

DOI: 10.3901/JME.2018.16.011

面向服务的智能制造*

陶 飞 戚庆林

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100083)

摘要: 新一代信息技术(如物联网、大数据、云计算、数字孪生等)与制造的融合发展,促使各制造强国纷纷出台各自的先进制造发展战略,如美国的“工业互联网”和德国的“工业4.0”等。同时,在“制造强国”和“网络强国”大战略背景下,我国也先后出台“中国制造2025”和“互联网+”等制造业国家发展实施战略。其共同主题之一是结合和使用新一代信息技术和人工智能技术,实现制造的物理世界和信息世界互联互通与融合,最终实现智能制造。同时,服务也被各制造强国共同列为实现智能制造的关键技术内容之一。智能服务已成为产业模式变革的核心,制造业的服务化趋势日益凸显。在分析总结智能制造的发展趋势和典型特征基础上,结合新一代信息技术与服务思想,探索提出了面向服务的智能制造(Service-oriented smart manufacturing, SoSM),设计了SoSM的实施架构,讨论了SoSM的内涵、关键实施技术与未来研究方向。

关键词: 智能制造;制造服务;面向服务的智能制造;新一代信息技术

中图分类号: TH16

Service-oriented Smart Manufacturing

TAO Fei QI Qinglin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: With the integration of New IT (e.g., Internet of Things, big data, cloud computing and digital twins, etc.) and manufacturing, a number of countries had put forward their national advanced manufacturing development strategies, such as Industrial Internet in the U.S. and Industry 4.0 in Germany, etc. At the same time, under the background of building "manufacturing power" and "network power", China has also successively introduced the manufacturing development strategies, namely "Made in China 2025" and "Internet +". One of the common core ideas of various manufacturing strategies is to achieve smart manufacturing, and the common means is to integrate the physical and cyber worlds of manufacturing through New IT and artificial intelligence technology. In addition, service is also listed as one of the key contents for smart manufacturing by various national advanced manufacturing development strategies. Since smart service has become the core of the industrial pattern innovation, service-oriented manufacturing is getting more and more attentions. Therefore, on the basis of analyzing and summarizing the development trend and important characteristics of smart manufacturing, integrating the idea of New IT and services, service-oriented smart manufacturing (SoSM) is proposed. Besides, the implementation framework of SoSM is designed, and the connotation, key implementation technologies and future research directions of SoSM are discussed.

Key words: smart manufacturing; manufacturing service; service-oriented smart manufacturing (SoSM); new IT

0 前言

随着物联网、云计算、大数据、数字孪生等新一代信息技术(New IT)和人工智能技术的快速发展及其与制造的不融合与落地应用,各制造强国纷纷提出了一系列国家层面先进制造战略,如美国的工业互联网^[1]和基于CPS(Cyber-physical systems, CPS)的制造或Cyber Manufacturing,德国工业4.0^[2],

中国制造2025和“互联网+制造”等^[3]。虽然提出背景不同,但是均异曲同工地表达了同一主题,即通过新一代信息技术融合制造的物理世界和信息世界,最终实现智能制造^[4]。向智能制造转型升级,已成为制造业发展的必然趋势。

随着制造业与服务产业的融合发展,一个不可忽视的趋势是制造的服务化。由于技术的进步,产品价值的降低,制造企业开始将产品服务附加到物理产品上以提高产品价值。甚至一些企业将业务外包以降低成本、提高竞争力。尤其是面向服务的架构^[5]思想被提出后,服务化从产品扩展到了制造

* 国家自然科学基金资助项目(51522501)。20170809收到初稿,20180302收到修改稿

资源领域,产生了“制造即服务”的概念。各类分散制造资源和能力的服务化为社会化的集成、分享和使用提供了可能。同时,服务行业也开始为制造企业提供专业化的产品全生命周期服务,如产品设计服务、物流运输服务、维护维修服务等^[6]。

自 20 世纪中叶,现代电子信息技术出现,制造与信息技术的融合就从未停止。信息技术的进步不断地推动制造业向着更加灵活、高效、节能、智能的方向发展。据国际生产工程学会的论著总结,所涌现的先进制造系统和先进制造模式已达 30 多种^[7],典型的包括计算机集成制造^[8]、虚拟制造^[9]、敏捷制造^[10]、网络化制造^[11]、全球制造^[12]、制造网格^[13]、工业产品服务系统^[14]、云制造^[15]等。这些制造模式有效地提高了企业的信息化程度和核心竞争力,适应了激烈的市场竞争环境。

然而,随着新一代信息技术的快速发展,世界经济进入网络化经济时代。这给现有的各种制造模式带来巨大的挑战。首先,市场需求不断变化,产品更新速度不断加快,客户定制化生产方式迅速发展,导致制造过程与组织的分散化、网络化。这要求制造企业积极开展网络化和国际化的协作。其次,产品种类的增多、功能的增强、交货时间的缩短,要求制造企业不断缩短产品研发周期、提高产品质量、改进生产方式和方法,实施智能化的制造。再者,经济效益与环境效益的均衡越来越受到重视,绿色制造要求从产品设计阶段开始就要考虑资源和环境问题,通过绿色工艺,绿色材料以及严格、科学的管理,使得环境影响最小、资源能源利用效率最高。在制造智能化和服务化发展的趋势下,如何融合和使用新一代信息技术,开展智能生产和精准管控,满足网络化、服务化、社会化、智能化和绿色化的制造发展需求,是当前国内外制造业发展面临的共同挑战。综合应对这一系列的挑战需要新的智能制造模式。

结合新一代信息技术与面向服务的思想,本文探索提出面向服务的智能制造,借助服务沟通制造的物理和信息世界,使分散的制造资源和能力彼此协作来完成不同的制造任务,实现网络化、服务化、社会化、智能化和绿色化的生产。

1 从制造到智造

1.1 制造与 IT 的融合发展

第二次世界大战期间,战争的需要催生众多科学技术。战后,这些科技的进步极大地促进生产力的发展^[16]。尤其在制造领域,电子信息技术与计算机技术的出现和迅猛发展为制造业注入新的活力。

如图 1 所示,自 1946 年第一台电子计算机 ENIAC 问世,IT 技术就不断地驱动着制造信息化的发展。20 世纪 50 年代,美国麻省理工成功研制第一台数控铣床,使制造业进入数控时代^[17]。自动化技术和相关设备的使用,极大地提高加工精度和生产效率。60 年代后,集成电路的发展催动计算机硬件不断更新换代。与此同时,为充分发挥硬件功能,计算机软件技术也迅速发展。随后,为了适应数据存储、处理、交换共享的需求,数据库、通信、网络技术等也蓬勃兴起,如 TCP/IP 协议、虚拟现实、局域网、万维网等技术相继出现。在计算机和网络技术应用的促进下,一批先进的制造技术和制造模式被提出并广泛应用,如计算机集成制造^[8]、虚拟制造^[9]、敏捷制造^[10]、网络化制造^[11]和全球制造^[12]等。进入 21 世纪,物联网、云计算、大数据等新一代信息技术(New IT)的兴起和迅猛发展,又给制造业带来深刻变革^[18]。New IT 成了推动产业变革的主要技术。New IT 与制造的融合带来一系列新的制造理念,如制造网格^[13]、IPS2^[14]、云制造^[15]等。并且,为了把握制造业发展新的机遇,世界主要制造业国家纷纷提出各自的国家先进制造战略,典型的有美国工业互联网、德国工业 4.0、中国制造 2025 等,其共同主题是智能制造。IT 技术与制造的不断融合加深了制造业的信息化程度,促进了多品种、小批量生产方式的发展,顺应了市场需求越来越多样化的趋势。

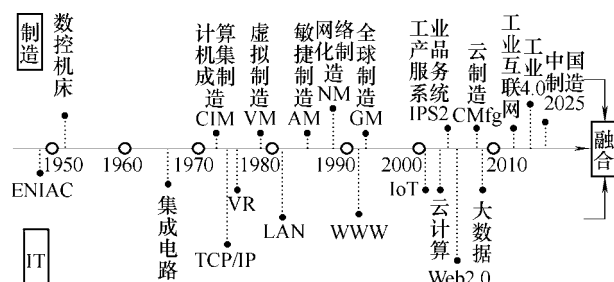


图 1 制造与 IT 的融合发展

如图 2 所示,制造与 IT 的融合发展可分为两个阶段。

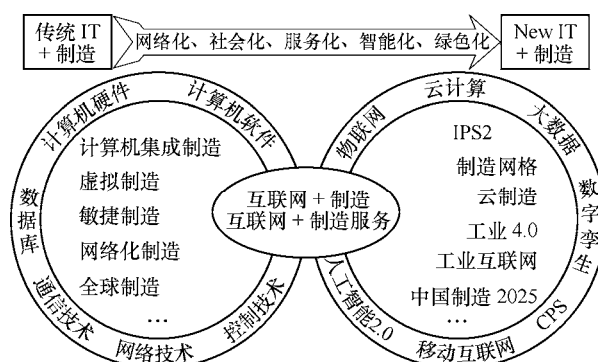


图 2 从传统 IT+制造到 New IT+制造

第一阶段是传统 IT 与制造的融合,即以网络技术为代表的传统 IT 不断与制造融合的过程。计算机软硬件、数据库、通信和网络技术的集成使用,使得制造企业内部以及企业之间的信息积累和管理更加方便、信息交流更加畅通,运转更加协调。自动控制技术则在制造自动化中起到了关键作用,提高了生产效率。计算机集成制造、虚拟制造、敏捷制造、全球制造等先进制造模式通过利用这些 IT 技术,促进了制造企业结构和资源配置的合理简化,以及生产、管理和经营模式的革新,从而以更低的成本、更快的速度生产出了质量更好、更符合市场需求的产品。

第二阶段是 New IT 与制造的融合,即借助新一代信息技术构建务联网,实现智能制造^[19]。物联网、云计算、大数据、人工智能等 New IT 使制造过程实现了海量数据的泛在感知和实时处理分析,帮助生产系统实现了决策优化。New IT 正在重构企业和用户之间的关系,以消费者为中心的个性化定制和按需制造已成为制造业主流。此外,New IT 还推动了制造业与服务业的融合创新,借鉴“服务”的理念,为制造中的所有用户提供产品制造所需的各种服务,实现了价值的延伸。New IT 已经渗透到生产制造的各个环节,并不断推动着生产方式向着网络化、社会化、服务化、智能化和绿色化转变。

(1) 在企业协同方面,制造的各环节向全面网络互联与协同发展(即网络协同化)。在市场需求快速变化的互联网时代,生产制造的各环节大量采用了互联网、通信网、物联网、移动互联网等网络技术,形成了制造业全价值链的全面互联。借助网络,不同的企业被连接起来,构成了最优的动态联盟,进行物质流、能量流与信息流的实时交换和动态重组,从而快速响应了顾客个性化的产品和服务要求^[20]。制造网络化使得制造各环节紧密协同,促进了生产、质量控制和运营管理协同和各种资源的共享与集成。

(2) 在制造资源/能力共享上,由企业内、企业间、跨区域企业间共享协作向全球化共享协作发展(即社会化)。随着产品性能和结构的不断复杂化,仅由单个企业完成整个产品的设计、制造和服务等所有的研制与生产活动已不可能,制造协作成为了不可避免的趋势。制造资源和能力的共享已经从企业内扩展到了企业之间,甚至是不同地区不同行业的企业间的资源共享^[21]。在全球化不断深化的趋势下,合作共赢的社会化资源共享,将会在 New IT 和平台化服务的支持下变为现实。

(3) 在价值创造上,由单纯的产品制造向“产

品+服务”和“制造即服务”的增值方式转变(即服务化)。单纯的产品制造位于“微笑曲线”的价值底端,而且随着 New IT 的引入,这部分的附加值也越来越低。服务作为重要的价值来源已经成为了制造业的重要发展趋势。一方面,制造商越来越多地利用“产品+服务”的形式增值产品^[22];另一方面,“制造即服务”的理念正不断被制造企业接受,制造资源、能力以及技术服务能通过服务实现优化和共享,从而让闲置资源产生价值^[23]。

(4) 在产品生产上,由机械的自动化生产走向了数据驱动的智能化生产(即智能化)^[24]。向智能化升级已成为制造业的必然趋势^[25]。与传统制造相比,智能制造关注数据的实时采集、汇总、处理和知识共享,以产生智能操作。New IT 的普及推动了企业与消费者直接交流,可精确地了解需求,并将客户需求反过来决定生产流程。此外,通过人、设备、产品之间的相互识别、互联互通,制造系统具备了数据泛在感知、智能分析、决策优化、人机协同和精准执行的能力。New IT 使得制造业可以智能地整合优势资源,并使制造的不同环节信息共享,实现智能化生产,增强了制造的灵活性和自适应性。

(5) 在环境影响方面,由污染/粗放型向清洁/节约/可持续型发展(即绿色化)^[26-28]。资源和环境问题对全球可持续发展的约束日益凸显,处于产业链中低端、高消耗、高排放的传统制造模式已难以为继。充分利用 New IT 推动资源综合利用,减少从设计、制造、使用到报废全生命周期对环境的影响,实现节能减排^[29]、绿色制造已成为制造业发展的潮流和趋势。制造的高效化和绿色节能将是制造业新模式区别与传统制造模式的重要标志。

1.2 智能制造

智能制造并非一个单一的概念,它既可以是智能制造技术、智能制造过程,也可以是智能制造系统或模式。目前,国内外还没有形成一种统一的、通用的、公认的智能制造的定义。从字面上理解,智能制造应包含“智能”和“制造”两部的含义。首先,《现代汉语词典》中解释智能为智慧和能力,即辨析、判断、发明创造的能力^[30];《辞海》中释义智能又称智力,包括在经验中学习或理解的能力,获得和保持知识的能力,迅速而又成功地对新情境作出反应的能力,运用推理有效地解决问题的能力等^[31]。其次,制造有狭义的制造和广义的制造之分,狭义的制造仅仅是指从原材料变成成品或者对零部件进行装配的制造加工环节;而广义的制造不仅包括了制造加工环节,还包括从市场分析、产品设计

到质量监控、物流运输、产品营销、售后服务直至产品报废回收等产品全生命周期过程^[32]。智能制造应该是含义更广泛的广义的制造。从以上两个方面看,工信部组织专家给出的描述性定义是一个比较全面的定义即“智能制造是基于物联网、云计算、大数据等新一代信息技术,贯穿设计、生产、管理、服务等制造活动各个环节,具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称”^[33]。

根据上述定义,智能制造的智能化是在泛在感知、高性能计算、人工智能、网络技术的基础上,通过泛在感知、计算分析、优化决策、控制执行的闭环反馈循环中实现的。如图3所示^[18],在新一代信息技术的支持下,实现智能制造需要经过以下四个步骤^[18]。

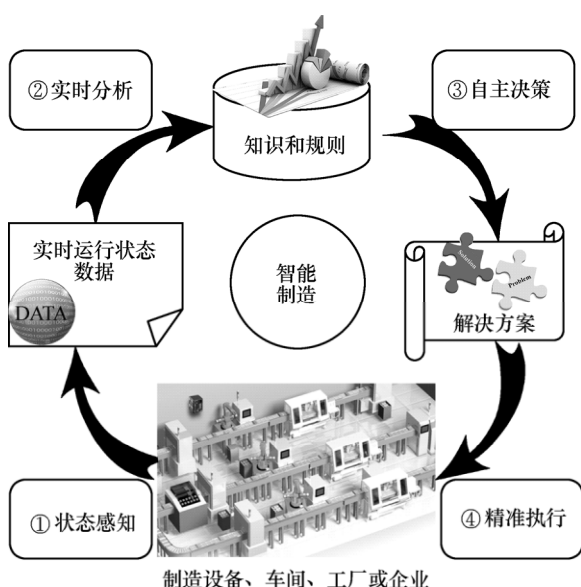


图3 智能制造流程

(1) 实时感知。智能制造需要以事实为依据进行决策,采取行动,因此,对设备、车间、企业,甚至制造系统运行状态进行实时、准确的信息采集和自动识别是智能制造的第一步。

(2) 实时分析。智能从数据中来,但数据不是智能,对所获取的实时状态数据进行快速、准确的提炼挖掘、计算分析,才能从大量的数据中抽取自主决策所需的知识。

(3) 自主决策。产品全生命周期过程中,不可避免地总会出现各种各样的问题,智能的表现即是运用数据分析获得的知识进行推理和决策从而解决这些问题。

(4) 精准执行。当经过自主决策生成解决方法后,产品全生命周期过程中的人、机、物、环境等会自动地调整他们的状态,精准地执行解决方案的

指令以适应各种变化。

经过上述四个步骤的闭环循环,复杂制造系统不断自我学习,实现资源优化配置和智能生产。

此外,制造过程是根据设计方案将原材料或零部件在车间/工厂中经过生产加工,生成产品,并提供服务的产品全生命周期全过程。如图4所示,智能制造中包含了以下智能。

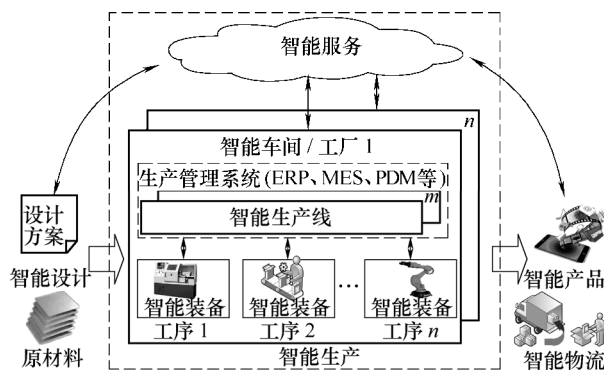


图4 智能制造中的智能

智能设计。智能设计利用图形化建模技术可快速、高效地自动化生成产品设计模型,并利用仿真技术模拟、分析产品设计模型的性能,论证产品可行性。

智能装备。智能装备可以自行监控自身的运行状态,并进行自主反馈,因此可以补偿加工误差,提高加工精度。此外,智能装备还能通过开放的数据接口,支持设备联网。

智能生产线。智能装备通过联网组成了智能生产线。智能生产线并非固定结构,其可以根据生产要求进行灵活的自动调整,从而支持多种产品的生产,满足了柔性的要求。

智能车间/工厂。多条智能生产线组成了智能车间,多个智能车间组成了智能工厂。在智能车间/工厂内,智能的设备、人、物料和信息系统彼此高度互联形成了一个有机的整体,提高了生产可控性。

智能管理。生产管理系统(ERP、MES等)可根据感知数据智能地监控生产状态和产品质量,并对各种制造资源进行优化,使其能够更有效地完成生产过程。

智能生产。原材料或零部件的附加芯片中记录了定制需求,并在生产过程中不断地记录各种数据直至产品成型。智能装备能够识别芯片中的信息,并智能地根据定制需求和工艺要求完成产品生产。

智能产品。嵌入了智能芯片的产品不断地采集数据并进行计算分析,为用户提供了各种智能应用。这些数据还可使制造、服务企业实时掌握产品的最新状态,从而为用户提供各种智能服务。

智能服务。智能服务既有产品服务，还包含生产性服务。在智能制造中，服务贯穿了产品全生命周期的各个环节和各项活动。

智能物流。智能物流包括了制造企业内、供应链间物料的智能运输以及产品的智能配送。供应商、制造企业、客户和物流企业之间的信息共享，实现了物流的精准配送、实时跟踪和溯源。

2 New IT 驱动的智能制造特征

New IT 驱动的智能制造实现了信息感知与互连的泛在化和移动化、信息处理的大数据化、资源与服务共享的开放化以及制造过程的智能化。如图 5 所示，在 New IT 与制造的融合过程中，智能制造呈现以下特征。

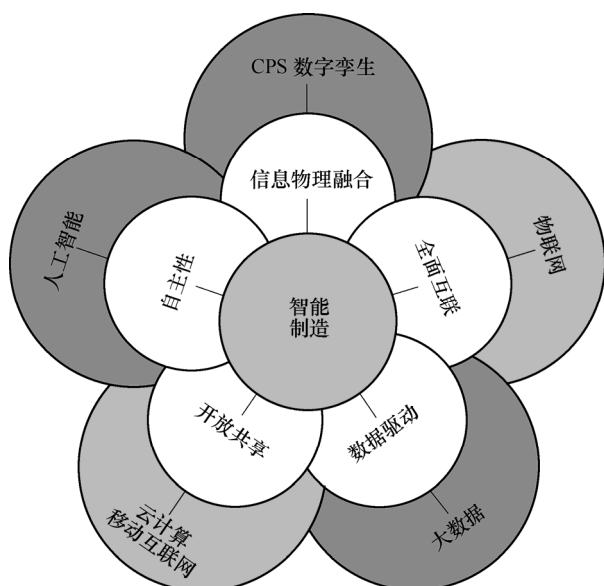


图 5 New IT 驱动的智能制造特征

(1) 信息物理融合。随着信息技术的发展及其在制造中的广泛应用，制造的物理世界和信息世界之间的交互不断加强，并不断地向实时交互与融合发展。制造已不再是单纯的物理机械加工，而是物理世界与信息世界通过相互反馈迭代影响的过程^[34]。借助信息世界高级的计算能力和实时分析能力，可对物理世界进行远程、可靠、实时、安全和高效的监测、协调与控制。物理世界与信息世界彼此依存，缺一不可。智能制造过程的实时分析与自主决策均在信息世界中进行，没有了信息世界，智能制造就没有了“大脑”。而所有制造活动最后都会落实到对实物的加工上，没有了物理世界，智能制造就缺失了“根本”。因此，信息物理融合是智能制造的必要条件。集成了计算、通信与控制功能的 CPS^[19]和虚实迭代交互优化的数字孪生^[4]的出现为制造信息物

理融合提供了技术基础。

(2) 全面互联。互联感知是智能制造的第一步^[35]。智能源于数据，数据来自互联感知。互联是为了打破制造过程中物质流、信息流和能量流的隔离，实现制造全要素、全业务、全流程的互联互通。智能制造时代，制造活动已不仅仅局限于某一工厂或企业内，而是所有人员、机器、物料、零部件、产品、平台、各级供应商以及成千上万的客户，协同参与产品生产、运营、管理的全过程。智能制造的全面互联包含了三个关键部分：制造企业内部的制造要素互联和应用互联；供应链上下游企业间的业务互联；跨越产品全生命周期的用户互联。物联网技术的成熟和应用为全面互联奠定了基础。通过物联网技术^[36]，任何需要监控、连接、交互的实体或过程的各种信息都可被实时感知，实现人、设备和系统之间的交互式无缝连接。

(3) 数据驱动。随着 New IT 向制造的不断渗透融合，制造数据的数量、种类和复杂性都在爆炸式增长，制造进入大数据时代^[24]。智能制造中，产品全生命周期所有活动都需要数据的支持并且产生大量的数据。这些数据已经渗透到生产经营的各个环节，为产品全生命周期用户提供了解客户、产品、设备、员工和制造流程所需的所有信息。由于蕴含了丰富的知识以及强大的预测能力，大数据促进了制造中各种智能应用，如基于大数据的个性化设计，大数据驱动的智能调度、过程优化、质量控制、故障预测、诊断、预防性维护等。制造大数据驱动制造走向了智能时代，为制造企业创造了新的潜力，特别是大幅提高了生产效率。

(4) 开放共享。随着制造的社会化趋势越来越明显，分散经营的社会化制造方式正在逐步取代集中经营的传统制造方式^[18, 21]。跨企业、甚至跨地区多企业间的协作，急需制造资源的开放和共享。市场的多边性和客户需求的多样化，要求企业具备生产多样产品的能力，然而，使企业购买满足多样化生产的所有制造资源是不现实的。制造服务打破了企业边界，实现了制造的资源社会化开放共享。企业能够以按需使用的方式充分利用外部优质资源进行协同生产，以满足顾客个性化的需求。云计算的分布式共享、平台独立性以及移动互联网地域分散性的特点，对分散制造资源服务化管理，异地请求和使用，提供了技术支持。

(5) 智能自主。制造过程中，经过一系列的知识提取、存储、融合及应用，智能制造具备了自主学习、自组织、自适应等自主性特征^[37]。智能是不断学习进化的过程，具有自学习能力的智能制造不断

地在制造迭代过程中进行学习以充实知识库。同时,智能制造还能够根据具体任务需求,自行组织运行结构,按照最优方式运行,并在下一个任务时重新自行组成新的结构。通过自学习和自组织,智能制造能够适应制造过程中的各种变化,从而具有抗干扰和容错能力。自适应能力能够根据对制造环境和运行状态的实时监测,智能地自行调整控制策略以适应干扰和变化,并能对系统进行故障预测和诊断,从而进行维护和修复。人工智能以对人类思维和智能行为(如学习、推理、决策等)的模拟,很好地促进了智能制造的智能自主性。

3 面向服务的智能制造

3.1 New IT 驱动下先进制造模式和战略的共性

服务化已成为了制造业发展的显著趋势,制造企业不断扩展他们的服务范围以获得更多的利润^[22]。服务的概念已由最初的产品附加服务扩展成了包含数据、技术、资源、能力等在内的广义概念。面向服务架构的思想^[5]以及“制造即服务”的概念,已被广泛应用到制造全生命周期各个环节。制造网格与云制造即是在此思想下被提出的。制造网格基于开放网格服务体系结构为制造业提供一个可扩展的资源共享和协同工作的环境,通过资源服务实现了异构制造资源的分布式共享和协同工作^[13]。在制造网格中,分布式、异构制造资源被封装成了服务,以通用的、标准的和规范的形式进行动态管理^[38]。李伯虎院士等^[39]提出的云制造融合了云计算、物联网、大数据等技术,是一种面向服务的智能制造新模式。在云制造中,各种制造资源和能力被虚拟化封装成制造服务,发布到云平台上进行统一、集中的优化管理和操作,并被用户按需使用^[15]。云制造中所有活动都是围绕着服务来进行的。在制造网格和云制造两种制造模式中,服务都起到了关键作用。

New IT 的迅速发展给全球工业技术体系、发展模式带来了重大变革,世界各主要制造强国纷纷提出了各自的先进制造战略。其中美国工业互联网非常注重具有先进计算和分析能力,低成本感知以及新型网络连接的高水平智能。它强调通过智能机床、先进分析方法以及人的连接,深度融合数字世界与机器世界,并通过服务来提升价值创造能力。工业互联网的核心在于智慧化和服务化。智能化能提高复杂条件下响应市场的能力,服务化可以使企业从差异化服务中获得更高附加值。德国工业 4.0 的目标是应用物联网、务联网、CPS 等来融合数字世界

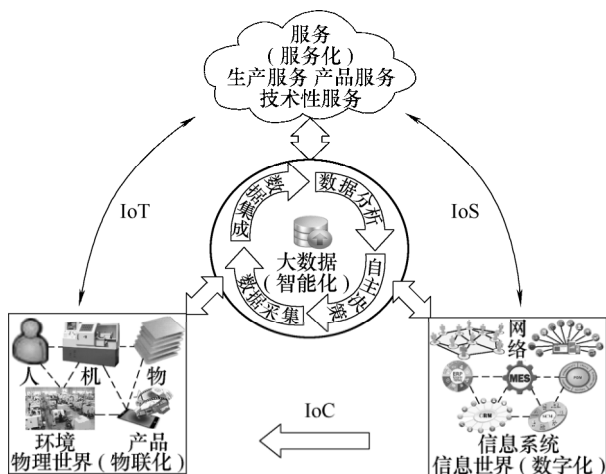
与物理世界,从而建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务生产模式^[40]。智能服务是工业 4.0 的一个重要内容,智能服务将状态感知、大数据分析等技术相结合,能改变现有的制造、使用和维护模式,引领制造更加智能化。此外,在中国制造 2025 提出的 5 项重点工程和九大战略任务中,明确积极发展服务型制造和生产性服务业,并将智能制造作为主攻方向。他们都不约而同地将智能制造作为主要目标,而且强调了服务在其中的重要作用。

在制造网格、云制造等先进制造模式,以及工业互联网、工业 4.0、中国制造 2025 等国家制造战略中,服务都被视为提高制造竞争力和增加利润源的关键。服务以其互操作性以及平台独立性的特点为大规模的企业协作提供了方便。通过服务,各类制造资源和能力能够以“现用现付费”的方式,方便地协同完成复杂的制造任务。因此,New IT 驱动下的不同制造模式和战略的共性可概括为面向服务的智能制造(Service-oriented smart manufacturing, SoSM)。

3.2 SoSM 的内涵

面向服务的智能制造是在新一代信息通信技术以及面向服务的技术支持下,一种面向服务和数据驱动的制造全要素、全流程、全业务全面互联,资源开放共享,制造过程自主优化,信息物理融合的智能化制造模式。面向服务的智能制造将分散的资源集中管理,集中的服务按需使用,为产品全生命周期用户提供了透明、可信的制造服务,满足了客户多样化、个性化、定制化的需求。在 SoSM 中,数据是核心,服务是手段,智能是目的。

SoSM 框架如图 6 所示,服务沟通了制造的物理世界和信息世界。在物理世界和服务之间,通过先进感知技术收集服务化封装所需的相关数据,并通过虚拟化和服务封装技术将制造资源和能力封装成服务。此过程的关键是实现各类制造要素的物联化。在服务和信息世界之间,通过各种信息手段按需使用服务,此过程的关键是实现制造资源和服务的数字化操作。最后,通过反馈,信息世界控制物理世界自动优化运行。在制造的物理世界和信息世界迭代交互过程中,大量数据产生。经过大数据采集、集成、分析挖掘和自主决策,实现了制造智能化。在四位一体的迭代过程中,物联网(Internet of things, IoT)负责制造资源的感知、互联和通信,以及制造服务的生成。务联网(Internet of services, IoS)负责制造服务的互操作和按需使用。控制联网(Internet of control, IoC)负责信息世界对物理世界的精准控制,使其自动执行。



在 SoSM 中,所有能为用户带来便利,并有助于产品价值创造的活动均可成为服务。考虑产品全生命周期^[22, 41],制造服务可大致分为三类。

(1) 生产相关的服务，主要是指与产品生命周期前端制造工艺和制造流程相关的服务，如咨询服务、设计服务、分析服务、制造资源/能力服务、加工工艺服务、测试服务等，这些服务用于将原材料或零部件加工或装配成最终产品。

(2) 产品相关的服务，主要是指与产品生命周期后端销售、使用、维护与回收等阶段为产品使用者提供的产品附加服务，如性价比分析、培训、物流、安装、调试、维护、维修、保养以及废弃产品回收、旧品再制造等服务，这些服务丰富了用户体验，增加了产品价值。

(3) 技术支撑服务，主要是指产品全生命周期各个环节提供技术支持的服务，如数据感知服务、数据管理服务、模型服务、算法服务、专家知识服务、金融服务等，这些服务确保了产品生命周期的顺利进行。

借助服务的虚拟性、互操作性和平台独立性等特性,制造系统能够以服务的方式方便地调用感知、分析、决策所需的各种设备、算法、模型等以及精准执行所需的制造资源和能力。这些服务可自组织成最优结构,精准地完成产品全生命周期过程中各项任务,并在运行过程中自主学习和适应各种状态变化,实现制造的智能化。

3.3 SoSM 模块化架构

根据 SoSM 的内涵和框架, SoSM 的体系结构如图 7 所示。该架构主要由制造的物理世界和信

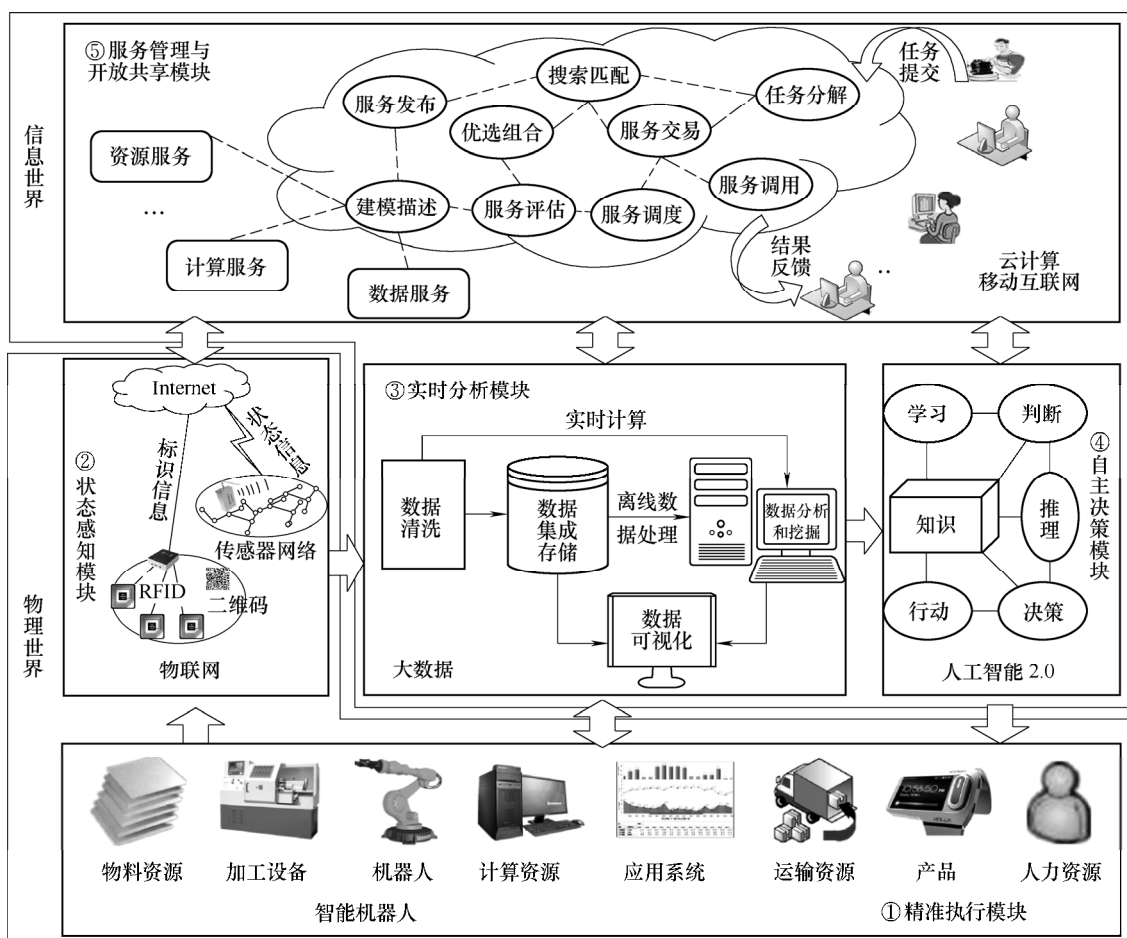


图7 面向服务的智能制造模块化架构

息世界两大部分组成,物理世界经由信息感知接入到信息世界,信息世界接受并处理来自物理世界的大量数据,并用于基于网络的各种应用和服务中,以控制或操作物理世界。在物理世界和信息世界的迭代交互中,SoSM 具备了状态感知、数据分析、资源共享、远程协调和精确控制等功能。

物理世界包括: 物理资源模块(精准执行模块)。该模块包含了制造的全生命周期中所涉及到的所有制造资源和能力,如人力资源(全生命周期的所有用户,如设计者、制造工人、企业管理者、物流运输者、维护人员、技术人员等)、制造加工资源(有硬件设备,如机床、机器人、计算机等,以及软件工具,如计算机辅助软件、各类应用系统、网络资源等)、物料资源(如原材料、零部件、半成品、产品、维护备件、物流设备等)。此外,还有影响产品加工进度、质量以及运行状态的环境因素(如温度、湿度、压力等)。该模块是所有制造活动的实际执行模块,这些制造资源和能力构成了产品全生命周期活动所需的“人-机-物-环境”,它们接收信息世界的控制指令,彼此密切配合精准执行分派的制造任务。

状态感知模块。该模块是由 RFID、二维码、各类传感器以及其他多源感知设备构成,主要对物理资源模块的各类要素进行标识识别和状态感知。物理资源产生的海量数据被有效采集和集成发送给实时分析模块进行大数据分析,并且物理资源被虚拟化以进行服务化封装,从而进行服务管理和开放共享。状态感知模块实现了各类资源的互联互通,连接了制造物理世界和信息世界。

信息世界包括: 实时分析模块。该模块负责分析、挖掘产品全生命周期中产生的大量数据。数据的处理和分析过程主要是从大量的数据中发现隐藏的规律或数据间的关系,从而将制造数据转化为知识。在进行数据分析之前,首先需要对数据进行清洗,以删除重复信息、纠正错误,并保证数据一致性。然后干净的数据被集成存储用于后续数据分析和挖掘。随后,通过机器学习、预测模型、统计过程控制等先进的分析工具,对实时数据或离线数据进行分析 and 挖掘,从大量动态而且模糊的数据中导出可理解的知识。以上过程所涉及到的存储、计算、模型、算法等都以服务的形式进行管理和调用。

自主决策模块。该模块负责根据知识和规则进行判断和推理,以决定采取何种策略进行智能操作。该模块主要是根据制造需求(如目标、任务等),对有限制造资源进行优化配置。当接到制造任务时,该模块会根据任务需求和目标约束执行智能优化算法,选择最佳的资源组合来完成任务。同时,

当运行过程发生变化时,该模块还可基于判定规则和知识判断、推理原因,并自主采取相应措施应对变化。该模块中,资源的调用、算法的选择、策略的制定等都是基于服务进行的。 服务管理与开放共享模块。该模块负责对产品全生命周期的所有服务进行管理以及各类用户对服务的共享。首先,对状态感知模块采集的物理资源的数据,实时分析模块和自主决策模块数据处理所需的计算、存储资源、模型、算法等信息进行建模描述、服务封装和发布。当用户提交一个任务后,任务被分解成能够被单个服务执行的子任务。然后,根据 QoS 约束进行制造服务供需匹配^[42],选择最优的服务,经过服务调度和服务交易后,调用相关服务完成任务请求。最后,服务执行的结果被反馈给用户。通过服务,扩展了智能制造的范围,更加灵活地实现了协同制造。

SoSM 体系架构体现了物联网、大数据、人工智能、云计算与移动互联网技术的融合。其中,物联网实现制造物理世界与信息世界之间的信息感知和互联互通。大数据分析打破了信息孤岛,挖掘了制造数据的潜在价值。人工智能延伸和扩展了人的智能,使能了制造的自主性。云计算和移动互联网以其分布式和广泛性的特点,为各种用户提供了全方位的服务和资源共享。

4 SoSM 未来研究展望

为了在理论和实践中取得长足发展,SoSM 需要在以下几个方面取得突破。

(1) 基于 CPS 与 Digital Twin 的制造信息物理融合。信息物理融合是智能制造落地应用所需解决的关键科学问题^[43]。基于 CPS 的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革^[3]。集成了计算、通信与控制于一体的 CPS 通过人机交互接口,使得信息空间能以远程的、可靠的、实时的、安全的、协作的方式操控物理实体^[44]。类似地,通过将物理实体的运行参数、实时状态反馈到数字世界, Digital Twin 构建或驱动虚拟模型来仿真物理世界,并通过虚拟方式进行判断、分析、预测和优化,最终指导物理实体对变化做出响应,改进操作,增加价值^[32,45]。作为实现信息物理融合的有效手段, CPS 与 Digital Twin 在产品设计与工艺规划、生产计划、制造执行到可靠运维等全过程中的应用理论与技术值得系统性的研究与探讨。

(2) 基于 IoT 的智能全要素动态感知与智能互联。智能制造的核心是数据,数据来自互联与感知。

虽然物联网、智能传感器、无线传感网络等已在制造领域得到了广泛的应用,在一定程度上实现了制造设备的网络化接入与智能化操作^[46],但仍存在车间要素互联不全(如人与设备、设备与设备、设备与物料、设备和环境、人-设备-环境等)、采集数据有限、制造装备物理和信息分离等不足,未能实现“人-机-物-环境”全要素的全面感知与互联^[35]。制造异构要素间的全面互联与融合理论、技术、协议与通用装置需要进一步地深入研究。

(3) 基于大数据的制造智能。制造数据的爆炸式增长给制造企业带来了前所未有的机遇和挑战^[47]。通过挖掘制造大数据中蕴含的丰富知识,建立决策模型,能给制造业企业带来更敏锐的洞察力,有助于提升生产效率和产品质量^[48]。然而,当前的相关研究主要集中于对物理感知数据的分析,但没实现“虚实交互”环境下制造全要素、全业务、全流程的数据集成与融合。因此,适合于“全要素、全业务、全流程物理信息数据融合”的大数据高效处理算法^[49]、模型和平台是未来的研究重点。

(4) 基于云服务和移动互联的制造资源、能力共享与优化配置。制造资源的共享是提高资源价值和利用率的有效途径之一^[50]。云服务是将用户所需的各类制造资源进行虚拟化和服务化,以服务的形式对制造资源进行集中管理,并通过移动互联对社会化用户开放共享,从而用户可以方便地按需使用各种制造资源^[51]。然而,基于云服务和移动互联的制造资源优化配置是个复杂动态的过程。研究面向不同行业、不同企业、不同用户、不同产品的服务共享模型和算法,对快速、灵活地响应用户需求有着重要的理论意义和实用价值。

(5) 基于新一代人工智能技术的制造过程智能决策与自主学习。受动态制造环境不确定性的影响,制造过程的复杂性和动态化趋势越来越凸显,制造系统面临着更加复杂、动态甚至有时甚至是混乱的行为^[52]。如何在动态复杂环境下高效地满足对高质量产品的需求,制造过程需要科学和智能的决策。此外,智能与学习密切相关,自主学习能力必将成为智能制造系统不可缺少的特征。人工智能为智能决策与自主学习提供了有效手段。人工智能技术能够在不同类型和来源的数据中发现高度复杂和非线性的模式,并将原始数据转化为特征空间,然后将其应用于检测、分类和预测,并通过重构分析,最后达到自主学习、自决策。因此,人工智能技术与智能制造的结合具有重要实践价值。

(6) 基于复杂网络的制造服务供需匹配。制造服务的供需匹配是实现制造资源和能力按需使用的关键问题之一^[53]。然而,目前对制造服务供需匹配的研究仅考虑了单一对象,或只针对供需静态映射,缺乏对供需同时动态变化的研究^[23]。环境复杂多变、制造资源状态不确定、任务需求动态变化、目标及约束多样性等制造复杂性和动态性增加了问题的求解难度。但是,复杂网络理论为供需匹配动态调度提供了新的工具^[54-55]。基于复杂网络的制造服务供需匹配研究将能弥补当前供需匹配研究在复杂动态匹配、动态演化等方面存在不足。

(7) 基于分享经济的制造效用均衡与按需使用。服务交易是价值创造的重要一步。服务交易需要服务的提供方、需求方以及管理方共同参与。然而,随着制造业越来越成为一个开放的动态环境,制造服务交易正变的越来越复杂。同时,参与各方的不同利益诉求(如需求方追求短期效益,提供方追求长期效益,而管理方根据条件追求长/短期效益),进一步加剧了服务效用均衡的瓶颈。因此,在分享经济环境下,考虑各方诉求,研究制造服务综合效用均衡对最大化服务价值具有重要意义。

(8) 基于人机协作的精准执行。智能装备(如机器人)将工人从一些沉重而危险的操作环境中解放了出来,以从事更高级的工作。然而,得益于人类无与伦比的灵活性和创造力,机器并不能完全取代人类。当单调、高度重复、危险的工作逐渐被智能装备取代时,人机协作也渗透到了各种制造活动中。人的推理与决策能力与智能装备的精准执行能力优势互补,能很好地保证制造性能^[56]。人与智能装备的和谐共存能使企业更加灵活的智能生产,从而更有效地生产多样化的产品。因此,人机协作在未来的智能制造中必将占据重要地位。

(9) 基于复杂网络的制造服务可靠协作。随着能够支持制造社会化^[21]与服务化的工业互联网平台的逐步应用,制造企业间通过制造服务开展分布式、动态、柔性协作,从而满足大规模不确定社会化需求是一种必然趋势。然而,在工业互联网平台的实际运营过程中,制造企业在开展制造服务协作时仍存在社会化协作关系不明、规模性协作模式多变、不确定需求驱动的随机协作行为难以预知和控制等问题。上述问题将严重影响制造服务协作可靠性及其协作效用。因此,基于复杂网络模型和理论构建制造服务协作网络模型、揭示制造服务协作机理、探讨制造服务协作可靠性和效用评估与提高机制等相关研究,将是制造企业能否参与并开展网络

化协同制造的重要前提。

(10) 基于服务组合的绿色制造。绿色节能是衡量智能制造的重要标志^[57]。推行绿色制造需要进行多项技术创新,如产品的能耗评估^[58-59]、绿色材料的优化选择^[26]、制造工艺的组合优化^[27]、故障产品部分/并行拆卸^[28]等。然而,目前能耗评估与制造绿色优化中存在着资源共享和使用率低、对用户技术要求门槛高等难题。服务化方法,如基于组合服务进行产品生命周期能耗评估及绿色优化,为解决上述难题提供了思路。

5 结论

New IT 的飞速发展,特别是其与制造技术的深度融合,给世界范围内的制造业带来了新的机遇和挑战。在物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的促进下,智能制造已成为世界各国制造业发展的共同主题。面向服务的架构和“制造即服务”的思想对实现智能制造具有的重大的推动作用。结合面向服务的思想和智能制造的概念,本文提出了面向服务的智能制造,阐述了其内涵和体系架构,并展望了未来的研究方向。本文只对面向服务的智能制造概念进行了初步探讨,后续将深化其理论基础、技术体系以及应用实践等相关内容。

参 考 文 献

- [1] ANNUNZIATA M ,EVANS P. Industrial Internet :pushing the boundaries of minds and machines[J]. General Electric , 2012(1-2) : 1-23.
- [2] KAGERMANN H , HELBIG J , HELLINGER A , et al. Recommendations for Implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 :Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 working group[M]. Berlin : Forschungunion , 2013.
- [3] 中国制造 2025 [EB/OL]. [2015-05-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [4] 陶飞,张萌,程江峰,等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统 , 2017 , 23(1) : 1-9.
TAO Fei , ZHANG Meng , CHENG Jiangfeng , et al. Digital twin workshop : A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2017 , 23(1) : 1-9.
- [5] ESPI-BELTRAN J , GILART-IGLESIAS V , RUIZ-FERNANDEZ D. Enabling distributed manufacturing resources through SOA : The REST approach[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing , 2017 , 46 : 156-165.
- [6] 李浩,顾新建,祁国宁,等. 现代制造服务业的发展模式及中国的发展策略[J]. 中国机械工程 , 2012 , 23(7) : 46-57.
LI Hao , GU Xinjian , QI Guoning , et al. Research on development mode of modern manufacturing services and its development strategy in China [J]. China Mechanical Engineering , 2012 , 23(7) : 46-57.
- [7] 朱剑英. 现代制造系统模式,建模方法及关键技术的新发展[J]. 机械工程学报 , 2000 , 36(8) : 1-5.
ZHU Jianying. New developments on system models , modeling methods and key technologies for modern manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2000 , 36(8) : 1-5.
- [8] YU C ,XU X ,LU Y. Computer-integrated manufacturing , cyber-physical systems and cloud manufacturing — concepts and relationships[J]. Manufacturing Letters , 2015 , 6 : 5-9.
- [9] OFFODILE O , ABDEL-MALEK L. The virtual manufacturing paradigm :The impact of IT/IS outsourcing on manufacturing strategy[J]. International Journal of Production Economics , 2002 , 75(1-2) : 147-159.
- [10] SANCHEZ L , NAGI R. A review of agile manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research , 2001 , 39(16) : 3561-3600.
- [11] 刘飞,雷琦,宋豫川. 网络化制造的内涵及研究发展趋势[J]. 机械工程学报 , 2003 , 39(8) : 1-6.
LIU Fei , LEI Qi , SONG Yuchuan. Connotation , state-of-the-art and research tendency of networked manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2003 , 39(8) : 1-6.
- [12] KARA S , MANMEK S , HERRMANN C. Global manufacturing and the embodied energy of products[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology , 2010 , 59(1) : 29-32.
- [13] TAO F ,ZHANG L ,NEE A. A review of the application of grid technology in manufacturing[J]. International Journal of Production Research , 2011 , 49(13) : 4119-4155.
- [14] MEIER H , ROY R , SELIGER G. Industrial product-service systems — IPS2[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology , 2010 , 59(2) : 607-627.
- [15] TAO F , ZHANG L , VENKATESH V , et al. Cloud manufacturing : A computing and service-oriented manufacturing model[J]. Proceedings of the Institution of

- Mechanical Engineers , Part B : Journal of Engineering Manufacture , 2011 , 225(10) : 1969-1976.
- [16] 黄光耀. 从世界视角看战后科技革命的历史影响[J]. 科学与社会, 2004(1) : 37-41.
- HUANG Guangyao. The historical influence of scientific and technological revolution after World War II : A global perspective[J]. Science and Society , 2004(1) : 37-41.
- [17] 叶佩青,张勇,张辉. 数控技术发展状况及策略综述[J]. 机械工程学报, 2015 , 51(21) : 113-120.
- YE Peiqing ,ZHANG Yong ,ZHANG Hui. Review on the Development and Strategies of CNC technology[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2015 , 51(21) : 113-120.
- [18] 周佳军,姚锡凡,刘敏,等. 几种新兴智能制造模式研究评述[J]. 计算机集成制造系统, 2017 , 23(3) : 624-639.
- ZHOU Jiajun , YAO Xifan , LIU Min , et al. State-of-art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2017 , 23(3) : 624-639.
- [19] TAO F , QI Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing : Framework and characteristics[J]. IEEE Transactions on Systems , Man , and Cybernetics : Systems , 2017 , Doi : 10.1109/TSMC.2017.2723764.
- [20] 尹胜,尹超,刘飞,等. 网状中心城市型区域网络化制造系统[J]. 计算机集成制造系统, 2011 , 17(2) : 281-288.
- YIN Sheng , YIN Chao , LIU Fei , et al. Networked manufacturing systems for netlike region with a central city[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2011 , 17(2) : 281-288.
- [21] TAO F , CHENG Y , ZHANG L , et al. Advanced manufacturing systems : Socialization characteristics and trends[J]. Journal of Intelligent Manufacturing , 2017 , 28(5) : 1079-1094.
- [22] PHUMBUA S , TJAHJONO B. Towards product-service systems modelling : A quest for dynamic behaviour and model parameters[J]. International Journal of Production Research , 2012 , 50(2) : 425-442.
- [23] 程颖,陶飞,张霖,等. 面向服务的制造系统中制造服务供需匹配研究综述与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2015 , 21(7) : 1930-1940.
- CHENG Ying , TAO Fei , ZHANG Lin , et al. Supply-demand matching of manufacturing service in service-oriented manufacturing systems[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2015 , 21(7) : 1930-1940.
- [24] TAO F , QI Q , LIU A , KUSIAK , A. Data-driven smart manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems , 2018 , Doi : 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.
- [25] 张存吉,姚锡凡,张翼翔,等. 从“ 数控一代 ” 到“ 智慧一代 ” [J]. 计算机集成制造系统, 2015 , 21(7) : 1734-1743.
- ZHANG Cunji ,YAO Xifan ,ZHANG Yixiang ,et al. From NC generation to wisdom generation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems , 2015 , 21(7) : 1734-1743.
- [26] TAO F , BI L , ZUO Y , et al. A hybrid group leader algorithm for green material selection with energy consideration in product design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology , 2016 , 65(1) : 9-12.
- [27] TAO F ,BI L ,ZUO Y ,et al. A cooperative co-evolutionary algorithm for large-scale process planning with energy consideration[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-The ASME Transactions , 2017 , 139(6) : 061016.
- [28] TAO F , BI L , ZUO Y , et al. Partial/parallel disassembly sequence planning for complex products[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-The ASME Transactions , 2018 , 140(1) : 011016.
- [29] 张雷,马军,符永高,等. 产品装配过程碳排放解算[J]. 机械工程学报, 2016 , 52(3) : 151-160.
- ZHANG Lei , MA Jun , FU Yonggao , et al. Carbon emission analysis for product assembly process[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2016 , 52(3) : 151-160.
- [30] 龚炳铮. 推进我国智能化发展的思考[J]. 中国信息界 , 2012 , 1 : 5-8.
- GONG Bingzheng. Thinking about advancing the development of intelligence in China[J]. Information China , 2012 , 1 : 5-8.
- [31] 智力-在线辞海 [EB/OL]. [2015-08-05]. [http : //www. xiexingcun. com/cihai/Z/Z1023.html](http://www.xiexingcun.com/cihai/Z/Z1023.html).
- [32] TAO F , CHENG J , QI Q , et al. Digital twin-driven product design , manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 2018 , 94(9-12) : 3563-3576.
- [33] 国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 智能制造[M]. 北京 : 电子工业出版社 , 2016.
- The Advisory Committee of National Manufacturing Power Construction Strategy , Strategy Consulting Center of the Chinese Academy of Engineering. Intelligent manufacturing[M]. Beijing : Electronic Industry Press ,

- 2016.
- [34] LEE J , BAGHERI B , KAO H. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters* , 2015 , 3 : 18-23.
- [35] TAO F , CHENG J , QI Q. IIHub : An industrial internet-of-things hub towards smart manufacturing based on cyber-physical system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , 2018 , 14(5) : 2271-2280.
- [36] ATZORI L , IERA A , MORABITO G. The internet of things : A survey[J]. *Computer Network* , 2010 , 54(15) : 2787-2805.
- [37] ZHANG Y , QIAN C , LV J , et al. Agent and cyber-physical system based self-organizing and self-adaptive intelligent shopfloor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , 2017 , 13(2) : 737-747.
- [38] TAO F , HU Y , ZHAO D. Study on manufacturing grid & its resource service optimal-selection system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 2008 , 37(9-10) : 1022-1041.
- [39] 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 Bohu , ZHANG Lin , WANG Shilong , et al. Cloud manufacturing : A new service-oriented networked manufacturing model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* , 2010 , 16(1) : 1-7.
- [40] HARRISON R , VERA D , AHMAD B. Engineering the smart factory[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* , 2016 , 29(6) : 1046-1051.
- [41] 韩江波. 服务型制造的全球管理变革及实现路径[J]. *技术经济与管理研究* , 2017(4) : 122-128.
- HAN Jiangbo. Managing change and realization path of service-oriented manufacturing[J]. *Technoeconomics & Management Research* , 2017(4) : 122-128.
- [42] TAO F , CHENG J , CHENG Y , et al. SDMSim : a manufacturing service supply-demand matching simulator under cloud environment[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing* , 2017 , 45 : 34-46.
- [43] 陶飞,程颖,程江峰,等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. *计算机集成制造系统* , 2017 , 23(8) : 1603-1611.
- TAO Fei , CHENG Ying , CHENG Jiangfeng , et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* , 2017 , 23(8) : 1603-1611.
- [44] KHAITAN S , MCCALLEY J. Design techniques and applications of cyber physical systems : A survey[J]. *IEEE Systems Journal* , 2015 , 9(2) : 350-365.
- [45] TAO F , ZHANG M. Digital twin shop-floor : a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. *IEEE Access* , 2017 , 5 : 20418-20427.
- [46] TAO F , ZUO Y , XU L , et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , 2014 , 10(2) : 1547-1557.
- [47] LI J , TAO F , CHENG Y , et al. Big data in product lifecycle management[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 2015 , 81(1-4) : 667-684.
- [48] QI Q , TAO F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0 : 360 Degree Comparison[J]. *IEEE Access* , 2018 , 6 : 3585-3593.
- [49] ZOU X , TAO F , JIANG P , et al. A new approach for data processing in supply chain network based on FPGA[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 2016 , 84(1-4) : 249-260.
- [50] TAO F , ZHANG L , LIU Y , et al. Manufacturing service management in cloud manufacturing : Overview and future research directions[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* , 2015 , 137(4) : 040912.
- [51] TAO F , CHENG Y , XU L , et al. CCIoT-CMfg : cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , 2014 , 10(2) : 1435-1442.
- [52] WUEST T , WEIMER D , IRGENS C , et al. Machine learning in manufacturing : advantages , challenges , and applications[J]. *Production & Manufacturing Research* , 2016 , 4(1) : 23-45.
- [53] CHENG Y , TAO F , ZHAO D , et al. Modeling of manufacturing service supply-demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 2017 , 45 : 59-72.
- [54] LI Y , TAO F , CHENG Y , et al. Complex networks in advanced manufacturing systems[J]. *Journal of Manufacturing Systems* , 2017 , 43 : 409-421.
- [55] CHENG Y , TAO F , XU L , et al. Advanced manufacturing systems : Supply-demand matching of manufacturing resource based on complex networks and internet of things[J]. *Enterprise Information Systems* , 2016 , Doi : 10.1080/17517575.2016.1183263.
- [56] LI Y , TEE K , YAN R , et al. A framework of human-robot

- coordination based on game theory and policy iteration[J]. IEEE Transactions on Robotics ,2016 ,32(6) :1408-1418.
- [57] 关于《绿色制造工程实施指南(2016-2020 年)》的解读 [EB/OL]. [2016-09-19]. [http : //www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057545/c5256301/content.html](http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057545/c5256301/content.html).
- [58] ZUO Y , TAO F , NEE A. An Internet of things and cloud-based approach for energy consumption evaluation and analysis for a product[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing , 2018 , 31(4-5) : 337-348.
- [59] TAO F , ZUO Y , XU L , et al. Internet of things and BOM-based life cycle assessment of energy-saving and emission-reduction of products[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics , 2014 , 10(2) : 1252-1261.

作者简介：陶飞 (通信作者)，男，1981 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为面向服务的智能制造、智能制造服务管理与优化、数字孪生、绿色可持续制造等。

E-mail : ftao@buaa.edu.cn

戚庆林，男，1989 年出生，博士研究生。主要研究方向为面向服务的智能制造、制造服务管理、数字孪生。