

智能制造总体架构探析

孟柳^{1,2}, 延建林¹, 董景辰¹, 韦莎³, 李瑞琪³, 臧冀原^{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, 北京 100084; 3. 中国电子技术标准化研究院, 北京 100007)

摘要: 智能制造是一个不断演进的大系统, 涵盖了产品、制造、服务全生命周期中所涉及的理论、方法、技术和应用。面对智能制造不断涌现的新技术、新理念、新模式, 迫切需要总结提出智能制造系统架构, 以更好地指导智能制造落地实施。本文从价值维、技术维和组织维三个维度构建了中国智能制造总体架构, 并分别与美国、德国、日本智能制造相关系统架构做了横向比较。智能制造总体架构的技术维反映了智能制造以两化融合为主线, 价值维体现了智能制造的主体是制造活动, 组织维强调了智能制造要以人为本。

关键词: 智能制造; 总体架构; 智能转型; 优化升级

中图分类号: T-01 **文献标识码:** A

Research on the General Architecture of Intelligent Manufacturing

Meng Liu^{1,2}, Yan Jianlin¹, Dong Jingchen¹, Wei Sha³, Li Ruiqi³, Zang Jiyan^{1,2}, Zhou Yuan²

(1. The CAE Center for Strategic Studies, Beijing 100088, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China)

Abstract: Intelligent manufacturing is an evolving system that covers theories, methods, technologies, and application involved in the whole life cycle of products, manufacturing, and services. Considering the new technologies, concepts, and models emerging in the field of intelligent manufacturing, a system structure for intelligent manufacturing needs to be summarized and proposed to well guide its implementation. This paper constructs the system structure of China's intelligent manufacturing from three dimensions, i.e., a value dimension, a technical dimension, and an organization dimension, and makes a horizontal comparison with the system architectures related to intelligent manufacturing in the United States, Germany, and Japan. The technical dimension reflects that China's intelligent manufacturing should focus on the integration of industrialization and informatization, the value dimension reflects that the main body of China's intelligent manufacturing is manufacturing activities, and the organization dimension emphasizes that China's intelligent manufacturing should be people-oriented.

Keywords: intelligent manufacturing; general architecture; intelligent transformation; optimization and upgrade

近年来, 随着新一代信息技术与制造业的融合不断深入, 智能制造成为世界各国抢占新一轮科技革命和产业变革的战略制高点。为赢得智能制造战

略竞争的主动权, 主要国家的工业界和学术界先后提出一系列智能制造体系架构, 旨在为国家规划未来智能制造战略提供借鉴, 也为智能制造国际标准

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-16

通讯作者: 孟柳, 中国工程院/清华大学, 联培博士后, 主要研究方向为智能制造; E-mail: bigbiglemon@163.com

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)

本刊网址: www.enginsci.cn

对接提供参考。当前，探讨和分析中国智能制造总体架构，是推动我国智能制造发展的一项重要而迫切的工作。

一、智能制造总体架构的基本含义

智能制造涵盖了产品、制造、服务全生命周期，是一个大概念 [1]。

智能制造总体架构（也称作智能制造系统架构，或智能制造系统参考架构），是对智能制造活动各相关要素及要素间关系的一种映射，是对智能制造活动的抽象化、模型化认识 [2]。

构建智能制造总体架构，从微观层面来看，是为智能制造实践提供构建、开发、集成和运行的框架；从中观层面来看，是企业实施智能制造提供技术路线指导；从宏观层面来看，是为国家制定和推进制造业智能转型提供顶层设计模型，推动智能制造标准化建设 [3]。

二、智能制造总体架构维度解析

本研究从价值维、技术维和组织维三个维度，提出了中国智能制造总体架构（见图 1）。

（一）技术维——以两化融合为主线的技术进化维度

智能制造从技术进化的维度可以分为三个范式：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络

智能化制造（见图 2）。这三个范式之间的演进是互相关联，迭代升级的。

数字化制造是智能制造的基础，贯穿于三个基本范式，并不断演进发展；数字化网络化制造将数字化制造提高到一个新的水平，通过工业“互联网+制造”；实现全价值链的优化；新一代智能制造是在前两种范式的基础上，通过先进制造技术与新一代人工智能技术集成，使得制造具有了真正意义上的智能。

1. 数字化制造

数字化制造如图 2（a）所示，是数字技术和制造技术的融合，是随着数字技术的广泛应用而出现的。数字化制造实现了制造的数字化设计、仿真、计算机集成制造，实现了企业生产和管理的集成和协同，在整个工厂内部实现了计算机系统和生产系统的融合，提高了产品设计、制造质量、劳动生产率，缩短了产品的研发周期，降低成本，提高能效。

数字化制造的特点如下：

（1）实现制造过程对象的数字化表达。包括产品和工艺的数字化，制造装备/设备的数字化，材料、元器件、被加工的零部件、模具/卡具/刀具等“物”的数字化以及人的数字化。

（2）数据的互联互通。包括网络通信系统构建，不同来源的异构数据格式的统一以及数据语义的统一。

（3）信息集成。生产运行数据与信息管理系统实现集成，其目的是要利用这些数据实现整个制

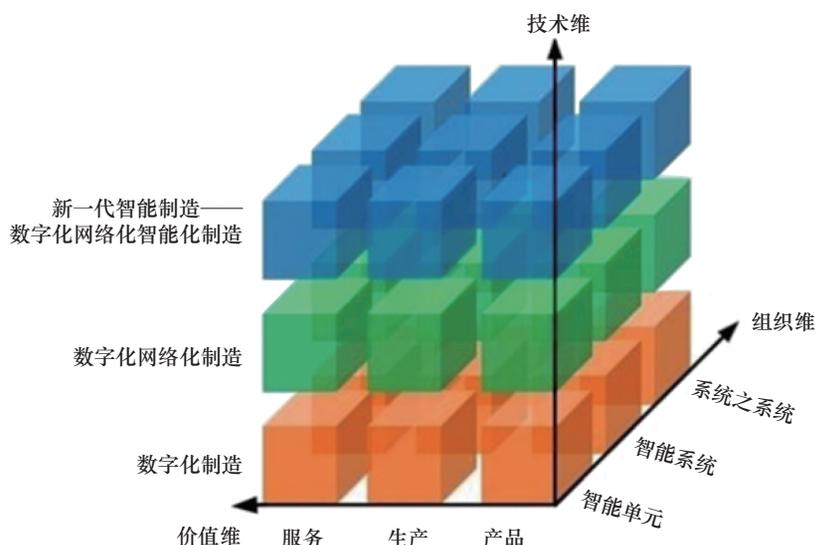


图 1 智能制造总体架构

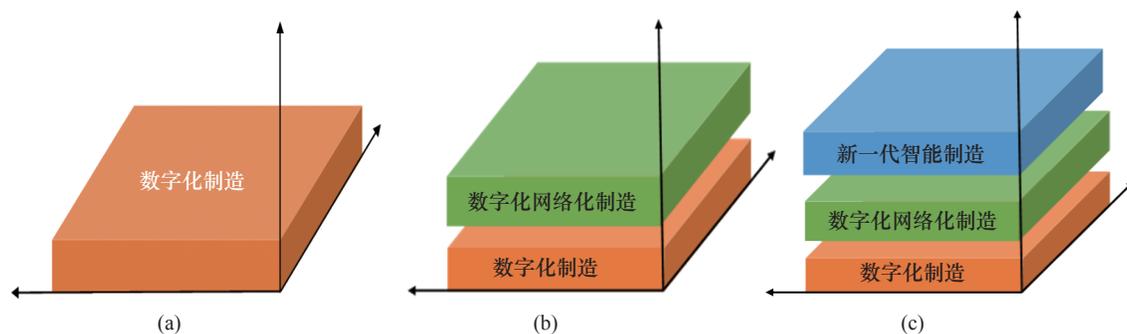


图2 智能制造总体架构价值维分解示意图

造过程各环节的协同和可视化管理。

2. 数字化网络化制造

数字化网络化制造如图2(b)所示,是在数字化制造的基础上,随着网络技术的广泛应用,企业间实现了互联互通,包括生产方和需求方,也就是企业和用户的需求信息的交融,企业的供应链上下游之间整体的协同,改变了企业的经营模式,实现全产业链优化,快速、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。

数字化网络化制造的特点如下:

(1) 实现与用户的充分沟通,更好了解用户的需求,企业从以产品为中心向以用户为中心转型。

(2) 实现全产业链上企业与企业之间的协同,包括企业间数据协同、资源协同、流程协同,从而使社会资源得到优化配置。

(3) 实现企业产品链从产品向服务延伸。通过对产品的远程运维,为用户提供更多的增值服务,使企业从生产型企业向生产服务型企业转型。

3. 数字化网络化智能化制造

数字化网络化智能化制造如图2(c)所示,是近年来高速发展的新一代人工智能技术与制造业技术融合的结果,是新一代智能制造。新一代人工智能技术的突破催生了多媒体智能、跨媒体智能、群体智能、人机混合增强智能、大数据智能以及自主智能系统,将给制造业带来新的发展方向[4]。

数字化网络化智能化制造将实现制造知识的自动化制造/服务,通过深度学习、迁移学习、增强学习等技术的应用,制造数据和信息“自动地”被加工成为知识,即制造业具有了“学习”的能力。从而使制造知识的生成、积累、应用和传承的效率发生革命性的变化,极大地释放人类智慧的潜能,显著提高创新和服务能力。随着制造知识生产方式

的变革,数字化网络化智能化制造将成为一种新的制造模式,它融入了新一代人工智能技术,成为真正意义上的智能制造。

(二) 价值维——以制造为主体的价值实现维度

智能制造主要由智能产品、智能生产及智能服务构成。其中,智能产品是主体,智能生产是主线,以智能服务为中心的产业模式变革是主题。智能制造的价值实现主要体现在产品、生产、服务三个方面,如图3所示。

1. 智能产品

智能产品包括智能制造的装备和各种产出物,产品通过智能制造技术提高产品功能、性能,带来更高的附加值和市场竞争力。

2. 智能生产

智能生产包括基于产品的设计、生产和管理等制造流程的各个环节,制造技术和信息技术融合,全面提升产品设计、生产和管理水平,显著提升劳动生产率。

3. 智能服务

智能服务包括以用户为中心的产品全生命周期的各种服务,服务智能化将大大促进个性化定制等生产方式的发展,延伸发展服务型制造业和生产性服务业,深刻地改革制造业的生产模式和产业形态。

此外,系统集成是智能制造价值实现的关键。集成的核心就在于解决系统之间的互连和互操作性问题,从局部的优化升级到整体的优化,实现产品、装备、生产、服务、市场、管理等整个制造生态效能的提升。

(三) 组织维——以人为本的组织系统维度

智能制造是一个大系统,内部和外部均呈现出

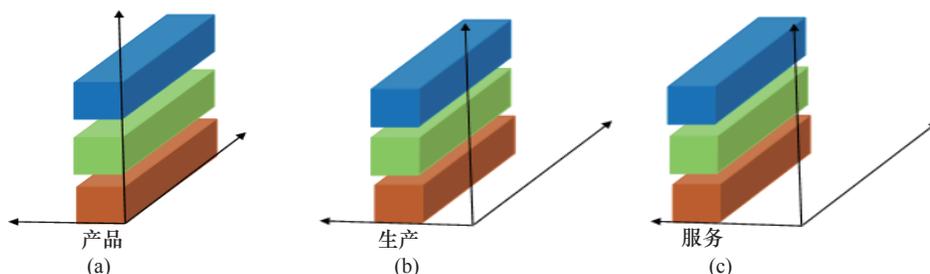


图3 智能制造总体架构价值维分解示意图

前所未有的系统“大集成”特征，从组织维度来看，智能制造主要体现在智能单元、智能系统、系统之系统三个层面（见图4）。

1. 智能单元

智能单元是实现智能制造功能的最小单元，可以是一个部件或产品。智能单元可通过硬件和软件实现感知—分析—决策—执行的数据闭环。

2. 智能系统

智能系统是指多个智能单元的集成，实现更大范围、更广领域的自动流动，提高制造资源配置的广度、精度和深度，包括制造装备、生产单元、生产线、车间、企业等多种形式。

3. 系统之系统

系统之系统是多个智能系统的有机整合，通过工业互联网和智能云平台，实现跨系统、跨平台的横向、纵向和端到端集成，构建开放、协同与共享的产业生态。一方面是制造系统内部的“大集成”。企业设备层、现场层、控制层、管理层、企业层之间的设备和系统集成，即纵向集成；另一方面是企业与企业之间基于工业物联网与智能云平台，实现集成、共享、协作和优化，即横向集成，是制造系统外部的“大集成”。另外，还包括制造业与金融业、上下游产业的深度融合形成服务型制造业和生产性服务业共同发展的新业态。

三、智能制造总体架构比较分析

近年来，在推进智能制造发展过程中，世界各国研究机构先后提出了相关的技术体系架构[5]，如美国工业互联网联盟发布“工业互联网参考架构(IIRA)”，德国电工电子与信息技术标准化委员会发布“工业4.0参考架构模型(RAMI4.0)”，日本工业价值链促进会发布“工业价值链参考架构

(IVRA)”，中国国家智能制造标准化总体组发布的“智能制造系统架构”，与这些系统参考架构相比较，可以更清晰地认识智能制造总体架构的基本特征。

(一) 技术维度比较

智能制造总体架构技术维度反映了以两化融合为主线的智能制造技术变迁，体现了技术可扩展性，与工业互联网参考架构具有相似性。工业互联网参考架构是建立在具体应用领域和相关利益群体上描述惯例、原理和时间、活动的系统框架[6]，为其他领域架构提供了一个基础的架构框架，可以扩展并相互参照。智能制造总体架构同样是在宏观视角构建的制造总体发展架构，具备跨产业广泛适用性和互操作的特性。

(二) 价值维度比较

智能制造价值维反映了以制造为主体的智能制造价值的实现形式。智能制造总体架构与工业4.0参考架构模型[7]都描述了制造产品全生命周期及其相关价值链。工业4.0参考架构模型的核心是智能生产技术和智能生产模式，旨在把产品、设备、资源和人有机地联系在一起，推动各个环节数据共享，实现全生命周期和全制造流程的数字化。智能制造总体架构聚焦制造业价值链全生命周期的数字化，并且在战略规划和对新技术应用的敏感性方面，更加全面地包括了网络和智能化发展的范式，具有更强的先进性和广泛适应性。

(三) 组织维度比较

智能制造组织维反映了以人为本的智能制造组织体系扩展。智能制造总体架构组织维借鉴了日本工业价值链[8]以及中国智能制造系统架构[9]。智

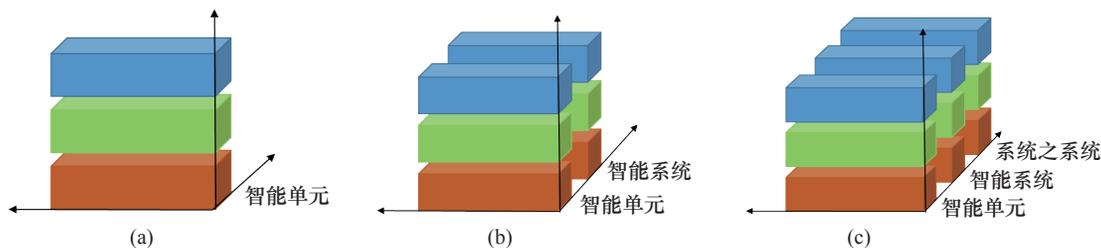


图 4 智能制造总体架构组织维分解示意图

智能制造总体架构组织维提出智能单元、智能系统和系统之系统三个层次，旨在帮助企业通过构建最基本的制造单元，从而一步一步实现智能车间、智能工厂、智能企业，最终构建智能企业集群、区域集群，进而扩展到全国惠及大中型企业和中小微企业协同发展，并行推进数字化、网络化、智能化，最终实现制造业企业的整体转型升级。

总的看来，如果说美国、德国、日本研究提出的智能制造参考架构模型主要聚焦于制造业的高端产业和高端环节，那么本研究提出的智能制造总体架构的着眼点在于中国整个制造业转型升级的整体规划，尤其是结合中国制造业发展不平衡不充分的实际现状，提出数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造三种基本范式迭代进化，强调当前中国智能制造发展必须坚持并行推进、融合发展，不但针对传统制造业改造升级有指导意义，而且对制造业未来的发展和技术的引领有着更远的规划 [10]。未来的制造业发展不仅仅是实现产品全生命周期和制造全流程的数字化，端到端链接万物互联的网络化，而且要实现整个制造业在新一代人工智能引领下的智能化发展。

四、结语

《中国制造 2025》明确提出，要以新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。站在科技和产业变革与国家转变经济发展方式的历史交汇点上，中国迫切需要制定大力发展智能制造的技术路线和发展战略，走出一条和西方发达国家不同的推进路径，加快推进中国制造智能转型，进而实现我国由制造大国向制造强国的转变。

面对智能制造不断涌现出的新技术、新理念、

新模式，有必要归纳总结出相应的总体架构，进而指导政府、企业发掘和探索新技术，应用新的理念和模式，从而在产业革命与技术革命的历史交汇点，抓住机遇，更好、更快地实现中国制造业的智能转型和优化升级。智能制造总体架构的提出，有望为国家的未来规划、企业的发展指出明确的技术路线，也为中国智能制造与世界各国的制造标准对接提出了清晰的方案。

参考文献

- [1] “新一代人工智能引领下的智能制造发展战略研究”课题组. 中国智能制造发展战略研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2017. The Research Group for Research on Intelligent Manufacturing Development Strategy by New-Generation Artificial Intelligence. Research on intelligent manufacturing development strategy in China [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2017.
- [2] 王松. 构建智能制造系统参考架构的几点思考[J]. 智慧中国, 2016 (9): 43-45. Wang S. Considerations on building the reference frame of intelligent manufacturing system [J]. Wisdom China, 2016 (9): 43-45.
- [3] 韦莎. 智能制造系统架构研究 [J]. 标准化研究, 2016 (4): 50-54. Wei S. Research on intelligent manufacturing system architecture [J]. Standardization Research, 2016 (4): 50-54.
- [4] Pan Y H. Heading toward artificial intelligence 2.0 [J]. Engineering, 2016, 2(4): 409-413.
- [5] 王春喜, 王成城, 汪烁. 智能制造参考模型对比研究 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2017 (4): 1-7, 42. Wang C X, Wang C C, Wang S. Comparative study of intelligent manufacturing reference model [J]. Instrument Standardization & Metrology, 2017 (4): 1-7, 42.
- [6] 美国通用电气公司. 工业互联网 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015. General Electric Company. Industrial Internet [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [7] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J, et al. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry [R]. The Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion, 2013.
- [8] Industrial Value Chain Initiative. Industrial value chain reference

- architecture (IVRA) [R]. Tokyo: Industrial Value Chain Initiative, 2016.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部, 国家标准化管理委员会. 国家智能制造标准体系建设指南 (2015 年版) [R]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 国家标准化管理委员会, 2015.
Ministry of Industry and Information Technology of the PRC, Standardization Administration of the PRC. National intelligent manufacturing standard system guide(2015) [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the PRC, Standardization Administration of the PRC, 2015.
- [10] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1): 11–20.