

智能制造关键使能技术发展及应用*

李伟^① 海本禄^② 易伟^①

(^①深圳国策信息服务有限公司,广东 深圳 518000;^②青岛大学商学院,山东 青岛 266071)

摘要: 信息通信技术对传统制造企业产生深远影响,催生智能制造生态系统范式。企业向智能制造范式转型,可从生命周期及价值链、制造层次结构和物理系统功能等三维度部署和实施。智能制造关键使能技术一般涵盖工业物联网、云计算、大数据、计算机仿真、增强现实、增材制造、水平和垂直系统集成、自主机器人和网络安全等九大技术。文章对上述关键使能技术进行梳理与综述,并分析其在智能制造领域应用的最新进展。

关键词: 信息通信技术;智能制造;使能技术

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2020.04.003

Development and application of key enabling technologies for smart manufacturing

LI Wei^①, HAI Benlu^②, YI Wei^①

(^①Shenzhen National Policy Information Service Co., Ltd., Shenzhen 518000, CHN;

^②Business School, Qingdao University, Qingdao 266071, CHN)

Abstract: ICT has had a profound impact on traditional manufacturing companies and leads to smart manufacturing ecosystem paradigm. The enterprise can deploy and implement in three dimensions including life cycle & value stream, manufacturing hierarchy, and physical system functions to transform into smart manufacturing paradigm. Smart manufacturing key enabling technologies generally cover nine technologies including industrial internet of things, cloud computing, big data, computer simulation, augmented reality, additive manufacturing, horizontal and vertical systems integration, autonomous robots and cybersecurity. This paper sorts out and summarizes these enabling technologies, and analyzes their latest applications in smart manufacturing domain.

Keywords: ICT; smart manufacturing; enabling technologies

自2011年以来,世界各国制造业发展战略纷纷出台,旨在正在利用各项使能技术,创造新的商业模式和新的制造方式,推进工业产业智能化转型升级^[1]。具体在生产制造领域的战略实践而言,基于异构数据和知识集成的信息物理系统(CPS)的生产方式不断进步,可互操作、集成、适应、优化、面向服务的智能化制造水平不断提升,与算法、大数据、物联网、工业自动化、网络安全、云计算或智能机器人等高科技的相关性日益紧密。当前,企业智能制造发展路径日益明晰,相关使能技术已取得飞速进步,因此有必要明确智能制造发展模型,并厘清相关关键使能技术的发展及应用现状和趋势。

1 企业智能制造发展路径

企业向智能制造范式转型,可以从生命周期及价值链、制造层次结构和物理系统功能等三维度,进行部署和实施^[2]。

其一,企业生命周期及价值链维度。企业产品生命周期划分为设计开发和样机研发阶段、实际实现阶段,两阶段各自都有资产的使用、维护、优化,并且相互间有反馈形成闭环。价值链的数字化进程,就是把采购、订货计划、装配、物流、维护、供货商和客户等各个方面都数字化链接在一起,会产生巨大的改善潜力。

其二,企业的制造层次结构维度。按照企业信息

* 国家社科基金重点项目“基于伙伴竞合关系的标准联盟企业知识管理策略选择机制研究”(18AGL005)

集成国际标准的功能层级划分,最底层为“产品”层,最顶层为“互联世界”层,由此形成产品、现场设备、车间/工段、工厂、企业、互联世界五项层级。其中“互联世界”即是使用 IoT 和 IoS 连接企业、客户和供应商,形成跨企业协同制造关系,实现智能制造企业环境的最后阶段。

其三,企业物理系统功能维度。按照 IT 和通信技术常用方法,企业数字化所有方面自下而上划分为 6 个层级:(1)资产。表达物理部件和非物理部件等实体,物理部件如线性轴、机器人、传送带、可编程序控制器、金属部件、文档、档案等。非物理部件包括软件和思想。(2)集成。以计算机能够处理的方式提供资产的信息,对技术过程进行计算机辅助的控制。集成层包含与 IT 系统相链接的元件,如传感器、射频识别(RFID)读入设备、人机界面(HMI)和计算机辅助控制器等。(3)通信。用来处理通信协议,以及数据和文件的传输。具有通信标准化功能,利用统一的数据格式和预定义协议,为集成层的控制提供服务。(4)信息。将不同的可用数据一致地处理和集成为有用的信息,不仅通过服务接口提供结构化的数据,还要接收事件,并把它们转换为将在“功能层”使用的相匹配的数据。(5)功能。关于所实现功能的正式描述,并创建可以远程访问、确保数据完整性的多功能的横向集成平台,支持业务过程的运行期和建模环境的服务,以及承担各种应用和技术功能性的运行期环境。(6)经营业务。支持映射业务模型和连接不同业务模型,并保证价值链功能的完整性。

2 智能制造关键使能技术

各国制造业发展战略以智能制造为主导,核心内容就是通过高度发达的自动化和数字化流程、电子和 IT 技术进行制造和服务。从生产和服务管理的角度来看,智能制造范式专注于建立智能和通信系统,如机器到机器和人机交互,处理来自智能和分布式系统交互的数据流,提升了制造的自主互操作性、灵活性、敏捷性和生产效率^[3]。智能制造关键使能技术一般涉及以下 9 个方面。

2.1 工业物联网

Internet 是全球系统,使用 TCP/IP 为全球用户提供计算机互联网络;Things 是任何人和物。物联网(internet of things, IoT)作为二词的组合,即“万物相连的互联网”,是借助互联网技术,实现在任何时间、任何地点,物与物、物与人的互联互通,当前已广泛应用于物流仓储、医疗保健以及公用事业中。物联网可

以通过 RFID、无线传感网络(WSN)、中间件、云计算、物联网应用软件和软件定义网络(SDN)等关键技术来实现^[4]。根据《工业物联网白皮书(2017版)》定义,工业物联网(industrial internet of things, IIoT)是通过工业资源的网络互连、数据互通和系统互操作,实现制造原料的灵活配置、制造过程的按需执行、制造工艺的合理优化和制造环境的快速适应,达到资源的高效利用,从而构建服务驱动型的新工业生态体系^[5]。具体而言,工业制造环境下,IIoT 需要确保实时数据可用性和高可靠性,并通过大数据分析及优化,调整生产模式,提高生产效率。根据物联网的自然演化趋势,工业物联网最终将迈向服务互联网(IoS),即围绕创造价值服务的所有人和物的互联互通,从而形成智能工厂(SF)的重要基础^[6]。

2.2 云计算

云计算(cloud computing, CC)是一种按使用量付费的模式,这种模式提供可用的、便捷的、按需的网络访问,进入可配置的计算资源共享池^[7]。一般而言,CC 包括公共云、私有云、混合云和社区云四种访问类型,包括基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)、软件即服务(SaaS)、一切皆服务(XaaS)四类服务模式^[8]。在制造环境中,云制造(cloud manufacturing, CMfg)概念被热议,即利用 CC 技术,改进当前制造系统,使用户能够从产品生命周期的所有阶段(包括设计、制造、管理等)获取服务,将制造方法从生产导向转向服务导向。CMfg 模型一般包括提供者、运营商和客户三类利益相关者,综合利用了 CC、BD、IoT、CPS、网络化制造、面向服务制造、虚拟制造和虚拟企业等理论,实现和支持合作,共享和管理制造资源(如企业的制造能力、设备、应用程序、软件工具、技术诀窍等),支持推荐和执行、智能映射和服务搜索,并可以提供可扩展、灵活且经济高效的解决方案^[9]。总之,CMfg 是一种基于知识的制造范式,模型、标准、协议、规则和算法等知识,在整个产品生命周期中的作为服务生成、管理和应用。

2.3 大数据

来自不同类型的巨量的结构化、半结构化和非结构化数据形成了大数据(big data, BD)。这些巨量数据只有通过先进的技术来实现信息获取、存储、分配、管理和分析,才能为万物互联时代的工业发展带来价值机会。与传统的数据处理不同,BD 表现出 volume(大量性)、velocity(高速性)、variety(多样性)的 3V 特征,另外一些学者还总结了其他维度,如 veracity(真实性)、vision(视野性)、volatility(易变性)、verification

(验证性)、validation(确认性)、variability(可变性)和value(价值性)等特征^[10]。在制造领域, BD 可以为整个产品生命周期内的相关生产活动提供系统指导, 实现流程的低成本和无故障运行, 并帮助管理人员做出决策。借助 CC 技术, 并通过如机器学习、预测模型等高级分析工具, 分析和挖掘离线和实时数据, 从巨大的数据中提取知识, 使企业能够了解产品生命周期的各个阶段, 可以帮助企业采取更加理性、信息充分和反应迅速的决策方式。在制造企业层级构建框架中, 从机器设备和操作者生成 IoT 数据是 BD 分析的源头信息, CC 提供了 BD 分析的 IT 基础设施^[11]。

2.4 计算机仿真

为了成功实施数字化制造, 计算机仿真是不可或缺的强大技术工具。仿真建模通过开发复杂的多功能产品, 深入了解复杂系统, 并可以在实际实施之前测试新概念或系统、资源配置和新操作, 从而可以在不干扰实际运行系统的情况下收集信息和知识^[12]。仿真建模允许实验验证产品、过程或系统设计和配置, 有助于制造业企业降低成本、缩短开发周期并提高产品质量, 有效支持运营和决策。在制造系统中, 仿真一直在设计评估、操作过程性能评估中发挥着重要作用。前者的应用主要包括设施布局、系统容量配置、材料处理系统、柔性制造系统和蜂窝制造系统等; 后者主要包括制造运营计划和调度、实时控制、运行策略和维护操作等方面。近年来, 虚拟现实(VR)技术在仿真的应用, 使得制造工厂的高保真模拟——虚拟工厂(VF)成为现实; 数字孪生(DT)技术将仿真扩展到所有产品生命周期阶段, 实现在不同制造系统模式、流程和产品上的实验和验证^[13]。

2.5 增强现实

增强现实(augmented reality, AR)是将虚拟信息放在现实中展现, 并且让人和虚拟信息进行互动的技术^[14], 当前被广泛应用于娱乐、营销、旅游、外科、物流、制造等领域。相对传统硬件, AR 具有更大的成本优势, 并提供动态实时信息, 在模拟、辅助和指导制造过程中, AR 已被证明是一种有效解决问题的技术。例如在制造过程控制中, 生产监测实时报告中使用了 AR, 通过监控 Cpk 索引来支持质量数据报告; AR 系统与质量数据分析(QDA)软件相关联以接收数据, QDA 软件生成报告并将其自动导出到 AR 应用程序中, 对照关键性能指标 KPI^[15]。在产品诊断维护过程中, 可以通过手持显示器进行产品缺陷检查和 3D 映射, 并反馈至平板电脑移动设备端。

2.6 增材制造

增材制造(additive manufacturing, AM)是指基于离散-堆积原理, 由零件三维数据驱动直接制造零件的科学技术体系^[16]。AM 是一种支持新产品、新商业模式和新供应链的使能技术, 内涵上包括快速原型、固体自由形式制造、层制造、数字制造或 3D 打印等, 在各产业应用愈加广泛。AM 取代许多传统制造工艺的潜力优势, 如直接从 CAD 数据文件制造零件、无需额外工具或制造成本的大规模定制、制造复杂几何形状、制造空心零件或晶格结构、“零浪费”方法的材料高利用率、按需制造和出色的可扩展性等^[17]。下一代 AM 工艺, 如微/纳米级 3D 打印、生物印刷和 4D 打印(AM 与智能材料的组合)等技术应用均在不断推进中。

2.7 水平和垂直系统集成

智能制造的系统集成有水平和垂直系统整合(horizontal and vertical systems integration)两种方法, 以实现实时数据共享, 为形成智能工厂(SF)奠定基础^[18]。水平集成是企业间集成, 是几家企业之间密切协作的基础, 利用信息系统丰富产品生命周期, 在同一价值创造网络中基于工业标准创建互联生态系统, 从而实现数据或信息的交换。而垂直整合是企业内部整合的网络化制造系统, 是企业层级不同层面(如企业规划、生产调度或管理)之间交换信息和协作的基础。垂直整合将整个组织内的所有过程数字化, 通过实时可用的质量管理、过程效率或操作规划等方式, 以高水平 and 灵活的方式提供小批量生产和定制化产品^[19]。

2.8 自主机器人

当前, 制造范式正在迅速从大规模生产转向定制化生产, 企业生产必须灵活适应更广泛的产品变化, 因此需要自主机器人(autonomous robots)技术支持。自主机器人将微处理器和人工智能(AI)与产品、服务和机器相结合, 使制造相关的计算、通信、控制、自治和社会性的能力得以实现^[20], 具有 AI、自适应和灵活的机器人可以促进不同的产品制造, 从而提供降低的生产成本。产品开发、制造和组装阶段等过程, 自主机器人可以自己决定在不断变化的环境中执行而无需操作员的交互; 非结构化环境中的恶劣危险场景下的工业应用, 可以通过自主工业机器人或与人密切合作来改进; 协作机器人(collaborative robots, Cobots)技术发展破除人机障碍, 为解决方案提供更大的可承受性和灵活性^[21]。

2.9 网络安全

随着越来越多的设施设备连接至互联网, 无生命的物体将成为主要的数据来源。物联网、虚拟环境、远

程访问和云存储数据等等的日渐普及, 不仅意味着越来越多的开放机会, 而且潜含着越来越多的新信息安全危机。网络安全(cybersecurity, CS)是适用于工业和物联网情境, 高水平信息安全的新术语, 泛指保护、探测和响应网络攻击的技术^[22]。IoT 必须基于制造过程中每个环节的安全通信来构建, 并且确保设施之间的安全互操作性, 这是实现供应链价值的基本前提。针对工业控制系统(ICS)的网络攻击会导致制造业务的瘫痪和关闭, 导致企业蒙受巨额经济损失; 某些潜在攻击方式, 例如篡改产品设计、制造过程文件或操纵过程/产品数据等, 均会延迟产品推出与投产。当前, 软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)技术应用可以帮助企业提高网络灵活性, 快速检测和临时替换故障系统。近年来, 深度防御观点日益被制造企业所接受, 从技术、组织和人三重维度构建安全 ICS 多层体系, 并强调系统级、网络级和工厂级的安全控制实施与更新^[23]。

3 结语

智能制造范式的核心是使生产制造系统更加灵活和协作, 其基础是先进自动化技术和 ICT 技术。当前, 智能制造进程不断推进, 本文所分析概括的九项关键使能技术是企业智能制造模式开展的技术推动力。工业环境中, 单项使能技术影响有限, 但协同实施将对产业影响巨大, 开启未来无限可能。所有关键使能技术的应用必须确保安全性, 网络安全技术的进步将为企业智能制造保驾护航。

参 考 文 献

- [1] 康佳立. 从工业 4.0 到社会 5.0——以德日两国相关发展战略的比较为例[J]. 科技管理研究, 2019(4): 19-24.
- [2] ZVEI. The reference architectural model industrie 4.0 (RAMI 4.0) [R/OL]. 2015-01-04[2019-05-01]. <https://www.zvei.org/en/subjects/industrie-4-0/the-reference-architectural-model-industrie-40-rami-40>.
- [3] Alcácer V, Cruz-machado V. Scanning the industry 4.0: a literature review on technologies for manufacturing systems [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019, in press, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.
- [4] Trappey A J C, Trappey C V, Govindarajan U H, et al. A review of essential standards and patent landscapes for the internet of things: a key enabler for Industry 4.0 [J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 33: 208-229.
- [5] 中国电子技术标准研究院. 工业物联网白皮书(2017版) [R/OL]. (2017-09-13) [2019-05-01]. <http://www.cesi.cn/201709/2919.html>.
- [6] LI S, XU L D, ZHAO S. 5G internet of things: a survey [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 1-9.
- [7] 中国信息通信研究院. 云计算发展白皮书(2018) [R/OL]. 2018-08-01[2019-05-01]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201808/>

t20180813_181718.htm.

- [8] 郭朝先, 胡雨朦. 中外云计算产业发展形势与比较[J]. 经济与管理, 2019(2): 86-92.
- [9] Alqaryouti O, Siyam N. Serverless computing and scheduling tasks on cloud: a review [J]. American Scientific Research Journal for Engineering Technology and Sciences, 2018, 40(1): 235-247.
- [10] Gandomi A, Haider M. Beyond the hype: big data concepts, methods, and analytics [J]. International Journal of Information Management, 2015, 35(2): 137-144.
- [11] Tao F, Qi Q, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 157-169.
- [12] Mourtais D, Papakostas N, Mavrilios D, et al. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015, 28(1): 3-24.
- [13] Cedeno J M V, Papinniemi J, Hannola L, et al. Developing smart services by internet of things in manufacturing business [J]. LogForum, 2018, 14(1): 59-71.
- [14] 侯颖, 许威威. 增强现实技术综述[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 1-7.
- [15] Segovia D, Mendoza M, Mendoza E, et al. Augmented reality as a tool for production and quality monitoring [J]. Procedia Computer Science, 2015, 75: 291-300.
- [16] 肖承翔, 李海斌. 增材制造技术与标准化最新进展[J]. 信息技术与标准化, 2015(6): 27-29.
- [17] Kim H, Lin Y, Tseng T L B. A review on quality control in additive manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(3): 645-669.
- [18] Wang X V, Wang L, Gordes R. Interoperability in cloud manufacturing: a case study on private cloud structure for SMEs [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 31(7): 653-663.
- [19] Wang S, Wan J, Li D, et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(4): 1-10.
- [20] Ben-ariARI M, Mondada F. Robots and their application [J]. Elements of Robotics, 2018(1): 1-20.
- [21] Hassan M, Liu D. Simultaneous area partitioning and allocation for complete coverage by multiple autonomous industrial robots [J]. Autonomous Robots, 2017, 41(8): 1609-1628.
- [22] Elhabashy A E, Wells L J, Camelio A, et al. A cyber-physical attack taxonomy for production systems: a quality control perspective [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018(2): 1-16.
- [23] Jasen C, Jeschke S. Mitigating risks of digitalization through managed industrial security services [J]. AI & SOCIETY, 2018, 33(2): 163-173.

第一作者: 李伟, 男, 1981 年生, 博士, 经济师, 深圳国策信息服务有限公司董事长, 研究方向为技术创新战略与政策, 已发表论文 15 篇。

(编辑 高扬)

(收稿日期: 2019-05-27)

文章编号: 20200408

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。