

第 1 章 先进制造技术的发展及体系结构

摘要 本章阐述了在知识经济条件下，制造业及先进制造技术的重要地位，制造业在社会市场环境、资源和技术背景下的变革及挑战，综述了工业化国家制造业的发展战略及我国先进制造技术的发展，论述了先进制造技术的内涵、特点、体系结构及分类，提出了先进制造技术前沿及发展趋势，指出我国先进制造技术的优先发展方向。

1.1 知识经济条件下制造业的发展

1.1.1 制造系统的定义和内涵

制造业是将制造资源（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。它涉及到国民经济的许多部门，是国民经济和综合国力的支柱产业。制造系统是制造业的基本组成实体。

制造过程及其所涉及的硬件、软件和人员组成的一个将制造资源转变为产品（含半成品）的有机整体，称为制造系统。制造系统还有以下三方面的定义：

（1）制造系统的结构定义。制造系统是制造过程所涉及的硬件（物料、设备、工具和能源等）、软件（包括制造理论、制造工艺和制造信息等）和人员所组成的一个具有特定功能的有机整体。

（2）制造系统的功能定义。制造系统是一个输入制造资源（原材料、能源等），通过制造过程输出产品或半成品的输入输出系统。

（3）制造系统的过程定义。制造系统可看成是制造生产的运行过程，包括市场分析、产品设计、工艺规划、制造装配、检验出厂、产品销售及售后服务等各个环节的制造全过程。

制造技术是完成制造活动所需的一切手段的总和。

1.1.2 知识经济条件下的制造业

目前，全球经济正处于一个根本性的变革时期，人类社会正在由工业经济时代步入知识经济时代，在以高技术为主要产业支柱，以智力资源为主要依托的知识经济条件下，高科技的知识经济促使制造业发生了革命性的变化。

与农业经济、工业经济不同，知识经济是以知识为基础的经济，它直接依赖于知识和信息的生产、扩散和应用。知识经济是工业化演进的必然结果，是一种比工业经济更高级的经济形态。在工业经济时代，生产要素主要是资本和劳动力；而在知识经济时代，知识、资本、劳动力成为生产要素的共同组成，而且知识在其中起核心作用。知识被认为是提高

生产率和实现经济增长的驱动器。

发展高科技是促进知识经济发展的重要途径。高科技的发展包括三个方面：① 开发研究高科技；② 发展高科技产业；③ 对传统产业全面改造以实现高科技化。高科技的发展与传统产业的改造、升级是密切联系、互相促进的两个方面，一方面高科技的引入有利于传统产业的创新设计；另一方面，传统产业的技术进步为高科技产业的发展提供了广阔的市场。

知识经济对制造工业的影响表现在对产品和消费观念的改变，产品设计和制造过程的数字化和智能化，以及经营和制造活动的全球化等。

在知识经济条件下，制造技术正在发生质的飞跃。

制造技术已成为一个涵盖整个生产过程、跨多个学科、高度集成的高新技术。同时，支撑制造技术的电子、光学、信息科学、材料科学、生物科学、激光及管理科学等也逐步成为制造业的新兴技术与新兴工业的复合体。

在知识经济条件下，制造业是参与市场竞争的主体。

按照世界经济发展规律，国际上越来越多的人已开始认识到一个没有工业基础和制造业的城市是没有根基的城市。制造业能极大地推动金融、贸易、保险、房地产和服务业的发展。没有制造业作为基础，无论哪一个产业都将失去存在和发展的条件。例如已经成为美国中部金融服务中心的芝加哥，该市政府为鼓励产业结构调整，提供了许多优惠政策，扶植附加值高、能耗低和无公害的制造业。

在知识经济条件下，制造业始终是国民经济的支柱产业。

制造业是国民经济的基础，它创造了人类社会财富的 60%~80%。但在全球出现许多新兴工业的 20 世纪 80 年代，制造业曾被人们忽视。为此，美国制造工程师学会于 1993 年撰文呼吁全社会“重新发现制造业”，并用最简单的数字告诉美国人民：美国 1992 年的国民经济总产值和经济活动的一大半来源于制造业！这使许多美国人感到震惊。因为长期以来不了解这样一个简单的事实，美国人民在整个 20 世纪能达到如此高的生活水准完全归功于先进的制造业。

1.2 制造业的变革及挑战

制造技术的发展是由社会、政治、经济等多方面因素决定的。纵观近两百年制造业的发展历程，影响其发展最主要的因素是技术的推动及市场的牵引。人类科学技术的每次革命，必然引起制造技术的不断发展，也推动了制造业的发展。另一方面，随着人类的不断进步，人类的需求不断产生变化，因而从另一方面推动了制造业的不断发展，促进了制造技术的不断进步。

两百年来，在市场需求不断变化的驱动下，制造业的生产规模沿着“小批量→少品种大批量→多品种变批量”的方向发展；在科技高速发展的推动下，制造业的资源配置沿着“劳动密集→设备密集→信息密集→知识密集”的方向发展，与之相适应，制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性流水自动化→柔性自动化→智能自动化”的方向发展。

1.2.1 知识经济条件下以社会、市场、环境和资源为背景的制造业

传统的制造业是建立在规模经济的基础上，靠企业规模、生产批量、产品结构和重复性来获得竞争优势的，它强调资源的有效利用，以低成本获得高质量和高效率。其生产赢利是靠机器取代人力、复杂的专业加工取代人的技能来获取的。在此条件下，机器的非柔性、要求标准的产品设计以获得高产出，但却难以满足市场对产品花色品种和交货期的要求，为此工业经济时代对传统制造业也提出了严峻的挑战。

世纪之交，国际关系多极化、消费多样化、经济全球化和贸易自由化、科学技术进步和信息社会的到来以及国际社会对人类赖以生存的资源和环境的高度重视，都促使世界各国更加重视制造业的社会地位和作用，重新审视其生产方式，对制造的发展提出了更高的要求 and 制约条件。在知识经济时代，制造业面临着新的历史性发展机遇和更加严峻的挑战。其特点是：

1. 产品生命周期缩短

现代科技以日新月异的速度发展，新产品层出不穷。产品的生命周期（一个产品从开发设计到被市场淘汰所经历的时间）大大缩短。

2. 用户需求多样化

用户追求多样化和个性化已逐渐成为世界的潮流。

3. 大市场和大竞争

世界市场的开放程度越来越大。随着计算机通信技术的迅速发展和信息高速公路的建立，使得全球集成制造有实现的可能。这样可以使资源得以更充分的利用，原料和产品的运输距离得以更显著的缩短，交货期也能得到进一步缩短，产业分工的国际化已成为发展潮流。

4 交货期成为竞争的第一要素

根据客户对产品需求的变化，要求迅速作出反应，已经成为压倒一切的竞争要素。

5. 信息化和智能化

计算机技术的深入和广泛的应用，使企业的控制进一步信息化和智能化，使企业的工作内容、对象和方法发生了根本的改变。

6. 人的知识、素质和需求的变化

企业职工的知识、素质有较大提高，对工作内容 and 环境有更高要求。

7. 环境保护意识的增强与可持续发展

人类发展与环境的矛盾日益加深和尖锐。作为人类经济活动反思的重大成果之一，国际社会于 1992 年确立了《21 世纪议程》，一致提出要遵循可持续发展模式。

1.2.2 知识经济条件下以社会、市场、环境和资源为背景的制造技术

20 世纪末，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代工程科学技术的迅猛发展及其在控制领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了制造活动的深度和广度，急剧地改变了现代制造业的设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生

产组织结构，产生一大批新的制造技术和制造模式。现代制造业已成为发展速度快、技术创新能力强、技术密集甚至是知识密集的部门。许多产品的技术含量和附加值增大，进入了高技术产品的行列。制造技术给制造业带来了重大变革，其主要特点是：

1. 常规制造工艺的优化

常规工艺优化的方向是高效化、精密化、清洁化、强韧化，以形成优质高效、低耗、少无污染的制造技术为主要目标，在保持原有工艺原理不变的前提下，通过改善工艺条件、优化工艺参数来实现。由于常规工艺至今仍是量大面广、经济适用的技术，因此对其进行优化有很大的技术经济意义。

2. 新型（非常规）加工方法的发展

由于产品更新换代的要求，常规工艺在某些方面（场合）已不能满足要求，同时高新技术的发展及其产业化的要求，使新型（非常规）加工方法的发展成为必然。新能源（或能源载体）的引入，新型材料的应用，产品特殊功能的要求等都促进了新型加工方法的形成与发展，如激光加工技术、电磁加工技术、超塑加工技术及复合加工技术等。

3. 专业、学科间的界限逐渐淡化、消失

在制造技术内部，冷热加工之间，加工过程、检测过程、物流过程、装配过程以及设计、材料应用、加工制造之间，其界限均逐渐淡化，逐步走向一体化。

4. 工艺设计由经验走向定量分析

应用计算机技术和模拟技术来确定工艺规范，优化工艺方案，预测加工过程中可能产生的缺陷及防止措施，控制和保证加工件的质量，使工艺设计由经验判断走向定量分析，加工工艺由技艺发展为工程科学。

5. 信息技术、管理技术与工艺技术紧密结合

微电子、计算机、自动化技术与传统工艺及设备相结合，形成多项制造自动化单元技术，经局部或系统集成后，形成了从单元技术到复合技术，从刚性到柔性，从简单到复杂等不同档次的自动化制造技术系统，使传统工艺产生显著、本质的变化，极大地提高了生产效率及产品的质量。

管理技术与制造工艺进一步结合，要求在采用先进工艺方法的同时，不断调整组织结构和模式，探索新型生产组织方式，以提高先进工艺方法的使用效果，提高企业的竞争力。

1.2.3 21 世纪对制造业的挑战

人类进入 21 世纪后，社会与政治环境、市场需求、技术创新预示着制造业将发生巨大变化。美国国家科学研究委员会工程技术委员会、制造与工程设计院“制造业挑战展望委员会”对 2020 年制造业所面临的形势，提出了六大挑战（或基本目标）。

1. 快速响应市场能力的挑战——全部制造环节并行实现

并行制造将显著缩短产品从概念到实现的时间。在合作企业中，各外围企业不同区段的核心能力和知识将动态组合，通过精确的估算、优化以及对产品成本利润的跟踪，将大大减小投资风险。并行制造将使人们组织各层次研究、开发、生产的方式发生革命性的变化。

并行制造是一个重大的挑战，不仅在通信和数据处理方面需要重要的新技术，而且需要制造企业有新的社会与文化氛围。这对于全球性的、多学科的、多文化的、高度瞬态变化的组织尤为重要。

2. 打破传统经营面临的组织、地域及时间壁垒的挑战——技术资源的集成

制造者面对全球竞争将承受巨大的竞争压力。为此企业必须具有敏捷性，以保持对时间和技术的控制，把时间和技术视为对生产率的挑战，不管制造企业是合作企业的一部分，还是网络的一部分，他们都必须都是小型的、柔性的。具备有强大竞争力的制造企业将需要集成系统和自动运转的功能。

有五个主要的因素促使技术资源的集成：

- (1) 为满足市场需求，企业必须快速响应那些具有很高期望和多种选择的顾客。
- (2) 快速响应环境要求在组织的各个层次上进行高效的通信，特别是与顾客、供应者和合作者的通信。
- (3) 新技术的快速吸收要求整个企业具有快速的学习能力。
- (4) 频繁的生产要素重构要求企业采用系统方法。
- (5) 成功企业要求工人具有自我激励精神和在制造与经营过程中的主人翁意识。

3. 信息时代的挑战——信息向知识的转变

制造业已基本上依赖于信息技术，未来这种依赖的趋势将更趋强烈，包括信息的收集、贮存、分析、发布和应用。如果计算机和信息技术（硬件和软件）保持目前的指数增长速率，到 2020 年将能满足制造业的需求。主要的两个挑战是：①“及时”捕获、贮存数据和信息，并将其转化为有用的知识；②在任何地点、任何时间需要时，用户能用熟悉的语言和格式“及时”得到该有用的知识。从各种资源中，将信息及时地转变为有用的知识并作出有效决策是 21 世纪的重大挑战。

4. 日益增长的环保压力的挑战——可持续发展

2020 年世界人口将从今天的 56 亿增至 80 亿。随着人口的增长以及目前技术的不断开发，全球生态系统将受到严重的制约。这一挑战是把生产废弃物及产品对环境的影响减少到“接近于零”。开发不影响环境的、成本低且有竞争力的产品和工艺，尽可能利用回收材料作原料，在能源、材料或人才资源各方面不造成大的浪费。

5. 制造全球化和贸易自由化的挑战——可重组工程

随着世界自由贸易体制的进一步完善及全球通信网络的建立，国际经济技术合作交往日趋紧密，全球产业界进入了结构大调整的重要时期，世界正在形成一个统一的大市场，在全球范围内基于柔性、临时合作模式的格局正在逐步形成。

6. 技术创新的挑战——全新制造工艺及产品的开发

这一挑战采用制造单元工艺这一全新的概念，它将导致生产能力的急剧变化。由于设计和制造的产品的尺寸愈来愈小（最终可达分子级和原子级的水平），制造工艺可能取得巨大的进步。

2020 年，技术创新的单元将在以下诸方面具有新的巨大的能力：

- (1) 多单元工艺技术集成为单一工艺将显著减少投资、检验时间、搬运和加工时间。
- (2) 全部可编程的、不需要硬工装的工艺将使产品的制造迅速转产成为可能。

(3) 自我导引工艺的创建将简化工装和编程的要求, 并提供更大的加工柔性。

(4) 对分子或原子级的处理将导致新材料的产生, 取消分散件联接与装配操作, 允许在一个零件中材料成分产生变化。

这些创新工艺的发展能够制造出新的产品, 例如由分子级的元器件组成的生物计算机, 能在分子或细胞级上进行手术的、只有分子大小的外科工具, 高效且便宜的太阳能收集器。

1.3 先进制造技术的提出及工业化国家制造业的发展战略

1.3.1 先进制造技术的提出

进入 80 年代以来, 各国制造业面临复杂多变的外部环境: 科学技术突飞猛进, 供求关系变化频繁, 产品更新日新月异, 各国经济与国际市场纵横交错, 竞争对手林立等等。因此, 当局和企业界都在寻求对策, 以获取全球范围内竞争优势。传统的制造技术已变得越来越不适当今快速变化的环境, 先进的制造技术, 尤其是计算机技术和信息技术在制造业中的广泛应用, 使人们正在或已经摆脱传统观念的束缚, 跨入制造业的新纪元。

先进制造技术 AMT (Advanced Manufacturing Technology) 就是在这种大环境下, 美国根据本国制造业的挑战与机遇, 对制造业存在的问题进行了深刻反省, 为了加强其制造业的竞争能力和促进国民经济增长而提出来的。从技术的角度来看, 以计算机为中心新一代信息技术的发展, 使制造业技术达到了从未有过的新高度, 先进制造技术的提出也是这种进程的反映。

“先进制造技术”这个专有名词一经提出, 立即获得欧洲各国、日本及亚洲新兴工业化国家的响应。

1.3.2 美国制造业领先地位的动摇以及新的竞争策略

美国的经济领导地位, 无论在国内或国外, 都面临着强烈挑战。当美国对此挑战还未作出相应的反应时, 其国际市场上的竞争能力便已受到侵蚀。即使像高技术方面原来遥遥领先的地位也正在丧失。特别是制造业, 它是美国经济的主要支柱, 因为美国财富的 68% 来源于制造业。但近 20 年里, 其领先地位已被动摇。除民用飞机和化学制品等少数产品的产值还基本维持不变外, 美国的汽车、机床、纺织品、民用电子、钢材等均为负增长, 其中汽车产量下降幅度最大。造成这种状况的根本原因, 就在于美国对制造业未予足够重视, 以致制造技术恶化、生产设备陈旧、管理落后。

自从数控机床出现以来, 计算机和通信技术在过去 20 多年内一直参与全球的市场和竞争, 美国的独立经济体制已被全球相互依存的现实所取代。70 年代, 美国政府和工业界开始感受到全球竞争的压力; 政府采用工资和物价控制等政策以抑制通货膨胀并未收到实效, 造成经济上的无规律, 使先前受保护的工业和市场陷入更激烈的竞争之中; 各公司不再像过去那样能轻易地将产品制造过程中增长的成本转嫁给用户。当问题增多时, 速决的作法

已证明无效，不得不把更多的注意力集中到了制造业。

美国通过大量研究报告为美国制造业的发展勾画蓝图。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，以评估目前和近期有多大能力对付可能面临的竞争。国会也参与有关美国企业竞争危机的讨论，并通过立法，促进制造业和制造技术的发展和进步：

- 国会设立了“国家研究委员会”（NRC），其中包括制造专委会，为政府制定发展战略和提供资助。

- 政府提出了“新的制造工程研究规划”，为制造研究专拨了经费，资助在制造研究与开发关键技术方面取得新突破。1991年4月公布的《国家关键技术》报告中，包括了制造技术领域中的计算机集成制造、智能加工装置、微米级和纳米级的制造、系统管理技术等。

- 国家科技基金会每年资助制造领域项目约400项，还建立了8个“国家制造工程研究中心”（ERC）、26个“工业大学合作研究中心”（IUCRC）和7个“制造技术中心”（MTC）。

- 1993年，克林顿总统批准将“先进制造技术计划”列为1994年预算重点扶持的惟一科技领域，政府投入14亿美元巨款。

- 1990年开始实施由商务部主持的“高技术计划”（APT），1993年投资6800万美元，1994年预算为1.9亿美元，到1997年将达7.5亿美元。

- 克林顿提出1997年前成立100多个全国制造技术中心。

- 组织美日双边制造工程研究会，学习日本经验。

其中先进制造技术计划是美国联邦政府科学、工程和技术协调委员会的六大科研和开发计划之一。其目标是：

- （1）为美国工人创造更多高技术、高工资就业机会，促进美国经济增长。
- （2）不断提高能源效益，减少污染，创造更加清洁的环境。
- （3）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。
- （4）使教育系统对每位学生进行更富有挑战性的教育。
- （5）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。

该项计划1994年度的预算14亿美元，商务部、国防部、能源部、内务部、环保局、宇航局、国家科学基金会、农业部等8个联邦政府机构介入。围绕三个重点领域开展研究：

- （1）下一代的“智能”制造系统。
- （2）为产品、工艺过程和整个企业的设计提供集成的工具。
- （3）基础设施工作。如强调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分析机制，制定评测基准和评测指标体系等。

先进制造技术计划的一个重要项目是协助联邦政府机构开发新一代汽车，这是美国总统技术计划的组成部分。1993年9月公布的新一代汽车计划目标是：①设计和制造——所有汽车生产的改进；②近期改进——促进不断完善；③燃烧效率提高3倍——实现油耗下降目标。参加单位包括：产业界——福特、通用、克莱斯勒三大汽车公司；政府部门——商务部（DOC）、国防部（DOD）、能源部（DOE）、国家宇航局（NASA）、国家科学基金会（NSF）。

1.3.3 日本制造业的茁壮兴起

日本从第二次世界大战的战败国一跃成为世界经济强国，在许多重要领域把工业实力很强、科学技术先进的美国和德国挤出了市场。

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。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。70 年代末 80 年代初，日本通过大规模倾销，毁掉了美国的消费电子业。美国 27 家生产收音机和电视机的大型工厂，包括 RCA 公司在内，得以存活者只有一家。1990 年，单日本 FANUC 公司生产的数控系统装置数量就占世界市场的一半。

日本制造业的巨大成功，固然有政治因素，但主要是和日本人在技术上善于吸收他国成功的经验，注重研究开发，又能根据市场需求的变化及本国情况，研究出一套套灵活的生产系统有关。比如美国麻省理工学院（MIT）的 J. Womack 等人在 1990 年出版的《The Machine That Changed the World》一书中提出的“精益生产”（Lean Production），早在十多年前，日本就已开始形成精益生产的模式。在这一模式中，能以低成本快速生产出高质量的让用户满意的产品；受到良好训练的工人能在心情舒畅、健康的环境下工作；更少强调等级制度，更多强调分担责任、人人参与管理的合作伙伴关系。

日本公司注重了解和满足客户的需求。供应商和各级承包商都是生产的组成部分，并尽量使其了解计划，鼓励技术上的竞争。管理是精益生产的关键所在，日本人的这种模式已对全球制造业产生了深远的影响。

1987 年，日本十位工业界代表着手一项五年规划，讨论日本制造业的未来，主题是智能制造技术计划。早稻田大学的系统科学研究所负责进行该项研究。最初由日本机械基金会资助，随后各参与公司也提供资金，在其研究过程中，吸引了工业界各方的广泛参与并引起管理阶层的极大关注。该规划的核心是如何将分散的制造单元变成有机的整体。1989 年，通产省（MITI）公布了一项草案，即未来制造业核心技术的智能制造系统（IMS）的开发，很快得到美国、西欧、加拿大等国的响应。到 1990 年，MITI 已组成了一个拥有 80 多个公司的集团，形成了一个大型的国际研究项目。

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：① 流程型工业（化学工业等）的无污染制造技术；② 全球化同步工程技术；③ 全球制造的企业集成技术；④ 自律分散型（Holonc）控制系统；⑤ 产品快速开发技术；⑥ 知识系统化技术。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。该计划经过 5 年调查和可行性试验，决定于 1995 年 1 月正式启动，为期 19 年，总投资 40 亿美元。

1.3.4 西欧制造业寻找与美日抗衡的途径

西欧制造业已明显受到来自美国和日本的压力，就连一向以产品质量和技术高超而自

豪的德国也不得不承认与日本存在着不小的差距。就以美国而言，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 15.9%。美国计算机公司（IBM、DEC、HP 和 Apple 等）已握有很大一部分计算机市场。西欧清楚地知道：如果欧洲共同体成员保持各自分离的市场，那将无法同美日抗衡。正如德国总理科尔所说：“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”。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。1992 年由显赫的企业家和政治家们共同掀起了一场旨在通过“欧共体统一市场法案”（SMAEC）的运动。这项法案得到公众的多数支持。这些国家已表明，为避免在工业上落后，他们是愿意在政治上付出代价的。

1985 年，欧共体的白皮书阐明了统一的初期阶段，然而不到五年，就采纳了建立统一市场的决定。1993 年 1 月 1 日，欧洲统一市场正式生效，拥有约 6 万亿美元的巨额市场。1994 年 1 月 1 日，欧洲经济一体化协议（EEA）正式生效，翻开了欧洲经济一体化发展历史的新篇章。此外，欧共体国家立即筹建一系列资金雄厚的跨国机构，以便合作开发极具竞争力的制造技术前沿，来武装欧共体国家的制造业：

- “尤里卡计划”（ERKA）. 1988 年用 5 亿美元资助涉及 16 个欧洲国家中 600 家公司的 165 个合作性高科技研究开发项目。

- 由欧共体制定的“欧洲信息技术研究发展战略计划”（ESPRIT）在 13 个成员国向 5500 名研究人员提供了资助。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 万欧洲货币单位作为研究开发费用，抓好 CIM 的设计原理、工厂自动化所需先进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计划”（BRITE）. 1991~1994 年期间计划投资 7.48 亿欧洲货币单位，资助材料、制造加工、设计以及复杂工厂系统运作方式等方面的研究。

- 欧洲联盟决定在 1994~1999 年间投入 1540 亿欧洲货币单位，用于西欧汽车工业结构调整。每年投入 40 亿欧洲货币单位，加强汽车新技术的研究与开发。

- 1987 年 9 月，在布鲁塞尔召开了欧共体成员开发部长会议，确定在“欧洲技术开发总计划”中耗资 54 亿欧洲货币单位，资助 3000 多项研究，决心在计算机、集成电路和机器人等尖端领域迎头赶上日美两国。

- 法国在其信息技术开发计划中把人工智能和计算机辅助一体化生产等列为七大项目中的两项。

1.3.5 先进制造技术在我国的发展

我国制造技术经建国以来 40 余年的发展已形成较完整的技术体系，为国民经济发展所需各类机械产品的制造提供基本的工艺技术，并取得了重要成就。然而与国外工业发达国家相比，仍存在着阶段性的差距。同时在 80 年代受到“第三次浪潮”的影响，一度认为制造业进入了夕阳阶段，影响到制造技术的发展。近几年来对制造技术的发展获得了重新认识，我国政府及有关领导对先进制造技术的发展给予了高度的关注。

- 国务委员宋健 1995 年 4 月在接见先进制造技术专家时，对于发展先进制造技术给

予高度的重视。宋健指出：“先进制造技术是一个国家、一个民族赖以繁荣昌盛的重要手段”，“如果制造技术不发达，这个国家、民族就不可能富裕”，“因此，我国相当长的时间内，发展制造技术是至关重要的”。他强调：“科委、自然科学基金会要加强对制造技术的投资比例”。

- 1995 年 5 月《中共中央、国务院关于加速科技进步的决定》中提出：为提高工业增长的质量和效益，要重点开发推广电子信息技术、先进制造技术、节能降耗技术、清洁生产和环保技术等共性技术。

- 1995 年 9 月《中共中央关于制定国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标的建议》中明确要大力采用先进制造技术。

- 国家计委、国家科委、国家经贸委在联合编制《全国科技发展‘九五’计划和到 2010 年长期规划》中明确将先进制造技术专项列入高技术研究与发展专题。

- 在“九五”计划的实施中，国家科学技术部的“国家科技攻关计划”、“国家高新技术研究发展计划”、“国家基础研究重大项目计划（攀登计划预选项目）”、“国家技术创新技术”都列入有关项目并付诸实施，其中“精密成形与加工研究开发和应用示范”、“金属材料热成形过程动态模拟及组织性能质量优化控制”、“CIMS”以及智能机器人等项目已全面实施。

国家计委也十分重视先进制造技术的发展，在“九五”期间实施了一批发展先进制造技术项目。如：数控系统及装备研究、自动测试系统及设备技术研究、现场总线、智能化仪表研究、传感器技术研究、30 万辆轿车规模生产关键技术及装备研究等。

国家自然科学基金会近年来已将不少经费投入先进制造技术发展的基础性研究，组织开展了“先进制造技术基础优先领域战略研究”。在此基础上，加大了对发展先进制造技术的支持，以加强发展先进制造技术的后劲，提出了先进制造技术重大项目，目前已开始付诸实施。

- 有关部门及地方对先进制造技术给予了重视。原机械工业部和国家机械工业局在编制《机械、汽车工业“九五”科技发展规划纲要和 2010 年轮廓设想》和《机械工业“十五”科技发展规划》时，都明确提出了以发展先进制造技术为重点，在规划发展重点及关键技术中先进制造技术的发展占有相当大的比例。原机械工业部通过各种渠道落实、安排这些项目。机械工业科技发展基金会近年来把支持先进制造技术作为主要任务，并加大了经费投入的力度。

1.4 先进制造技术的内涵、技术构成及特点

1.4.1 先进制造技术的定义

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。它是一个相对的、动态的概念。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、一致公认的定义，经过近来对发展先进制造技术方面开展的工作，通过对其内涵、特征的分析研究，可以定义为：“先进制造技术是制造业不断吸收机械、电子、

信息（计算机与通信、控制理论、人工智能等）、能源及现代系统管理等方面的成果，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”。

4.2 先进制造技术的内涵及技术构成

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。

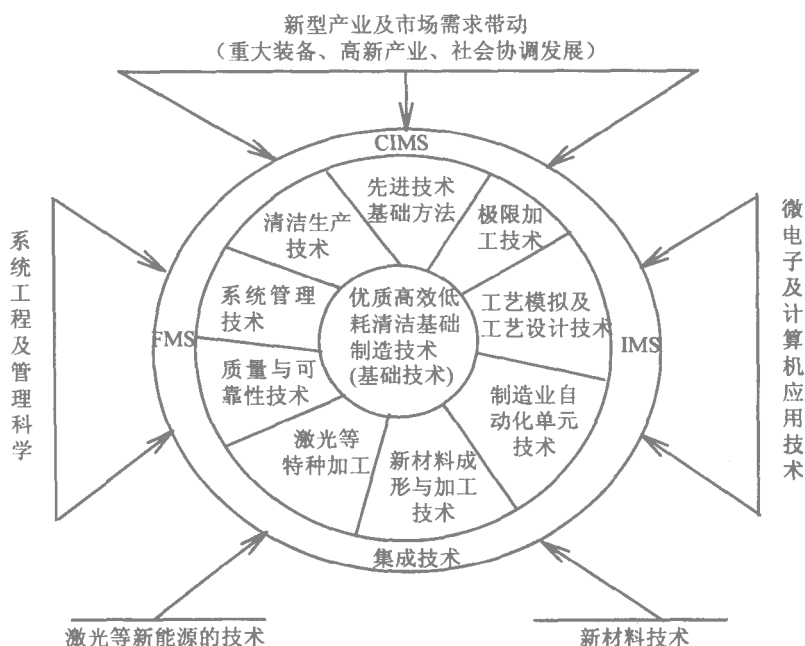


图 1-1 先进制造技术的内涵、层次及其技术构成示意图

1. 基础技术

第一层次是优质、高效、低耗、少无污染基础制造技术。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、少无污染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、毛坯强化、少氧化热处理、气体保护焊及埋弧焊、功能性防护涂层等。

2. 新型单元技术

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、现代设计基础与方法、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。

1.4.3 先进制造技术的特点

(1) 先进性。作为制造技术的基础——制造工艺，必须是经过优化的先进工艺，因而，先进制造技术的核心和基础必须是优质、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) 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。

(5) 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，因此有人称其为“制造工程”。

(6) 动态性。先进制造技术不是一成不变的，而是一门动态技术。它要不断地吸收各种高新技术，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、灵活的生产。同时反映在不同时期和不同的国家地区，先进制造技术就有其自身不同的特点、目标和内容等。

(7) 技术与管理的更紧密结合。对市场变化作出更敏捷的反应及对最佳技术经济效益的追求，使先进制造技术十分重视生产过程组织管理体制的合理化和最佳化，它是技术与管理、自然科学与社会科学紧密结合的产物。

(8) 先进制造技术强调的是实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产。先进制造技术的核心和基础是优质、高效、低耗、清洁、少无污染工艺，它是从传统的制造工艺发展起来的，并与新技术实现了局部或系统集成，其重要的特征是实现优质、高效、低耗外，还要针对 21 世纪人类面临的有限资源与日益增长的环保压力的挑战，实现可持续发展，要求实现低耗、清洁。此外，先进制造技术也必须面临人类在 21 世纪消费观念变革的挑战，满足对日益“挑剔”的市场的需求，实现灵活生产。

(9) 先进制造技术是面向 21 世纪的技术系统，其目的是提高制造业的综合经济效益，赢得激烈的市场竞争。

1.5 先进制造技术的体系结构及分类

1.5.1 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：① 主体技术群；② 支撑技术群；③ 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。见图 1-2 先进制造技术的体系结构。

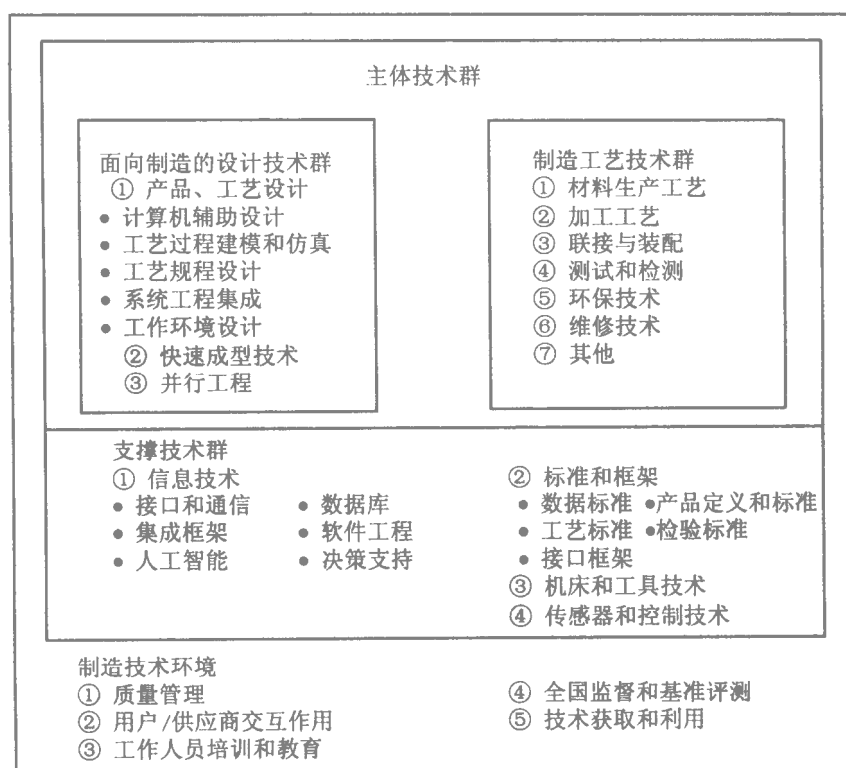


图 1-2 先进制造技术的体系结构

1.5.2 先进制造技术的分类

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 4 大领域，它们横跨多个学科，并组成一个有机整体。

1. 现代设计技术

(1) 计算机辅助设计技术。包括：有限元法；优化设计；计算机辅助设计；反求工程

技术；模糊智能 CAD；工程数据库。

(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。

(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。

(4) 全寿命周期设计。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。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。

2. 先进制造工艺

(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；冷温成形成套技术；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。

(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；调整切削与高速磨削；变速切削；复杂型面的数控加工；游离磨料的高效加工。

(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。

(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。

(10) 拟实制造成形加工技术。包括：材料热加工拟实制造成形；机械加工的拟实制造技术；机械产品的拟实装配技术。

3. 自动化技术

(1) 数控技术。包括：数控装置；进给系统和主轴系统；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) 计算机集成制造系统 (CIMS)。

(5) 传感技术。

(6) 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。

(7) 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。

4. 系统管理技术

(1) 先进制造生产模式。包括：精益生产；CIMS；敏捷制造；分散网络化制造系统；智能制造。

(2) 集成管理技术。包括：并行工程；MRP 与 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。

1.6 先进制造技术发展趋势

人类已进入一个新的世纪，处于新技术革命巨大浪潮冲击下的制造业，面临着严峻的挑战和机遇：① 新技术革命的挑战；② 信息时代的挑战；③ 有限资源与日益增长的环保压力的挑战；④ 制造全球化和贸易自由化的挑战；⑤ 消费观念变革的挑战。

在新世纪中，制造业发展的重要特性是向全球化、网络化、虚拟化方向发展，未来先进制造技术发展的总趋势是向精密化、柔性化、智能化、集成化、全球化方向发展。

1.6.1 企业生产方式面临重大变革

随着需求的个性化及制造的全球化、信息化，改变了制造业的传统观念和和生产组织方式。

精益生产、敏捷制造、智能制造、虚拟制造、分散网络化制造系统等新的生产方式不断出现。其特点是：① 以技术为中心向以人中心转变；② 以金字塔式的多层次生产管理结构向扁平的网络结构转变；③ 从传统的顺序工作方式向并行工作方式转变；④ 从按功能划部门的固定组织形式向动态的、自主管理的小组工作组织形式转变；⑤ 快速响应市场的竞争策略是制胜的法宝。

1.6.2 绿色制造将成为 21 世纪制造业的重要特征

日趋严格的环境与资源的约束，使绿色制造越来越重要。中国的资源、环境问题尤为突出，制造业不仅要解决生产过程的污染和资源浪费问题，更重要的是要为社会提供在全生命周期内没有污染、节约资源的产品。主要技术是：

(1) 绿色设计技术。在产品的设计阶段就考虑在其生命周期全过程的无污染、资源低耗

和回收。

- (2) 清洁生产技术。
- (3) 拆卸回收技术。
- (4) 生态工厂的循环制造技术。
- (5) ISO14000 环保管理标准。

1.6.3 设计技术不断现代化

产品设计是制造业的灵魂。现代设计技术的主要发展趋势是：

- (1) 设计方法和手段的现代化。它突出反映在数值仿真或虚拟现实技术的发展，以及现代产品建模理论的发展上。
- (2) 新的设计思想和方法不断出现。如并行设计，面向“X”的设计 DFX (Design For X)，健壮设计 (Robust Design)，优化设计 (Optimal Design)，反求工程技术 (Reverse Engineering) 等。
- (3) 由简单的、具体的、细节的设计转向复杂的总体设计和决策，要通盘考虑包括设计、制造、检测、销售、使用、维修、报废等阶段的产品的整个生命周期。
- (4) 由单纯考虑技术因素转向综合考虑技术、经济和社会因素。设计不是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而注意考虑市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

1.6.4 成形制造技术向精密成形或净成形的方向发展

展望 21 世纪，成形制造技术正在从制造工件的毛坯、从接近零件形状 (Near Net Shape Process) 向直接制成工件即精密成形或称净成形 (Net Shape Process) 的方向发展。主要技术是：

- (1) 精密铸造技术。
- (2) 精密塑性成形技术。
- (3) 精密连接技术。

1.6.5 加工制造技术向着超精密、超高速以及发展新一代制造装备的方向发展

(1) 超精密加工技术。目前世界已达到加工精度为 $0.025\mu\text{m}$ 表面粗糙度 R_a 为 $0.045\mu\text{m}$ ，进入纳米级加工的时代。超精切削加工技术，其切削厚度由目前的红外波段正朝着可见光波段甚至更短波段趋近；超精加工机床向多功能模块化方向发展；超精加工材料由金属扩大到非金属。

(2) 超高速切削。目前超高速切削铝合金切削速度已超过 1600m/min ；铸铁为 1500m/min ；超耐热镍合金达 300m/min ；钛合金达 200m/min 。超高速切削的发展已转移到一些难加工材料的切削加工上。

(3) 新一代制造装备的发展。市场竞争和新产品、新技术、新材料的发展推动着新型加工设备的研究与开发，其中典型的例子是“并联桁架式结构数控机床”（或俗称“六腿”

机床)的发展。它突破了传统机床结构方案,采用通过六个轴长短的变化以实现刀具相对于工件的加工位姿的变化。

1.6.6 新型加工方法以及复合工艺不断发展

(1) 激光、电子束、离子束、分子束、等离子体、微波、超声波、电液、电磁、高压水束流等新能源或能源载体的引入,形成了多种崭新的特种加工及高密度能束切割、焊接、熔炼、锻压、热处理、表面保护等加工工艺。其中以多种形式的激光加工发展最为迅速。

(2) 超硬材料、高分子材料、复合材料、工程陶瓷、非晶微晶合金、功能材料等新型材料的应用,扩展了加工对象,导致某些崭新加工技术的产生,如:超塑成形、等温锻造、扩散焊接及其复合工艺(超塑成形/扩散连接):加工陶瓷材料的热等静压、粉浆浇注、注射成形;超硬材料的高能束加工;高分子材料、复合材料的水束流切割;沉积 TiN、TiC、CNB、人造金刚石等超硬薄膜的 CVD、PVD、PCVD 等。

1.6.7 应用快速原型制造技术的快速制造技术得到快速发展和应用

快速原型制造技术是一项具有广泛应用前景、能给制造业带来革命性变化的高技术。快速制造技术包括:

- (1) 基于三维曲面设计的快速设计技术。
- (2) 快速三坐标测量技术。
- (3) 快速原型制造技术。
- (4) 快速零件制造技术。
- (5) 并行工程。

1.6.8 虚拟技术将广泛应用

虚拟制造技术是以计算机支持的仿真技术为前提,对设计、加工、装配等过程统一建模,形成虚拟的环境、虚拟的过程、虚拟的产品。主要包括:

- (1) 虚拟设计。
- (2) 虚拟制造。
- (3) 虚拟研究开发中心。将异地、各具优势的研究开发力量,通过网络和视像系统联系起来,进行异地开发、网上讨论。
- (4) 虚拟企业。为了快速响应某一市场需求,通过信息高速公路,使产品制造得到一个由不同公司临时组建成的没有围墙、超越空间约束、靠计算机网络联系、统一指挥的合作组织实体。

1.6.9 工艺模拟技术得到迅速发展

先进制造技术的一个重要发展趋势是工艺设计由经验判断走向定量分析,加工工艺由