



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Intelligent Manufacturing—Perspective

走向新一代智能制造

周济^a, 李培根^b, 周艳红^{b,*}, 王柏村^{c,*}, 臧冀原^c, 孟柳^c

^a Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China

^b Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

^c Tsinghua University, Beijing 100084, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 January 2018

Revised 18 January 2018

Accepted 19 January 2018

Available online

关键词

先进制造

新一代智能制造

人-信息-物理系统

新一代人工智能

基本范式

并行推进

融合发展

摘要

智能制造是一个不断演进发展的大概念,可归纳为三个基本范式:数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。新一代智能制造是新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合,贯穿于产品设计、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成,不断提升企业的产品质量、效益、服务水平,减少资源能耗,是新一轮工业革命的核心驱动力,是今后数十年制造业转型升级的主要路径。“人-信息-物理系统”(HCPS)揭示了新一代智能制造的技术机理,能够有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。基于智能制造三个基本范式次第展开、相互交织、迭代升级的特征,推进制造业智能转型应采取“并行推进、融合发展”的技术路线。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

面对新一轮工业革命,《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[1]。世界各国都在积极采取行动,美国提出“先进制造业伙伴计划”[2,3]、德国提出“工业4.0战略计划”[4]、英国提出“英国工业2050战略”[5]、法国提出“新工业法国计划”[6]、日本提出“超智能社会5.0战略”[7]、韩国提出“制造业创新3.0计划”[8],都将发展智能制造作为本国构建制造业竞争优势的关键举措。

新世纪以来,新一代信息技术呈现爆发式增长,数

字化网络化智能化技术在制造业广泛应用,制造系统集成式创新不断发展,形成了新一轮工业革命的主要驱动力。特别是,新一代智能制造作为新一轮工业革命的核心技术,正在引发制造业在发展理念、制造模式等方面重大而深刻的变革,正在重塑制造业的发展路径、技术体系以及产业业态,从而推动全球制造业发展步入新阶段[9–13]。

2. 智能制造的三个基本范式

广义而论,智能制造是一个大概念[10,14],是先进信息技术与先进制造技术的深度融合,贯穿于产品设

* Corresponding author.

E-mail address: yhzhou@hust.edu.cn (Y. Zhou); wangbaicun@mail.tsinghua.edu.cn (B. Wang).

计、制造、服务等全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，旨在不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，减少资源消耗，推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展。

数十年来，智能制造在实践演化中形成了许多不同的相关范式，包括精益生产、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[15-23]，在指导制造业技术升级中发挥了积极作用。但同时，众多的范式不利于形成统一的智能制造技术路线，给企业在推进智能升级的实践中造成了许多困扰。面对智能制造不断涌现的新技术、新理念、新模式，有必要归纳总结提炼出基本范式。

智能制造的发展伴随着信息化的进步。全球信息化发展可分为三个阶段：从20世纪中叶到90年代中期，信息化表现为以计算、通信和控制应用为主要特征的数字化阶段；从20世纪90年代中期开始，互联网大规模普及应用，信息化进入了以万物互联为主要特征的网络化阶段；当前，在大数据、云计算、移动互联网、工业互联网集群突破、融合应用的基础上，人工智能实现战略性突破，信息化进入了以新一代人工智能技术为主要特征的智能化阶段[24]。

综合智能制造相关范式，结合信息化与制造业在不同阶段的融合特征，可以总结、归纳和提升出三个智能制造的基本范式（图1），也就是：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。

2.1. 数字化制造

数字化制造是智能制造的第一个基本范式，也可称为第一代智能制造。

智能制造的概念最早出现于20世纪80年代[25]，但

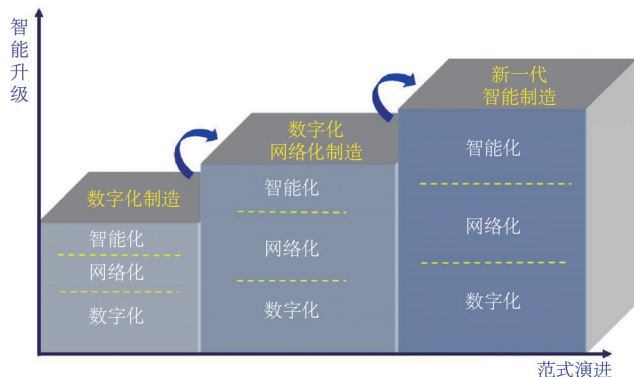


图1. 智能制造三个基本范式演进。

是由于当时应用的第一代人工智能技术还难以解决工程实践问题，因而那一代智能制造主体上是数字化制造。

20世纪下半叶以来，随着制造业对于技术进步的强烈需求，以数字化为主要形式的信息技术广泛应用于制造业，推动制造业发生革命性变化。数字化制造是在数字化技术和制造技术融合的背景下，通过对产品信息、工艺信息和资源信息进行数字化描述、分析、决策和控制，快速生产出满足用户要求的产品[15, 16, 26, 27]。

数字化制造的主要特征表现为：第一，数字技术在产品中得到普遍应用，形成“数字一代”创新产品；第二，广泛应用数字化设计、建模仿真、数字化装备、信息化管理；第三，实现生产过程的集成优化。

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。国际上也有若干关于数字化制造的比较广义的定义和理论[28]。

2.2. 数字化网络化制造

数字化网络化制造是智能制造的第二种基本范式，也可称为“互联网+制造”，或第二代智能制造[29]。

20世纪末互联网技术开始广泛应用，“互联网+”不断推进互联网和制造业融合发展，网络将人、流程、数据和事物连接起来，通过企业内、企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，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转变[17, 30-33]。

数字化网络化制造主要特征表现为：第一，在产品方面，数字技术、网络技术得到普遍应用，产品实现网络连接，设计、研发实现协同与共享；第二，在制造方面，实现横向集成、纵向集成和端到端集成，打通整个制造系统的数据流、信息流；第三，在服务方面，企业与用户通过网络平台实现连接和交互，企业生产开始从以产品为中心向以用户为中心转型[34]。

德国“工业4.0战略计划”报告和美国GE公司“工业互联网”报告完整地阐述了数字化网络化制造范式，精辟地提出了实现数字化网络化制造的技术路线[4, 9, 31, 35-39]。

2.3. 新一代智能制造——数字化网络化智能化制造

数字化网络化智能化制造是智能制造的第三种基本范式，也可称为新一代智能制造。

近年来，在经济社会发展的强烈需求以及互联网的普及、云计算和大数据的涌现、物联网的发展等信息环境急速变化的共同驱动下，大数据智能、人机混合增强智能、群体智能、跨媒体智能等新一代人工智能技术加速发展，实现了战略性突破[24, 40, 41]。新一代人工智能技术与先进制造技术深度融合，形成新一代智能制造——数字化网络化智能化制造。新一代智能制造将重塑设计、制造、服务等产品全生命周期的各环节及其集成，催生新技术、新产品、新业态、新模式，深刻影响和改变人类的生产结构、生产方式乃至生活方式和思维模式，实现社会生产力的整体跃升。新一代智能制造将给制造业带来革命性的变化，将成为制造业未来发展的核心驱动力。

智能制造的三个基本范式体现了智能制造发展的内在规律：一方面，三个基本范式次第展开，各有自身阶段的特点和重点解决的问题，体现着先进信息技术与先进制造技术融合发展的阶段性特征；另一方面，三个基本范式在技术上并不是绝然分离的，而是相互交织、迭代升级，体现着智能制造发展的融合性特征。对中国等新兴工业国家而言，应发挥后发优势，采取三个基本范式“并行推进、融合发展”的技术路线。

3. 新一代智能制造引领和推动新一轮工业革命

3.1. 发展背景

当今世界，各国制造企业普遍面临着提高质量、增加效率、降低成本、快速响应的强烈需求，还要不断适应广大用户不断增长的个性化消费需求，应对资源能源环境约束进一步加大的挑战。然而，现有制造体系和制造水平已经难以满足高端化、个性化、智能化产品和服务增值升级的需求，制造业的进一步发展面临巨大瓶颈和困难。解决问题，迎接挑战，迫切需要制造业的技术创新、智能升级[14, 41]。

新一轮工业革命方兴未艾，其根本动力在于新一轮科技革命。新世纪以来，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日新月异、飞速发展[11, 12, 42–48]，并极其迅速地普及应用，形成了群体性跨越。这些历史性的技术进步，集中汇聚在新一代人工智能技术的战略性突破，实现了质的飞跃[24]。新一代人工智能呈现出深度学习、跨界协同、人机融合、群体智能等新特征，为人类提供认识复杂系统的新思维、改造自然和社会的新技术。当然，新一代人工智能技术还处在极速发展的进程中，将继续

从“弱人工智能”迈向“强人工智能”，不断拓展人类“脑力”，应用范围将无所不在。新一代人工智能已经成为新一轮科技革命的核心技术，为制造业革命性的产业升级提供了历史性机遇，正在形成推动经济社会发展的巨大引擎。世界各国都把新一代人工智能的发展摆在了最重要的位置[49, 50]。

新一代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技术，成为了新一轮工业革命的核心驱动力。

3.2. 新一代智能制造是新一轮工业革命的核心技术

科学技术是第一生产力，科技创新是经济社会发展的根本动力。第一次工业革命和第二次工业革命分别以蒸汽机和电力的发明和应用为根本动力，极大地提高了生产力，人类社会进入了现代工业社会。第三次工业革命以计算、通信、控制等信息技术的创新与应用为标志，持续将工业发展推向新高度[51]。

新世纪以来，数字化和网络化使得信息的获取、使用、控制以及共享变得极其快速和普及，进而，新一代人工智能突破和应用进一步提升了制造业数字化网络化智能化的水平，其最本质的特征是具备认知和学习的能力，具备生成知识和更好地运用知识的能力，这样就从根本上提高工业知识产生和利用的效率，极大地解放人的体力和脑力，使创新速度大大加快，应用范围更加泛在，从而推动制造业发展步入新阶段，即数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。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工业革命的高潮，将重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态，并将引领真正意义上的“工业4.0”，实现新一轮工业革命。

3.3. 愿景

制造系统将具备越来越强大的智能，特别是越来越强大的认知和学习能力，人的智慧与机器智能相互启发性地增长，使制造业的知识型工作向自主智能化的方向发生转变，进而突破当今制造业发展所面临的瓶颈和困难。

新一代智能制造中，产品呈现高度智能化、宜人化，生产制造过程呈现高质、柔性、高效、绿色等特征，产业模式发生革命性的变化，服务型制造业与生产型服务业大发展，进而共同优化集成新型制造大系统，全面重塑制造业价值链，极大提高制造业的创新力和竞争力。

新一代智能制造将给人类社会带来革命性变化。人与机器的分工将产生革命性变化，智能机器将替代人类大量体力劳动和相当部分的脑力劳动，人类可更多地从事创造性工作；人类工作生活环境和方式将朝着以人为本的方向迈进。同时，新一代智能制造将有效减少资源与能源的消耗和浪费，持续引领制造业绿色发展、和谐发展。

4. 新一代智能制造的技术机理：“人-信息-物理系统”

智能制造涉及智能产品、智能生产以及智能服务等多个方面及其优化集成。从技术机理角度看，这些不同方面尽管存在差异，但本质上是一致的，下面以生产过程为例进行分析。

4.1. 传统制造与“人-物理系统”

传统制造系统包含人和物理系统两大部分，是完全通过人对机器的操作控制去完成各种工作任务[如图2(a)所示]。动力革命极大地提高了物理系统（机器）的生产效率和质量，物理系统（机器）代替了人类大量体力劳动。传统制造系统中，要求人完成信息感知、分析决策、操作控制以及认知学习等多方面任务，不仅对人的要求高，劳动强度大，而且系统工作效率、质量还不够高，完成复杂工作任务的能力还很有限。传统制造系统可抽象描述为图2(b)所示的“人-物理系统”（human-physical systems, HPS）。

4.2. 数字化制造、数字化网络化制造与“人-信息-物理系统”

与传统制造系统相比，第一代和第二代智能制造系

统发生的本质变化是，在人和物理系统之间增加了信息系统，信息系统可以代替人类完成部分脑力劳动，人的相当部分的感知、分析、决策功能向信息系统复制迁移，进而可以通过信息系统来控制物理系统，以代替人类完成更多的体力劳动，如图3所示。

第一代和第二代智能制造系统通过集成人、信息系统和物理系统的各自优势，系统的能力尤其是计算分析、精确控制以及感知能力都得以很大提高。一方面，系统的工作效率、质量和稳定性均得以显著提升；另一方面，人的相关制造经验和知识转移到信息系统，能够有效提高人的知识的传承和利用效率。制造系统从传统的“人-物理系统”向“人-信息-物理系统”（human-cyber-physical systems, HCPS）的演变可进一步用图4进行抽象描述[11, 52, 53]。

信息系统（cyber system）的引入使得制造系统同时增加了“人-信息系统”（human-cyber systems, HCS）和“信息-物理系统”（cyber-physical systems, CPS）。其中，CPS是非常重要的组成部分。美国在21世纪初提出了CPS的理论[54]，德国将其作为“工业4.0”的核心技术。CPS在工程上的应用是实现信息系统和物理系统的完美映射和深度融合，“数字孪生体”（digital twin）即是其最为基本且关键的技术，由此，制造系统的性能和效率可大大提高[13, 30, 37, 55, 56]。

4.3. 新一代智能制造与新一代“人-信息-物理系统”

新一代智能制造系统最本质的特征是其信息系统增加了认知和学习的功能，信息系统不仅具有强大的感知、计算分析与控制能力，更具有学习提升、产生知识的能力，如图5所示。

在这一阶段，新一代人工智能技术将使“人-信息-

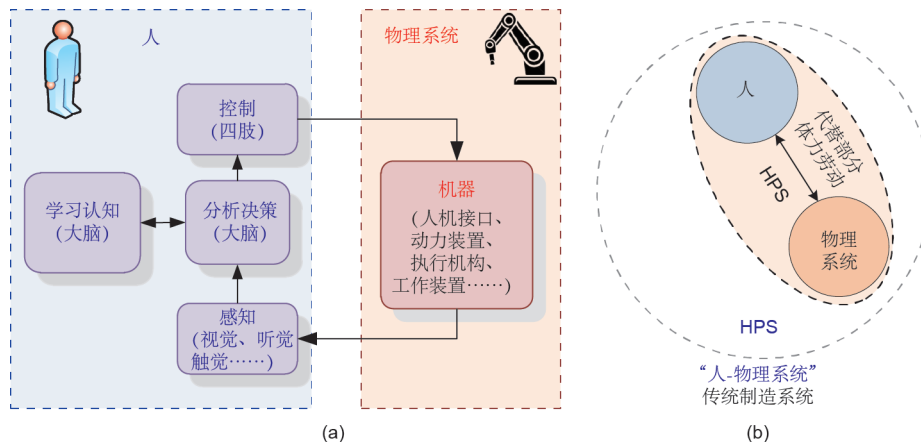


图2. 传统制造系统与“人-物理系统”。

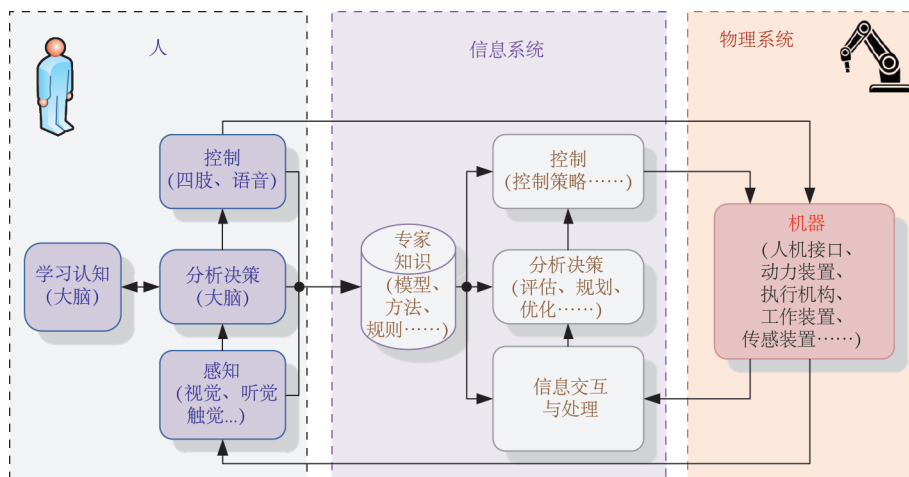


图3. 第一代和第二代智能制造系统。

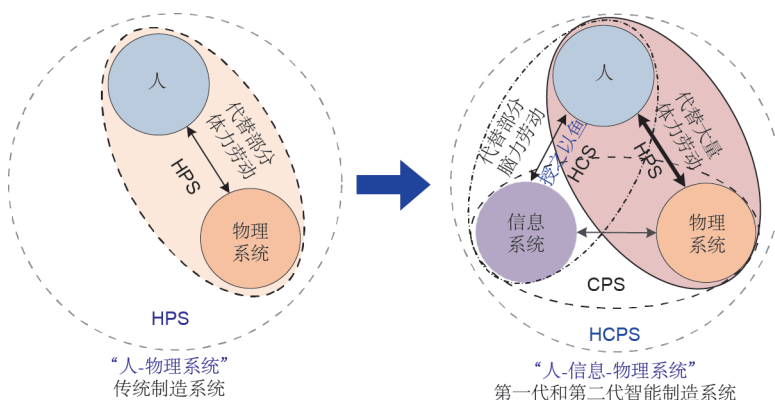


图4. 从“人-物理系统”到“人-信息-物理系统”。

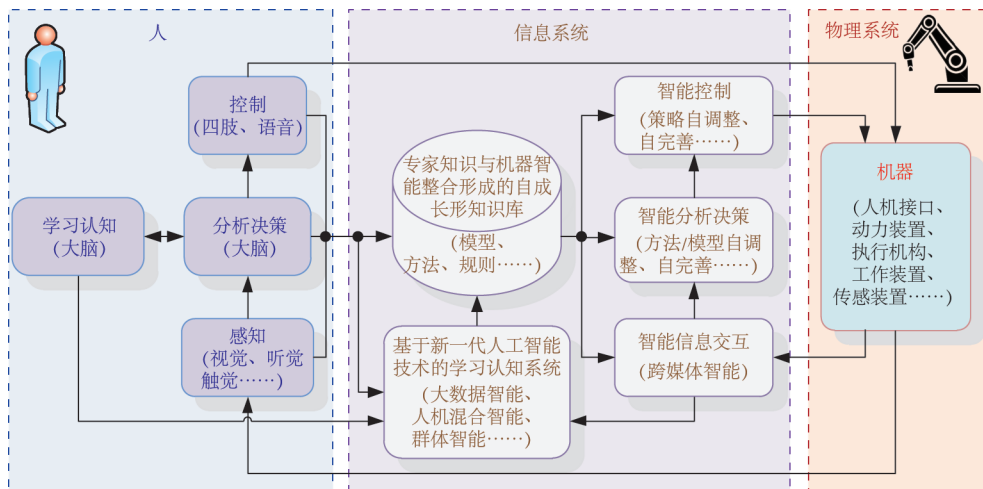


图5. 新一代智能制造系统的基本机理。

物理系统”发生质的变化，形成新一代“人-信息-物理系统”（图6）。主要变化在于：第一，人将部分认知与学习型的脑力劳动转移给信息系统，因而信息系统具有了“认知和学习”的能力，人和信息系统的关系发生了根本性的变化，即从“授之以鱼”发展到“授之以渔”；

第二，通过“人在回路”的混合增强智能，人机深度融合将从本质上提高制造系统处理复杂性、不确定性问题的能力，极大地优化制造系统的性能[52, 57]。

新一代“人-信息-物理系统”中，HCS、HPS和CPS都将实现质的飞跃。

新一代智能制造进一步突出了人的中心地位，是统筹协调“人”“信息系统”和“物理系统”的综合集成大系统；将使制造业的质量和效率跃升到新的水平，为人民的美好生活奠定更好的物质基础；将使人类从更多体力劳动和大量脑力劳动中解放出来，使得人类可以从事更有意义的创造性工作，人类社会开始真正进入“智能时代”[10-12, 51]。

总之，制造业从传统制造向新一代智能制造发展的过程是从原来的“人-物理”二元系统向新一代“人-信息-物理”三元系统进化的过程（图7）。新一代“人-信息-物理系统”揭示了新一代智能制造的技术机理，能够有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。

5. 新一代智能制造的系统组成与系统集成

新一代智能制造是一个大系统，主要由智能产品、智能生产和智能服务三大功能系统以及工业物联网和智能制造云两大支撑系统集成而成（图8）。

新一代智能制造技术是一种核心使能技术，可广泛应用于离散型制造和流程型制造的产品创新、生产创新、服务创新等制造价值链全过程的创新与优化。

5.1. 智能产品与制造装备

产品和制造装备是智能制造的主体，其中，产品是智能制造的价值载体，制造装备是实施智能制造的前提和基础[58]。

新一代人工智能和新一代智能制造将给产品与制造装备创新带来无限空间，使产品与制造装备产生革命性变化，从“数字一代”整体跃升至“智能一代”。从技术机理看，“智能一代”产品和制造装备也就是具有新一代HCPS特征的、高度智能化、宜人化、高质量、高性价比的产品与制造装备。

设计是产品创新的最重要环节，智能优化设计、智能协同设计、与用户交互的智能定制、基于群体智能的“众创”等都是智能设计的重要内容。研发具有新一代HCPS特征的智能设计系统也是发展新一代智能制造的核心内容之一。

5.2. 智能生产

智能生产是新一代智能制造的主线[40, 59, 60]。

智能产线、智能车间、智能工厂是智能生产的主要载体[61-63]。新一代智能制造将解决复杂系统的精确建模、实时优化决策等关键问题，形成自学习、自感知、

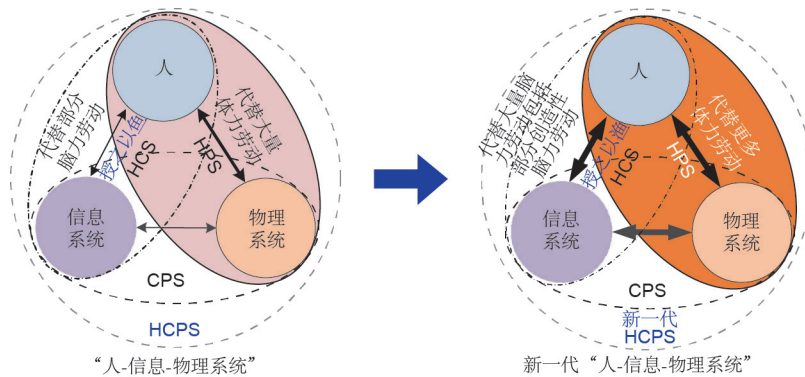


图6. 新一代“人-信息-物理系统”。

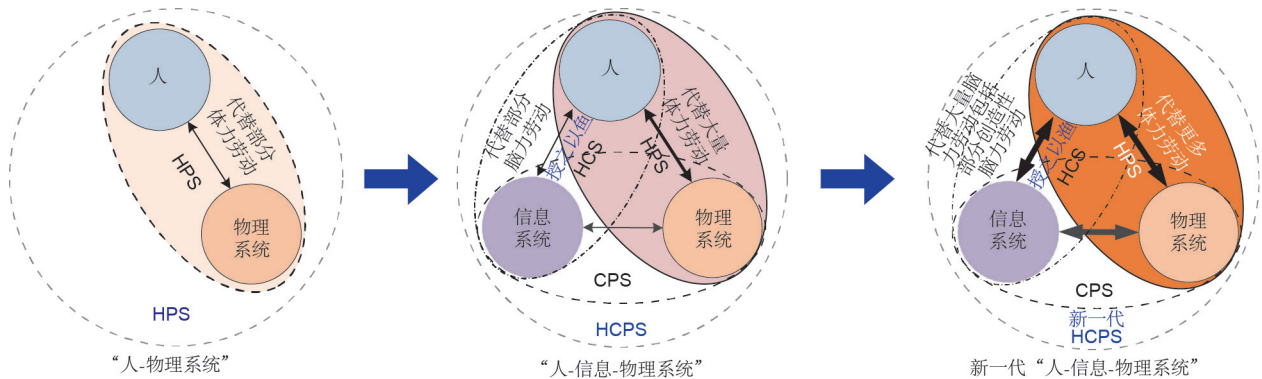


图7. 从“人-物理系统”到新一代“人-信息-物理系统”。

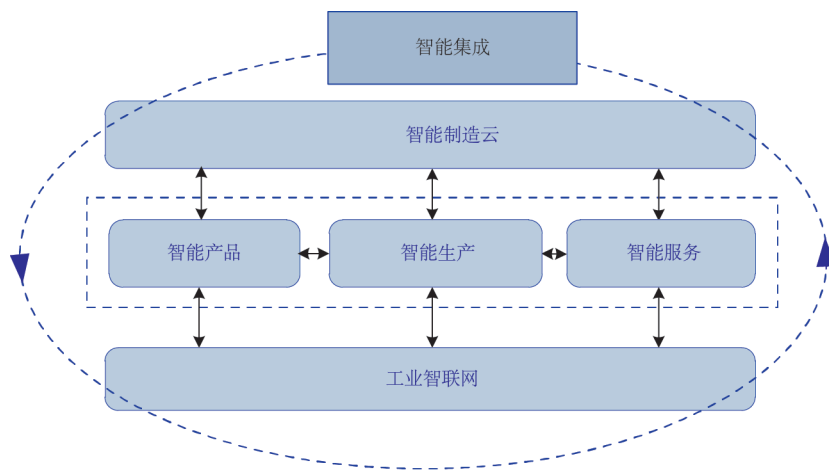


图8. 新一代智能制造的系统集成。

自适应、自控制的智能产线、智能车间和智能工厂，实现产品制造的高质、柔性、高效、安全与绿色。

5.3. 智能服务

以智能服务为核心的产业模式变革是新一代智能制造的主题[64, 65]。

在智能时代，市场、销售、供应、运营维护等产品全生命周期服务，均因物联网、大数据、人工智能等新技术而赋予其全新的内容。

新一代人工智能技术的应用将催生制造业新模式、新业态：一是，从大规模流水线生产转向规模化定制生产；二是，从生产型制造向服务型制造转变，推动服务型制造业与生产性服务业大发展，共同形成大制造新业态。制造业产业模式将实现从以产品为中心向以用户为中心的根本性转变，完成深刻的供给侧结构性改革。

5.4. 智能制造云与工业物联网

智能制造云和工业物联网是支撑新一代智能制造的基础[9, 20, 31, 44, 66, 67]。

随着新一代通信技术、网络技术、云技术和人工智能技术的发展和应用，智能制造云和工业物联网将实现质的飞跃。智能制造云和工业物联网将由智能网络体系、智能平台体系和智能安全体系组成，为新一代智能制造生产力和生产方式变革提供发展的空间和可靠的保障[68]。

5.5. 系统集成

新一代智能制造内部和外部均呈现出前所未有的系统“大集成”特征：

一方面是制造系统内部的“大集成”。企业内部设计、生产、销售、服务、管理过程等实现动态智能

集成，即纵向集成；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[69–72]。

另一方面是制造系统外部的“大集成”。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。智能制造与智能城市、智能农业、智能医疗等交融集成，共同形成智能生态大系统——智能社会。

新一代智能制造系统大集成具有大开放的显著特征，具有集中与分布、统筹与精准、包容与共享的特性，具有广阔的发展前景。

6. 并行推进、融合发展——中国推进智能制造的技术路线

在西方发达国家，智能制造是一个“串联式”的发展过程，他们是用几十年时间充分发展数字化制造之后，再发展数字化网络化制造，进而迈向更高级的智能制造阶段[16]。在中国，制造业对于智能升级有着极为强烈的需求，近年来技术进步也很快，但是总体而言，中国智能制造的基础非常薄弱，大多数企业，特别是广大中小企业，还没有完成数字化制造转型。面对这样的现实，中国如何推进制造业的技术改造、智能升级？

首先，必须实事求是，中国企业在推进智能升级的过程中要踏踏实实地完成数字化“补课”，夯实智能制造发展的基础；同时，不必走西方发达国家“顺序发展”的路径，努力探索一条智能制造跨越式发展的新路。

近几年，中国制造业界大力推进“互联网+制造”。一方面，一批数字化制造基础较好的企业成功转型，实现了数字化网络化制造；另一方面，部分原来还未实现

数字化制造的企业，则采用并行推进数字化制造和数字化网络化制造的技术路线，在完成数字化制造“补课”的同时，成功实现向数字化网络化制造的跨越。这给我们提供了成功的经验。

中国推进智能制造应采取“并联式”的发展方式，采用“并行推进、融合发展”的技术路线：并行推进数字化制造、数字化网络化制造、新一代智能制造，以及时充分应用高速发展的先进信息技术和先进制造技术的融合式技术创新，引领和推进中国制造业的智能转型。

未来若干年，考虑到中国智能制造发展的现状，也考虑到新一代智能制造技术还不成熟，中国制造业转型升级的工作重点要放在大规模推广和全面应用“互联网+制造”；同时，在大力普及“互联网+制造”的过程中，要特别重视各种先进技术的融合应用，“以高打低、融合发展”。一方面，使得广大企业都能高质量完成“数字化补课”；另一方面，尽快尽好应用新一代智能制造技术，大大加速制造业转型升级的速度。

再过若干年，在新一代智能制造技术基本成熟之后，中国制造业将进入全面推广应用普及新一代智能制造的新阶段。

我国在推动三个基本范式“融合发展”时，必须制定统一的标准。未来数十年，我国企业在智能升级过程中，将普遍面临多次范式转化和技术升级，必须高度重视制定和实行智能制造的相关标准，为后续发展做好准备，避免企业的低水平重复建设，有利于我国推进智能制造的分阶段实施和不断升级。

在实施“并行推进、融合发展”这一技术路线的过程中，要强调“五个坚持”的方针。

一是坚持“创新引领”。紧紧抓住新一代智能制造带来的历史性机遇，充分利用互联网、大数据、人工智能等先进技术，瞄准高端方向，加快研究、开发、示范、推广和应用新一代智能制造技术，用创新引领和推动制造业生产质量和效率提升，实现中国制造业由大变强。

二是坚持“因企制宜”。推动智能制造，要充分激发企业的内生动力。中国的企业参差不齐，实现智能转型不能搞“一刀切”，各个企业特别是广大中小企业，要结合企业发展实情，充分考虑技术先进性和技术经济性的平衡，实事求是地应用适合自己转型升级的技术路径。

三是坚持“产业升级”。推动智能制造不能仅仅停留在典型、示范、部分制造环节或者部分制造领域，而

是要着眼于广大企业、各个行业和整个制造产业，推动中国制造业质量变革、效率变革、动力变革，实现中国制造业全方位的智能化转型升级。

四是坚持建设良好的发展生态。各级政府、科技界、学界、金融界等社会各界要共同营造良好的生态环境，帮助和支持企业特别是广大中小企业的智能升级。营造“大众创业、万众创新”的良好环境；建设“用产学研金政”紧密结合的智能制造技术创新体系；形成从事推广应用各种共性使能技术和提供系统解决方案的新兴企业集群。

推进智能制造成败的关键在于人才，要以人为本，动员各方力量，努力培养一代智能制造优秀人才。

五是坚持开放与协同创新。中国制造业界要不断扩大与世界各国制造业界的交流，实行更高水平的开放。中国的市场是开放的市场，中国的创新体系是开放的创新体系。我们要和世界制造业的同行们共同努力，共同推进新一代智能制造，共同推进新一轮工业革命，使制造业更好地为人类造福。

致谢

感谢路甬祥、潘云鹤、朱高峰、吴澄、李伯虎、柳百成、王天然、卢秉恒、谭建荣、杨华勇、李德群、段正澄、蒋庄德、林忠钦、马伟明、丁荣军、高金吉、刘永才、冯培德、柴天佑、孙优贤、袁晴棠、钱峰、屈贤明、邵新宇、董景辰、朱森第、蔡惟慈、张纲、黄群慧、吕薇、余晓晖、宁振波、赵敏、郭朝晖、李义章等各位专家所作出的贡献。

感谢延建林、胡楠、古依莎娜、杨晓迎、徐静、刘默、刘丽辉、韦莎、马原野、张欣等各位同事所作出的贡献。

本研究由中国工程院重大咨询研究项目（2017-ZD-08）资助，特此感谢。

Compliance with ethics guidelines

ZHOU Ji, LI Peigen, ZHOU Yanhong, WANG Baicun, ZANG Jiyuan, and MENG Liu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Reference

- [1] State Council of the People's Republic of China. "Made in China 2025" plan unveiled [Internet]. Beijing: State Council of the People's Republic of China;

- [updated 2015 May 19; cited 2017 Dec 20]. Available from: http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm. Chinese.
- [2] Executive Office of the President, National Science and Technology Council. A national strategic plan for advanced manufacturing. Report. Washington, DC: Office of Science and Technology Policy; 2012 Feb.
- [3] White House Office of the Press. President Obama launches Advanced Manufacturing Partnership [Internet]. Washington, DC: White House; [updated 2011 Jun 24; cited 2017 Dec 20]. Available from: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>.
- [4] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Munich: National Academy of Science and Engineering (acatech); 2013 Apr.
- [5] Foresight. The future of manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK. Project report. London: The Government Office for Science; 2013 Oct.
- [6] The new face of industry in France [Internet]. Paris: Government of the French Republic; [cited 2017 Dec 20]. Available from: https://www.economie.gouv.fr/files/nouvelle_france_industrielle_english.pdf.
- [7] Taki H. Towards technological innovation of Society 5.0. *J Inst Electr Eng Jpn* 2017;137(5):275. Japanese.
- [8] Han SY. *Industry Innovation 3.0*. APO News 2014;44(4):8.
- [9] Evans PC, Annunziata M. *Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines*. Boston: General Electric; 2012 Nov.
- [10] National Manufacturing Strategy Advisory Committee, Center of Strategic Studies of the Chinese Academy of Engineering. *Intelligent manufacturing*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry; 2016. Chinese.
- [11] Hu H, Zhao M, Ning Z, Guo Z, Chen Z, Zhu D, et al. Three-body intelligence revolution. Beijing: China Machine Press; 2016. Chinese.
- [12] Lee J, Ni J, Wang AZ. *From big data to intelligent manufacturing*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press; 2016. Chinese.
- [13] Lee J, Qiu B, Liu Z, Wei M. *Cyber-physical system: The new-generation of industrial intelligence*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press; 2017. Chinese.
- [14] Zhou J. *Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025”*. *China Mech Eng* 2015;26(17):2273–84. Chinese.
- [15] Chen D, Heyer S, Ibbotson S, Salonitis K, Steingrímsson JG, Thiede S. Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *J Cleaner Prod* 2015;107:615–25.
- [16] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N, Mourtzis D, Michalos G, Georgoulas K. *Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook*. *Proc Inst Mech Eng Part B* 2009;223(5):451–62.
- [17] Kang HS, Lee JY, Choi SS, Kim H, Park JH, Son JY, et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *Int J Precis Eng Manuf-Green Technol* 2016;3(1):111–28.
- [18] Shah R, Ward PT. *Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance*. *J Oper Manag* 2003;21(2):129–49.
- [19] Shen W, Hao Q, Yoon HJ, Norrie DH. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Adv Eng Inform* 2006;20(4):415–31.
- [20] Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. *Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm*. *Enterp Inf Syst* 2014;8(2):167–87.
- [21] Tao F, Cheng Y, Zhang L, Nee AYC. *Advanced manufacturing systems: Socialization characteristics and trends*. *J Intell Manuf* 2017;28(5):1079–94.
- [22] Browne J, Dubois D, Rathmill K, Sethi SP, Stecke KE. Classification of flexible manufacturing systems. *FMS Mag* 1984;2(2):114–7.
- [23] Merchant ME. *Manufacturing in the 21st century*. *J Mater Process Technol* 1994;44(3–4):145–55.
- [24] Pan Y. *Heading toward artificial intelligence 2.0*. *Engineering* 2016;2(4):409–13.
- [25] Zhou J. *Digitalization and intelligentization of manufacturing industry*. *Adv Manuf* 2013;1(1):1–7.
- [26] Brown RG. *Driving digital manufacturing to reality*. In: Joines JA, Barton RR, Kang K, Fishwick PA, editors 2000 Winter Simulation Conference proceedings; 2000 Dec 10–13; Orlando, FL, USA. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2000. p. 224–8.
- [27] Yoshikawa H. *Manufacturing and the 21st century—Intelligent manufacturing systems and the renaissance of the manufacturing industry*. *Technol Forecast Soc Change* 1995;49(2):195–213.
- [28] Wu D, Rosen DW, Wang L, Schaefer D. *Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation*. *Comput-Aided Des* 2015;59:1–14.
- [29] Tian GY, Yin G, Taylor D. *Internet-based manufacturing: A review and a new infrastructure for distributed intelligent manufacturing*. *J Intell Manuf* 2002;13(5):323–38.
- [30] Lee J, Bagheri B, Kao HA. *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*. *Manuf Lett* 2015;3:18–23.
- [31] Li BH, Zhang L, Wang SL, Tao F, Cao JW, Jiang XD, et al. *Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model*. *Comput Integr Manuf Sys* 2010;16(1):1–7,16. Chinese.
- [32] Lee J. *E-manufacturing—Fundamental, tools, and transformation*. *Robot Comput-Integr Manuf* 2003;19(6):501–7.
- [33] Stankovic JA. *Research directions for the Internet of Things*. *IEEE IoT J* 2014;1(1):3–9.
- [34] Bryner M. *Smart manufacturing: The next revolution*. *Chem Eng Prog* 2012;(10):4–8.
- [35] Sandler U, editor. *Industrie 4.0—Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2013. German.
- [36] Hermann M, Pentek T, Otto B. *Design principles for Industrie 4.0 scenarios*. In: Bui TX, Sprague RH Jr, editors *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*; 2016 Jan 5–8; Kauai, HI, USA. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press; 2016. p. 3928–37.
- [37] Jazdi N. *Cyber physical systems in the context of Industrie 4.0*. In: Miclea L, Stoian I, Enyedi S, Vălean H, Stan O, Sanislav T, et al., editors *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*; 2014 May 22–24; Cluj-Napoca, Romania. Piscataway: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.; 2014. p. 1–4.
- [38] Lu Y, Morris KC, Frechette S. *Standards landscape and directions for smart manufacturing systems*. In: *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*; 2015 Aug 24–28; Gothenburg, Sweden. Piscataway: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.; 2015. p. 998–1005.
- [39] Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman ST. *Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review*. *Engineering* 2017;3(5):616–30.
- [40] Li BH, Hou BC, Yu WT, Lu XB, Yang CW. *Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: A review*. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng* 2017;18(1):86–96.
- [41] Kusiak A. *Smart manufacturing must embrace big data*. *Nature* 2017;544(7648):23–5.
- [42] Atzori L, Iera A, Morabito G. *The Internet of Things: A survey*. *Comput Netw* 2010;54(15):2787–805.
- [43] Mayer-Schönberger V, Cukier K. *Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think*. London: John Murray; 2014.
- [44] Marston S, Li Z, Bandyopadhyay S, Zhang J, Ghalsasi A. *Cloud computing—The business perspective*. *Decis Support Syst* 2011;51(1):176–89.
- [45] Mell P, Grance T. *The NIST definition of cloud computing*. Technical report. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2011 Sep. Report No.: SP 800-145.
- [46] Fosso Wamba S, Akter S, Edwards A, Chopin G, Gnanzou D. *How “big data” can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study*. *Int J Prod Econ* 2015;165:234–46.
- [47] Wu J. *Intelligence times*. Beijing: China CITIC Press; 2016. Chinese.
- [48] Han Q, Liang S, Zhang H. *Mobile cloud sensing, big data, and 5G networks make an intelligent and smart world*. *IEEE Netw* 2015;29(2):40–5.
- [49] Executive Office of the President, National Science and Technology Council. *Preparing for the future of artificial intelligence*. Washington, DC: Office of Science and Technology Policy; 2016.
- [50] State Council of the People's Republic of China. *Development planning for a new generation of artificial intelligence* [Internet]. Beijing: State Council of the People's Republic of China; [updated 2017 Jul 20; cited 2017 Dec 20]. Available from: http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm. Chinese.
- [51] Brynjolfsson E, McAfee A. *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. New York: W. W. Norton and Company, Inc.; 2014.
- [52] Sowe SK, Simmon E, Zettsu K, de Vaulx F, Bojanova I. *Cyber-physical human systems: Putting people in the loop*. *IT Prof* 2016;18(1):10–3.
- [53] Ma M, Lin W, Pan D, Lin Y, Wang P, Zhou Y, et al. *Data and decision intelligence for human-in-the-loop cyber-physical systems: Reference model, recent progresses and challenges*. *J Sign Process Syst* 2017. In press.
- [54] Baheti R, Gill H. *Cyber-physical systems*. In: Samad T, Annaswamy AM, editors *The impact of control technology*. New York: IEEE Control Systems Society; 2011. p. 161–6.
- [55] Rajkumar R, Lee I, Sha L, Stankovic J. *Cyber-physical systems: The next computing revolution*. In: *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*; 2010 Jun 13–18; Anaheim, CA, USA. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2010. p. 731–6.
- [56] Sha L, Gopalakrishnan S, Liu X, Wang Q. *Cyber-physical systems: A new frontier*. In: Singhal M, Serugendo GDM, Tsai JJP, Lee WC, Romer K, Tseng YC, et al., editors *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*; 2008 Jun 11–13; Taichung, Taiwan, China. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press; 2008. p. 1–9.
- [57] Schirner G, Erdogmus D, Chowdhury K, Padir T. *The future of human-in-the-loop cyber-physical systems*. *Computer* 2013;46(1):36–45.
- [58] Meyer GG, Främling K, Holmström J. *Intelligent products: A survey*. *Comput Ind* 2009;60(3):137–48.
- [59] Zuehlke D. *SmartFactory—Towards a factory-of-things*. *Annu Rev Control* 2010;34(1):129–38.
- [60] Zhong RY, Dai QY, Qu T, Hu GJ, Huang GQ. *RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production*. *Robot Comput-Integr Manuf* 2013;29(2):283–92.
- [61] Jardim-Goncalves R, Romero D, Grilo A. *Factories of the future: Challenges and leading innovations in intelligent manufacturing*. *Int J Comput Integr Manuf* 2017;30(1):4–14.
- [62] Wang S, Wan J, Li D, Zhang C. *Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook*. *Int J Distrib Sens Netw* 2016;12(1):1–10.
- [63] Anderl R. *Industrie 4.0—Advanced engineering of smart products and smart production*. In: *Proceedings of the 19th International Seminar on High Technology*; 2014 Oct 9; Piracicaba, Brasil; 2014. p. 1–14.

- [64] Holler M, Uebernickel F, Brenner W. Understanding the business value of intelligent products for product development in manufacturing industries. In: Proceedings of the 2016 8th International Conference on Information Management and Engineering; 2016 Nov 2–5; Istanbul, Turkey. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2016. p. 18–24.
- [65] Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mech Syst Signal Process* 2014;42(1–2):314–34.
- [66] Tao F, Cheng Y, Xu LD, Zhang L, Li BH. CCloud-CMfg: Cloud computing and Internet of Things-based cloud manufacturing service system. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1435–42.
- [67] Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot Comput-Integr Manuf* 2012;28(1):75–86.
- [68] State Council of the People's Republic of China. Guidance of deepening "Internet + Advanced Manufacturing" and developing Industrial Internet [Internet]. Beijing: State Council of the People's Republic of China; [updated 2017 Nov 27; cited 2017 Dec 20]. Available from: http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-11/27/content_5242582.htm. Chinese.
- [69] Browning TR. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions. *IEEE Trans Eng Manag* 2001;48(3):292–306.
- [70] Chen Y. Integrated and intelligent manufacturing: Perspectives and enablers. *Engineering* 2017;3(5):588–95.
- [71] China Cyber-Physical Systems Development Forum. Cyber-Physical Systems white paper (2017) [Internet]. Beijing: China Electronics Standardization Institute; c2009–17 [updated 2017 Mar 1; cited 2017 Dec 20]. Available from: <http://www.cesi.ac.cn/201703/2251.html>. Chinese.
- [72] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Notice on soliciting opinions on "Guidance of national standard of intelligent manufacturing system (2018 edition)" [Internet]. [updated 2018 January 15; cited 2018 Jan 17]. Available from: <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1653100/n3767755/c6013858/content.html>. Chinese.