

第一章 绪 论

先进制造技术 (Advanced Manufacturing Technology, AMT) 源于 20 世纪 80 年代末的美国。它是制造业不断吸收信息技术及现代化管理等方面的成果,并将其综合应用于产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,提高对动态多变的产品市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。

本章介绍了制造技术、先进制造技术的基本概念、制造业的基本概念、制造业的发展和我国制造业的现状以及制造技术的基本概念;论述了先进制造技术的内涵、特点、体系结构和分类,提出了先进制造技术的发展趋势。

第一节 制造、制造业及制造技术

一、制造、制造技术和制造业的定义

1. 制造 (Manufacturing) 是人类按照市场的需求,运用主观掌握的知识和技能借助于手工或可以利用的客观物质工具,采用有效的方法,将原材料转化为最终物质产品,并投放市场的全过程。

就“制造过程”而言又有狭义与广义之分。

(1) 狭义制造,又称“小制造”,就是指产品的加工和装配过程。

(2) 广义制造,又称“大制造”或“现代制造”,它指产品的全生命周期,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内一系列相互联系的活动。

2. 制造业是所有与制造有关的企业机构的总体。

它是将制造资源(物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等),通过制造过程,转化为可供人们使用与利用的工业品与生活消费品的行业,它涉及国民经济的许多部门,是国民经济和综合国力的支柱产业。它一方面创造价值,生产物质财富和新的知识,另一方面为国民经济各个部门包括国防和科学技术的进步与发展提供先进的手段和装备。

在工业化国家中,约有 1/4 的人口从事各种形式的制造活动,在非制造业部门中约有半数

人的工作性质与制造业密切相关。纵观世界各国,如果一个国家的制造业发达,它的经济必然强大。大多数国家和地区的经济腾飞,制造业功不可没。例如日本、新加坡、韩国、中国台湾、中国香港等。

3. 制造技术(Manufacturing Technology)是完成制造活动所需的一切手段的总和,是将原材料和其他生产要素经济合理地转化为可直接使用的具有较高附加值的成品/半成品和技术服务的技术群。健康发达的高质量制造业必然有先进的制造技术作为后盾。

二、传统制造业及其技术的发展

人类文明的发展与制造业的进步密切相关。在石器时代,人类利用天然石料制作劳动工具,以采集利用自然资源作为主要生活手段。到青铜器、铁器时代,人们开始采矿、冶炼铸锻工具、织布、打造工具,满足以农业为主的自然经济的需要,采取的是作坊式手工业的生产方式。生产用的原动力主要是人力,局部利用水力和风力。直到1765年,瓦特发明蒸汽机,纺织业、机器制造业才取得革命性的变化,引发了第一次工业革命,近代工业化大生产开始出现。到1820年奥斯特发现电磁效应,安培提出电流相互作用定律,1831年法拉第提出电磁感应定律,1864年麦克斯韦电磁场理论的建立,为发电机、电动机的发明奠定了科学基础,从而迎来电气化时代。以电作为动力源,改变了机器的结构,开拓了机电制造技术的新局面。

19世纪末20世纪初,内燃机的发明,自动机床、自动线的相继问世,以及产品部件化、部件标准化和科学管理思想的提出,掀起制造业革命的新浪潮。20世纪中期,电力电子技术和计算机技术的迅猛发展及其在制造领域所产生的强大的辐射效应,更是极大地促进了制造模式的演变和产品设计 with 制造工艺的紧密结合,也推动了制造系统的发展和管理方式的变革。同时,制造技术的新发展也为现代制造科学的形成创造了条件。

回顾制造技术的发展,从蒸汽机出现到今天,主要经历了三个发展阶段:

1. 用机器代替手工,从作坊形成工厂

18世纪后半叶,以蒸汽机和工具机的发明为特征的产业革命,揭开了近代工业的历史,促成了制造企业的雏形——工场式生产的出现,标志着制造业已完成从手工业作坊式生产到以机械加工厂和分工原则为中心的工厂生产的艰难转变。20世纪初,各种金属切削加工工艺方法陆续形成,近代制造技术已成体系。它产生于英国,19世纪先后传到法国、德国和美国,并在美国首先形成了小型的机械工厂,使这些国家的经济得到了发展,国力大大增强。

2. 从单件生产方式发展成大量生产方式

推动这种根本变革的是两位美国人:泰勒和福特。泰勒首先提出了以劳动分工和计件工资制为基础的科学管理,成为制造工程科学的奠基人。福特首先推行所有零件都按照一定的公差要求来加工(零件互换技术),1913年建立了具有划时代意义的汽车装配生产线,实现了

以刚性自动化为特征的大量生产方式，它对社会结构、劳动分工、教育制度和经济发展，都产生了重大的作用。20世纪50年代发展到了顶峰，产生了工业技术的革命和创新，传统制造业及其大工业体系也随之建立和逐渐成熟。近代传统制造工业技术体系的形成，其特点是以机械—电力技术为核心的各类技术相互联结和依存的制造工业技术体系。

3. 柔性化、集成化、智能化和网络化的现代制造技术

由于传统制造是以机械—电力技术为核心的各类技术相互联结和依存的制造工业技术体系，其支撑技术的发展，决定了传统制造业的生产和技术有如下特点：

(1) 单件小作坊式生产加高度的个人制造技巧，大量的机械化刚性规模生产加一体化的组织生产模式，再加细化的专业分工。

(2) 制造技术的界限分明及其专业的相互独立。

(3) 制造技术一般仅指加工制造的工艺方法，即制造全过程中某一段环节的技术方法。

(4) 制造技术一般只能控制生产过程中的物料流和能量流。机械加工工艺系统输入的是材料或坯料及相应的刀具、量具、夹具体、润滑油、切削液和其他辅助物料等，经过输送、装夹、加工和检验等过程，最后输出半成品或成品。

整个加工过程是物料的输入和输出的动态过程。这种以加工设备和加工工艺为中心，以有形的物质为对象，用以改变物料的形态和地点变化的运动过程被称为物料流；机械加工过程的各种运动，特别是物料的运动、材料的加工厂变形均需要能量来维持，这种能量的消耗、转换、传递的过程称为能量流。

为保证机械加工过程的正常进行，必须集成各方面的信息，包括加工任务、加工方法、刀具状态、工件要求、质量指标、切削参数等。所有这些信息构成了机械加工过程的信息系统，这个系统不断地和机械加工过程的各种状态进行信息交换，从而有效地控制机械加工过程，以保证机械加工的效率和产品质量。这种信息在机械加工系统中的作用过程称为信息流。

(5) 制造技术与制造生产管理的分离。

三、现代制造及其技术的发展

自然科学的进步促进了新技术的发展和传统技术的革新、发展及完善，产生了新兴材料技术（新冶炼技术、新合金材料、高分子材料、无机非金属材料、复合材料等），新切削加工技术（数控机床、新刀具、超高速和精密加工），大型发电和传输技术，核能技术，微电子技术（集成电路、计算机、电视、广播和雷达），自动化技术，激光技术，生物技术和系统工程技术。

另外，人类社会在跨入20世纪后，物质需求不断提高，在科学和技术进步的同时，受到地球有限资源和环境条件约束，随着全球市场的逐渐形成，世界范围的竞争日益加剧，日益提高的生活质量要求与世界能源的减少和人口增长的矛盾更加突出。因此，社会发展对其经

济支撑行业——制造业及其技术体系提出了更高的要求，要求制造业具有更加快速和灵活的市场响应、更高的产品质量、更低的成本和能源消耗以及良好的环保特性。这一需求促使传统制造业在 20 世纪开始了又一次新的革命性的变化和进步，传统制造开始向现代制造发展。

现代制造及其技术的形成和发展特点如下：

1. 在市场需求不断变化的驱动下，制造的生产规模沿着以下方向发展：小批量 少品种 大批量 多品种变批量。

2. 在科技高速发展的推动下，制造业的资源配置呈现出从劳动密集型 设备密集型 信息密集型 知识密集型变化。

3. 生产方式上，其发展过程是：手工 机械化 单机自动化 刚性流水自动线 柔性自动线 智能自动化。

4. 在制造技术和工艺方法上，现代制造在发展中，其特征表现为：重视必不可少的辅助工序，如加工前后处理；重视工艺装备，使制造技术成为集工艺方法、工艺装备和工艺材料为一体的成套技术；重视物流、检验、包装及储藏，使制造技术成为覆盖加工全过程（设计、生产准备、加工制造、销售和维修，甚至再生回收）的综合技术，不断发展优质高效低耗的工艺及加工方法，以取代落后工艺；不断吸收微电子、计算机和自动化等高新技术成果，形成 CAD（Computer Aided Design，计算机辅助设计）、CAM（Computer Aided Manufacturing，计算机辅助制造）、CAPP（Computer Aided Processing Planning，计算机辅助工艺规划）、CAT（Computer Aided Testing，计算机辅助测试）、CAE（Computer Aided Engineering，计算机辅助工程）、NC（Numerical Control，数字控制技术）、CNC（Computer Numerical Control，计算机数字控制）、MIS（Management Information System，计算机管理信息系统）、FMS（Flexible Manufacturing System，柔性制造系统）、CIMS（Computer Integrated Manufacturing System，计算机集成制造系统）、IMT（Intelligent Manufacturing Technology，智能制造技术）、IMS（Intelligent Manufacturing System，智能制造计划）等一系列现代制造技术，并实现上述技术的局部或系统集成，形成从单机到自动生产线等不同档次的自动化制造系统。

5. 引入工业工程和并行工程（Concurrent Engineering，CE）概念，强调系统化及其技术和管理的集成，将技术和管理有机地结合在一起，引入先进的管理模式，使制造技术及制造过程成为覆盖整个产品生命周期，包含物质流、能量流和信息流的系统工程。

第二节 先进制造技术的内涵及体系结构

一、先进制造技术产生的背景

AMT 最早源于美国。美国制造业在“二战”及稍后时期得到了空前的发展，形成了一支

强大的研究开发力量，成为当时制造业的霸主，制造业可以说是美国经济的主要支柱，因为美国财富的 68%来源于制造业。战后国际环境发生了很大的变化，军事对峙和显示实力刺激制造业发展的背景减弱了。由于美国长期受强调基础研究的影响，忽视制造技术的发展，到 20 世纪 70 年代日本和德国经济恢复时，美国制造业遇到了强有力的挑战，汽车业、家用电器业、机床业、半导体业、应用电子工业、钢铁业的霸主地位相继退位，连优势最为明显的航天、航空业也遇到了强有力的竞争，出口产品的竞争力大大落后于日本和德国，对外贸易逆差与日俱增，经济滞胀，发展缓慢。而日本在过去几十年内不断地主动采用制造新技术，已使其制造业成为公认的世界领袖。

20 世纪 80 年代初期，美国一批有识之士相继发表言论，对美国制造业的衰退进行了反思，强调了制造技术与国民经济及国力的至关重要的相依关系，强调了制造技术的重要性。在此背景下，克林顿政府在上台后，相继提出了两个颇有号召力的口号：“为美国的利益发展技术”“技术是经济的发动机”，强调了具有明确的社会经济目标的关键技术的重要性，制订了国家关键技术计划，并对其技术政策做了重大调整。美国先进制造技术也就是在这样一个社会经济背景下出台了。此后，AMT 在诸多国家和地区得到广泛的应用。

二、先进制造技术（AMT）的定义

先进制造技术是为了适应时代要求，提高竞争能力，对制造技术不断优化及推陈出新而形成的。先进制造技术作为一个专有名词提出后，至今没有一个明确的、公认的定义。

经过近来对发展先进制造技术方面开展的工作，通过对其特征的分析研究，可以认为：“先进制造技术（AMT）是制造业不断吸收信息技术及现代化管理等方面的成果，并将其综合应用于产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产，提高对动态多变的产品市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。”

三、先进制造技术的内涵及技术构成

先进制造技术的内涵是“使原材料成为产品而采用的一系列先进技术”，其外延则是一个不断发展更新的技术体系，不是固定模式，它具有动态性和相对性，因此，不能简单地理解为就是 CAD、CAM、FMS、CIMS 等各项具体的技术。

先进制造技术在不同发展水平的国家和同一国家的不同发展阶段，有不同的技术内涵和构成，对我国而言，它是一个多层次的技术群。先进制造技术的内涵和层次及其技术构成如图 1-1 所示。

1. 基础技术

第一层次是优质、高效、低耗、清洁基础制造技术。铸造、锻压、焊接、热处理、表面

保护、机械加工等基础工艺至今仍是生产中大量采用、经济适用的技术，这些基础工艺经过优化而形成的优质、高效、低耗、清洁基础制造技术是先进制造技术的核心及重要组成部分。这些基础技术主要有精密下料、精密成形、精密加工、精密测量、毛坯强韧化、精密热处理、优质高效连接技术、功能性防护涂层等。

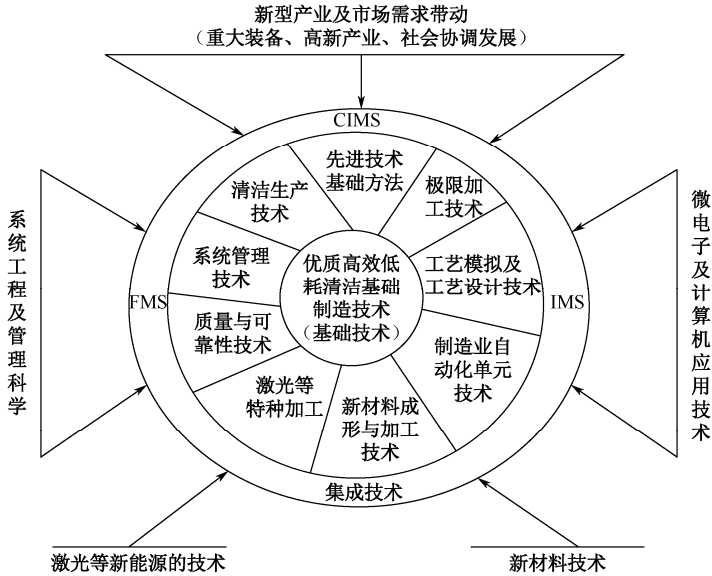


图 1-1 先进制造技术的内涵、层次及其技术构成

2. 新型的制造单元技术

第二个层次是新型的先进制造单元技术。这是在地市场需求及新兴产业的带动下，制造技术与电子、信息、新材料、新能源、环境科学、系统工程、现代管理等高新技术结合而形成的崭新的制造技术。如：制造业自动化单元技术、极限加工技术、质量与可靠性技术、系统管理技术、CAD/CAM、清洁生产技术、新材料成形与加工技术、激光与高密度能源加工技术、工艺模拟及工艺设计优化技术等。

3. 集成技术

第三个层次是先进制造集成技术。这是应用信息、计算机和系统管理技术对上述两个层次的技术局部或系统集成而形成的先进制造技术的高级阶段。如 FMS、CIMS、IMS 等。

以上三个层次都是先进制造技术的组成部分，但其中每一个层次都不等于先进制造技术的全部。

四、先进制造技术的特点

1. 先进性

先进制造技术的核心和基础是经过优化的先进工艺（优质、高效、低耗、清洁工艺），它

从传统制造工艺发展起来，并与新技术实现了局部或系统集成。

2. 广泛性

先进制造技术不是单独分割在制造过程的某一环节，而是将其综合运用于制造的全过程，它覆盖了产品设计、生产设备、加工制造、销售使用、维修服务，甚至回收再生的整个过程。

3. 实用性

先进制造技术的发展是针对某一具体的制造目标（如汽车制造、电子工业）的需求，而发展起来的先进、适用技术，有明确的需求导向；先进制造技术不是以追求技术的高新度为目的，而是注重产生最好的实践效果，以提高企业竞争力和促进国家经济增长和综合实力为目标。

4. 集成性

先进制造技术由于专业、学科间的不断渗透、交叉、融合，界限逐渐淡化甚至消失，技术趋于系统化、集成化，已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新兴交叉学科，因此可以称其为“制造工程”。

5. 系统性

随着微电子、信息技术的引入，先进制造技术能驾驭信息生成、采集、传递、反馈、调整的信息流动过程。先进制造技术是可以驾驭生产过程的物质流、能量流和信息流的系统工程。

6. 动态性

它不断地吸收各种高新技术成果，将其渗透到企业生产的所有领域和产品寿命循环的全过程，实现优质、高效、低耗、清洁、灵活地生产。

五、先进制造技术的体系结构

1994年，美国联邦科学、工程和技术协调委员会（FCCSET）下属的工业和技术委员会先进制造技术工作组提出，将先进制造技术分为三个技术群：主体技术群；支撑技术群；制造技术环境。这三个技术群相互联系、相互促进，组成一个完整的体系，每个部分均不可缺少，否则就很难发挥预期的整体功能效益。图 1-2 给出了先进制造技术的体系结构。

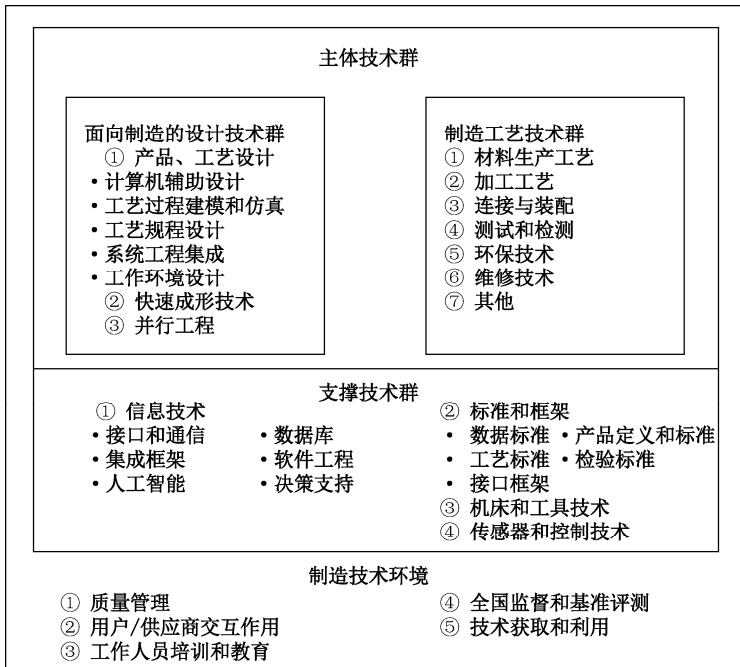


图 1-2 先进制造技术的体系结构

六、先进制造技术的分类

先进制造技术已不是一般单指加工过程的工艺方法，而是横跨多个学科，包含了从产品设计、加工制造到产品销售、用户服务等整个产品生命周期全过程的所有相关技术，涉及设计、工艺、加工自动化、管理以及特种加工等多个领域。将目前各国掌握的制造技术系统化，对先进制造技术的研究分为下述四大领域。

1. 先进设计技术

(1) 计算机辅助设计技术 包括：有限元法；优化设计；反求工程技术；模糊智能 CAD；工程数据库等。

(2) 性能优良设计基础技术 包括：可靠性设计；安全性设计；动态分析与设计；防断裂设计；疲劳设计；防腐蚀设计；减摩和耐磨损设计；健壮设计；耐环境设计；维修性设计和维修性保障设计；测试性设计；人机工程设计等。

(3) 竞争优势创建技术 包括：快速响应设计；智能设计；仿真与虚拟设计；工业设计；价值工程设计；模块化设计等。

(4) 全寿命周期设计技术 包括：并行设计；面向制造的设计；全寿命周期设计。

(5) 可持续性发展产品设计技术 主要有绿色设计。

(6) 设计试验技术 包括：产品可靠性试验；产品环保性能试验与控制、仿真试验与虚拟试验。

具体内容本书在第二章介绍。

2. 先进制造工艺技术

(1) 精密洁净铸造成形工艺 包括：外热冲天炉熔炼、处理、保护成套技术；钢液精炼与保护技术；近代化学固化砂铸造工艺；高效金属型铸造工艺与设备；气化膜铸造工艺与设备；铸造成形工艺模拟和工艺 CAD。

(2) 精确高效塑性成形工艺 包括：热锻生产线成套技术；精密辊锻和楔横轧技术；大型覆盖件冲压成套技术；精密冲裁工艺；超塑和等温成形工艺；锻造成形模拟和工艺 CAD 等。

(3) 优质高效焊接及切割技术 包括：新型焊接电源及控制技术；激光焊接技术；优质高效低稀释率堆焊技术；精密焊接技术；焊接机器人；现代切割技术；焊接过程的模拟仿真与专家系统。

(4) 优质低耗洁净热处理技术 包括：可控气氛热处理；真空热处理；离子热处理；激光表面合金化；可控冷却。

(5) 高效高精机械加工工艺 包括：精密加工和超精密加工；高速磨削；变速切削；复杂型面的数控加工；游离磨料的高效加工等。

(6) 现代特种加工工艺 包括：激光加工；复合加工；微细加工和纳米技术；水力加工等。

(7) 新型材料成形与加工工艺 包括：新型材料的铸造成形；新型材料的塑性成形；新型材料的焊接；新型材料的热处理；新型材料的机械加工。

(8) 优质清洁表面工程新技术 包括：化学镀非晶态技术；新型节能表面涂装技术；铝及铝合金表面强化处理技术；超声速喷涂技术；热喷涂激光表面重熔复合处理技术；等离子化学气相沉积技术；离子辅助沉积技术。

(9) 快速模具制造技术 包括：锻模 CAD/CAM 一体化技术；快速原型制造技术等。

具体内容本书在第三章介绍。

3. 制造自动化技术

制造自动化是指用机电设备工具取代或放大人的体力，甚至取代和延伸人的部分智力，自动完成特定的作业，包括物料的存储、运输、加工、装配和检验等各个生产环节的自动化。制造自动化技术涉及数控技术、工业机器人技术和柔性制造技术，是机械制造业最重要的基础技术之一。

(1) 数控技术 包括数控装置；送给系统和主轴系统；数控机床的程序编制。

(2) 工业机器人 包括机器人操作机；机器人控制系统；机器人传感器；机器人生产线总体控制。

(3) 柔性制造系统 (FMS) 包括 FMS 的加工系统；FMS 的物流系统；FMS 的调度与

控制，FMS 的故障诊断。

(4) 自动检测及信号识别技术 包括自动检测 CAT；信号识别系统；数据获取；数据处理；特征提取；识别。

(5) 过程设备工况监测与控制 包括过程监视控制系统；在线反馈质量控制。

本书在第四章介绍工业机器人和柔性制造系统。

4. 系统管理技术

(1) 先进制造生产模式 包括现代集成制造系统 (CIMS)、敏捷制造系统 (AMS)、智能制造系统 (IMS)、精良生产 (LP) 以及并行工程 (CE) 等先进的生产组织管理和控制方法。

(2) 集成管理技术 包括并行工程；物料需求计划 (Material Requirement Planning, MRP) 与准时制生产 (Just In Time, JIT) 的集成—生产组织方法；基于作业的成本管理 (ABC)；现代质量保障体系；现代管理信息系统；生产率工程；制造资源的快速有效集成。

(3) 生产组织方法 包括虚拟公司理论与组织；企业组织结构的变革；以人为本的团队建设；企业重组工程。

其中的先进制造生产模式在本书第五章介绍。

第三节 先进制造技术的发展

一、各国先进制造技术发展概况

1. 美国

美国 68% 的财富来源于制造业，可以说制造业是美国经济的主要支柱。但由于美国政府长期以来只注重对基础技术和国防技术的支持，而视传统的制造产业为“夕阳工业”，因而制造技术的发展受到了极大的冷遇，导致了 20 世纪 70 年代开始的美国科技优势和经济竞争力的衰退，其在国际市场上竞争能力受到侵蚀，世界领先地位已被动摇。

为了重新树立美国制造业在世界范围内的领导地位，加强其制造业的竞争能力，美国国家自然科学学院和工程科学院、白宫科技政策办公室、国防部、商业部以及其他政府部门，都着手对制造业进行调查，在大量研究报告的基础上，美国政府在 20 世纪 90 年代初提出了一系列制造业的振兴计划，其中包括“先进制造技术计划”和“制造技术中心计划”。

(1) 先进制造技术计划

该计划是美国联邦政府科学、工程和技术协调委员会于 1993 年制定的 6 大科学和开发计划之一，其目标为：为美国工人创造更多高技术、高工资的就业机会，促进美国经济增长；

不断提高能源效益，减少污染，创造更加清洁的环境；使美国的私人制造业在世界市场上更具有竞争力，保持美国的竞争地位；使教育系统对每位学生进行更富有挑战性的教育；鼓励科技界把确保国家安全以及提高全民生活质量作为核心目标。

该计划 1994 年度的预算为 14 亿美元，围绕以下三个重点领域开展研究：下一代的“智能”制造系统。这类系统将能在提高质量、降低成本的同时，提高生产率（产出）和柔性，特别适用于中小批量的生产。它们将对快速变化的市场需求作出迅速有效的响应。这类柔性的、高度自动化的集成系统将传感器和控制技术、机床和工具、物料搬运装置、信息技术以及计算机硬件软件方面的新成果与高度熟练的、富有适应性的劳动者结合在一起。这种下一代制造系统（有时也称为“制造单元”）将会推动美国制造业企业走在 21 世纪世界市场的前沿。为产品、工艺过程和整个企业的设计提供集成的工具。这些工具将能迅速而并行地开发新产品和相关的生产系统。正像在过去的计算机辅助设计和工程带来产品设计的革命一样，供生产工艺设计用的基于计算机的硬件和软件工具将会给制造过程带来新的活力，并克服由于依次串行地开发产品、工艺和制造企业（工厂布局）而引起的延误和不足。此外，成套的（集成的）工程工具将使制造过程的其他重要新领域得以扩展，例如符合环保要求的制造。这一重点领域的目的在于通过协调地开发和运用各种先进工具来降低生产成本、缩短供货期和改进产品质量。强调要为众多新出现的工艺、设备和工厂设计工具和技术提供一种集成框架、操作环境、公用数据库以及各种接口标准。这一重点领域也考虑了其他先进课题，如快速原型生产法、产品和制造系统的递阶仿真以及企业建模和企业集成化的工具。基础设施建设，包括扩展和联合已有的各种推广应用机构、建立地域性的技术联盟（技术联合体）、制定有关国家制造技术发展趋势的监督和机制、制定评测基准和评测指标体系等。

（2）制造技术中心计划

该计划于 1988 年颁布，也称“合作伙伴计划”，指政府与企业共同发展制造技术上进行密切合作，针对美国 35 万家中小企业，政府的职责不是让它们生产什么产品，而是要帮助这些企业掌握先进技术，使它们具有识别、选择适用于自己技术的能力。该计划要求在一个地区设立一个制造技术中心，为中小企业展示新的制造技术和装备，组织不同类型的培训，帮助企业了解和选用最新的或最适合于它们使用的技术和装备。这些制造技术中心的作用，是在制造技术的拥有者与需要这些技术的中小型企业之间建立沟通桥梁，制造技术的拥有者通常是政府的研究机构、试验室、大学及其他研究机构。

2. 日本

自第二次世界大战之后，日本从战败国一跃成为世界经济强国，在许多重要领域如数控机床、机器人、精密制造、微电子工艺领域等取得了世界领先的进展。

美国曾以福特方法赢得全世界制造技术的优势，而日本人却在福特方法的基础上，不断更新技术以适应市场需求。20 世纪 70 年代，日本汽车大举进入美国市场，以其价廉质优和多

品种将美国三大汽车公司推向倒闭的边缘。1990年，日本FANUC公司生产的数控系统装置数量就占世界市场的一半。日本走出了一条：技术引进 自主开发 加强基础研究的技术发展的道路。

1990年日本通产省提出了智能制造计划（Intelligent Manufacturing System, IMS），并邀请美国、欧共体、加拿大、澳大利亚等国参加研究，形成了一个大型国际共同研究项目，由日本投资10亿美元保证计划的实施。该计划的核心是如何将分散的制造单元变成有机的整体。该计划目标为：要全面展望21世纪制造技术的发展趋势，先行开发未来的主导技术，并同时致力于全球信息、制造技术的体系化、标准化。

IMS的产生背景是，现在各个国家、各个企业都在极力开发和追求高性能的制造技术和制造装备，但缺乏在整体制造系统的高度上确立各个开发项目的位置的观念。IMS的研究目的是，通过各发达国家之间的国际共同研究，使制造业在接受订货、开发、设计、生产、物流直至经营管理的全过程中，做到使各个装备、各生产线自律化，并实现自律化的装备、生产线在系统整体上的协调和集成，由此来适应、迎接当今世界制造活动全球化的发展趋势，减少过于庞大的重复投资，并通过先进、灵活的制造过程的实现来解决制造系统中的人因问题。这里所谓的“自律化”，是指能够根据周围环境以及生产作业状况自主地进行判断并采取适当的行动。也就是说，给予装备、生产线一定的“智能”。

从1992年秋至1994年的大约两年时间内，IMS选择了六个试验项目开展为期两年的研究，以探讨全面实施计划的可行性。这六个项目是：流程型工业（化学工业等）的无污染制造技术；全球化同步工程技术；全球制造的企业集成技术；自律分散型控制系统；产品快速开发技术；知识系统技术。这六个项目共有来自各参加国的73个企业和67个大学、研究机构参加，经过近两年的实施，均获得成功。

3. 欧共体

西欧各国的制造业强烈地感受到来自美国和日本的压力。以美国而言，美国三大汽车公司就占有1/4的西欧市场，而西欧17国1993年汽车销量比1992年下降了15.9%。西欧清楚地认识到：如果欧共体成员保持各自分散的市场，那将无法同美日抗衡。正如德国前总理科尔所说：“任何一个欧洲国家都不可能仅靠自身的力量有效地对付美国和日本的技术挑战，欧洲只有把财力和人力集中起来，才能保持自己在未来世界上的经济地位。”当时法国总统密特朗提出，要使欧洲不致落后太多，一个统一的欧洲是激发国家创造力的重要支柱，欧洲必须团结在一项伟大工程的周围才能拯救欧洲。为此，欧共体各国政府与企业界共同掀起了一场旨在通过“欧共体统一市场法案”的运动，并制定了“尤里卡计划（ERKA）”“欧洲信息技术研究发展战略计划（ESPRIT）”和“欧洲工业技术基础研究（BRITE）”等一系列发展计划。

尤里卡计划中，1988年用5亿美元资助了涉及16个欧洲国家600家公司的165个合作性高科技研究开发项目。

在欧洲信息技术研究发展战略计划中,13 个成员国向 5500 名研究人员提供资助。把 CIM 中信息集成技术的研究列为五大重点项目之一,明确要向 CIM 投资 620 欧洲货币单位作为研究开发费用,抓好 CIM 的设计原理、工厂自动化所需微电子系统以及采用实时显示显像系统进行生产过程和管理的三大课题。

欧洲工业技术基础研究,重点资助材料、制造加工、设计以及工厂系统运作方式等方面的研究。

4. 韩国

进入 20 世纪 90 年代,随着六个五年计划的完成,韩国经济实力的科技基础都有了很大提高。1992 年开始的第七个五年计划,在科学技术方面提出了更高的目标。鉴于工业发达国家加强了技术保护措施,从而限制了韩国的工业发展,唯一的出路是发展本国的高技术,增加产品竞争能力。1991 年底韩国提出了“高级先进技术国家计划”,通常称为 G-7 计划。该计划的目标是到 2000 年把韩国的技术实力提高到世界第一流工业发达国家的水平,并希望通过这一计划的实施在 21 世纪初加入七国集团。

G-7 计划包括七项先进技术和七项基础技术,其中七项先进技术指:大规模集成电路、综合业务数字网、高清晰度电视、电气车辆、智能计算机、医学和农业试剂、先进制造系统,七项基础技术指:高级材料、下一代运输系统、生物技术、环境技术、新能源、新型核反应堆、人机接口技术。政府和产业部门分别投资 32 亿美元和 30 亿美元。G-7 计划是韩国政府第一次试图协调与技术相关的各部门的研究活动。过去,由于缺乏协调,导致研究投资的重复,而各部各自投资又强度太小,不足以实施大的计划。现在联合各部,制订统一的计划,再由各个部负责主管,分头实施。G-7 计划主要由科技部、工商部、能源部、交通部主管。

G-7 计划中的“先进制造系统”是一个将市场需求、设计、车间制造和分销集成在一起的系统,旨在改善质量和生产率,最终建立起全球竞争能力。该项目由三部分组成:共性基础技术,包括:集成的开放系统、标准化及性能评价;下一代加工系统,包括:加工设备、机械技术、操作过程技术;电子产品的装配和检验系统。包括:下一代印制板装配和检验系统、高性能装配机构和制造系统、先进装配基础技术、系统操作集成技术、智能技术。

二、我国先进制造技术的发展状况

中国先进制造技术在政府的关怀下得到快速发展和重大突破。具体表现在以下 10 个方面。

1. 计算机辅助设计(CAD)技术普及化。

CAD 技术的普及,提高了中国企业的设计水平和产品开发能力。以三维 CAD 和产品数据管理(PDM)为重点,在软件市场和企业应用方面都相当活跃。在三维 CAD 软件开发上,主要表现为:新一代三维 CAD 软件及 CAD/CAM 系统纷纷上市,建立了 2D 和 3D 统一模型,

软件的集成性得到提高与改善,软件的专业化和本地化得到加强。

在 CAD 技术的应用方面,到 1999 年底,已经遍及中国 29 个省市的各个行业,有 10 万家企业应用。

2. 快速原型制造技术由起步迈向成熟,应用初具规模。

快速原型制造(Rapid Prototype Manufacturing, RPM)技术是一项国外在 20 世纪 80 年代中期才发展起来的高新技术,包括一切由 CAD 模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体的技术总称。

中国从 20 世纪 90 年代期间起步,并取得了突破性的进展。目前已掌握了 4 种最主要的 RPM 技术,即立体光刻(SLA)、叠层实体制造(LOM)、选择性激光烧结(SLS)、熔融沉积造型(FDM)技术,并在工艺、装备、材料方面并举发展。采用上述技术的设备国内都已商品化生产,投放国内市场并有少量出口。目前中国拥有的 RPM 设备从 20 多台发展到约 200 台,其中有 50%是中国自己制造的。

3. 精密成形与加工技术水平显著提高,在汽车零部件、重大装配制造中获得广泛应用。

精密成形与加工技术是指机械零部件从毛坯成形、零件加工到装配成为产品的全过程中,采用近净成形(Near Net Shape Process)、近无缺陷成形、越精密、超高速等多种先进技术,使制造过程精密、高效、低耗,以获得高精度、高质量产品的综合集成技术。

在精密加工方面:通过超精密车床的研究开发,一种最小分辨率(最小脉冲当量)为 5nm、主轴精度为 50nm、定位精度小于 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 、主轴最大回转直径为 800mm 的超精密车床已经问世。另外,还针对谐振腔体加工、复印鼓加工、球面加工的需要,开发了专用超精密车床等。

在精密成形方面:攻克了采用铜金属型进行球墨铸铁铸件精密铸造的难关,开发了汽车球铁薄型件金属型铸造工艺与成套装备,并已用于汽车齿轮等零件毛坯制造;在对汽车覆盖件冲压成形过程仿真技术及相关成套技术系统研究基础上,建立了中国具有自主知识产权的汽车覆盖件 CAD/CAE/CAM 一体化技术,并解决了柳州微型汽车厂、长沙梅花车身厂覆盖件冲压时起皱与拉裂等生产难题。

4. 热加工工艺模拟优化技术取得重要进展,使材料热加工由“技艺”走向“科学”。

热加工工艺模拟优化技术(以下简称模拟优化)以材料热加工过程的精确数学、物理建模为基础,以数值模拟及相应的精确测试为手段,能够在计算机逼真的拟实环境中动态模拟热加工过程,预测材料经过成形、改性制成零件毛坯后的组织性能质量,特别是能找出易发缺陷的成因及消除方法,通过在虚拟条件下工艺参数的反复比较,得出最优工艺方案,通过模拟优化,可以确保关键大件一次制造成功;对于大批量生产的毛坯件,可以减小试模次数,直至确保一次试模成功。

5. 激光加工在基础研究和技术开发方面有实质性进展,产业应用获得经济效益。

在应用基础研究方面:大功率 CO_2 及 YAG 激光三维焊接和切割机理与技术研究已取得重

要进展，一是建立了大功率激光光束的传输与聚焦理论及加工用激光光束质量的评定方法；二是建立了具有真正实用价值的激光三维加工数控自动编程。

在技术开发方面：通过对大功率激光光束光斑诊断技术的研究，已开发出大功率激光光束光斑诊断仪样机，可对连续大功率激光光束和聚焦光斑的功率密度分布进行测量。在激光熔敷技术方面解决了两个关键技术：一是研制出采用载气送粉和同轴保护气的自汇聚三维随动熔敷加工头；二是设计制作了以高精车为主体的光束成型系统，从而使该技术真正走向工业应用。

6. 数控技术取得重要进展，国内市场占有率有所提高。

中国在数控机床共性关键技术攻关、数控机床开发、数控系统和普及型数控机床产业化工程研究、传统装备的数控化改造等方面取得了进展，在一些基础技术和关键技术上有重大突破。

7. 现场总线智能仪表研究开发获重要进展，应用已有一定的基础。

基于计算机及数字通信技术的工业控制通信网络技术，即现场总线技术，以及相关的设备及系统技术获得飞速发展，这是未来工业自动化技术和自动化控制技术的重要发展方向。

8. 微型机械研究进展迅速，标志着先进制造技术正向微观领域扩展。

微型机械研究泛指尺寸范围为毫米、微米或纳米级，集微结构、微传感器、微执行器和微控制器为一体的微机电系统。

9. 现代集成制造系统研究和应用取得突破，在国际上占有一席之地。

10. 新生产模式的研究和实践具有特色，推动了中国制造业的技术进步和管理现代化。

20世纪90年代，中国在汽车制造业中首先推广精良生产。通过精简机构、减少管理层次、组织团队、消除企业中存在的各种浪费现象，显著提高了企业的经营效益，随着Internet的普及应用，众多高等院校将敏捷制造作为研究方向，并结合中国制造业的实际情况，进行了有益的探索和实践。

三、先进制造技术的发展趋势

随着以信息技术为代表的高新技术的不断发展和市场需求的个性化与多样化，未来制造业发展的重要特征是全球化、网络化、虚拟化，未来先进制造技术发展的总趋势是向精密化、柔性化、虚拟化、网络化、智能化、敏捷化、清洁化、集成化及管理创新的方向发展。

1. 传统制造技术向高效化、敏捷化、清洁化方向发展

(1) 向高效化方向发展

机械加工、铸造、锻压、焊接、热处理与表面改性等传统工艺技术在相当长时间内仍将是量大面广、经济实用的制造技术，对其加以优化和革新具有重大技术经济效益。随着精度

补偿、应用软件、传感器、自动控制、新材料和机电一体化等技术的发展,工艺装备在数控化的基础上进一步向生产自动化、作业柔性化、控制智能化方向发展。例如,焊接生产已由单机控制发展到专机群控,进而发展到柔性生产及车间集中控制、大型焊接成套设备、多自由度焊接机器人和焊接工程专家系统;新一代装备制造技术也在不断发展,多轴联动加工中心、装配作业集成机床、虚拟轴机床、快速成形机等新型加工设备不断涌现;与工艺和装备发展相匹配的计量测试技术、工况监测与故障诊断技术、装配技术、质量保证技术等也不断取得新的进展。

(2) 向敏捷化方向发展

进入 20 世纪 90 年代以来,世界经济表现为竞争全球化、贸易自由化、需求多样化,产品生产朝多品种小批量方向发展,从而对制造企业快速响应市场和产品一次制造成功的要求日益提高。基于此,现代的产品设计正由手工绘图方式向计算机自动绘图方式方向发展,由满足单个构件要求的设计向对整个制造系统功能的综合设计、将设计与制造及相关因素进行系统综合的并行设计、基于网络的远程设计方向发展。面向制造、面向装配、面向检测的设计将利用并行工程的原理和方法,从设计一开始就考虑到从产品概念设计到报废处理的全生命周期的有关问题;在计算机建模仿真基础上扩展的虚拟制造技术,在产品阶段就适时地、并行地、协同地“虚拟”出产品未来的制造全过程及其产品性能、可制造性等相关因素,从而更经济、更快捷、更柔性地组织生产和优化布局,以达到缩短产品开发周期,降低生产成本,提高生产效率,完善产品设计质量的目的。因此,可以预测,面向并行工程的设计、虚拟制造的设计、全生命周期设计、CAD/CAM/CAPP 一体化技术等敏捷设计制造技术与系统将在今后若干年内得到长足发展。

(3) 向清洁化方向发展

保护环境、节约资源已成为全球密切关注的焦点,为此发达国家正积极倡导“绿色制造”和“清洁生产”,大力研究开发生态安全型、资源节约型制造技术。因此,发达国家正在大力发展清洁绿色的精密成形与加工制造技术,能实现少甚至无切削的塑性成形技术、“干净”成形技术、粉末冶金技术等将成为 21 世纪优先发展的制造技术。随着可持续发展思想的深入人心,发达国家正通过立法的、经济的、政策的、舆论的手段加强对制造业的环境监督与安全保障,对制造企业废弃物的排放标准日趋严格,制造工艺安全标准也不断提高。

2. 先进制造技术向精密化、多样化、复合化方向发展

进入 21 世纪,先进制造技术正以迅猛的步伐,逐步、全面地改变着传统制造技术的面貌和旧的制造模式。就发达国家的 AMT 发展而言,具有以下比较明显的发展趋势。

(1) 向精密化方向发展

加工技术向高精度发展是制造技术的一个重要发展方向。精密加工和超精密加工、微型机械的微细和超微细加工等精密工程是当今也是未来制造技术的基础,其中纳米级的超精密

加工技术和微型机械技术被认为是 21 世纪的核心技术和关键技术。

精密、超精密加工主要包括 4 个领域：超精密切削加工。国外采用金刚石刀具已成功地实现了纳米级极薄层的稳定切削。超精密磨削加工和研磨加工。国外用精密砂带加工出的磁盘其表面粗糙度可达 9nm。超精密特种加工技术。发达国家用电子束、离子束刻蚀法已加工出精度 2.5nm、表面粗糙度 4.5nm 以下的大规模集成电路芯片。超精密加工装备制造技术。目前加工圆度在 10nm、表面粗糙度在 3nm 以内的超精密加工机床已经问世并用于生产。微细、超微细加工是一种特殊的精密加工，它不仅加工精度极高，而且加工尺寸细微，其主要工艺方法有光刻、刻蚀、沉积、外延生长等。微型机械是机械技术与电子技术在 $\mu\text{m}/\text{nm}$ 级水平上相融合的产物。据国外专家预测，21 世纪将是微型机械、微电子和微型机器人的时代。美国采用半导体微细加工工艺已在硅片上加工出纳米级微型静电电机和微流量控制泵；可注入人体血管的医用微型机器人和其他实验、演示用微型机器人也已诞生。

(2) 向多样化方向发展

为适应制造业对新型或特种功能材料以及精密、细小、大型、复杂零件的需要，发达国家正大力研究与开发各种原理不同、方法各异的加工与成形方法，如超硬/超脆材料的高能束流加工、复合材料的水射流切割、陶瓷材料的微波能加工、超塑性材料的等温锻造、高温超导材料的粉末成形、复杂精密零件的电铸加工、大型板状零件的等离子体加工以及特殊环境和极限条件下的真空焊接、水下切割、爆炸成形等。据统计，目前在机械制造中采用的成形工艺已达 500 种以上，特种成形工艺也有百余种。

(3) 向复合化方向发展

由于材料加工难度越来越大，工件形状越来越复杂，加工质量要求越来越高，国外正在研究多种能量的复合加工方法以及常规加工与特种加工的组合加工工艺。如在切削区引入声、光、电、磁等能量后，可以形成超声振动切削、激光辅助切削、导电加热切削、磁性切削等复合加工工艺。不同的特种加工工艺也可以相互组合，扬长避短，如对陶瓷、人造金刚石等超硬、脆件材料加工方法的研究带动了电火花与电化学复合加工、电火花与超声波复合加工、电解复合抛光等多种能量复合加工技术的发展。还出现了激光退火或真空镀膜与离子注入相结合、塑性成形与扩散连接相结合、化学热处理与电镀相结合等组合化工艺。目前，两种能量的复合工艺已得到广泛应用，而多种能量的复合加工工艺也正在探索之中。

利用特种加工易于实现自动化、自适应控制的特点，将特种加工技术和信息技术相结合，不断发展高精度、高效率的超大型、超微型、超精密特种加工机床和加工中心。例如，激光加工中心能将切割、打孔、焊接、表面处理等不同加工工序集成在一起，能加工多种材料和多种规格、形状的零件，并能实现多维度的智能化控制。

3. 制造系统向柔性化、集成化、智能化、全球化方向发展

(1) 向柔性化方向发展

制造业自动化水平是制造技术先进性的主要标志之一，不断提高制造业自动化程度是工

业先进国家追求的目标,随着制造业生产规模向“小批量 少品种大批量 多品种变批量”的演进,发达国家制造业自动化系统也相应地从 20 世纪 70 年代以前刚性连接的自动线和自动化单机发展到 20 世纪 80 年代的计算机数控(CNC)、柔性生产线和柔性制造系统(FMS)以及 20 世纪 80 年代中期以后的计算机集成制造系统(CIMS),并正向更高水平的智能制造系统(IMS)和全球敏捷制造系统推进。总之,制造业自动化系统正沿着数控化 柔性化 集成化 智能化 全球化之螺旋式阶梯攀缘而上,柔性化程度越来越高。

(2) 向集成化方向发展

20 世纪 80 年代中期以来,国外的柔性制造设备开始与 CAD、CAPP、CAM 等自动化技术和生产管理中的管理信息系统(MIS)等进行集成,借助计算机和网络技术,将企业所有的技术、信息、管理功能和人员、财务、设备等资源与制造活动有机结合在一起向 CIMS 发展,构成一个覆盖企业制造全过程(产品订货、设计、制造、管理、营销),能对企业“三流”(即物质流、资金流、信息流)进行有效控制和集成管理的完整系统,实现全局动态综合优化、协调运作和整体高柔性、高质量、高效率,从而创造出巨大生产力。目前,发达国家的 CIMS 已从实验室走向大规模工业应用,CIMS 既是当今制造业自动化十分热门的前沿科技,也是 21 世纪制造业的主流生产技术和未来工厂的主导生产模式。

(3) 向智能化方向发展

未来的制造业是基于知识和信息的高技术产业。随着微电子、信息和智能技术的迅猛发展,现代机器将由传统的动力驱动型(体力取代型)和命令型转向未来的信息驱动型和智能型(脑力取代型),制造自动化也将从强调全盘自动化转向重视人的智能和人机交互合作。20 世纪 80 年代末、90 年代初,发达国家开始将人工神经网络(Artificial Neural Network,ANN)、遗传算法(Genetic Algorithm,GA)等为代表的新一代人工智能技术与制造技术进行集成,发展了一种新型的智能制造技术(IMT)和智能制造系统(IMS)。IMT 及 IMS 首次系统地提出了对制造系统的数据流、信息流、知识流的全面集成,也更加突出了制造过程中人类智能的能动作用和人机融洽合作。智能化是柔性化、集成化的拓展和延伸,未来的智能机器将是机器智能与人类专家智能的有机结合,未来的制造自动化将是高度集成化与高度智能化的融合。

(4) 向全球化方向发展

人类已经步入知识经济和信息化的时代,随着世界自由贸易体制的不断完善,全球统一大市场的形成以及全球信息高速公路网络和交通运输体系的建立,制造业将得以借助全球互联网络、计算机通信和多媒体技术实现全球或异地制造资源(知识、人才、资金、软件、设备等)的共享与互补,制造业、制造产品和制造技术走向国际化,制造自动化系统也进一步向网络化、全球化方向发展。基于 Internet 的敏捷制造、全球制造已经成为现实。

4. 制造科学、技术与管理向交叉化、综合化方向发展

(1) 向交叉化方向发展

不同领域的学科与技术相互交叉渗透是大科学时代的重要特征。随着现代科技的突飞猛

进,制造技术正吸收与融会微电子学、计算机科学与技术、信息科学、材料科学、生物学、管理科学以至人文社会科学等诸多学科的理论知识和最新成果,不断研究各类产品与机器的新原理和制造机理。探索新的制造科学基础理论,改进旧的或创造新的设计方法、制造工艺、技术手段、工艺装备和制造模式,建立新的学科群、技术群和产业群,制造技术本身也由一门工艺技术发展为一门面向大制造业、涵盖整个产品生命周期和制造各环节、横跨众多学科与技术领域的新型、交叉工程科学——制造科学。制造科学与技术走向一体化,制造科学指导、支撑制造技术,制造技术丰富、推动制造科学,两者相互包含,彼此促进,相得益彰。AMT 的研究与开发越来越依赖于多学科的交叉与综合。例如,对制造机理的研究和制造规律的揭示离不开以微电子和计算机技术为基础的现代实验测试、监控补偿、理论算法、数据处理、建模仿真等技术的发展。又如 AMT 中的快速成形技术涉及机械、电子、计算机、光学、材料等多个学科,每个学科的相关进步都会促进快速成形技术的发展,反过来,快速成形技术的发展又会对各相关学科提出更高、更新的课题。

总之,21 世纪将是制造科学技术与现代高新技术进一步交叉、融合的世纪,制造科学技术体系将更臻充实、完善与拓展。

(2) 向综合化方向发展

以系统论、控制论、信息论为核心的系统科学与管理科学也正在向制造技术领域渗透、移植与融合,产生出新的制造技术与制造模式。制造技术与管理技术已成为推动制造系统向前运动的两个快速转动的“驱动轮”,制造模式则是连接两轮的“主轴”。

先进制造模式是一项由人与物、技术与组织管理构成的集成系统,制造硬技术与管理软技术在制造模式中得到有机统一。管理技术已成为柔性制造系统、计算机集成制造系统等的重要组成部分,更是后续章节介绍到的如敏捷制造、智能制造、虚拟制造等先进制造模式的内核和灵魂。组织管理体制的变革与制造模式的创新推动了制造技术的进步,增强了制造业对日益多变市场的应变能力。如何更好地实现管理技术与制造技术的有机融合将是未来制造业发展面临的一个永恒的课题。制造技术在充分利用现代高新技术改造和武装自身的同时,AMT 这门技术科学内部各学科、各专业间也不断渗透、交叉与融合,界限逐步模糊甚至消失,技术趋于系统化、集成化。例如,精密成形技术的发展使热加工有可能提供最终形状、尺寸可直接装配的零件,淡化了冷、热加工的界限;在制造自动化系统内部,计算机技术、智能技术、自动化技术、现代管理技术等犬牙交错、密不可分;在计算机集成制造系统中,加工、检测、物流与装配过程之间,产品设计、材料应用、加工制造、组织管理之间界限逐渐模糊,走向一体化。

复习思考题

1. 简述先进制造技术的产生背景。
2. 先进制造技术的内涵和特点是什么？
3. 说明先进制造技术的体系结构。
4. 简述先进制造技术的发展趋势。