系列措施,并把先进制造技术列为“美国国家关键技术”之一,鼓励和支持先进制造技术的研究,经过几年的实践已取得了明显效果,例如著名的“2mm 工程”等的实施,使美国汽车产量再次超过日本,重新占领欧美市场。与此同时,日本、欧洲、澳大利亚等也相继开展了相关的研究,推动了这一技术在国际范围内的广泛开展。和工业发达国家相比,我国的制造技术水平还比较低,参与市场竞争的能力相对较弱,面对市场的国际化和竞争的日益加剧,采用先进制造技术发展我国的制造业已成为发展的必然趋势。

先进制造技术是作用于产品整个寿命周期的所有适用技术的总称,其主要特征是强调实用性和综合性,提高企业综合经济效益。从它的目的性就可以看出,它是一个不断吸收新技术,并将其渗透到制造过程的各个环节,以实现优质、高效、节能、环保和敏捷生产的动态过程,因此对促进国民经济的发展有不可低估的影响。

虽然各国对先进制造技术进行了大量的研究,但由于其技术的综合性、内容的广泛性及发展过程的动态性,到目前为止,对其体系结构及研究内容还没有统一的模式,全面系统介绍先进制造技术和系统的论著相对还很缺乏,这与当前的研究形成反差。我们在几年教学和研究的基础上,组织力量编写本书,其目的是起一个抛砖引玉的作用,以推动先进制造技术在我国更加深入广泛的研究和应用,也为广大科技工作者、教师和学生以及企业界人士提供一本先进制造技术与系统方面较为系统的教材和参考书。

本书力图从整体上对先进制造技术和系统进行全面的介绍,并反映出其发展的最新成果。因此从内容编排上充分考虑了这一点。作为基础对制造系统进行了简要介绍,并讨论了先进制造技术与系统的体系结构。本书把先进制造系统分成先进工程设计技术、制造自动化技术、制造工艺技术、先进管理技术以及相关支持技术,这些几乎包括了有关

① 制造时间  $MLT = n_m (T_{su} + Q T_0 + T_{no})$

②  $PC = WS_w H R_p$

$T_{su}$ : 装配时间  $T_{no}$ : 非工序时间  
 $T_0$ : 工序时间

先进制造技术的所有内容和最新成果。因此本书具有综合性强,内容广泛,思想新颖等特点。

本书是在李言教授为博士和硕士研究生开设的学位课《先进制造技术》讲义的基础上,由李言、李淑娟、郑建明编写完成的。由李言担任全书统稿。肖继明、袁启龙、洪伟也参加了部分编写和资料整理。李淑娟、洪伟、赵丽颖、刘洁完成了全书的计算机绘图工作。

黄玉美教授担任本书的主审。

在本书的编写过程中,作者参考和引用了国内外许多同行专家论文及著作的研究内容,在此谨表衷心感谢!

由于先进制造技术是一全新的概念,又涉及广泛的研究内容,因此本书的编写本身就有很大的难度,加之作者认识水平及能力所限,谬误缺点在所难免,敬请读者批评斧正,并期望同行专家赐教。

作者

1999年11月于西安

③  $WS_w H = \sum (DW_i / R_{p_i}) n_m$

$W$ : 设备或加工工作站数

$S_w$ : 每周的班次次数

$H$ : 一台设备或一个工作站每班加工时间(h)

$DW$ : 要求率 (件/周或件/月)

$R_p$ : 生产率

$n_m$  — 工序数

$I = 1, 2, \dots, k$

④ 利用率

$U = \text{生产输出} / PC$

⑤ 工作效率

$D = (-MTTR + MTBF) / MTBF \times 100\%$

$\begin{cases} MTBF = (PC / R_p) - MTTR \end{cases}$

$MTTR = \frac{PC - PC_1}{R_p}$

故障PC      实际制造能力

# 目 录

第 1 章 制造系统的基本概念和发展	(1)
1.1 制造系统的基本概念	(1)
1.1.1 制造与社会	(1)
1.1.2 生产的种类和生产类型	(2)
1.1.3 制造系统	(3)
1.2 制造系统的发展	(5)
1.2.1 材料及制造方法的发展	(5)
1.2.2 加工质量的发展	(6)
1.2.3 生产类型的演变和发展	(7)
1.2.4 制造自动化的发展	(9)
1.3 面向新世纪的企业特征	(10)
1.3.1 企业竞争力的分析	(10)
1.3.2 未来制造企业的特征	(12)
第 2 章 先进制造系统的体系结构	(14)
2.1 先进制造技术的发展背景	(14)
2.1.1 市场变化的特点	(14)
2.1.2 产品结构的特点	(15)
2.1.3 生产过程的特点	(16)
2.1.4 制造格局的变革及新技术发展	(17)
2.2 先进制造技术与系统的概念与特点	(18)
2.3 先进制造系统的体系结构	(19)
2.3.1 先进制造企业结构	(19)
2.3.2 先进制造系统的体系结构	(21)
2.3.3 先进制造系统的生产模式	(22)
2.4 先进制造系统效益指标与测定	(23)
2.4.1 生产率的测定	(23)
2.4.2 质量的测定	(24)

2.4.3	灵活性的测定	(25)
2.4.4	综合制造效能的测定	(26)
<b>第3章</b>	<b>先进制造系统的工程设计技术</b>	<b>(28)</b>
3.1	设计的概念	(28)
3.1.1	设计的类型	(29)
3.1.2	机械系统开发设计程序	(29)
3.1.3	机械系统设计的基本原则	(30)
3.1.4	设计方法概论	(32)
3.1.5	新产品开发	(33)
3.2	计算机辅助设计	(38)
3.2.1	计算机辅助绘图	(38)
3.2.2	计算机辅助设计	(52)
3.3	并行工程与并行设计	(57)
3.3.1	并行工程	(57)
3.3.2	并行设计	(61)
3.4	面向“X”的设计	(65)
3.4.1	概述	(65)
3.4.2	面向制造的设计	(67)
3.4.3	面向质量的设计	(75)
3.4.4	其他 DFX 方法	(81)
3.5	优化设计	(82)
3.5.1	概述	(82)
3.5.2	优化设计的数学模型	(82)
3.5.3	常用的优化方法	(84)
3.6	反求工程	(86)
3.6.1	反求分析的内容与方法	(87)
3.6.2	反求设计的内容与方法	(87)
3.6.3	实物反求设计方法	(88)
3.7	其他设计方法简介	(89)
<b>第4章</b>	<b>制造自动化技术</b>	<b>(91)</b>
4.1	CAD/CAPP/CAM 集成	(91)
4.1.1	CAD/CAM 系统的组成	(91)
4.1.2	CAD/CAM 系统在 CIMS 中的地位	(92)
4.1.3	特征技术及 CAD/CAPP/CAM 集成	(93)
4.1.4	产品数据交换技术	(95)
4.1.5	产品数据管理技术	(98)

4.2 数控编程技术 .....	(100)
4.2.1 编程的内容和步骤 .....	(100)
4.2.2 手工编程 .....	(101)
4.2.3 自动编程 .....	(105)
4.2.4 数控自动编程系统的发展 .....	(111)
4.3 计算机辅助工艺过程设计 .....	(111)
4.3.1 CAPP 的基本原理 .....	(111)
4.3.2 派生式 CAPP 系统 .....	(114)
4.3.3 创成式 CAPP 系统 .....	(116)
4.3.4 智能型 CAPP 系统 .....	(119)
4.3.5 CAPP 存在的问题及发展趋势 .....	(119)
4.4 计算机集成制造系统 .....	(122)
4.4.1 CIMS 的基本概念 .....	(122)
4.4.2 CIMS 的组成 .....	(123)
4.4.3 CIMS 的体系结构 .....	(125)
4.5 柔性制造系统 .....	(130)
4.5.1 车间自动化递阶结构 .....	(131)
4.5.2 FMS 工件传送及其管理系统 .....	(132)
4.5.3 FMS 刀具交换及其管理系统 .....	(133)
4.5.4 FMS 加工单元 .....	(133)
4.5.5 FMS 清洗工作站 .....	(134)
4.5.6 FMS 在线测量工作站 .....	(134)
4.5.7 FMS 单元控制器和 workstation 控制器 .....	(134)
4.5.8 物料运送小车 .....	(136)
4.6 车间控制器 .....	(137)
4.6.1 车间控制系统递阶结构 .....	(137)
4.6.2 车间控制系统开放体系结构 .....	(138)
4.6.3 单元控制器 .....	(140)
4.6.4 常规生产计划调度方法 .....	(142)
4.6.5 基于人工智能的车间计划调度系统 .....	(145)
4.6.6 CAPP 与生产计划调度的集成 .....	(148)
4.7 智能制造技术和智能制造系统 .....	(149)
4.7.1 智能制造技术和智能制造系统的基本概念 .....	(149)
4.7.2 智能制造技术和智能制造系统的主要内容 .....	(150)
4.7.3 智能制造系统的建模技术 .....	(152)
4.7.4 智能制造技术的控制策略 .....	(152)
4.7.5 机械系统状态监控技术 .....	(155)
4.8 制造系统的信息分类及制造接口 .....	(158)

4.8.1	机械系统中信息的分类 .....	(158)
4.8.2	制造接口 .....	(160)
<b>第 5 章</b>	<b>先进制造工艺技术 .....</b>	<b>(162)</b>
5.1	制造工艺技术概述 .....	(162)
5.2	特种加工技术 .....	(163)
5.2.1	激光束加工 .....	(164)
5.2.2	光刻蚀技术 .....	(166)
5.2.3	电子束加工与光刻技术 .....	(168)
5.2.4	离子束加工 .....	(171)
5.3	超声加工及振动切削 .....	(174)
5.3.1	超声加工 .....	(174)
5.3.2	振动切削 .....	(175)
5.3.3	低频振动钻孔技术 .....	(178)
5.4	微米/纳米技术 .....	(182)
5.4.1	概述 .....	(182)
5.4.2	微米/纳米技术 .....	(182)
5.4.3	微机电系统 .....	(186)
5.5	快速原型/制造技术 .....	(189)
5.5.1	快速成形制造 .....	(189)
5.5.2	RP&M 的主要工艺方法 .....	(190)
5.5.3	RPM 与相关学科间的关系 .....	(193)
5.6	去毛刺工艺 .....	(195)
<b>第 6 章</b>	<b>先进制造系统管理技术 .....</b>	<b>(199)</b>
6.1	概述 .....	(199)
6.2	成组技术 .....	(200)
6.2.1	成组技术的基本概念 .....	(200)
6.2.2	零件分类编码系统 .....	(201)
6.2.3	零件的分组(族)方法 .....	(206)
6.3	管理信息系统 .....	(212)
6.3.1	管理信息系统的概念 .....	(212)
6.3.2	管理信息系统的结构 .....	(213)
6.3.3	MIS 的开发步骤简介 .....	(213)
6.4	制造资源计划(MRP II) .....	(214)
6.4.1	MRP II 发展过程 .....	(214)
6.4.2	基本功能 .....	(215)
6.4.3	MRP II 的特点 .....	(219)

6.5	全面质量管理	(219)
6.5.1	概述	(219)
6.5.2	质量控制体系	(220)
6.5.3	全面质量管理和 ISO9000 质量标准	(220)
6.5.4	计算机集成质量系统	(223)
6.6	准时生产(JIT)管理方式	(226)
6.6.1	JIT 生产管理方式的基本思想及实现方法	(227)
6.6.2	实现 JIT 生产的重要手段——看板管理	(233)
6.7	精益生产	(235)
6.7.1	精益生产的产生	(235)
6.7.2	精益生产的概念与体系结构	(235)
6.7.3	精益生产的管理与控制技术	(239)
6.7.4	企业应用精益生产的条件	(241)
6.8	敏捷制造	(242)
6.8.1	敏捷制造的提出	(242)
6.8.2	敏捷制造的概念	(242)
6.8.3	企业的敏捷性及其影响因素	(243)
6.8.4	敏捷企业的体系及特性	(243)
6.8.5	敏捷制造系统的设计准则	(245)
6.9	制造全球化和网络化	(246)
6.9.1	全球制造	(246)
6.9.2	正在来临的信息网络化时代	(247)
6.9.3	网络上的虚拟企业及其虚拟制造信息服务网	(248)
6.9.4	全球制造模式中的制造系统与设备的控制技术	(249)
6.10	虚拟制造	(251)
6.10.1	虚拟制造概念	(251)
6.10.2	虚拟制造的特征	(252)
6.10.3	虚拟制造系统的分类	(252)
6.11	全能制造系统	(253)
6.11.1	全能体的概念	(253)
6.11.2	全能制造系统	(253)
6.11.3	全能制造系统的结构	(254)
6.12	未来企业的组织形态	(255)
6.12.1	虚拟企业(公司)	(255)
6.12.2	动态联盟	(256)
6.12.3	分散网络化生产	(258)



<b>第 7 章 系统支撑技术和支撑环境</b> .....	(262)
7.1 概述 .....	(262)
7.2 IDEF 建模分析和设计方法 .....	(262)
7.2.1 IDEF0 方法 .....	(263)
7.2.2 IDEF1X 方法 .....	(268)
7.3 计算机网络技术 .....	(272)
7.3.1 计算机网络的构成与分类 .....	(273)
7.3.2 计算机网络体系结构及协议 .....	(274)
7.3.3 常见的计算机网络产品 .....	(275)
7.4 数据库技术 .....	(277)
7.4.1 数据库系统组成 .....	(277)
7.4.2 数据模型及其设计方法 .....	(278)
7.4.3 数据库管理系统 .....	(279)
7.4.4 常见的数据库管理系统 .....	(280)
7.5 虚拟现实技术 .....	(282)
7.5.1 概述 .....	(282)
7.5.2 虚拟现实系统的类型与组成 .....	(282)
7.5.3 临境交互技术与装置 .....	(283)
7.5.4 虚拟现实系统的建模技术 .....	(283)
7.5.5 开发环境及应用领域 .....	(284)
7.6 人工智能技术 .....	(284)
7.6.1 专家系统 .....	(284)
7.6.2 神经网络技术 .....	(295)
7.6.3 遗传算法 .....	(301)
7.6.4 模拟退火算法 .....	(305)
<b>参考文献</b> .....	(309)

# 第 1 章 制造系统的基本概念和发展

## 1.1 制造系统的基本概念

制造业是将可用资源与能源通过制造过程,转化为可供人和社会使用和利用的工业产品或生活消费品的行业,它涉及到国民经济的各个行业,如机械、电子、轻工、食品、石油、化工、能源、交通、军工和航空航天等。可以说制造业是国民经济的基础行业,是国民经济建设和综合国力的支柱产业。

随着制造业的发展和学科间的交叉与渗透,现代制造过程及相应的制造理论、制造技术及组织管理模式的显著特征已明显地呈现出来:一是系统科学性,即涉及系统理论和系统工程的方法越来越多;二是学科综合集成性,即现代制造过程和制造技术,不是任何一个单一学科知识能够支撑,而依赖于多门学科知识的有机结合,如光、机、电一体化技术的综合运用;三是技术发展的先进性,新技术的涌现和发展,并不断地向制造技术中的渗透,为制造技术的发展提供了良好的支持环境,形成了制造技术新的发展理念和模式。例如,信息技术、网络技术、计算机技术、人工智能及仿真等新技术的迅速发展,使全球制造、网络制造、虚拟制造、智能制造等制造新理论、新技术已成为制造技术不可逆转的发展趋势。为此,研究如何运用系统工程的理论和方法,有机综合和集成制造过程涉及的多学科知识,以及先进的制造和技术模式,以解决制造过程中的综合性技术问题和相关的管理问题,从而达到制造过程整体最优化,是制造技术发展过程永恒的追求目标和研究主题。

### 1.1.1 制造与社会

制造(Manufacturing)是人类按照所需目的,运用主观掌握的知识和技能,借助于手工或客观可以利用的物质工具,采用有效的方法,将原材料转化成最终物质产品,并投放市场的全过程。它包括市场调研和预测、产品设计、选材和工艺设计、生产加工、质量保证、生产过程管理、营销、售后服务等产品寿命周期(Life Circle)内一系列相互联系的活动。随着信息业的突起和知识经济的发展,制造的内涵和范围也会产生很大的变化,如软件生产、信息利用等已成为很大的产业就说明这一点。

制造业是所有与制造活动有关的实体或企业机构的总称。制造业是国民经济的支柱,这是因为一方面它创造价值,生产物质财富和新知识;另一方面,它为国民经济各部门包括国防和科学技术的进步和发展提供手段和装备。

社会的进步和发展,离不开制造业的革新和发展。综观世界各国的发展,如果一个国家的制造业发达,它的经济必然强大。因此制造业和社会的进步与发展有着密切的关系。

可以这样来理解:①物质资料的生产是人类社会赖以生存和发展的基础,人类最基本的活动是物质资料的生产。推动人类社会进步、决定人类社会面貌的主要因素仍然是物质资料的生产;②生产的目的是满足社会和人们生活的需要,制造业则是提供这一需要的基石;③没有强大、先进的制造业,就不可能保持在激烈的市场竞争中取胜,提高综合国力和人民生活水平就没有保障;④健康强大的制造业是一个国家综合实力的体现。人类社会的发展史,特别是近几十年世界经济的发展状况就是有力的证明。

社会生产力的进步,使物质资料的生产(第一、二产业的生产),在国民生产总值和劳动力与资源投入中所占的比例不断减少,而服务业(第三产业)和信息业(有人称为第四产业)所占的比例迅速增加。这一趋势只能说明社会生产的不断进步、社会的不断发展,并不能证明第一、二产业在社会中的作用在下降。按照匹特(W·Petty)一克拉克(C·Clark)法则,当某国的第三产业的比例超过50%后,该国即进入先进工业化经济大国的行列。因此作为第二产业的制造业,必须调整产业结构,促进技术进步,才能形成强大稳定的制造业体系,认识到这一点,就不会产生所谓制造业是“夕阳工业”的恐惧和忧虑。

制造技术是完成制造活动所需的一切手段的总和。高质量、高水平的制造业必然有先进的制造技术作后盾。所以说制造技术是一个国家科技水平的综合体现,是国家经济可持续发展的根本动力。为了赢得激烈的市场竞争,在世界经济中占一席之地,就必须研究和利用先进制造技术,不断完善和改造制造业,使其具有优越的生存环境,并能提供功能适用(Function)、交货期短(Time to Market)、质量好(Quality)、价格低(Cost)、服务优良(Service)的具有竞争力的产品。

### 1.1.2 生产的种类和生产类型

这里出现了两个意义极其相近的术语,即生产(Production)和制造(Manufacturing)。由于理解和定义范围的出发点不同,使生产和制造在很多方面是相互包容的,因此在本书中对二者的使用不做严格的区分。

#### (1)生产的种类

根据产出物的形态变化,制造概念的发展大致经历了三个阶段:

1)自然生产(Nature Production):在远古时代,自然界既是生产活动的对象,也是惟一的财富来源,人们最基本的生产活动是采集果实、狩猎和捕鱼,称之为自然生产。经过漫长的发展,演变成当今社会的第一产业。

2)市场生产(Market Production):通过制造或工业活动产生实际的产品或财富,主要强调有形产品的生产。由于市场生产概念的确立,诞生了今天的第二产业,如制造业、建筑业、电力等等。

3)效用生产(Utility Production):效用是满足人类需求程度的一种指标,效用生产是通过产生或增大效用来增加附加价值。因此效用生产的概念还包括了一切服务业和当今的信息产业,也就是第三、四产业。

就工业生产而言,可以把制造活动分为三大种类:基础制造、变换制造和最终制造。

·基础制造:就是获取自然资源,并把它们转换成能被其他制造业利用的原材料,如采矿、钢铁冶炼等;

·变换制造:是指把基础制造的输出转换成工业产品,如轧钢、化工生产等。变换制造的特征是其产品的物理形态不完整;

·最终制造:是指把毛坯、原材料或半成品经过加工并装配成用户可以直接使用的最终产品的生产,如机械加工、装配等生产都属于这一类。

## (2) 生产类型

根据制作产品的行业类别以及生产数量,一般制造过程分为单件生产、小批生产、中批(成批)生产、大批生产以及大量生产,因此通常把生产类型划分为三大类型:单件小批生产、成批生产和大批大量生产。生产类型不同,生产过程的生产率,对劳动技术、设备、刀夹量具的要求以及生产组织方式等均有不同的特征。比如设备在大批量生产中,以组合机床、专用机床以及自动线为主要特征。而单件小批生产条件下,则要求有良好的通用性,万能性。而生产率方面,大批量生产中生产率高于单件小批生产。然而,据统计在全部零件制造中有75%~80%的生产批量小于50件,因此单件小批生产是主要的制造活动,尤其在市场竞争日益加剧,产品更新换代越来越快的今天更是如此。探索如何在单件小批生产条件下,取得大批大量生产的效率和效益成为制造技术研究的又一重要课题。进入20世纪90年代后期,大批量定制生产(Mass Customization Production)概念的提出为解决这一问题提供了新的思路和方法。

### 1.1.3 制造系统

#### (1) 制造系统的概念

“系统”是由相互作用和相互依赖的若干部分有机结合,并具有特定功能的有机整体。关于制造系统的定义,尚在发展和完善之中。1989年英国学者Parnaby指出:“制造系统是工艺、机器系统、人、组织结构、信息流、控制系统和计算机的集成组合,其目的在于取得产品制造的经济性和产品性能的国际竞争性。”1990年国际生产工程研究学会(CIRP)给出制造系统的定义是:“制造系统是制造业中形成制造生产的有机整体,在机电工程生产中,制造系统具有设计、生产、发运和销售的一体化功能。”1992年美国麻省理工学院G·Chryssolouris给出的定义是:“制造系统是人、机器和装备以及物流和信息流的一个组合体。”日本东京都大学人见胜人教授从制造系统结构、制造系统转变特性以及制造系统的过程三个方面给出了制造系统的定义。我国学者也进行了广泛深入的研究,重庆大学刘飞教授提出:“制造过程及其所涉及的硬件包括人员、生产设备、材料、能源和各种辅助装置以及有关的软件,包括制造理论、制造技术(制造工艺和制造方法等)和制造信息等,组成了一个具有特定功能的有机整体,称之为制造系统。”

根据上述定义,对制造系统可以这样来理解:制造系统是由包括人、生产设备、生产工具、物料传输设备及其他辅助装置组成的硬件环境,和由生产信息、决策信息、生产方法、工艺手段和管理模式所形成的软件支持条件所构成的有机整体,其根本目标是把制造资源转变成财富或产品。

一个制造系统具备“系统”概念的全部特征:

1) 集合性(Assemblage):指制造系统是由两个或两个以上可以相互区别的要素(或子系统)组成。

2) 相关性 (Relationship):是指制造系统内各要素是相互依赖和相互联系的,当某一要素发生变化时,则其他相互关联的要素相应地改变和调整,以保持系统的整体最优。

3) 目的性 (Goal-seeking):是指一个制造系统是一个整体,要完成一定的任务,达到一个或多个目的。

4) 环境适应性 (Adaption to Environment):是指一个系统必须具有对周围环境变化的适应性,外部环境的变化与系统是相互影响的,如果系统能根据外部的环境变化,进行自我调节,使系统的运行达到最优状态,说明系统环境适应性好。

制造系统除具有一般系统的普遍特性外,还有几个显著的特点:

1) 制造系统是一个具有非线性和耗散特征的动态系统。众所周知,制造系统要消耗能量(耗散),存在众多非线性因素(如力、磨损等),并和外部(环境)有物质和信息交换,故它是耗散的非线性系统。其动态性表现在:第一,制造系统总是处在生产要素的不断输入和有形产品的不断输出这样一个动态过程中;第二,制造系统内部的硬件和软件也处于不断变化之中;第三,系统为适应环境变化,总是处在不断发展、变化和完美之中。

2) 制造系统具有反馈特征。制造系统在运行过程中,其输出状态如产品质量和资源状态不断地反馈给制造系统的各个环节,从而实现制造过程的不断调节、改造和优化。

3) 制造系统存在随机性。制造系统的许多随机因素导致系统的某些性质成为带有偶然性的随机特性。如产品的市场需要、加工误差等就是如此。

4) 制造系统是一个有序的定向转换过程。这是由制造系统的目的性决定的。而且许多制造过程如化工、机械加工,不仅有序、定向,而且不可逆。

## (2) 制造系统的“流素”分析

如上所述,由于制造系统的动态性,使制造系统在运行过程中无时无刻都伴随着各种“流素”的运动。系统就是要对各种流素进行合理规划、配置和控制,使系统的运行处于最优状态,以获得动态综合的最佳效益。图 1-1 是机械制造系统流素运动过程示意图。

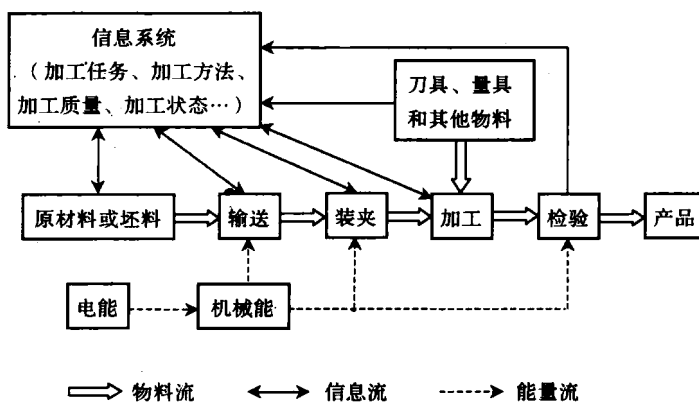


图 1-1 制造系统流素运动

从图中可以看出系统三种基本“流素”,即物料流、信息流和能量流。同时还有其他隐含“流素”,如资金流、误差流、人员流等等。

1) 物料流:制造系统与环境有物质交换,即从系统外部输入原材料、坯件及配套件,输

出成品和废弃物。在物料流子系统支持下,把加工、处理、检验、装配等工作站或设备连接成系统,输入物件按预定顺序流过制造系统,完成规定的转换,输出成品等,把物料的运动与变换过程称为物料流。

2)信息流:信息流表征了制造系统的信息与外部交换,以及系统内部信息传递与交换的特性,如设计信息与控制指令的输入,上层控制和管理所需信息的输出等。其中包含了决策过程产生的决策信息流。

3)能量流:制造过程必须从外界吸收能量,在系统内进行能量转换,同时排出废弃的能量。在能量流动过程中,除了直接用于物件转换的能量外,还存在着因摩擦、生热等消耗的能量。因此以能量表征了系统与外界能量的交换,系统内能量的变换和耗散的特性。

4)资金流:制造过程是消耗资金和创造财富的过程,资金的转换和劳动的物化使产品增值,故资金的流动情况是制造过程经济学特性的重要指标。它覆盖了包括规划、设计、制造和控制及检测、包装、运输等制造活动,合理地规划和运筹资金流,会使制造过程取得良好的效益。

5)误差流:误差流又称加工误差流动或制造误差流动。加工误差流指的是输入制造系统的坏(工)件误差转换成输出的工(零)件或产品的误差过程,它表征了制造系统误差形态的变化。

6)人员流:人是制造系统重要的资源。人员流是指现代企业对人力资源的开发利用,以及对人员的合理配置,使每个人在系统中充分发挥自己的潜能,取得最佳的使用效果。

## 1.2 制造系统的发展

世界科学技术的巨大进步,推动了社会生产力的迅速发展。今天,无论是工业、农业、交通运输,还是通讯、航空宇航等各个领域,其发展速度和取得的成就都是前所未有的。机械制造工业,已由二百多年前的个体手工作坊式生产方式以及随后发展的大批大量生产方式,被自动化、柔性化、智能化、敏捷精益化的定制生产方式所代替,使得企业快速提供顾客所需要的质量高、成本低、个性化的产品成为可能。研究机械制造领域的发展过程,以及这种科学技术与生产互相促进、共同发展的历史,不仅可以理解今天的科学技术同发展生产的关系,而且能够预测未来的生产及其所依赖的科学技术发展方向。

### 1.2.1 材料及制造方法的发展

材料的发展与产品的发展密切相关,继 1770 年瓦特发明蒸汽机以后,陆续出现了 Daimler 汽油发动机、Parson 蒸汽轮机、高速斜齿轮柴油发动机,1910 年左右出现了滚动轴承,以后又发展了燃汽轮机、喷气发动机。20 世纪 50 年代以后,则出现了导弹、人造卫星,而今天宇宙飞船、载人空间站已成现实,目前正在向星际探测器等宇航新时代迈进。

随着产品的发展,材料也不断发展。在蒸汽机时代,所用的主要材料是低碳钢和铸铁,其极限抗拉强度不超过 210MPa。但随着产品性能和结构要求的提高,对材料性能提出了越来越高的要求,如要制造燃汽轮机,就必须要有耐磨、耐热的新材料,于是出现了耐磨、耐热的合金钢。1950 年前后,由于发展飞机和人造卫星的需要,又出现了钛和钛合

金,随即又发展了高强度钢以及各种新材料,使材料极限抗拉强度超过 2110MPa。目前由于产品需求的极大变化,各种新材料更是层出不穷,如结构陶瓷、复合材料、超高强度合金材料、各种涂层材料、以及智能材料等,都在工业生产中发挥着愈来愈多的作用。

材料的发展促进了刀具材料及制造方法的发展,伴随着材料性能的不断改善和提高,制造技术和加工方法也必须相应地改变。尤其是出现了高强度、耐热合金以后,传统的切削加工方法已很难对用这类材料制造的零件进行加工,于是新的加工方法相继出现,如电火花加工、电化学加工、电子束加工、等离子体加工、激光加工等。高性能非金属材料,复合材料的广泛使用,使射流加工、超声加工、化学加工、光蚀加工、生物制造等技术得到广泛的发展。

总之,市场和需求推动了产品的发展,产品的发展给材料的发展提出了新的要求,同时促进了材料技术的发展,这就要求制造工艺和方法能快速适应这一发展的要求,使它们相互依赖、共同发展。因此研究开发新材料,新工艺是机械工业永无止境的追求目标。

### 1.2.2 加工质量的发展

保证零件加工质量是机械加工方法要解决的首要问题,加工质量的指标中最重要的加工精度。保证加工精度,即是指限制加工方法产生的误差值,使它限定在允许的范围之内;而提高加工精度是指需要减少加工误差值。

生产的发展要求不断提高机器的工作精度和运转精度,为此必须相应地提高零件的尺寸和几何形状精度。19世纪中相继出现了各种金属切削方法和机床,形成了精度理论和公差制度。20世纪中叶以后又出现了各种新型工具材料和特种加工方法,使二百多年来机械加工的精度不断提高。1850年机器零件的尺寸精度已达到0.01mm。20世纪初由于发明了能测量0.001mm的千分尺和光学比较仪等,加工精度便逐渐向微米级过渡,成为机械加工精度发展进程中的转折点。当时在机械工业中将达到微米级精度的加工称为精密加工。20世纪50年代末以来,迅速发展的宇航、计算机、激光技术,以及自动控制系统等尖端科学技术,就是综合利用了近代的先进技术和工艺方法的结果。另外由于生产集成电路的需要,出现了各种微细加工工艺(微小尺寸零件的加工技术)。它利用切削的和非切削的加工方法,在最近一二十年的时间里使机械加工精度提高了1~2个数量级,即由50年代末的微米级( $10^{-6}$ m),提高到目前的10纳米(nm)级(1nm为 $10^{-9}$ m),从而进入超精密加工的时代。现在测量超大规模集成电路所用的电子探针,其测量精度已可达 $2.5\text{\AA}$ ( $\text{\AA}=10^{-10}$ m)。21世纪将实现原子级的加工和测量。各年代达到的加工精度的大致情况见图1-2。从图中可见,传统的机械加工方法(一般的粗加工和精密加工)与超精密机械加工方法一样,也是随采用新技术、新工艺、新设备,以及新的测试技术和仪器,其加工精度也不断提高。一般精密加工(如研磨)现在也可达到 $0.05\mu\text{m}$ 精度。加工精度的不断提高,反映了在加工工件时材料的分割水平不断由宏观进入微观世界的发展趋势。

提高机械加工精度的措施主要有:开发新的机械加工工艺方法,如现已创造出单刃金刚石刀具精密、超精密车削及铣削的新工艺;新型刀具材料的研制和采用,如应用涂层硬质合金、聚晶立方氮化硼和人造金刚石材料等;研究超精密加工用机床,如采用空气轴承,

具备低速进给机构和微量进刀机构,具有优越的抗热、抗振特性。另外,在加工过程中对加工精度进行的监控技术,如应用光学的计量方式已有可能进入实用阶段。

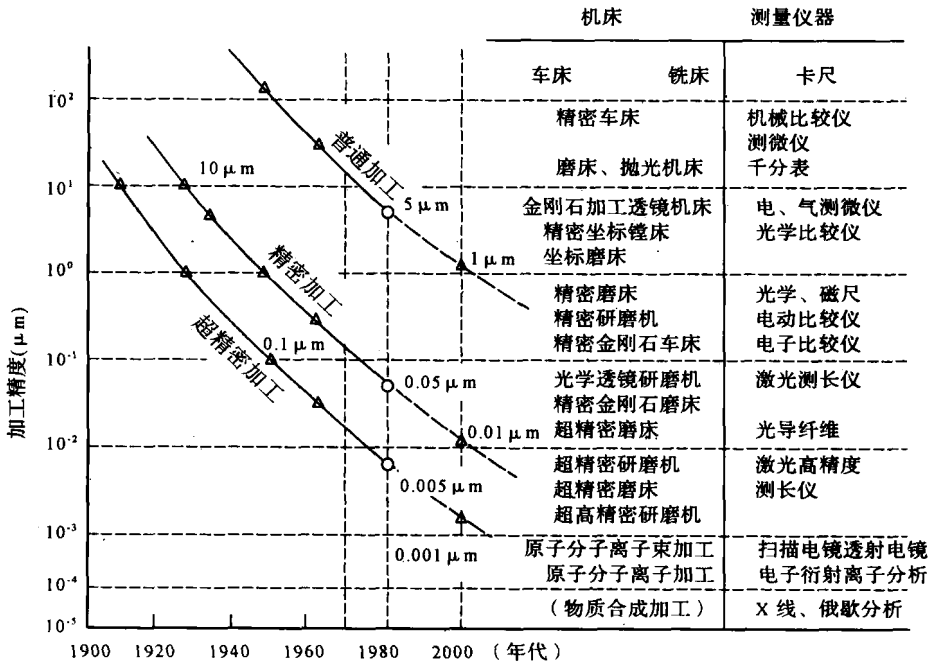


图 1-2 各年代达到的加工精度

为了延长机械设备的使用寿命和提高其工作可靠性,国外近年来特别注意零件经机械加工后的表面质量,提出了表面完整性(Surface Integrity)这一概念,它比过去一般所谓表面质量包含了更多的内容。表面完整性不但指机械加工后表面的粗糙度、波纹度、以及纹理等表面特征,还包含已加工表面大致在 0.38mm(0.015in)厚度范围内各种物理、机械、冶金方面的特性,如残余应力、硬化程度、微观组织变化、晶间腐蚀、热损伤区、材质不均等。表面完整性对于零件在工作时受的应力很大,或经受的是交变载荷,以及使用环境恶劣时尤为重要。现在国外已有人提出了评价表面完整性的一系列数据指标,研究了各种加工工艺方法与表面完整性的关系,找到了提高表面完整性的工艺方法,如低应力磨削方法。随着对连续生产过程的设备、能源设备、海上采油设备、航天设备等的安全性、可靠性要求日益提高的趋势,对表面完整性的研究一定会不断深入和扩大。

### 1.2.3 生产类型的演变和发展

国际生产工程研究学会(CIRP)曾对美、日、欧洲各工业部门所采用的生产类型进行过调查,调查结果见图 1-3。

从图中可以看出,各国工业企业不论产品种类,还是零件产值,在单件和小批生产方式下生产的占总量的 80%左右,虽然这些数字有一定的变化范围,但基本反映了这些国家生产类型的基本情况。我国对机械工业的统计结果也表明,批量在 10~100 件的零件



约占生产类型种类数的 70%，单件生产还不包括在内。由此可见，无论国内还是国外，单件小批方式下生产的零件占大多数。随着市场竞争的日趋激烈、人们生活需求的多样化，产品的品种和规格，将会不断增加。因此，多品种小批量生产将成为今后生产的主流。

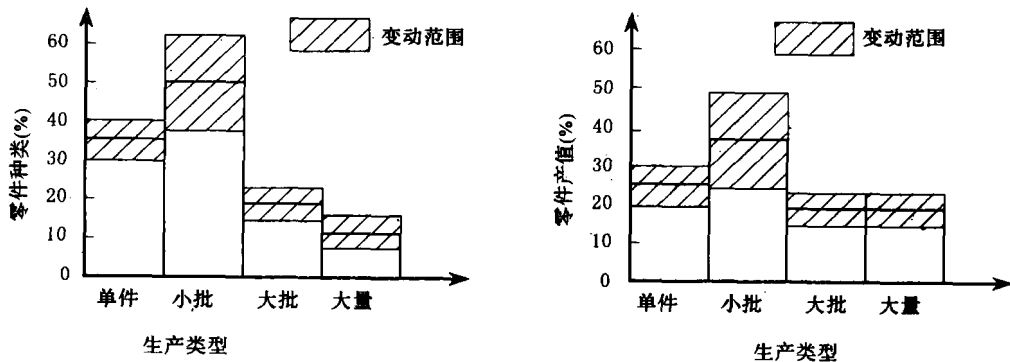


图 1-3 生产类型分布

综观制造技术的发展历程，由于材料和制造工艺、产品需求的变化，生产类型和生产方式也随之改变。图 1-4 可以直观地反映出它们的演变过程。

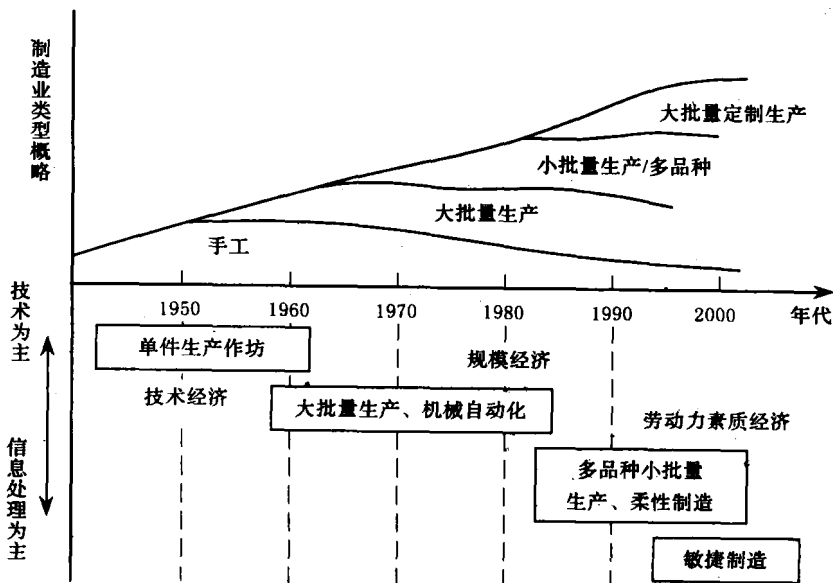


图 1-4 生产类型和生产方式的演变

从图中可以看出生产类型和生产方式演变大致经历了四个阶段：

1) 作坊式单件生产 (Craft Production)。从 1770 年瓦特发明蒸汽机开始，揭开了工业化的序幕，在这一阶段称为“技艺”性生产方式，产品设计、机械加工和装配都有高度的技