

doi: 10.7690/bgzd.2013.11.001

世界先进制造系统的演进路径及体系结构

莫莉, 郑力

(清华大学工业工程系, 北京 100084)

摘要: 为了提高制造企业的市场竞争力, 对先进制造系统模式及其理论与方法进行研究。概述先进制造系统的定义、内涵、特征及产生背景, 简要介绍近 50 年来世界典型的先进制造系统与模式, 如计算机集成制造、并行工程、精益生产、敏捷制造、虚拟制造、智能制造、网络制造系统等, 从战略重点、关键技术、竞争策略等 3 个维度分析先进制造体系的演进路径, 构建世界先进制造系统的体系结构图, 探讨未来先进制造系统的变化趋势, 并展望以云制造系统等为代表的未来新兴制造系统。该研究可为全球制造业的发展提供重要的理论和方法参考。

关键词: 先进制造系统; 演进路径; 体系结构

中图分类号: TP272 **文献标志码:** A

Evolution Path and Structure of Advanced Manufacturing System

Mo Li, Zheng Li

(Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the market competitiveness of manufacturing enterprises, this paper makes research on advanced manufacturing system mode and its theory and method. It introduces the background, concept and characteristics of advanced manufacturing system (AMS), and analyses the typical patterns, including: CIMS, CE, LPS, AMS, VMS, IMS and NMS. Then, from the three dimensions of strategic focus, key technology, competitive strategy, the paper analysis the evolution path of AMS, obtains its system structure. Finally discusses the future trend, and prospects cloud manufacturing system (CMS) as the representative of the emerging manufacturing system. The research can be the valuable reference for the theory and method of the development of the global manufacturing industry.

Key words: advanced manufacturing system; evolution path; system structure

0 前言

从人类工业发展历程看, 19 世纪中叶的英国, 20 世纪初的美国和 20 世纪中的日本被公认为是“世界工厂”。导致世界工厂转移的关键原因是制造技术的进步: 英国的瓦特发明了蒸汽机, 解放了工人的体力劳动; 美国的福特发明了流水线, 颠覆了传统欧洲式的生产组织方式, 使生产率大幅度提高; 日本的丰田发明了精益生产系统, 对传统大批量生产方式进行了革命性的变革, 极大提高了生产效益。

20 世纪中期后, 市场竞争的日益加剧, 消费者需求的日益多样化和个性化, 要求现代的制造业必须有最短的交货期、最优的产品品质、最低的产品价格和最好的服务, 才能占领市场, 赢得竞争。此外, 科学技术的发展也进入了一个日新月异的时代, 电子信息技术和自动化技术发展迅猛, 以 Internet 为代表的信息技术革命, 经济全球化进程打破了传统的地域经济发展模式, 市场变得更加广阔; 因此, 提高制造企业市场竞争力最有力的工具——先进制

造系统就越来越受到广泛的关注和重视。美、日、德、韩、西欧及我国都先后将先进制造系统上升到国家战略高度, 出现了许多先进的制造理念和制造系统模式, 如计算机集成制造、并行工程、敏捷制造、虚拟制造、智能制造及绿色制造等。这些先进制造系统模式及其理论与方法为全球制造业的发展提供了重要的理论和方法。

1 先进制造系统的定义及内涵

关于制造系统的概念, 英国著名学者帕纳比 (Parnaby) 于 1989 年给出的定义为: 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。国际生产工程学会 (CIRP) 于 1990 年给出的定义是: 制造系统是制造业中形成生产的有机整体, 广义的制造系统包括设计、生产、配送和销售的一体化功能。国际著名制造系统工程专家、日本东京大学人见胜人教授于 1994 年指出: 制造系统可从 3 个方面来定义, 即

收稿日期: 2013-07-13; 修回日期: 2013-08-22

作者简介: 莫莉 (1972—), 男, 湖南人, 博士后, 副研究员, 从事企业管理和先进制造管理研究。

系统结构、系统转变(输入/输出)和系统运行。综合上述几种定义,笔者认为,制造系统就是一个由制造技术、制造资源、制造信息以及对资源、信息进行加工处理的过程所组成的相互联系的有机整体,可以实现与外界进行物质、能量和信息交互,实现资源转换以满足社会等环境需求,完成包括市场分析、产品研发设计、工艺规划、制造实施、质量检验、物流配送、销售服务甚至报废回收等各个环节活动的制造全过程。制造过程涉及的硬件包括人员、生产设备、材料、能源和各种辅助装置,所涉及的软件包括制造理论、技术、工艺、方法、标准、规范等。

美国学者于 20 世纪 80 年代末首次提出了“先进制造”(advanced manufacturing)的概念。理论界普遍认为,所谓的先进制造系统,就是基于先进制造技术,能够在时间(T)、质量(Q)、成本(C)、服务(S)、环境(E)等方面满足市场需求,获取系统投入的最大增值,同时具有良好社会效益的制造系统。而先进制造技术就是传统制造业不断吸收机械、电子、信息、材料、能源及现代管理等领域的先进成果,并将其综合应用于制造全过程,以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,从而取得较理想的技术与经济效果的制造技术的总称。

先进制造系统并没有一个固定的模式,不同的社会生产力水平,不同的市场需求和社会需求,不同的企业状况,使得先进制造系统的目标与实现技术不尽相同,但概括来讲,先进制造系统具有以下共同特征:高度集成性,强调通过优化制造系统的内部联系提高系统的运行效率;以顾客为中心,强调采取面向顾客的策略,不断掌握当前及未来顾客和市场的需求,并以此组织生产;快速响应,强调对市场的快速响应能力,通过策略的实施,缩短产品制造周期,加快产品上市周期;满意质量,强调恰当地满足顾客全方位和全产品生命周期内质量需求的特性;绿色特性,强调可持续发展,尽可能减少能源和不可再生资源的消耗,减少对环境、空气与水的污染^[1]。

2 几种典型的先进制造模式与系统

纵观制造系统的发展历程,制造业的竞争要素是随着动态的市场变化而变化的。自 20 世纪中叶特别是 80 年代以来,世界市场已由过去传统的相对稳定逐步演变成动态多变的特征,由过去的局部竞争演变成全球竞争范围内竞争;同行业、跨行业相互

渗透、相互竞争日趋激烈。为了适应变化迅速的市场环境,为了提高企业市场竞争力,从最初的规模战略、成本战略(cost)到后来的质量战略(quality)、供货期战略(time to market)、服务战略(service)、环保战略(environment),直到现在的综合战略 TQCSE(时间、质量、成本、服务、环境)。相应的制造系统和模式不断创新,先后出现了精益生产、集成制造、敏捷制造等 60 多种先进制造系统和模式。为便于梳理,笔者将以得到广泛应用的主流先进制造体系为例进行演变分析^[2-4]。

2.1 计算机集成制造系统

20 世纪 50 年代,随着控制论、电子技术、计算机技术的发展,工厂中开始出现各种自动化设备和计算机辅助系统。如 20 世纪 50 年代初期开始出现的数控机床,20 世纪 60 年代开始出现的计算机辅助设计(CAD)、计算机数控(CNC)、计算机辅助制造(CAM)。20 世纪 60—70 年代之间,计算机技术快速发展,工作站、小型计算机等开始大量进入到工程设计中,开始了 CAD/CAM,计算机仿真等工程应用系统。从 20 世纪 70 年代开始,计算机逐步进入到上层管理领域,开始出现了管理信息系统(MIS)、物料需求计划(MRP)、制造资源计划(MRP II)等概念,美国学者 Joseph Harrington 于 1973 年首先提出了计算机集成制造(CIM)的概念,并提出了 2 个重要的观点:1) 系统的观点,企业的生产经营应看作一个整体,须用系统的观点和系统分析的方法来观察企业的生产经营问题,企业的各个生产环节是不可分割的,需要统一安排与组织,强调的是系统集成;2) 信息化的观点,产品制造过程实质上是信息采集、传递、加工处理的过程,强调的是企业信息化。

CIM 借助计算机软硬件,综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术等,将企业生产经营全过程中有关人、技术和管理三要素以及有关的信息流、物流和资金流有机集成并优化运行,以实现产品的高质量、低成本、交货期短,提高企业对市场变化的应变能力和综合竞争能力。而在 CIM 基础上建立起来的计算机集成制造系统(CIMS),是一种新型制造系统和模式,它从企业的经营战略目标出发,将传统的制造技术与现代信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术等有机结合,将产品从创意策划、设计、制造、营销到售后服务全过程中有关的人和组织、经营管

理和技术三要素有机结合起来，使制造系统中的各种活动、信息有机集成并优化运行，达到产品上市快、成本低、质量高、能耗少，提高企业的创新能力和市场竞争力。

2.2 并行工程

全球性的竞争要求生产者对市场变化作出迅速准确的反应，在现代制造技术发展一定程度后，以信息技术为基础的并行工程制造系统和模式应用而生。美国国防高级研究计划局(DARPA)于1987年最先提出了系统化的并行工程思想，并于1988年发出了并行工程倡议，至此，并行工程在国际上引起了各国的高度重视，并在一大批国际上著名企业中获得了成功的应用，如波音、洛克希德、雷诺、通用电气均采用并行工程，取得了显著的经济效益。

美国防御分析研究所(IDA)于1988年给出的定义是最有代表性且被广泛采用的：并行工程是对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行、一体化设计的一种系统化的工作系统和模式。这种系统和模式力图使开发人员从一开始就考虑到产品全生命周期中的各种因素，包括质量、成本、进度及用户需求。这种生产方式是将时间上先后的知识处理和作业实施过程转变为同时考虑和尽可能同时处理的一种生产方式，主要目标是缩短产品开发周期，提高产品质量，降低产品成本，从而增强企业的竞争力。并行工程不仅包含、继承了许多传统的CMS、CIMS技术，还提出了一些新的技术，如各种并行工程使能技术(如DFX工具)和各种集成技术。并行工程所追求的目标与CIMS的目标是相同的，即“提高企业的市场竞争能力，赢得市场竞争”，但其实施策略和运行模式却有所不同。概括来讲，并行工程注重并行性，即从产品的设计阶段就并行地考虑了产品整个生命周期中的所有因素，把时间上的先后作业过程转变为同时考虑和尽可能同时处理的过程，使产品开发过程更趋合理、高效；注重整体性，强调全局性的考虑问题，追求整体最优；注重协同性，特别强调团队设计小组的协同工作，强调一体化、并行地进行产品及其相关过程的协同设计开发，追求利用群体的力量提高整体效益；注重集成性，强调人员集成、信息集成、功能集成和技术集成。

2.3 精益生产系统

二战以后，日本汽车工业刚刚起步，但统治世

界的是以美国福特为代表的流水线大批量、少品种的生产系统，以规模效应带动成本降低，由此带来价格上的竞争力。鉴于当时的历史环境，以大野耐一等人代表的丰田汽车创始人，根据自身特点，逐步创立了一种独特的多品种、小批量、高质量和低消耗的生产方式——丰田生产方式并付诸实施。丰田汽车据此成为世界上效率最高、品质最好的汽车制造企业，而且使整个日本的汽车工业以至日本经济达到今天的世界领先水平。1990年美国麻省理工学院的詹姆斯·沃麦克、丹尼尔·琼斯等系统总结了日本制造业几十年来的成功经验，在《改变世界的机器》一书中首次系统归纳总结出“精益生产”的生产系统。专家们预言，精益生产方式必将在整个工业领域中取代大批量生产方式及残存的单件生产方式，将对世界工业产生深远的影响。事实上，时至今日，精益生产已经成为全球范围内包括汽车工业在内的诸多工业制造的通用生产系统和模式。

精益生产系统综合了单件生产与大量生产的优点，既避免了前者的高成本，又避免了后者的僵化，其主要内容及特征有：坚持以顾客为中心的策略，以销售部门作为企业生产过程的起点，产品开发与生产均以销售为起点，按订货合同组织多品种小批量生产；产品开发采用并行工程方法和主查制，确保高质量、低成本，缩短产品开发周期，满足用户要求；在生产制造过程中实行“拉动式”的准时化生产，把传统的“上道工序推动下道工序”的生产优化为“下道工序要求拉动上道工序的生产”，杜绝一切超前、超量生产；以人为中心，充分调动人的潜能和积极性，普遍推行“一人多机”操作，多工序管理，并把工人组成作业小组，不仅完成生产任务，而且参加企业管理，从事各种革新活动，提高劳动生产率；追求无废品、零库存、零故障等目标，降低产品成本，保证产品多样化；消除一切影响工作的“松弛点”，以最佳的工作环境、工作条件和最佳工作状态从事最佳作业，从而全面追求尽善尽美；注重总装厂与协作厂之间的相互依存，把主机厂与协作厂之间存在的单纯买卖关系变成利益共同的“血缘关系”，70%左右的零部件设计、制造委托给协作厂，主机厂只完成约30%的设计、制造业务。

2.4 敏捷制造系统

1987年，美国国防部在递交给国会的一份报告中指出：美国要想重振经济，必须大力发展制造业，

要恢复美国在制造业的领先地位,就必须拟定一个发展制造技术的长期规划,提出一种新的制造管理体系。在美国国防部的委托下,美国亚科卡研究所于 1991 发布了《21 世纪制造企业发展战略报告》,并提出了一种新的制造管理体系——敏捷制造(AM)。敏捷制造一提出就受到了广泛的重视和研究,美欧、日本及我国均在 20 世纪 90 年代初就开始了相关的研究,美国一些大企业应用敏捷制造取得了显著成效。

理论界普遍认为,敏捷制造系统就是能快速满足顾客要求的高质量、高性能产品和服务的要求,并能从急剧变化的市场中击败其他竞争对手,从而盈利获胜的制造系统。敏捷制造的出发点是基于对多元化和个性化市场发展趋势的分析,认为制造系统应尽可能具有高的柔性和快速反应能力,从而在变幻莫测、竞争激烈的市场中具有高的竞争能力。敏捷制造是制造系统为了实现快速反应和灵活多变的目標而采取的一种新的制造模式。敏捷制造企业通常采取以下措施:快速重组生产技术;快速相应的组织方式,包括内部动态的组织方式和外部的动态联盟,重视人的因素;技术创新;组织、人、技术的集成。实现敏捷制造的关键技术有: CIM 技术,将企业生产全过程中的有关人、技术、经营管理三要素及信息流、物流有机集成并优化运行,以实现产品高质、低耗、上市快,从而使得企业赢得市场竞争,是敏捷制造的基础技术;网络技术,利用企业网实现企业内部工作小组之间的交流和并行工作,利用互联网实现异地设计和制造,及时地、最优地建立动态联盟,基于网络的企业资源计划管理系统和产品供应链系统都将为敏捷制造的实施提供必须的信息。标准化技术,以集成和网络为基础的制造离不开信息的交流,交流的前提是有统一的交流规则,执行电子数据交换标准 EDI、产品数据交换标准 STEP 及超文本数据交换标准 SGML 等,是进入国际合作大环境,参加跨国动态联盟的前提;模型和仿真技术,敏捷制造通过动态联盟和虚拟制造来实现,因而要对产品经营过程进行建模和仿真,采用基于仿真的产品设计和制造方法十分必要;并行工程技术,采用由上下游因素共同决策产品开发各阶段工作的方式,从而缩短开发周期,降低成本,增强对市场的响应敏捷度; workflow 管理技术,能够有效支持企业业务重组、业务过程集成、项目管理和群组协同工作,对于实施动态联盟具有重要的支

持作用,此外还可以作为企业间信息集成的使能工具,基于 Web 和基于邮件方式的工作流管理系统可以为企业灵活地组建动态联盟和实现信息交换发挥重要作用。此外,集成框架技术、集成平台技术、数据库技术、决策支持系统、人机工程、人工智能等也都是支持敏捷制造的重要技术。

2.5 虚拟制造系统

20 世纪 90 年代以来,对市场的快速响应(交货期)成为企业竞争的焦点,企业的柔性和快速响应市场的能力成为竞争能力的主要标志。虚拟制造体系就是根据企业竞争的需要,在强调柔性和快速的前提下,伴随着信息技术的迅速发展,而得到人们的极大重视。

虚拟制造系统(VMS)是以计算机仿真技术为前提,对设计、制造等生产过程进行统一建模,在产品设计实施阶段,实时、并行地模拟出产品未来制造全过程及其对产品设计的影响,预测产品性能、制造成本、可制造性,从而更有效、更经济灵活地组织制造生产,使工厂和车间的资源得到合理配置,以达到产品开发周期和成本的最小化,产品设计质量的最优化,生产效率的最高化的生产系统。VMS 是现实制造系统在虚拟环境下的映射,所生产的产品是可视的虚拟产品,具有真实产品所必需具有的特征,并具有动态结构及决策、控制、调度、管理等 4 个机制,涉及到整个产品开发和制造过程的方方面面,涉及到整个产品的生命周期。VMS 的理论体系包含开放机理、分布机理、动态机理、并行机理、集成机理、人机和谐机理。虚拟产品制造包括建立统一的虚拟制造分布式仿真模型、制造系统离散事件建模与仿真、多级分布式仿真集成基础结构。

2.6 智能制造系统

1991 年 1 月,日本发起了智能制造系统(IMS)的国际合作研究开发计划。该项目旨在联合工业发达国家的先进制造技术,包括日本工厂与车间的企业技术、欧盟的精密工程技术和美国的系统技术,并开发下一代的标准技术。其目的是实现当前生产技术的标准化,开发出能使人 and 智能设备都不受环境和国家的限制、彼此合作的高技术生产系统,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,做到各种自律化的装备和生产线在整体上的协调和集成,减少过于庞大的重复

投资，并通过先进灵活的制造过程来解决制造系统中人的问题。

IMS 是一种由智能机器人和人类专家共同组成的人机一体化系统。它突出了在制造诸环节中，以一种高度柔性集成的方式，借助计算机模拟人类专家的智能活动进行分析、判断、推理、构思和决策，取代或延伸制造环境中的部分脑力劳动，同时收集、存储、完善、共享、继承和发展人类专家的制造智能。IMS 具有自律能力、人机一体化、虚拟现实、自组织与超柔性、学习能力与自我维护能力等特征。

2.7 网络化制造系统

网络化制造(NMS)是在网络经济条件下产生并得到广泛应用的一种先进制造模式，其概念的形成和初步的应用是在 20 世纪 90 年代中期。网络化制造的产生是基于需求与技术双轮驱动的结果。需求一方面来自于市场竞争的压力；另一方面来自于企业提高自身生产经营管理水平的需要。信息技术

与网络技术，特别是因特网技术的迅速发展和广泛应用，促进了 NMS 的发展。

NMS 的概念和内涵还在不断地发展。一般认为，NMS 是企业为应对知识经济和制造全球化的挑战，以快速响应市场需求和提高企业竞争力为主要目标的一种先进制造模式。通过采用先进的网络技术(包括因特网、企业内联网和企业外联网技术)、制造技术及其他相关技术，构建面向企业特定需求的基于网络的制造系统，突破空间地域对企业市场经营范围和方式的约束，开展覆盖产品整个生命周期的企业业务活动，实现企业间的协同和各种社会资源的共享和集成，高速、高质、低成本地为市场提供产品和服务。

3 世界先进制造体系演进分析

以世界典型的先进制造系统为例，笔者将从战略重点、关键技术、竞争策略 3 个维度分析其演进路径，见表 1。

表 1 典型先进制造系统的主要特征

制造系统	主要特征		
	战略重点	关键技术	竞争策略
计算机(现代)集成制造	Q、C、T	CAD、CNC、CAM、PDM、MRPII、ERP	人、技术、管理和信息流、物流、资金流的有机集成。
并行工程	T、Q、C	CIM、DFX	以空间换时间，协同工作，整体最优。
精益生产	C、Q、T、S	JIT、成组技术、TQM、并行工程	消除一切无效劳动和浪费，持续改善，无废品、零库存、零故障，低成本，高品质，保证产品多样化。
敏捷制造	T、Q、S、C	CIM、网络技术、标准化技术、模型和仿真技术、并行工程、 workflow 管理、人机工程等	快速响应市场，快速调整自身结构，快速集成资源，实现资源共享。
虚拟制造	T、C、Q、S、E	建模技术群、仿真技术群、控制技术群	产品开发周期和成本的最小化，产品设计质量的最优化，生产效率的最高化。
智能制造	C、E、T、Q、S	人工技能技术、并行工程、虚拟制造技术、信息网络技术、人机一体化、自组织与超柔性	将人工智能引入制造系统，在大范围内具有自适应、自学习和自组织的能力。
网络制造	T、Q、C、S、E	综合技术(产品全生命周期管理、协同产品管理、大量定制和并行工程)、使能技术(CAD、CAM、CAE、CAPP、CRM、SRM、ERP、MES、SCM、PDM)、基础技术(标准化技术、产品建模技术、知识管理技术)	用计算机网络敏捷的组织社会制造资源，形成企业间跨地区的动态联盟。针对市场机遇，以最短的时间、最低的成本、最少的投资向市场推出高附加值产品。

3.1 战略重点的演进

从人类制造历史来看，制造企业间激烈竞争的是核心产品，产品间的竞争要素随着时代的变迁而不断演变。19 世纪中叶到 20 世纪中叶的工业社会阶段，制造系统和模式是刚性的大批量生产，流水线 and 泰勒工作制得到广泛的应用，在机械化和电气化技术的支撑下，大大提高了劳动生产率，降低了产品成本。20 世纪后半叶，市场需求朝多样化发展且竞争加剧，迫使工业制造向多品种、小批量、缩短生产周期方向演进，刚性制造模式逐渐被柔性制造模式所替代。从制造企业关注的战略重点来看，

早期是成本(C)，20 世纪 70 年代增加了质量(Q)，80 年代增加了交货期(T)，90 年代初期增加了服务(S)，21 世纪初期又增加了环境友善(E)。可以看出，现代先进制造体系的战略重点已从关注单方面演变成在 T、Q、C、S、E 等几个方面均能很好地满足市场和社会的需求，从而获取系统投入的最大增值，同时具有良好社会效益。

3.2 关键技术的演进

从现代制造业的发展中可以看出，先进制造技术出现了清晰的演进路径，如越来越重视加工前后处理等必不可少的辅助工序；越来越重视工艺装备，

制造技术已经成为集工艺方法、工艺装备和工艺材料为一体的成套技术；越来越重视物流、检验、包装及储藏，制造技术已经成为覆盖全加工过程的综合技术，且优质高效的工艺及加工方法不断涌现，以取代落后技术和工艺；不断吸收微电子、计算机和自动化等高新技术成果，应用 CAD、CAM、CAPP、CAT、CAE、NC、CNC、MIS、FMS、CIMS、IMT、IMS、MES 等一系列先进制造技术，并实现上述技术的局部或者系统集成，形成从单机到自动生产线等不同档次的自动化制造技术；引入并运用工业工程和并行工程概念，强调系统化及其技术和管理集成，将技术和管理有机地结合在一起，引入并应用先进的管理模式，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。

3.3 竞争策略的演进

从先进制造系统演进来看，竞争策略也在逐步升级，如更加注重市场的快速响应(T)，现在企业的竞争已不仅仅集中在质量(Q)、成本(C)、服务(S)，更多的应该是基于时间的竞争，即在更短的时间内，设计、制造、销售客户所需要的产品与服务；更加注重竞争策略的持续改善，先进制造模式愈来愈体现继承与发展，竞争策略的持续优化已经成为先进制造模式发展的一个重要趋势；更加注重基于集成、信息和网络技术的广域竞争，如敏捷制、虚拟、智能制造，已经实现了不同地域企业间的资源共享、优化组合和异地制造，而网络化制造实现了制造和销售服务遍布全世界，企业通过网络的协调和运作，能将遍布世界的制造厂和销售服务点连成一体，能够在任何时刻与世界任何一个角落的用户或供应商打交道，形成了广域甚至全球性的生产经营网络，从而成功提升了企业全球竞争实力^[5]。

4 先进制造体系的体系结构

无论哪种先进制造系统，都大致包括输入、输出、转换、外部约束、内部机制等要素，如图 1 所示。而其中最核心是转换环节，也就是通过生产控制，将输入资源转化成增值的输出资源。大致来讲，输入的资源包括物质(物料、劳务、资金、能源、设备等)和信息(技术、市场需求等)，输出的资源包括产品(有形产品和无形产品)、服务等，外部约束包括国家的方针政策、法律法规、规范标准等，内部机制是实现资源转换的内部条件基础，包括基础设

施、规章制度、战略规划、企业文化等。

转换是制造系统最核心部分。先进制造系统都是通过生产控制将不同资源通过不同形式的联系和相互作用转化为增值的产品和服务输出。在所有的先进制造系统中，都应该包含有“硬”的生产控制管理模块，如计划管理、制造工程、设备管理、质量管理、成本管理、安全及健康管理、物流管理等，以实现对具体生产“事件”的管理。同时为了使“硬”的生产控制管理模块发挥作用，先进制造系统还应具备辅助性的“软”生产控制管理模块，如生产的组织管理、人才培育、行为规范和班组管理，以实现对从事生产制造“人员”的管理。通过充分利用信息流(信息化系统)，“硬”管理模块和“软”管理模块共同实现物料的转换、存储和检测，从而实现企业增值。

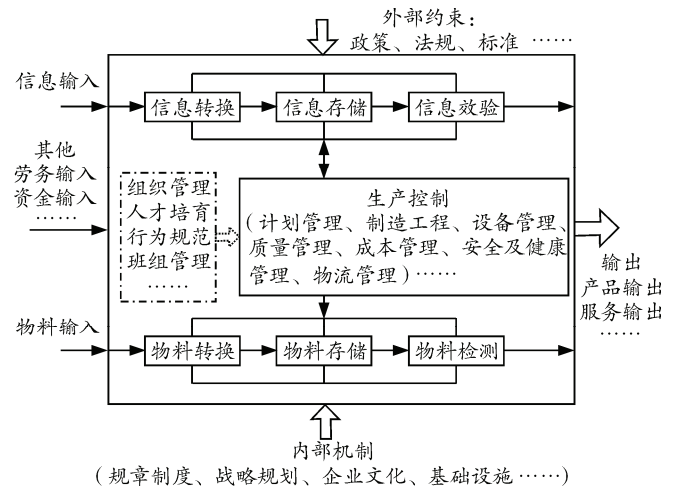


图 1 先进制造系统体系结构

转换的优劣是衡量先进制造系统的最核心指标，而转换的优劣是靠 T、Q、C、S、E 等具体指标来体现。具体来说，优秀的转换必然能够达到：时间短、质量优、成本低、服务好、环境清洁。先进制造系统并没有一个固定的模式，不同的社会生产力水平，不同的市场需求和社会需求，不同的企业状况，使得先进制造系统的目标与实现技术不尽相同，但概括来讲，先进制造系统普遍都具有高度集成性、以市场和顾客为中心、快速响应、满意质量、绿色化等共同特征。

5 先进制造管理体系的发展趋势

为了适应制造业面临的形势和不断变化的市场需求，先进制造技术和先进制造管理系统一直处于不断完善和发展过程中。简要讲，先进制造技术将

进一步向集成化、全球化、网络化、柔性化、绿色化、智能化和精确化发展，而未来的先进制造管理系统将会进一步集合多学科成果，将传统制造技术、信息技术、网络技术、自动化技术与先进的管理科学充分融合^[6]。未来将有以下新兴制造管理模式得到大量应用：

一是绿色制造系统(GMS)。是综合考虑环境影响和资源效益的现代化制造模式和系统，其目标是使产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中，对环境的影响(负作用)最小，资源利用率最高，并使企业经济效益和社会效益协调优化。绿色制造实质上是人类社会可持续发展战略在现代制造业中的体现。目前主要的研究方向包括绿色设计、清洁生产、绿色供应链和逆向物流、绿色管理模式、绿色制造支撑技术等^[7]。

二是服务型制造系统。在服务型制造模式下，制造企业以“产品+服务”的形式为客户提供全面解决方案。服务型制造可使企业从单纯的生产加工，转变为向中间客户和最终客户提供全方位和全生命周期的生产性服务，同时向产品研发和营销网络渗透，并通过世界范围内的生产性服务和技术、加工、服务渠道的互相融合，加快制造企业转型升级步伐。目前有关服务型制造的主要研究领域包括以下几方面：服务创新与产品—服务集成设计、产品服务系统、服务作业的部署与服务系统控制等^[8-10]。

三是云制造系统。云制造是一种面向服务的高效、低耗，基于知识的网络化智能制造的新模式，融合现在信息化制造技术，云技术、物联网等技术，通过对现有网络化制造与服务技术进行延伸和变革，把各类制造资源和制造能力集虚拟化、服务化，并且进行统一、集中的智能化管理和经营的技术。云制造所提供的云服务涉及制造过程的全生命周期，云服务商提供各种服务或服务的组合，如为制造企业实现向用户提供高质量产品和专业化服务提供了平台支持，从而提高产品服务的增值能力；云制造模式强调了制造能力的服务化及按需使用，使得更多形态的资源服务进入到云制造平台中，将极大地扩展社会化服务的共享边界；云制造模式丰富了众包业务协作平台的功能，为众包业务过程的动态协同提供支持，将使得业务协作过程更加透明化、

集成化和精细化。但云制造的相关研究目前仍处于起步阶段，在模式、技术及应用等各个方面，都还有许多有待深入探讨的课题^[11]。

6 结束语

先进制造系统与管理对制造业至关重要，也是国家竞争优势的重要基础。战略重点、关键技术和竞争策略是先进制造系统演进的原动力和重要着力点。通过先进制造技术和管理的有机结合，制造(企)业可以获得时间短、质量优、成本低、服务好、环境清洁的竞争优势。可以预测，随着现代管理理论的发展以及新的制造技术的不断涌现，先进制造系统与管理的理论和实践将会得到进一步的发展。笔者的研究探索和有关结论对于我国制造业认识和运用先进制造技术、系统与管理有着重要的理论和现实意义。

参考文献：

- [1] 但斌, 刘飞. 先进制造与管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 4-12.
- [2] 戴庆辉. 先进制造系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 336-419.
- [3] 蒋志强, 施进发, 王金凤. 先进制造系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 115-188.
- [4] Wayne Pardy, Terri Andrews. Integrated Management Systems: Leading Strategies and Solutions[M]. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield Publishing Group, Inc, 2010: 125-148.
- [5] 赵磊, 胡小梅, 俞涛. 先进制造技术研究综述[J]. 装备制造技术, 2011, 5(11): 75-80.
- [6] Monica Bellgran, Eva Kristina Säfsten. Production Development: Design and Operation of Production Systems[M]. London: Springer London Ltd, 2010: 303-321.
- [7] 郑力, 江平宇, 乔立红, 等. 制造系统研究的挑战和前沿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 125-136.
- [8] 孙林岩, 李刚, 江志斌, 等. 21 世纪的先进制造模式——服务型制造[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2307-2312.
- [9] 武晓青, 杨明顺, 高新勤. 服务型制造模式与运行框架研究[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(2): 82-91.
- [10] Manzini E, Vezzoli C, Clark G. Product-service systems: Using an existing concept as a new approach to sustainability[J]. Journal of Design Research, 2001, 1(2): 12-18.
- [11] 张霖, 罗永亮, 范文慧, 等. 云制造及相关先进制造模式分析[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 459-466.