

智能制造的三个基本范式：从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造

臧冀原^{1,2}, 王柏村^{1,2}, 孟柳^{1,2}, 周源²

(1. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 2. 清华大学公共管理学院, 北京 100084)

摘要: 本文简述了研究智能制造范式的重要意义, 智能制造的内涵和发展历程, 综合智能制造相关范式总结出智能制造三个基本范式: 数字化制造、数字化网络化制造——“互联网+”制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。阐述了三种基本范式的内涵、特征。我国应从数字化“补课”做起, 进一步夯实智能制造发展的基础; 今后一阶段应重点发展“互联网+”制造, 并行推进三种基本范式; 新一代智能制造将从根本上引领和推进第四次工业革命, 为我国实现制造业换道超车、跨越发展带来了历史性机遇。

关键词: 基本范式; 数字化制造; “互联网+”制造; 新一代智能制造

中图分类号: F424 **文献标识码:** A

Brief Analysis on Three Basic Paradigms of Intelligent Manufacturing

Zang Jiyuan^{1,2}, Wang Baicun^{1,2}, Meng Liu^{1,2}, Zhou Yuan²

(1. The CAE Center for Strategic Studies, Beijing 100088, China; 2. School of Public Policy & Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper briefly describes the significance of studying the paradigms of intelligent manufacturing, and introduces the connotation and development process of intelligent manufacturing. By analyzing the characteristics of relevant paradigms of intelligent manufacturing, three basic paradigms of intelligent manufacturing are summarized: digital manufacturing, digital and networked manufacturing (“Internet Plus” manufacturing or smart manufacturing), and digital, networked, and intelligentized manufacturing (new-generation intelligent manufacturing). The connotation and characteristics of the three basic paradigms are expounded. China should start with the digital manufacturing, thus to consolidate the foundation for the development of intelligent manufacturing. In the next stage, China should focus on the development of “Internet Plus” manufacturing, and promote these three basic paradigms in parallel. The new-generation intelligent manufacturing will fundamentally lead and advance the fourth industrial revolution, and bring a historic opportunity for China’s manufacturing to achieve leapfrog development.

Keywords: basic paradigms; digital manufacturing; “Internet Plus” manufacturing; new-generation intelligent manufacturing

收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-08-13

通讯作者: 周源, 清华大学公共管理学院, 副教授, 主要研究方向为公共政策; E-mail: zhou_yuan@mail.tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代人工智能引领下的智能制造研究”(2017-ZD-08-03); 中国工程院咨询项目“‘十三五’战略性新兴产业培育与发展规划研究”(2014-ZD-7); 国家自然科学基金资助项目(91646102, L16240452, L1524015); 教育部人文社会科学项目(16JJDGC011); 中国博士后科学基金资助项目(2018M630191)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、研究背景

当前全球制造业发生深层次的变化，制造业再次成为全球竞争的焦点。改革开放40年来，我国制造业快速发展，取得了举世瞩目的成就，建立起世界规模第一、门类齐全、独立完整的制造体系，但大而不强、产业水平多处于中低端等问题突出。为应对发达国家高端制造业回流影响和新兴市场国家的要素成本优势的竞争，我国制造业的发展方式不能是粗放式增长模式的简单复制，而是需要在智能制造条件下推进高质量发展 [1]。

新一代信息技术，特别是新一代人工智能技术，飞速发展，并加速与制造业融合，这一融合趋势为全球制造业的转型升级带来了新机遇。我国“政产学研用金”各个主体抢抓机遇，因势利导，初步形成了推进智能制造的热潮。智能制造是我国制造业创新发展的主要抓手，是制造业转型升级的主要路径，是建设制造强国的主攻方向 [2]。

企业是智能制造的主体，质量和效益提升是企业实施智能制造的目标。近年来，在智能制造的推进过程中，部分企业存在盲目实施智能制造项目的情况，为智能制造而智能制造，偏离了智能制造的目标。广大企业在智能制造的理性认识、发展方向、路径选择等方面还存在许多困惑和误区。因此特别应该讨论清楚什么是智能制造，明晰智能制造的内涵，梳理出智能制造的基本范式，有力推动我国制造企业转型升级。

二、智能制造的内涵、发展历程和基本范式

（一）智能制造的内涵

广义而论，智能制造是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于产品、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，实现制造的数字化、网络化、智能化，并不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展 [1]。

（二）智能制造的发展历程

智能制造的理念与技术发展，迄今已经历几十年的历程。从20世纪80年代日本提出“智能制造系统（IMS）”，到美国提出“信息物理系统（CPS）”，

德国提出“工业4.0”，再到中国提出“中国制造2025”，智能制造广泛影响着世界主要国家的工业转型战略。在几十年的发展历程中，与智能制造相关的各种范式层出不穷、相互交织，如精益生产、柔性制造、并行工程、敏捷制造、数字化制造、计算机集成制造、网络化制造、云制造、智能化制造等。精益生产从20世纪50年代起源于日本丰田汽车公司，并被广泛应用于制造业，主要目标是在需要的时候，按需要的量生产需要的产品，由准时生产（JIT）、全面质量管理、全面生产维护、人力资源管理构成，体现了持续改善的思想，是智能制造的基础之一 [3]。柔性制造在20世纪80年代初期进入实用阶段，是由数控设备、物料储运装置和数字化控制系统组成的自动化制造系统，能根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整，适用于多品种、中小批量生产，系统具备生产、供应链的柔性、敏捷和精准的反应能力。并行工程利用数字化工具从产品概念阶段就考虑产品全生命周期，强调产品设计、工艺设计、生产技术准备、采购、生产等环节并行交叉进行，并行有序，尽早开展工作。敏捷制造诞生于20世纪90年代，随着信息技术的发展，企业采用信息手段，通过快速配置技术、管理和人力等资源，快速有效响应用户和市场需求。我国1986年开始研究计算机集成制造，它是将传统制造技术与现代信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术有机结合，借助计算机，实现企业产品全生命周期各个阶段的人、经营管理和技术有机集成并优化运行 [4]。21世纪初，网络化制造兴起，它是先进的网络技术、制造技术及其他相关技术结合构建的制造系统，是提高企业的市场快速反应和竞争能力的新模式 [5]。近几年，为解决更加复杂的制造问题和开展更大规模的协同制造，面向服务的网络化制造新模式——云制造开始爆发式发展 [6]。智能化制造则是新一代信息技术、传感技术、控制技术、新一代人工智能技术等不断发展与在制造中的深入应用，产品制造、服务等具备的自适应、自学习、自决策等能力，这是一种面向未来的制造范式 [7]。

这些范式里既有智能制造的基础，也有体现智能制造价值实现、技术路径升级、组织方式等不同维度的范式，它们从不同视角上反映出制造业的数字化网络化智能化特征，在制造业从自动化走向智

能化的转型过程中发挥了积极作用。但是，众多的智能制造范式在企业选择技术路径、推进智能升级的实践中造成一定的困难。面对智能制造不断涌现出的新技术、新理念、新模式，迫切需要归纳总结出基本范式，为我国企业发展智能制造凝聚共识，更好地服务于中国制造业的智能转型、优化升级。

(三) 智能制造的三个基本范式

智能制造作为制造技术和信息技术深度融合的产物，相关范式的诞生和演变发展与数字化网络化智能化的特征紧密联系，这些范式从其诞生之初都具有数字化特征，计算机集成制造、网络化制造、云智造和智能化制造等具有网络化特征，而未来融入新一代人工智能的智能化制造则具有智能化特征，如表 1 所示。

根据智能制造数字化网络化智能化的基本技术特征，智能制造可总结归纳为三种基本范式，即：数字化制造——第一代智能制造、数字化网络化制造——“互联网+”制造或第二代智能制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造（见图 1）。

需要强调的是，我国制造业有世界上门类最为齐全、独立完整的产业体系，包括以机电产品制造为主体的离散型制造业和石化、冶金、建材、电力等流程型制造业。这里讨论的智能制造包括了离散型制造业和流程型制造业的数字化网络化智能化。

三、数字化制造

第一代智能制造是数字化制造，它是智能制造

的第一种范式。20 世纪 80 年代后期，智能制造的概念被首次提出，当时智能制造的主体就是数字化制造，是后两个智能制造基本范式的基础。

20 世纪下半叶以来，随着制造业对于技术进步的强烈需求，数字化制造引领和推动了第三次工业革命，以计算机数字控制为代表的数字化技术广泛应用于制造业，推动制造业发生革命性变化。数字化制造是在制造技术和数字化技术融合的背景下，通过对产品信息、工艺信息和资源信息进行数字化描述、集成、分析和决策，进而快速生产出满足用户要求的产品。数字化制造主要聚焦于提升企业内部的竞争力，提高产品设计和制造质量、提高劳动生产率、缩短新产品研发周期、降低成本和提高能效。

数字化制造的主要特征表现为：第一，在产品方面，数字化技术得到普遍应用，形成数控机床等“数字一代”创新产品。第二，大量采用计算机辅助设计/工程设计中的计算机辅助工程/计算机辅助工艺规划/计算机辅助制造（CAD/CAE/CAPP/CAM）等数字化设计、建模和仿真方法；大量采用数控机床等数字化装备；建立了信息化管理系统，采用制造资源计划/企业资源计划/产品数据管理（MRPII/ERP/PDM）等，对制造过程中的各种信息与生产现场实时信息进行管理，提升各生产环节的效率和质量。第三，实现生产全过程各环节的集成和优化运行，产生了以计算机集成制造系统（CIMS）为标志的解决方案。在这个阶段，以现场总线为代表的早期网络技术和以专家系统为代表的早期人工智能技术在制造业得到应用。

20 世纪 80 年代，我国企业开始了解和认识到数字化制造的重大意义，经过几十年的发展，一大

表 1 智能制造相关范式基本技术特征

数字化	网络化	智能化
智能化制造	智能化制造	智能化制造
云制造	云制造	
网络化制造	网络化制造	
计算机集成制造	计算机集成制造	
数字化制造		
敏捷制造		
并行工程		
柔性制造		
精益生产		

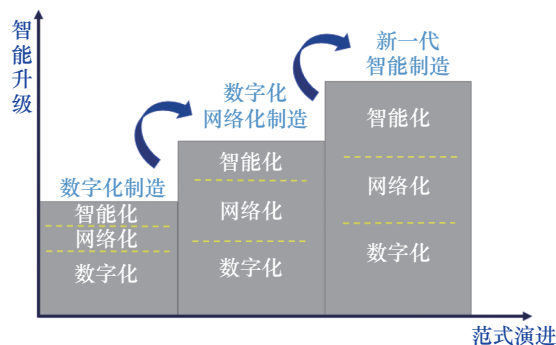


图 1 智能制造基本范式的演进

批企业实施了设计、制造、管理等制造全过程的数字化，推广数字化制造装备和数控系统，企业信息化成果显著，特别是近年来，广东、江苏、浙江等地大力推进“机器换人”“数字化改造”，建立起大量的数字化生产线、数字化车间和数字化工厂，众多的企业完成了数字化升级，我国数字化制造进入从探索示范渐入推广普及发展阶段。同时，要充分意识到，我国真正完成数字化制造转型的企业数量，相对我国巨大的企业基数，特别是中小企业，还是少数。因此，我国的智能制造发展必须坚持实事求是的原则，踏踏实实从数字化“补课”做起，进一步夯实智能制造发展的基础。但是，还必须深刻地认识到，西方发达国家是在数字化制造普及的基础上推进网络化制造，而我国在数字化制造“补课”过程中不必沿着西方顺序发展的路径，我们可以并且必须并行推进数字化制造和数字化网络化制造，在帮助企业扎实完成数字化制造“补课”的同时，实现数字化网络化制造升级。

需要说明的是，数字化制造是智能制造的基础，其内涵不断发展，贯穿于智能制造的三个基本范式和全部发展历程。这里定义的数字化制造是作为第一种基本范式的数字化制造，是一种相对狭义的定位。国际上也有多种关于数字化制造的比较广义的定位和理论。

四、“互联网+”制造——数字化网络化制造

第二代智能制造是数字化网络化制造，它是智能制造的第二个范式，从本质上讲，就是“互联网+”制造，在国外也被称为“smart manufacturing”，是在数字化制造的基础上实现网络化，应用工业互联网、工业云的技术实现联通和集成，同时还具备一定的智能。

20世纪末，互联网技术快速发展并得到广泛普及和应用，“互联网+”不断推进制造业和互联网融合发展，制造技术与数字技术、网络技术的密切结合重塑制造业的价值链，推动制造业从数字化制造向数字化网络化制造的范式转变。

“互联网+”制造是在数字化制造的基础上，深入应用先进的通信技术和网络技术，用网络将

人、流程、数据和事物连接起来，联通企业内部和企业间的“信息孤岛”，通过企业内、企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，实现产业链的优化，快速、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。先进制造技术和数字化网络化技术的融合，使得企业对市场变化具有更快的适应性，能够更好地收集用户对使用产品和对产品质量的评价信息，在制造柔性化、管理信息化方面达到了更高的水平。

“互联网+”制造在产品、制造、服务各环节，相对之前的制造模式都有了显著不同，实现了制造系统的连通和信息反馈，主要特征表现为：第一，在产品方面，数字技术、网络技术得到普遍应用。部分产品能够通过网络进行连接和交互，成为网络的终端。第二，在制造方面，实现企业内、企业间的供应链、价值链的连接和优化，打通整个制造系统的数据流、信息流。企业能够通过设计和制造平台实现制造资源的全社会优化配置，开展与其他企业之间的业务流程协同、数据协同、模型协同，实现协同设计和协同制造。生产过程更加柔性，能够实现小批量多品种的混流生产。第三，在服务方面，企业与用户通过网络平台实现联接和交互，企业掌握用户的个性化需求，用户能够参与产品全生命周期活动，将产业链延伸到为用户提供产品健康保障等服务。大规模个性化定制生产、远程运维服务、全生命周期质量追溯服务、以供应链优化为核心的网络协同制造等新模式新业态正在悄然兴起。规模定制生产逐渐成为消费品制造业发展的一种普遍模式，远程运维服务模式在工程机械行业得到广泛应用。企业生产开始从以产品为中心向以用户为中心转型，企业形态也逐步从生产型企业向生产服务型企业转型。

21世纪以来，世界主要国家加速推进智能制造。德国“工业4.0”以CPS为核心，将产品、制造、服务数据化和集成化，实现企业内和企业间的集成和互联互通。美国工业互联网提出将全球工业系统与高级计算、分析、传感技术及互联网的高度融合，重构全球工业，激发生产力。德国“工业4.0”和美国工业互联网完整地阐述和提出了数字化网络化制造范式及实现的技术路线。

我国工业界紧紧抓住互联网发展的战略机遇，

大力推进“互联网+”制造，一批企业在进行数字化改造的同时，逐渐形成从内部互联到企业间互联互通，形成了一些典型试点示范项目。例如，海尔集团建立起以智能制造执行系统（iMES）为核心的互联工厂，可实时、同步响应全球用户需求，并快速交付智能化、个性化的方案。佛山维尚家居制造有限公司构建“新居网”互动开放式设计平台，充分挖掘消费者的个性化需求，实现消费驱动生产，并建立“大规模家具设计定制生产系统”，有效解决个性化定制与标准化、批量化生产的矛盾。西安飞机工业（集团）有限责任公司构建了飞机协同开发与制造云平台（DCEaaS），实现 10 家参研单位和 60 多家供应商的协同开发、制造服务和资源动态分析与弹性配置。

在今后一个阶段，我国推进智能制造的重点是推广和大规模应用“互联网+”制造——第二代智能制造。

五、新一代智能制造——数字化网络化智能化制造

新一代智能制造——数字化网络化智能化制造是智能制造的第三种基本范式，可对应于国际上推行的“intelligent manufacturing”。

21 世纪以来，移动互联、超级计算、大数据、云计算、物联网等新一代信息技术飞速发展，集中汇聚在人工智能技术的突破上。人工智能技术与先进制造技术的深度融合，形成了新一代智能制造——数字化网络化智能化制造，成为新一轮工业革命的核心驱动力。新一代智能制造的主要特征表现在制造系统具备了“认知学习”能力。通过深度学习、增强学习、迁移学习等技术的应用，新一代智能制造中制造领域的知识产生、获取、应用和传承效率将发生革命性变化，显著提高创新与服务能力。随着制造知识生产方式的变革，新一代智能制造形成了一种新的制造范式。

新一代智能制造将给制造业带来革命性变化，是真正意义上的智能制造，将从根本上引领和推进第四次工业革命，为我国实现制造业换道超车、跨越发展带来了历史性机遇。如果说数字化网络化制造是新一轮工业革命的开始，那么新一代智

能制造的突破和广泛应用将推动形成新一轮工业革命的高潮。

六、结语

本文分析了智能制造三个基本范式的内涵和特征，从中可以总结出智能制造发展的两个特性 [8]：延续性和融合性。

延续性：智能制造的三个基本范式同时具有时间上和目标上的延续性，数字化制造、“互联网+”制造和新一代智能制造次第展开，目标聚焦制造业的效率和提升，体现出新一代信息技术与先进制造技术融合发展的阶段性特征 [1]。

融合性：数字化制造、“互联网+”制造和新一代智能制造范式并不是绝然分离的，而是相互交织、迭代升级，例如，在数字化制造范式中，已经应用了信息通信技术和第一代人工智能技术；在数字技术、网络技术充分发展的今天，智能制造各基本范式推进过程中都可按照需要融入各种先进技术，体现着智能制造发展的融合性特征。

综合中国国情，基于对智能制造延续性和融合性的认识，我国推进智能制造应采取三个基本范式“并行推进、融合发展”的技术路线，从而实现制造业的智能升级、跨越发展。

参考文献

- [1] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11–20.
- [2] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273–2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing——Main direction of “Made in China 2025” [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [3] Shah R, Ward P T. Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance [J]. *Journal of Operations Management*, 2004, 21(2): 129–149.
- [4] 吴澄, 李伯虎. 从计算机集成制造到现代集成制造——兼谈中国 CIMS 系统论的特点 [J]. *计算机集成制造系统*, 1998 (5): 1–6.
Wu C, Li B H. From computer integrated manufacturing to contemporary integrated manufacturing—Also about the systematic character of CIMS in China [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1998 (5): 1–6.
- [5] 杨叔子, 吴波, 胡春华, 等. 网络化制造与企业集成 [J]. *中国机械工程*, 2000, 11(2): 54–57.
Yang S Z, Wu B, Hu C H, et al. Network manufacturing and enterprise integration [J]. *China Mechanical Engineering*,

- 2000, 11(2): 54-57.
- [6] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7.
Li B H, Zhang L, Wang S L, et al. Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7.
- [7] 周济. 制造业数字化智能化 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2395-2400.
Zhou J. Digitization and intellectualization for manufacturing for manufacturing industries [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2395-2400.
- [8] 董景辰. 卷首语——论中国智能制造的三个基本范式 [J]. 电器与能效管理技术, 2017 (24): I0001-I0004.
Dong J C. Foreword—The three basic paradigms of intelligent manufacturing in China [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017 (24): I0001-I0004.