


# 驱动制造业从“互联网+”走向“人工智能+”的大数据之道

姚锡凡<sup>1</sup> 雷 毅<sup>1</sup> 葛动元<sup>2</sup> 叶 晶<sup>1</sup>  
1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州, 510640  
2. 广西科技大学机械工程学院, 柳州, 545006

**摘要:**“互联网+制造”和“人工智能+制造”已成为我国制造业转型升级的国家战略。阐述了两者的发展历程及其代表制造模式;从历史渊源出发,梳理了两者在大数据驱动下走向融合的发展演化进程,它们产生了“互联网+人工智能+制造”的智能制造,并将统一于社会信息物理生产系统旗下。

**关键词:**互联网;人工智能;智能制造;大数据;社会信息物理系统

**中图分类号:**TP391; TH16

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2019.02.002      **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

## On Big Data Driving Manufacturing from “Internet Plus” to “AI Plus”

YAO Xifan<sup>1</sup> LEI Yi<sup>1</sup> GE Dongyuan<sup>2</sup> YE Jing<sup>1</sup>  
1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640  
2. School of Mechanical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006

**Abstract:**“Internet+manufacturing” and “artificial intelligence (AI)+manufacturing” had been a strategy of manufacturing upgrading in China. Their development history and representative manufacturing models was elaborated, their fusion evolution driven by big data from the perspective of their historical origins was reviewed, and the smart manufacturing resulted from such fusion in the form of “internet+AI+manufacturing” was addressed, which is enclosed under the umbrella of the social cyber physical production systems.

**Key words:** internet; artificial intelligence; smart manufacturing; big data; social cyber physical system

### 0 引言

正在兴起的新一轮工业革命将导致全球工业体系、发展模式和竞争格局产生重大变革<sup>[1]</sup>。德国将这新一轮工业革命称之为以信息物理系统为基础的工业 4.0<sup>[2]</sup>,美国则称之为工业互联网<sup>[3]</sup>。中国于 2015 年 7 月发布了《积极推进“互联网+”行动的指导意见》;2016 年 5 月发布了针对制造业版的“互联网+”——《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》;2017 年 7 月发布了《新一代人工智能发展规划》,将智能制造作为新一代人工智能应用之首;同年 11 月发布了《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》。由此可见,“互联网+”和“人工智能+”频繁地出现在我国制造业顶层战略规划之中。

制造业是工业的主体和国民经济支柱,世界

各国对其极其重视,2008 年的世界金融危机后,工业化国家纷纷出台“再工业化”战略计划。在新一轮工业革命中,我国出现两种主要“版本”的制造模式:“互联网+制造”和“人工智能+制造”。事实上,这两种制造模式早已存在,前者被称为网络化制造,后者被称为智能制造。从形式上来看,两者的不同在于“+”前面的对象,即改造传统制造业所采用的技术手段不同。从本质上来看,两者都致力于通过虚拟信息空间与实体物理系统的融合来实现制造业的变革。

那么“互联网+制造”和“人工智能+制造”究竟是什么关系?它们的未来又走向何方?本文对此展开研究,从两者的发展历程和历史渊源,探讨两者之间的相互关系以及未来发展走向。

### 1 互联网+制造

“互联网+制造”代表互联网与制造的融合,这里的“+”既包含“加”、也包含“减”的含义。所谓“加”,就是充分发挥互联网在生产要素配置中

收稿日期:2018-06-05  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675186,51765007);  
广东省科技计划资助项目(2017A030223002);广西自然科学基金资助项目(2016GXNSFAA380111)

的优化和集成作用,盘活存量和提升生产效率;所谓“减”,就是去掉信息化孤岛或障碍,淘汰落后产能和简化生产流程。如果用集合来表示,“互联网+制造”可视为互联网与制造的交集,即“互联网+制造”等同于“制造+互联网”<sup>[4]</sup>,这种融合亦称为互联网制造(网络化制造),如图 1a 所示。具体形式上,既有早期“制造+网格”发展出的制造网格,也有新兴“制造+物联网”所形成的制造物联(网)<sup>[5]</sup>,如图 1b 所示。从更广泛意义来说,就有“工业+互联网”衍生出工业互联网。

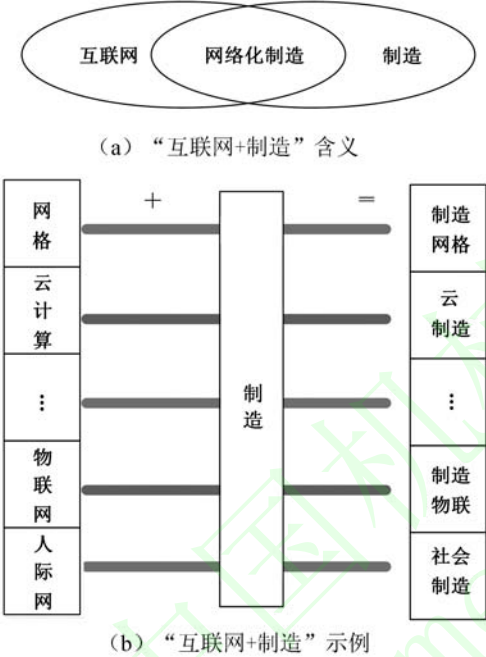


图 1 “互联网+制造”含义及其示例  
Fig.1 The meaning and examples of “Internet+ manufacturing”

“互联网+制造”的发展可以概括为数字化制造与互联网技术从单独发展走向集成与协同发

展,如图 2 所示。1952 年,Parsons 公司与 MIT 合作,试制成功第一台三坐标数控铣床<sup>[6]</sup>,标志着数控(numerical control,NC)技术的诞生,并发展出计算机数控(computer numerical control, CNC)与直接数控(direct numerical control, DNC)<sup>[7]</sup>,构成了计算机辅助制造(computer aided manufacturing,CAM)的核心。20 世纪 50 年代后期以来,计算机辅助制图经历二维至三维的转变,并拓展为包含构思、功能设计、结构分析等设计理念的计算机辅助设计(computer aided design,CAD)。在数值计算方法发展的推动下,20 世纪 70 年代初期实现了计算机辅助工程(computer aided engineering,CAE)的实用化<sup>[8]</sup>。此后,设计与仿真分析逐渐集成为工程设计软件的 2 个重要模块。从初期研究开始,CAM 与 CAD 便存在功能交互,并不断深入集成为 CAD/CAM。

为优化工艺过程设计,20 世纪 60 年代后期出现了计算机辅助工艺规划(computer aided process planning,CAPP)<sup>[9]</sup>。CAD、CAM、CAPP 组成的工程设计自动化系统具有产品的概念设计、工程分析、结构与工艺设计及数控编程功能<sup>[10]</sup>,上述技术的综合运用在 20 世纪 80 年代初出现的柔性制造系统(flexible manufacture system,FMS)上得到了体现<sup>[11]</sup>。20 世纪 80 年代初期出现的产品数据管理(product data management,PDM)解决了大量工程图纸文档的管理困境,并逐步扩展为产品开发全生命周期的数据管理<sup>[12]</sup>,进一步完善处理 CAD/CAM 系统存在的数据管理问题。20 世纪 60 年代,库存物资管理问题引起了制造业对物料管理的思考,进而发展出物料需求计划(material requirement planning,

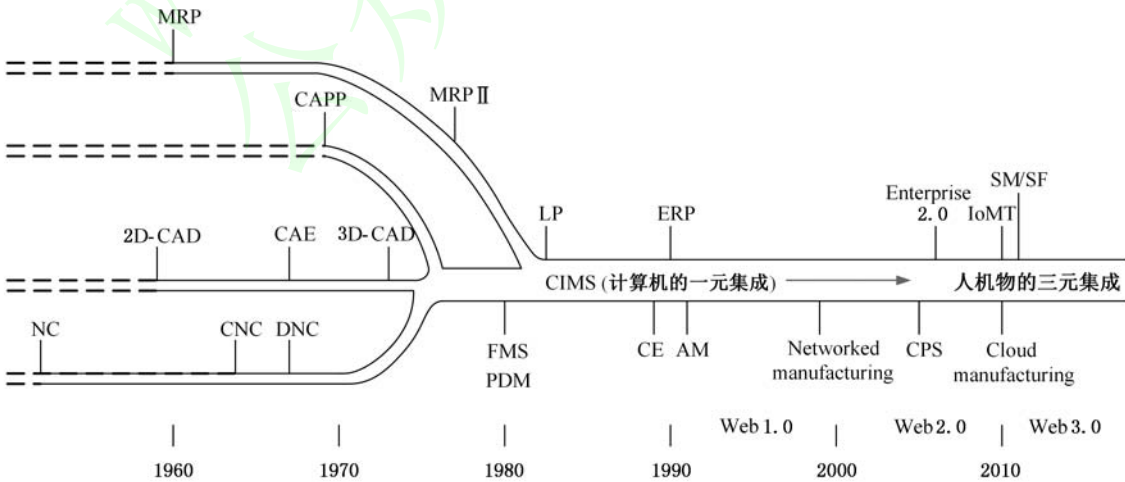


图 2 “互联网+制造”演化  
Fig.2 Evolution of “Internet+ manufacturing”

MRP),并在此基础上发展出闭环的 MRP。20 世纪 70 年代,制造资源计划(manufacturing resource planning,MRP II)应用管理会计的概念来实现对物资信息与资金信息的集成,并于 20 世纪 90 年代扩展为更为全面的企业资源计划(enterprise resource planning,ERP)<sup>[13]</sup>。

自 1973 年提出计算机集成制造(computer integrated manufacturing, CIM)<sup>[14]</sup>以来,由 CAD、CAM、CAPP、MRP II 等框架为基础构成的计算机集成制造系统(CIMS)逐步推进理论与实践应用。20 世纪 80 年代,CIMS 技术迅速向纵深发展,相继提出了精益制造(lean production,LP)<sup>[15]</sup>、并行工程(concurrent engineering,CE)<sup>[16]</sup>等制造模式。CIMS 具备数字化、信息化与集成化的特点,为互联网技术在制造业中的应用提供了技术基础。

互联网 Internet 是现代集成制造的基础技术,其功能与内涵随着其发展历程而不断扩展。互联网以 ARPANET 为起点,随后科学计算网、美国国家科学基金会网等拓展了互联网的应用范围并推动互联网协议走向标准化,最终在 1989 年出现了最为广泛应用的万维网(world wide web, WWW)。此后万维网经历了 3 个发展阶段<sup>[4]</sup>:① Web1.0(1990~2000),用户仅获取网站信息,信息单向流动;② Web2.0(2000~2010),用户获取并产生网站信息,实现信息在用户与社交平台之间的双向流动;③ Web3.0(2010~),融合语义网、移动网络、人工智能等技术,目前仍处于不断发展之中。

随着 Web 时代的到来,CIMS 与 Internet 技术进入集成与协同发展时期,制造系统进入“互联时代”。20 世纪 90 年代初出现具有代表性的敏捷制造(agile manufacturing,AM)<sup>[17]</sup>,1999 年提出以数字化、柔性化、网络化为基本特征的网络化制造(networked manufacturing),以实现无地域限制的社会协作与资源共享<sup>[18]</sup>。2000 年后,互联网技术的进步催生出更为复杂的制造网络,信息物理融合系统(cyber-physical systems, CPS)<sup>[19]</sup>出现并致力于实现虚拟世界和实际物理世界互联与协同。2006 年,McAfee 将 Web2.0 理念引伸到企业,提出了企业 2.0(enterprise 2.0)概念<sup>[20]</sup>。

随着传感器、RFID 等技术的广泛采用,互联网逐步走向万物互联的物联网(Internet of things,IoT)时代<sup>[21]</sup>。基于物联网理念提出的制造物联(internet of manufacturing things,IoMT)<sup>[5]</sup>不仅实现生产过程中数字化装备、智能

设备的信息互联,更进一步对产品的全生命周期信息进行管理。随着云计算和面向服务技术的发展,云制造(cloud manufacturing,CM)<sup>[22]</sup>应运而生。以制造物联、云制造等为代表的新兴网络化制造模式,需要结合大数据智能技术对具备大数据特征的制造数据进行处理,因此该类“互联网+制造”模式实质上也是一种智能制造模式<sup>[4]</sup>,由此也可以看出“互联网+制造”与“人工智能+制造”正逐步走向融合与统一。

综上,网络化制造随着互联网的发展而发展,从最初的计算机集成制造走向人机物的三元集成制造(图 2),并通过物联网和大数据等新一代信息技术与智能制造产生密切关联。

2 人工智能+制造

“人工智能+制造”代表人工智能与制造的融合,如图 3 所示。最初体现为诞生于 20 世纪 80 年代的智能制造(intelligent manufacturing, IM)。此时的 AI 主要依靠符号智能实现决策,因此 IM 主要依赖人类专家知识来解决制造中的问题。近些年来,得益于新一代 AI 的发展,特别是以“大数据+深度学习”为代表的大数据智能的发展,诞生了新一代智能制造(多用 smart manufacturing(SM)表示)<sup>[23-24]</sup>。

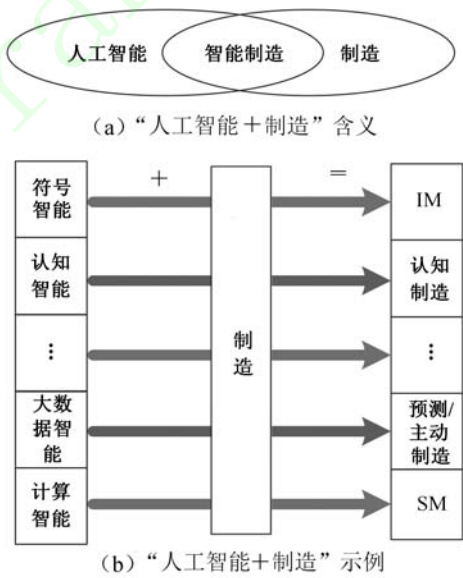


图 3 “人工智能+制造”含义及示例  
Fig.3 The meaning and examples of “AI + manufacturing”

人工智能作为一门在计算机中模仿人类智力的科学,已有 70 多年的研究历史<sup>[25]</sup>。1943 年关于 M-P 神经元模型的研究<sup>[26]</sup>,通常被认为是 AI 研究的开端。1956 年,Dartmouth College 研讨会首次使用“人工智能”一词,标志 AI 研究领域



正式诞生,人工智能研究工作进入第一个兴旺期,在机器学习、定理证明、模式识别、问题求解等领域推出程序,并研制出了人工智能语言 LISP<sup>[27]</sup>。在 AI 研究初期,学术界受控制论的影响甚重而形成行为主义学派,因此 AI 的研究方法以进化计算、强化学习为主<sup>[28]</sup>。20 世纪 70 年代, AI 研究陷入“寒冬”,直至 20 世纪 80 年代初,专家系统的成功开发与应用产生了巨大的社会效应,以符号主义为代表的 AI 迎来了蓬勃发展时期<sup>[25]</sup>。1980 年后, Hopfield 网络与误差反向传播算法的提出,使停滞十余年的神经网络研究步入恢复期<sup>[26]</sup>。近些年,以深度学习为代表的联结主义 AI 迅猛发展, AI 技术在图像识别、语音识别、自然语言处理方面的研究上取得突破性进展<sup>[29]</sup>。

20 世纪 80 年代,得益于 CIMS 与 AI 的发展,各国开始尝试 AI 与数字化制造的集成应用,智能制造应运而生。20 世纪 90 年代初期,日本首先提出智能制造系统的概念与国际合作研究计划。此后,各国竞相发展智能制造,从初期的侧重智能制造单元以及基于符号主义 AI 的制造专家系统,逐渐转向人工神经网络、模拟退火算法以及遗传算法等技术组成的计算智能,并发展出模糊神经网络、遗传神经网络等多种 AI 算法融合的智能方法<sup>[30]</sup>。

21 世纪,因大数据和深度学习等新一代人工智能的发展,智能制造进入新的发展时期。2006 年 Hinton 指出深层神经网络具有优异的特征学习能力<sup>[31]</sup>,由此兴起关于深度学习的研究。智慧地球<sup>[32]</sup>概念的提出进一步推动了人工智能的研究,美国、德国、中国、英国、日本及韩国各自提出新工业计划<sup>[33]</sup>,德国提出的以智能制造为主要特征的工业 4.0 得到全世界的广泛关注。

21 世纪关于智能制造的研究侧重于提高系统动力、快速适应性和资源有效性<sup>[34]</sup>。新一代智能制造 SM 具备了数字化、虚拟化、物联网等新技术,以万物互联、数据驱动、自主智能等新形式发展<sup>[35]</sup>。对上述新技术、新形式进行应用的典型智能制造模式包括:采用先进分析方法与信息物理系统等工具,将大数据转换为可利用、可操作的信息,从而实现制造过程预测的预测制造<sup>[36]</sup>,以及基于大数据与主动计算而提出的主动制造<sup>[23,37]</sup>。

随着新一代 AI 的发展,人们更加广泛地将 AI 应用于制造业智能决策之中,并实现对产品质量监测、工艺效率及制造全生产周期的优化。同时, AI 也使智能制造内容更加丰富,并对其产生颠覆性变革。

### 3 网络化制造与智能制造走向融合

网络化制造和智能制造分别随着互联网和人工智能技术发展而发展,当前都进入各自的新发展期。2010 年前,计算机集成制造/网络化制造占据主导地位,人工智能只是在制造的某些环节起到辅助作用,处理数据对象以结构化数据为主。20 世纪 90 年代,互联网进入 Web 时代,制造业“信息化孤岛”<sup>[4]</sup>得以初步互联,智能制造不再局限于利用人工智能、数据分析及统计等智能方法处理“孤岛式”的制造问题。由于该阶段的制造数据以结构化数据为主,数据结构简单,专家系统、模糊推理等符号主义 AI 对其具有高效的处理能力,从而形成了许多以符号主义 AI 为基础的制造资源集成系统。当互联网进入 Web2.0, 人际网、社交媒体和企业 2.0 等得到深入发展,企业、客户主动在网络上产生包含制造、服务及社交等内容,具备结构化与非结构化共存特征的海量数据。网络数据的规模化、复杂化对 AI 在数据处理、挖掘方面提出更高的要求,也推动了联结主义 AI 的发展。

近些年来,随着物联网、大数据和机器学习等兴起和发展,智能制造得到越来越多的关注,并不断与互联网(网络化制造)融合,互联网成为了智能制造的基础设施,形成了面向产品全生命周期的“互联网+人工智能+制造”的新一代智能制造,如图 4 所示。

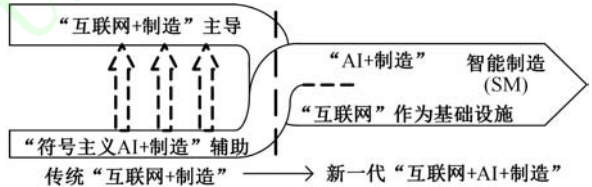


图 4 从“互联网+”到“AI+”的制造模式演进

Fig.4 Evolution of manufacturing mode from “Internet+” to “AI+”

网络化制造致力于解决“信息化孤岛”问题,而智能制造致力于解决制造决策问题,但随着物联网的发展,通过万物互联解决“信息化孤岛”问题之后,就需要解决更高层次的认识智能问题,同时也产生一个“副产品”——大数据<sup>[38]</sup>。基于知识(符号智能)的传统智能制造,由于存在知识获得等瓶颈,现在已转向由原始大数据直接获得知识或模型来解决生产中的问题,因此网络化制造与智能制造走向融合成为必然。

由此可见,新一代智能制造以“互联网+”作为基础,融合了物联网、云计算、大数据和深度学

习等为代表的新一代信息技术,包括 IoMT、云制造、信息物理生产系统等众多制造模式。IoMT 基于物联网技术,解决设计、生产与服务过程的信息传输与共享问题,使制造数据能在更大范围共享而实现全局优化;云制造对制造资源进行虚拟化与服务化,实现制造资源在企业间的流通与共享,为客户提供按需生产的服务平台,在企业之间开展更广泛的协同制造;信息物理生产系统通过状态感知、实时分析、人机交互/自主决策、精准执行和反馈,实现物理系统和信息系统的协同,以及人、设备与产品的连通与交流<sup>[24]</sup>。

这些从不同视角提出的新兴智能制造模式,虽然侧重点有所不同,但它们都具有一些共同目标。其一,相比于传统的“互联网+制造”仅在制造或服务某些环节对数据智能化处理,新一代的智能制造模式更注重产品全生命周期的数据分析与监控<sup>[39]</sup>。这得益于由传感器、射频识别等廉价设备构成的感知系统,它们分布于产品的全生命周期之中,能够实时地获得监测数据。其二,新一代智能制造模式更注重客户体验与需求,在社交媒体等服务大数据的驱动下,产品需求逐渐由市场导向转为客户需求导向,产品生产方式逐渐由“推式”转为“拉式”,越来越多的企业实施制造与服务融合策略,为客户提供个性化定制产品<sup>[23,40]</sup>。

4 大数据驱动的智能制造

大数据对智能制造提出了挑战。从来源上,制造大数据包含 PDM、制造执行系统等产生的产品设计与制造过程数据、ERP 系统等产生的公司运营数据、供应链关系管理系统及互联网客户需求等产生的价值链数据,以及经济形势变化、政策变动等因素产生的外部数据<sup>[38]</sup>。相较于互联网

大数据所具备的规模性(volume)、多样性(variety)、高速性(velocity)及价值性(value)的 4V 特征<sup>[41]</sup>,制造大数据还具备制造领域特有的一些属性:①时序特性,智能感知设备对制造过程不断采样,数据与该时间的生产状态匹配而具有时序特性;②高维特性,加工过程用多个维度(工艺、环境、时间)参数来描述产品加工质量;③多尺度特性,制造过程中,在同一维度下用不同尺度数据相互配合来描述产品质量;④高噪特性,制造过程中存在的电磁干扰、振动等形式的噪声影响测量结果,得到的是低信噪比的测量数据<sup>[38]</sup>。

制造与服务流程产生的以非结构化数据为主的海量数据,要求新一代智能制造能够在大量持续变化的数据流中提取知识,并依靠知识关联与存在模式,分析信息价值<sup>[42]</sup>。目前,可利用以深度学习为代表的人工智能对原始数据进行处理,将大数据转变为可利用、具有价值的信息与知识,对制造及服务过程进行智能决策。

智慧制造是将未来互联网的四大支柱技术(人际网(internet of people, IoP)、内容知识网(internet of contents and knowledge, IoCK)、务联网(internet of services, IoS)和物联网 IoT<sup>[43]</sup>)与制造技术融合而成的一种新型智能制造模式<sup>[43-44]</sup>,它是社会制造(企业 2.0)、IM/SM/预测制造/主动制造、云制造、制造物联等智能制造理念的融合与拓展,如图 5 所示。然而,正是 IoP、IoS、IoT 三者的集成导致了制造大数据的产生, IoCK(包括大数据)起到桥接 IoP、IoS、IoT 的作用,并通过对 IoCK 中的大数据提取可操作的信息/知识,最终实现了人、机、物的集成与智慧应用。

智慧制造实质上是一种社会信息物理生产系统(social - cyber - physical production system ,

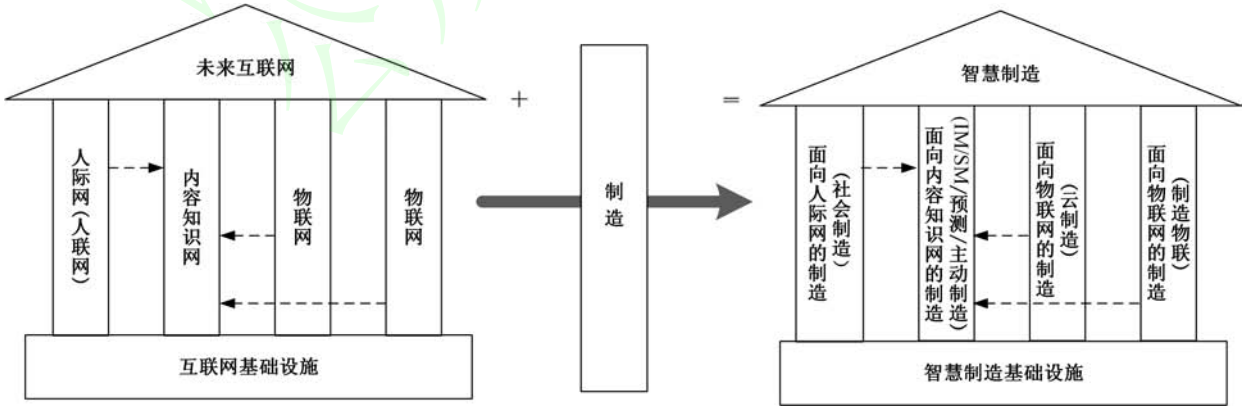


图 5 “未来互联网+制造”的智慧制造

Fig.5 Wisdom manufacturingbased on “future internet+manufacturing”

SCPPS)<sup>[45]</sup>,延伸和发展了工业 4.0 下的信息物理生产系统 (cyber-physical production system, CPPS)<sup>[46]</sup> 的理念,如图 6 所示。CPS 由基于 IoT 的物理系统和基于 IoCK、IoS 的信息系统构成,社会信息物理系统则是在 CPS 基础上,进一步融合基于 IoP 的社会系统。首先,由 IoT 感知底层设备的原始数据;然后通过 IoCK 分析获取大数据中的信息与知识,并根据外部环境的变化自动判断决策;通过 IoS 将制造资源虚拟化与服务化,按照业务流程施效于物理系统;面对机器无法自主决策的复杂问题,可借助于 IoP 在人类社会中

实现知识共享,通过人类群体智慧加以解决,同时 IoP 能收集互联网中的客户需求信息,进而按客户需求进行生产,从而形成“物→数据→信息→知识→智慧→服务→人→物”循环的回路<sup>[24]</sup>。数据在系统中起到桥接各子系统的作用,并为智能决策提供原始数据。信息系统与制造技术融合形成了赛博制造(cyber manufacturing)。基于 IoP 的社会系统与制造技术融合形成社会制造,进一步与 IoCK、IoS、IoT 融合而形成社会信息物理生产系统,从而将群体智慧集成于制造系统之中。

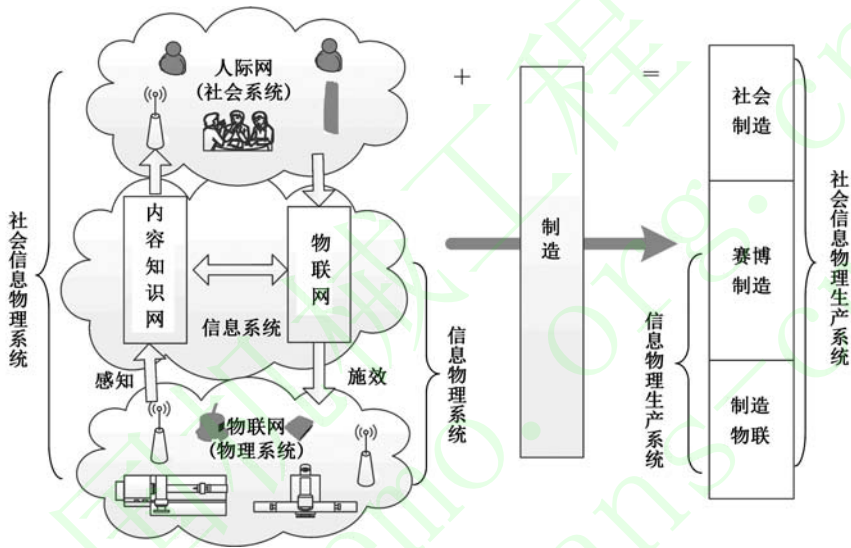


图 6 “CPS/SCPS+制造”  
Fig.6 “CPS/SCPS+ manufacturing”

大数据在制造、供给、经营管理及服务过程中的应用,使企业能及时适应市场需求的变化,做出更高效精准、利润最大化的部署。因此,在大数据驱动下,企业制造生产更加主动,使客户融入设计制造过程,实现小批量乃至单件的个性化定制。以某传感器个性化定制为例,它要求企业按客户在企业网络系统中提供的需求设计生产不同型号的传感器,这意味着企业在生产过程中需要不断地切换生产,为此该企业从产品设计入手,将组成传感器的部件进行标准化、模块化,并制定相应的识别条码,使机器实现条码数据自动扫描,并通过表面贴装机自动切换程序来贴装相应型号传感器的零部件,进而实现生产不同型号传感器的零秒切换,同时也实现企业利润的最大化;在制造过程中针对不同订单的缓急程度,可对生产进行动态规划,进而实现生产任务的动态调度及物料的优化配送,并可通过生产数据实现制造资源的实时监控与质量控制;此外,通过大数据还可优化包含库存、财务、销售分析及采购成本数据的经营管理

服务以及包含市场预测与供给渠道信息的供应链管理,从而避免不必要的成本支出与损失<sup>[38]</sup>。

5 结语

新一轮工业革命在全球范围内兴起,制造业竞争格局面临重大变革,多国纷纷提出工业振兴计划。互联网+AI+制造融合的新一代智能制造已成为制造业发展新引擎,抢占新一代智能制造发展热潮的先机,对我国制造业创新发展、竞争力提升,从制造大国走向制造强国具有重要意义。本文阐述了“互联网+制造”与“AI+制造”各自发展历程及相关制造模式,梳理了两者的融合趋势,并将新一代智能制造统一于社会信息物理生产系统理念之下。

“未来互联网+制造”,特别是在“四网”高度融合的智慧制造(或社会信息物理生产系统)必然产生大量可供使用的海量原始数据。大数据计算被认为是继实验研究、理论分析和计算机仿真之后的第四种科学研究范式,并成为新一代人工智



能基础,因此如何利用大数据智能就成为新一代及未来网络化制造/智能制造亟需解决的问题,也是制造系统从被动走向主动的关键所在。本文从宏观视角上探讨驱动制造业从“互联网+”走向“人工智能+”的大数据之路,后继工作将从微观角度上细化相关研究。

#### 参考文献:

- [1] 周佳军,姚锡凡. 先进制造技术与新工业革命[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 1963-1978.  
ZHOU Jiajun, YAO Xifan. Advanced Manufacturing Technology and New Industrial Revolution[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(8): 1963-1978.
- [2] 乌尔里希·森德勒,邓敏,李现民. 工业4.0:即将来袭的第四次工业革命[M]. 北京:机械工业出版社, 2014: 7-16.  
SENDER Ulrich, DENG Min, LI Xianmin. Industrie 4.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 7-16.
- [3] 夏志杰. 工业互联网的体系框架与关键技术——解读《工业互联网:体系与技术》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(10): 1248-1259.  
XIA Zhijie. The System Framework and Key Technologies of Industrial Internet — Interpretation of Industrial Internet: Framework and Technology [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(10): 1248-1259.
- [4] 姚锡凡,陶韬,葛动元. “互联网+制造”的发展现状与展望[J]. 制造技术与机床, 2018(8): 1-5.  
YAO Xifan, TAO Tao, GE Dongyuan. State-of-the-art Survey and Prospect of “Internet plus Manufacturing” [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(8): 1-5.
- [5] 姚锡凡,于森,陈勇,等. 制造物联的内涵、体系结构和关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 1-10.  
YAO Xifan, YU Miao, CHEN Yong, et al. The Connotation, Architecture and Key Technologies of Internet of Manufacturing Things[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 1-10.
- [6] ZHANG Y, XU X, LIU Y. Numerical Control Machining Simulation: a Comprehensive Survey[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24(7): 593-609.
- [7] 刘莉. 浅谈机械制造中数控技术的应用及发展[J]. 科技创新与应用, 2012(13): 93-93.  
LIU Li. Simple Discussion on the Application and Development of Numerical Control Technology in Mechanical Manufacturing[J]. Technology Innovation and Application, 2012(13): 93-93.
- [8] 孙东印,司建明,李郁. 综述 CAE 技术的发展和应用[J]. 现代制造技术与装备, 2011(2): 25-27.  
SUN Dongyin, SI Jianming, LI Yu. Review on CAE Technology Development and Application[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2011(2): 25-27.
- [9] AL-WSWASI M, IVANOV A, MAKATSORIS H. A Survey on Smart Automated Computer-aided Process Planning(ACAPP) Techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 809-832.
- [10] 张明达,马秋成,张文辉,等. PDM 框架下的 CAD/CAM/CAPP/ERP 集成技术研究[J]. 现代制造工程, 2009(7): 27-29.  
ZHANG Mingda, MA Qiucheng, ZHANG Wenhui, et al. Research on Integration between of CAD/CAM/CAPP/ERP under PDM Framework [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009 (7): 27-29.
- [11] KOREN Y, SHPITALNI M. Design of Reconfigurable Manufacturing Systems[J]. Journal of Manufacturing Systems 2010, 29(4): 130-141.
- [12] ZHANG Y J, WANG S J, LI H. Research and Application on Product Data Management Technology[J]. Advanced Materials Research, 2010, 118/120: 944-947.
- [13] 韩珂. 企业资源规划(ERP)的理论形成历程[J]. 企业导报, 2010(9): 260-261.  
HAN Ke. The Theoretical Formation Process of Enterprise Resource Planning (ERP)[J]. Guide to Business, 2010(9): 260-261.
- [14] LAPERRIERE L. CIRP Encyclopedia of Production Engineering [M]. Berlin: Springer, 2014: 271-275.
- [15] PETTERSEN J. Defining Lean Production: Some Conceptual and Practical Issues[J]. Tqm Journal, 2012, 21(2): 127-142.
- [16] STJEPANDIĆ J, WOGNUM N, VERHAGEN W J C. Concurrent Engineering in the 21st Century[M]. Cham: Springer, 2015: 21-49.
- [17] DUBEY R, GUNASEKARAN A. Agile Manufacturing: Framework and Its Empirical Validation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76 (9/12): 2147-2157.
- [18] 柴国荣,赵雷,宗胜亮. 网络化制造的研究框架与未来主题[J]. 科技管理研究, 2014, 34(15): 193-197.  
CHAI Guorong, ZHAO Lei, ZONG Shengliang.

- The Conceptual Frame and Future Topic of Networked Manufacturing[J]. Science and Technology Management Research, 2014, 34(15):193-197.
- [19] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10):1157-1166.  
WANG Zhongjie, XIE Lulu. Cyber-physical Systems: a Survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157-1166.
- [20] 孙琳, 秦铁辉. 企业 2.0 理念及其作用探析[J]. 情报科学, 2010(6):806-811.  
SUN Lin, QIN Tiehui. A Probe into the Concept and Role of Enterprise 2.0[J]. Information Science, 2010(6): 806-811.
- [21] 严新平, 张月雷. 物联网环境下的机械系统状态监测技术展望[J]. 中国机械工程, 2011, 22(24): 3011-3015.  
YAN Xinping, ZHANG Yuelei. Thoughts of Mechanical System Condition Monitoring Technology under IOT[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 3011-3015.
- [22] 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.
- [23] 姚锡凡, 周佳军, 张存吉, 等. 主动制造——大数据驱动的新兴制造范式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 172-185.  
YAO Xifan, ZHOU Jiajun, ZHANG Cunji, et al. Proactive Manufacturing—a Big-data Driven Emerging Manufacturing Paradigm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 172-185.
- [24] 周佳军, 姚锡凡. 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. State-of-Art Review on New Emerging Intelligent Manufacturing Paradigms [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(3): 624-639.
- [25] RUSSELL S J, NORVIG P. Artificial Intelligence: a Modern Approach[M]. New York: Pearson Education Limited, 2016:1-33.
- [26] HAYKIN S. 神经网络与机器学习[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:1-10.  
HAYKIN S. Neural Networks and Learning Machines[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 1-10.
- [27] 米爱中, 姜国权, 霍占. 人工智能及其应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2014: 4-5.
- MI Aizhong, JIANG Guoquan, HUO Zhan. Artificial Intelligence and Its Application[M]. Changchun: Jilin University Press, 2014: 4-5.
- [28] 王广赞, 易显飞. 人工智能研究的三大流派: 比较与启示[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版), 2018, 33(4): 6-11.  
WANG Guangzan, YI Xianfei. Three Major Schools of Artificial Intelligence Research [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Social Science Edition), 2018, 33(4): 6-11.
- [29] 尹宝才, 王文通, 王立春. 深度学习研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2015(1):48-59.  
YIN Baocai, WANG Wentong, WANG Lichun. Review of Deep Learning[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(1):48-59.
- [30] 姚锡凡, 刘敏, 张剑铭, 等. 人工智能视角下的智能制造前世今生与未来[J/OL]. 计算机集成制造系统:1-28 [2019-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20180809.1559.050.html>.
- YAO Xifan, LIU Min, ZHANG Jianmin, et al. The Past, Present and Future of Intelligent Manufacturing from the Perspective of Artificial Intelligence[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems:1-28 [2019-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20180809.1559.050.html>.
- [31] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(8):1697-1716.  
JIAO Licheng, YANG Shuyuan, LIU Fang, et al. Seventy Years Beyond Neural Networks: Retrospect and Prospect[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(8): 1697-1716.
- [32] IBM 商业价值研究院. 智慧地球[M]. 北京: 东方出版社, 2009:1-50.  
IBM Institute for Business Value. Smart Earth [M]. Beijing: The Oriental Press, 2009:1-50.
- [33] 林汉川, 汤临佳. 新一轮产业革命的全局战略分析——各国智能制造发展动向概览[J]. 人民论坛·学术前沿, 2015(11):62-75.  
LIN Hanchuan, TANG Linjia. Global Strategy Analysis of the New Round of Industrial Revolution—Overview of the Development of Intelligent Manufacturing in the World[J]. People's Tribune, 2015(11):62-75.
- [34] WANG L, SHIH A J. Challenges in Smart Manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 40:1.
- [35] LI B H, HOU B C, YU W T, et al. Applications of Artificial Intelligence in Intelligent Manufacturing: a Review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(1):



- 86-96.
- [36] LEE J, LAPIRA E, BAGHERI B, et al. Recent Advances and Trends in Predictive Manufacturing Systems in Big Data Environment [J]. Manufacturing Letters, 2013, 1(1): 38-41.
- [37] YAO X, ZHOU J, ZHANG J, et al. From Intelligent Manufacturing to Smart Manufacturing for Industry 4.0 Driven by Next Generation Artificial Intelligence and Further on [C]//2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES). Beijing, IEEE, 2017: 311-318.
- [38] 张洁, 秦威, 鲍劲松, 等. 制造业大数据[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016.
- ZHANG Jie, QIN Wei, BAO Jinsong, et al. The Big Data of Manufacturing[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2016.
- [39] 唐堂, 滕琳, 吴杰, 等. 全面实现数字化是通向智能制造的必由之路——解读《智能制造之路: 数字化工厂》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 366-377.
- TANG Tang, TENG Lin, WU Jie, et al. Full Realization of Digitalization is the Only Way to Intelligent Manufacturing — Interpretation of “Smart Manufacturing System and Practices” [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(3): 366-377.
- [40] 闫开宁, 李刚. “互联网+”背景下的服务型制造企业变革[J]. 中国机械工程, 2018, 29(18): 2238-2249.
- YAN Kaining, LI Gang. Enterprise Evolution of Service-oriented Manufacturing under the Context of “Internet Plus” [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(18): 2238-2249.
- [41] CHEN M, MAO S, LIU Y. Big Data: a Survey [J]. Mobile Networks & Applications, 2014, 19(2): 171-209.
- [42] NAGORNY K, LIMA-MONTEIRO P, BARATA J, et al. Big Data Analysis in Smart Manufacturing: a Review [J]. International Journal of Communications Network & System Sciences, 2017, 10(3): 31-58.
- [43] 姚锡凡, 练肇通, 杨屹, 等. 智慧制造——面向未来互联网的人机物协同制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1490-1498.
- YAO Xifan, LIAN Zhaotong, YANG Yi, et al. Wisdom Manufacturing: New Humans-computers-things Collaborative Manufacturing Model [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2014, 20(06): 1490-1498.
- [44] YAO X, JIN X, ZHANG J. Towards a Wisdom Manufacturing Vision [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015, 28(12): 1291-1312.
- [45] 姚锡凡, 张剑铭, LIN Yingzi. 智慧制造系统的基础理论与技术体系[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(10): 2699-2711.
- YAO Xifan, ZHANG Jianming, LIN Yingzi. The Basic Theory and Technical Framework for Wisdom Manufacturing Systems [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2016, 36(10): 2699-2711.
- [46] YAO X, ZHOU J, LIN Y, et al. Smart Manufacturing Based on Cyber-physical Systems and Beyond [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017(1): 1-13.

(编辑 张 洋)

作者简介: 姚锡凡, 男, 1964年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为制造系统集成与智能(智慧)制造。发表论文 200 余篇。E-mail: mexfyao@scut.edu.cn. 葛劲元(通信作者), 男, 1970年生, 副教授。研究方向为机器视觉和机器学习。E-mail: gordon399@163.com.

## 2019 年机械工程青年精英冬季论坛

**在长春召开** 2019 年 1 月 12—13 日, 由中国机械工程学会主办, 吉林大学机械与航空航天工程学院、长春市科协、吉林省机械工程学会承办的机械工程青年精英冬季论坛在吉林省长春市吉林大学召开。论坛由院士特邀主题报告、专家沙龙、专题报告、重点实验室参观等一系列学会交流活动, 吸引到上银优博奖获奖者、中国科协青托工程入选者、国家优秀入选者、吉林大学以及长春市兄弟院校师生在内的 150 余位青年学者参加。

论坛开幕式由吉林大学赵宏伟教授主持。首先, 吉林大学研究生院副院长张宗弢教授致欢迎辞, 中国机械工程学会副秘书长左晓卫发言: 感谢吉林大学机械与航空航天学院对论坛的大力支持, 学会充分利用资源为青年学者搭建学术交流平台、为其成长铺路搭桥。之后, 任露泉院士以“仿生学研究感悟”为题, 介绍师法自然的仿生学本质特征、理念、文化, 揭示仿生学研究的意义与作用, 通过介绍近五年来的团队研究成果、学术影响提出其科研感悟。接下来的专家沙龙上, 与会青年代表跟专家前辈从科研中科学问题凝练、团队建设、研究生培养等方面进行了交流。

藉由论坛, 中国机械工程学会向机械工程青年学者发起“传承中国科学家精神加强科学道德自律”倡议, 倡议青年学者弘扬爱国奋斗的中国科学家精神, 传承科学道德自律的底线意识, 为实现中华民族伟大复兴的中国梦谱写青春华章!

(工作总部)