



Research  
Intelligent Manufacturing—Review

## 对工业 4.0 背景下的智能制造的回顾

钟润阳<sup>a</sup>, 徐旬<sup>a,\*</sup>, Eberhard Klotz<sup>b</sup>, Stephen T. Newman<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand

<sup>b</sup> Industry 4.0 Campaign, Festo AG & Co. KG, Esslingen 73726, Germany

<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 31 March 2017

Revised 26 May 2017

Accepted 13 June 2017

Available online 24 October 2017

#### 关键词

智能制造

工业 4.0

物联网

制造系统

物理信息系统

### 摘要

作为新一代工业模式的工业 4.0 旨在提升生产灵活性, 也将继续提高企业生产效率, 保证更高的产品质量以及培养承担大规模定制的能力。因此, 它能够使企业在短时间内生产出更高质量的产品, 以应对日益个性化的产品带来的挑战。在工业 4.0 模式中, 智能制造发挥着重要的作用。典型的资源被转换成智能实体, 以便它们能够在智能环境中感知、行动和行为。为了充分理解在工业 4.0 背景下的智能制造, 本文对智能制造、物联网 (IoT) 支持制造和云制造等相关课题进行了综合评述, 在我们已有的分析基础上对其中的相似之处和不同点进行了重点探讨。在文中我们还回顾了一些用于实现智能制造的关键技术, 如物联网、网络物理系统 (CPS)、云计算、大数据分析 (BDA) 以及信息和通信技术 (ICT)。之后我们将介绍全球智能制造业的发展动向, 包括来自不同国家的政府战略计划以及来自欧盟、美国、日本和中国的主要跨国公司的战略计划。最后, 我们提出其当前所面临的挑战和未来的研究方向。本文所讨论的概念将为实现备受期待的第四次工业革命带来新的思路。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the 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

工业 4.0 是一个由德国提出的发展战略, 它旨在创建智能工厂, 而工厂的制造技术都是由网络物理系统 (CPS)、物联网 (IoT) 和云计算 [1,2] 升级改造过的。在工业 4.0 时代, 制造系统能够监测制造中的物理过程, 创造一个所谓物理世界的“数字双胞胎”(或称作“网络双胞胎”)并通过即时通信以及与人类、机器、传感器等 [3] 之间的合作做出明智的决策。工业 4.0 将嵌入式生产系统技术与智能生产过程结合起来, 为新的技术时代的到来铺平道路。这一发展战略将从根本上改变产业价值链、生产价值链和商业模式。

在工业 4.0 的背景下, 制造系统被升级和智能化。智能制造利用先进的信息和制造技术来实现灵活、智能和可重构的制造流程, 以适应动态和全球化的市场 [4]。它能够提供整个制造供应链、各个行业、大中小型企业需要的物理过程和信息流 [5,6]。智能制造需要某些支撑技术, 以便使设备或机器能够根据过去的经验和学习能力在不同情况和要求下来改变自身的行为 [7]。这些技术使其能够直接与制造系统进行通信, 从而使问题得到解决并及时做出适应性决定。有些技术也应用了人工智能技术 (AI), 它使得制造系统能从经验中学习, 并最终实现一个互联的、智能的和无处不在的工业实践。

\* Corresponding author.

E-mail address: [xun.xu@auckland.ac.nz](mailto:xun.xu@auckland.ac.nz)

与智能制造相类似的概念还包括云制造和物联网支持制造。为了充分了解工业4.0背景下的智能制造，本文回顾了Scopus和Google学术数据库中的165篇论文，并明确描述了智能制造、物联网支持制造和云制造等关键概念。接着，本文又讨论了诸如物联网、网络物理系统、云计算、大数据分析（BDA）以及信息和通信技术（ICT）等用于支持智能制造的关键技术。之后讨论了全球智能制造的发展动向，其中包括来自欧盟、美国、日本和中国的政府机构和大型企业的案例。最后，本文从对工业从业者和学术界的启发中探讨智能制造的未来发展前景。

2005—2016年间的关于智能制造的论文发表数据已经从Scopus数据库中收集（图1），图中显示了关于该主题的论文数量在这段时期中呈稳定增长的趋势。

图1（a）显示2005—2016年发表的有关智能制造的论文数量。从2005年到2006年，论文数量急剧增加，从大约100篇增长至150篇；从2007年到2014年，该数量呈稳定增长趋势。2014—2015年间，论文发表数量再一次显著增长，225篇论文于2015年发表。图1（b）列举了智能制造领域发表的顶尖作品的来源。排名前五的是 *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*（83）、*Computer Integrated Manufacturing Systems*（69）、*Journal of Intelligent Manufacturing*（49）、*International Journal of Production Research*（46）和 *Expert Systems with Applications*（33）。图1（c）列出了本研究领域的顶尖大学或研究机构的论文发表情况。排名前五的大学分别是上海交通大学（42）、北京航空航天大学（31）、浙江大学（29）、重庆大学（20）、清华大学（20）。图1（d）显示了这一领域的顶尖学者的论文发表情况；图1

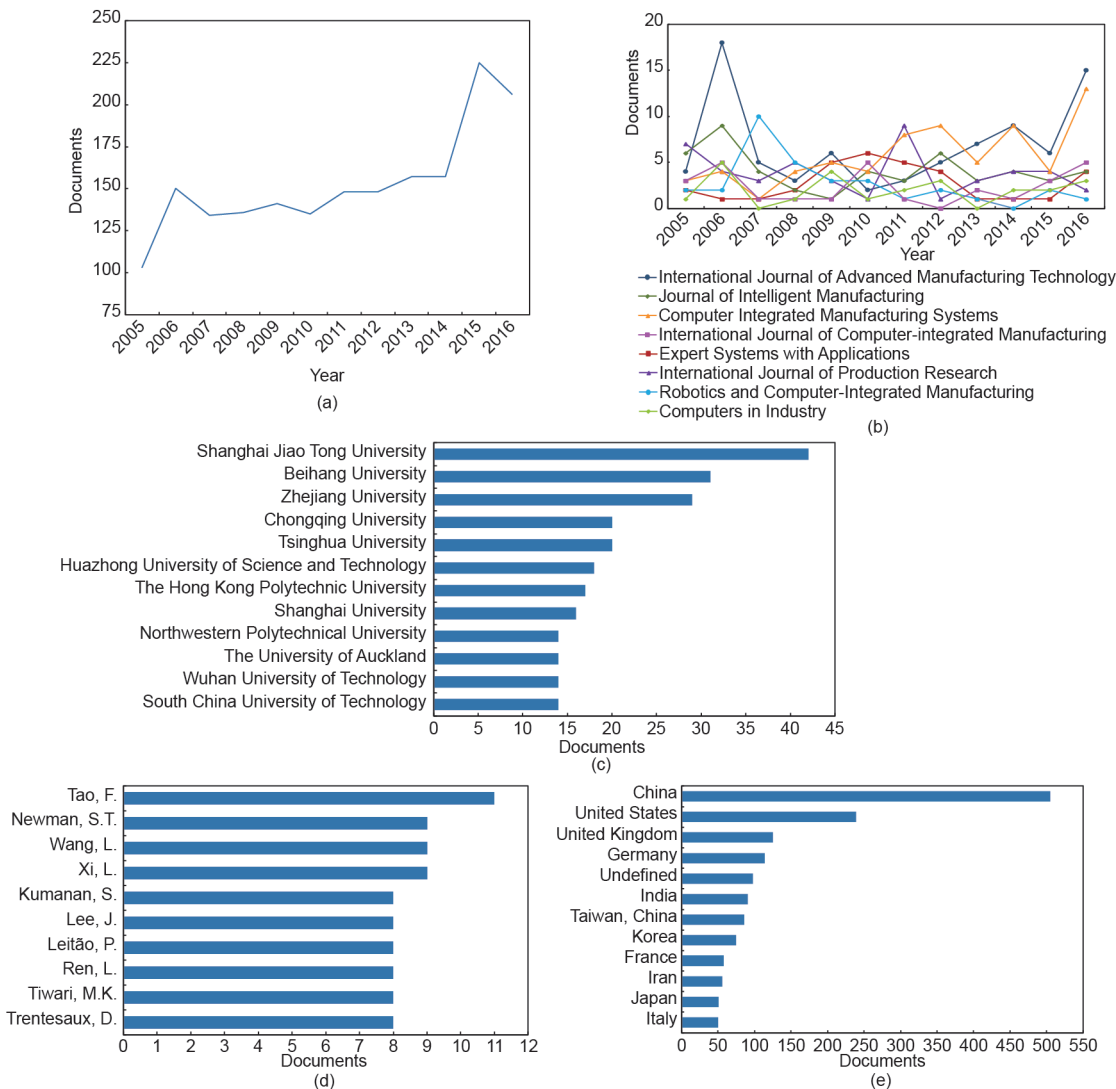


图1.来自Scopus数据库的统计数据（搜索关键字：intelligent manufacturing，日期：2017年3月31日）。（a）每年发表的论文数量；（b）按来源分类的论文；（c）按隶属关系分类的论文；（d）按作者分类的论文；（e）按国家/地区分类的论文。

(e) 则列出了在这一领域较为活跃国家和地区，排名前三的是中国、美国和英国。

这些论文是依据智能制造、物联网支持制造和云制造等核心概念在Scopus和Google学术数据库中检索的。通过分析这些关键技术和与之相关的全球发展动向，我们将进一步关注智能制造未来的前景。

## 2. 主要概念

制造业是一个国家经济的基础，并深刻地影响着国计民生。而新兴技术可以对制造模式、方法、概念甚至是商业发展带来改革性的影响。本部分回顾了三种主要的先进制造技术：智能制造、物联网支持制造和云制造。

### 2.1. 智能制造

智能制造（也称为智慧制造）是一个广泛的制造概念，其目的是通过充分利用先进的信息和制造技术来优化生产和产品交易[8]。它被认为是一种基于智能科技的新型制造模式，极大地改良了典型产品整个生命周期的设计、生产、管理和集成。人类可以使用各种智能传感器、适应性的决策模型、先进材料、智能设备和数据分析来优化整个产品生命周期[9]，而生产效率、产品质量和服务水平也会得到提高[10]。一个制造企业在面对全球市场的动态和波动时展现出来的能力，有时帮助其提升竞争力。

智能制造系统（IMS）是实现这一概念的一种形式，它被称为是新一代的制造系统，这种系统是通过采用新的模式、新的形式和新的方法来把传统制造系统升级为智能系统的。在工业4.0时代，智能制造系统使用服务导向型的体系结构（SOA）并通过互联网为终端用户提供可协作的、可定制的、灵活的以及可重构的服务，从而形成一个高度集成化的人机交互制造系统[11]。这种高度集成的人机合作的目的是建立一个由智能制造系统中多种制造元素组成的生态系统，从而使组织、管理和技术层面可以无缝连接。智能制造系统其中的一个范例是费斯托公司网络物理工厂（Festo Didactic Cyber-Physical Factory），作为德国政府创建的工业4.0战略计划的一部分[12]，这座工厂为大型供应商、各高校和研究所等提供技术训练和资格认证。

人工智能可以提供学习、推理和行为等典型功能，因此在智能制造系统中扮演着重要的角色。随着人工智

能技术的不断应用，人类在智能制造系统中的参与度大大降低。例如，人工智能可以自动配置材料和生产组合物，而且可以即时地监测和控制生产过程和制造操作[13,14]。随着工业4.0的概念不断获得认可，自主传感、智能互联、智能学习分析和智能决策将最终得以实现。在未来，智能调度系统可以根据人工智能技术和问题求解器来安排工作，并可以在支持互联网的平台中作为服务提供给其他用户[15]。

### 2.2. 物联网支持制造

物联网支持制造是指一种先进的理念，在这种理念的指导下可以将典型的生产资源加工成可以互相感知、互联以及互动反应智能制造实物，以实现自动化和适应性的制造逻辑[16]。在物联网支持制造环境中，人与人之间、人类与机器之间以及机器与机器之间通过智能感知实现了互联[17]。因此，物联网技术在制造业中的应用程序可以使资源实现按需使用和高效共享的价值。物联网技术被认为是一个在工业4.0框架下的现代制造业概念，并取得了最新的进展和突破。例如，用于数据获取和分享的前沿信息技术（IT）基础设施就极大地影响了制造系统的性能。

物联网支持制造能够使各种制造资源（如机器、工人、材料和就业岗位）之间实现即时数据收集与共享[18]。即时数据收集与共享是在诸如射频识别（RFID）和无线通信标准等的关键技术的基础上实现的。通过使用射频识别技术，其可以使包括物料的移动在内的物理制造流程与各种生产操作的可见性和可追溯性等相关信息无缝集成[19,20]。射频识别标签和读取器被部署到典型的制造场所，如车间、装配线和仓库，在这里，射频识别设备将制造实物创造智能产品。这样就可以实时地检测到车间扰动并反馈给制造系统[21]，从而提高制造和生产决策的有效性和效率。

已经有一些物联网支持制造的实例见诸报道。为提高制造的灵活性，人类将一种用于摩托车装配线的射频识别即时生产管理系统引入了制造过程中[22]。隆鑫通用公司（Loncin Motor Co., Ltd.）运用这一制造系统从原材料、在制品（WIP）项目和工作人员中收集即时生产数据，增强其可见性、可追踪性和可溯源性，以吸引企业的兴趣。怀集登云汽配股份有限公司[Huaiji Dengyun Auto-Parts(Holding) Co., Ltd.]是一个汽车零部件制造企业，该企业的一项案例研究也为这一系统做了说明[23]。这个中小型发动机阀门制造商在整个业务中

应用了基于射频识别的车间制造解决方案。通过使用射频识别支持的即时数据，企业的制造执行系统和资源规划系统的集成程度得到了提高。参考文献[24]中提到了广东志高空调有限公司所采用的一例实施基于射频识别的车间管理系统的相关信息。在这个案例中，射频识别技术提供了自动和准确的实体数据，以实现即时实体可见性和可追溯性。在模具行业、汽车零件和配件制造行业、产品生命周期管理和航空航天维修业务的生产实践中可以找到更多使用射频识别系统的案例[25–28]。

### 2.3. 云制造

云制造是在云计算、物联网、虚拟化和服务导向型技术等支持下的一种先进制造模式，它可以将制造资源转化为可全面共享和流通的服务[29,30]。云计算涵盖了整个产品生命周期中的设计、模拟、制造、测试和维护，因此通常被看作是一个平行的、网络化的、智能化的制造系统（“制造云”），而这个系统可以更加智能地管理生产资源和能力。因此，可以为所有类型的终端用户[31]按需提供制造服务。

在云制造中，各种生产资源和加工能力可以被智能地感知到并连接到云中。射频识别和条码之类的物联网技术可以用来自动管理和控制这些资源，使它们可以进行数字化共享。服务导向型技术和云计算为云制造的概念提供了重要支持。因此，可以将制造资源和能力虚拟化、封装并分发到可以访问、调用和实现的各种服务中[32]。此类服务可以按照预先定义的特定规则进行分类和聚合。现在，有许多不同种类的制造云被用于处理各种各样的制造服务[33]，不同的用户可以通过虚拟制造环境或平台来搜索、访问和调用合适的服务。

云部署模式、制造资源建模、需求和服务匹配等才是云制造中的关键问题。由于应该为服务共享建立虚拟制造环境或解决方案，因此需要公共、私有、社区和混合云等云部署方法，以便终端用户随时利用其服务。例如，混合云是一种多种云的混合体，其可以提供多种部署模式，也具备灵活部署以及易于访问跨业务应用程序的优势[34]。例如，机器和装配线等制造资源也需要被建模，以便分配和共享服务。德国电气和电子制造商协会（ZVEI）和一些类似的德国协会组织已经发展出一种先进的方法，他们不仅在工业4.0产品和服务（参考体系结构模型工业（RAMI）模型）[35]中创建了参考体系结构，还描述了几个为了数据和资源能连续使用而建立的设备管理或执行架构[36]。然而，这样的开发是具

有挑战性的，因为大量的物理制造实物的类型和异构格式迥异，而这可能会为其发展带来难以预见的建模复杂性[37]。云制造中的制造需求和服务匹配非常重要。这些匹配不仅包括服务提供商和客户的最佳解决方案，还包含服务计划、调度和执行[38]。

### 2.4. 比较

鉴于现代先进制造系统将对我们的未来生活产生巨大的影响，上述三个在工业4.0的背景下产生的概念显得尤为重要。为了充分理解这些概念并找出它们之间的差异和相似之处，表1[11,33,39–50]从四个角度为其做了比较：主要特征、支持技术、主要研究和应用。

从表1可以看出，这些概念已被广泛地研究和实施。它们有一些相似之处，比如制造系统中智能决策的目的以及对各种制造资源的优化[51]。在这三个主要概念中使用了物联网、云计算和大数据分析在内的几种核心技术，这些技术将会在下一节里详细介绍。这些概念的研究重点是不同的，也是基于不同的研究思路得出的。例如，智能制造集中于人机之间和机器对机器的互动交流，而物联网支持制造则强调生产决策模型和SMO建模的实时数据。云制造侧重于制造服务的配置和建模。从应用程序的角度来看，物联网支持制造已经获得了成功，文献中报道了大量的行业案例，且这一概念得到了专业培训和教育理念的支持。然而，智能制造和云制造仍处于研究或概念验证阶段，并且实际发展案例是有限的。标准化概念是由一些像ZVEI这样的权威协会所提出的。现如今所报道的关于智能制造和云制造的案例分为两类：系统架构说明和虚拟制造公司操纵场景演示。但是，要真正实现它们还面临很多困难。

## 3. 关键技术

本节主要回顾了智能制造中使用的一些关键技术，包括物联网、网络物理系统、云计算、大数据分析及其他信息和通信技术。

### 3.1. 物联网

物联网指的是一个通过网络互联的世界，在这个世界中，各种实物都嵌入了电子传感器、执行器或其他数字设备，这样它们就可以联网并连接用于收集和交换数据[52]。一般而言，物联网能够提供物理实体、系统和

表1 核心概念的比较

Concepts	Major characteristics	Supporting technologies	Major research	Applications	Refs.
Intelligent manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AI-based smart decision-making</li> <li>• Advanced automotive production</li> <li>• Adaptive and flexible manufacturing systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Big data processing</li> <li>• Advanced robotics</li> <li>• Industrial connectivity services</li> <li>• Last-generation sensors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced manufacturing decision-making models</li> <li>• Human-machine integration</li> <li>• AI-enabled machine learning</li> <li>• Machine-to-machine connectivity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A smart manufacturing system with a portrait of an ISO STEP tolerancing standard</li> <li>• A product life-cycle test bed enabling intelligent manufacturing</li> <li>• Agent-based IMSs</li> <li>• Intelligent manufacturing planning and control systems</li> </ul>	[11,39–42]
IoT-enabled manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auto-ID technology-based smart manufacturing system</li> <li>• Real-time data collection</li> <li>• Real-time visibility and traceability of production processes</li> <li>• Real-time manufacturing decision-making</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IoT</li> <li>• Wireless production</li> <li>• BDA</li> <li>• Cloud computing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real-time data-driven decision-making models</li> <li>• Real-time data visualization</li> <li>• SMO modeling</li> <li>• Models of SMO behaviors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• An RFID-based resources management system</li> <li>• An IoT-enabled smart construction production system</li> <li>• An RFID-based job shop WIP inventories management system</li> <li>• An RFID-enabled real-time production planning and scheduling system</li> </ul>	[43–47]
Cloud manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manufacturing service distribution and sharing</li> <li>• Intelligent capability management</li> <li>• Manufacturing cloud service management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cloud computing</li> <li>• IoT</li> <li>• Virtualization method</li> <li>• Service-oriented technology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modeling of manufacturing resources and capabilities</li> <li>• Manufacturing services configuration</li> <li>• Manufacturing cloud architecture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data visualization in a cloud manufacturing shop floor</li> <li>• QoS-based service composition selection in a cloud manufacturing system</li> <li>• Smart cloud manufacturing using the IoT</li> <li>• A semantic web-based framework in cloud manufacturing</li> </ul>	[33,48–50]

Auto-ID: automatic identification; STEP: standard for the exchange of product model data; QoS: quality of service.

服务的高级连接，从而实现实体间的通信和数据共享。在各个行业中，物联网可以实现照明、加热、加工、机器人真空和远程监控的控制和自动化。物联网中的一个关键技术是自动识别（auto-ID）技术，它可以用来制作智能实物。例如，早在1982年，卡耐基梅隆大学（Carnegie Mellon University）的研究人员就将互联网连接的设备应用到改装的可乐机上[53]。物联网现在被认为是无处不在的无线标准、数据分析和机器学习等尖端技术的广泛融合[54]。这意味着随着它不断渗入我们日常生活的各个方面，大量的传统领域将受到物联网技术的影响。

射频识别技术就是一个例子。据报道，到2020年将会有近208亿台设备将被连接并充分利用射频识别技术[55]。这种转变将对大部分行业产生影响，尤其是制造业。现在，射频识别技术已被用于识别位于仓库、生产车间、物流公司、配送中心、零售商和处置/回收等各阶段的各种物品[56]。被识别之后，这些物体具有智能感应能力，可以通过特定的互联形式相互连接和交互，从而可以从其移动或感知行为中创建大量的数据。智能实体之间的互联性是预先定义的，在配备射频识别阅读器和标签之后，这些物体被赋予特定的应用程序或逻辑，如制造过程[57]。射频识别设备不仅可以帮助终端

用户完成日常运营，还可以捕获与这些操作有关的数据，从而实现生产管理的实时性。表2[58–66]列出了物联网的典型应用程序，表明物联网技术已经被广泛应用于工业领域。

表2显示，物联网技术已被广泛应用于智能城市、制造业和医疗保健等不同领域。不同的应用程序服务于不同的目标，因此各个领域都可以得到发展。法国等发达国家以及中国和印度等发展中国家都在为寻求特定项目合作而积极努力。因为各国和各地区之间需要协作合作，尤其是在采用物联网等尖端技术时，所以这些协作不仅加强了物联网技术的发展，而且在一定程度上解决了全球性的问题。

### 3.2. 网络物理系统

网络物理系统是物理实物和软件紧密交织在一起的一种机制，使得不同的组件可以通过各种各样的方式交换信息[67,68]。网络物理系统涉及大量的跨学科方法论，如控制论、机械工程和机电一体化、设计和过程科学、制造系统和计算机科学。其中一个关键的技术方法是嵌入式系统，它有利于物理实物与其计算元素或服务之间高度协调和组合关系的形成[69]。与传统嵌入式系统不同的是，CPS支持系统包括通过物理输入和输出设

表2 物联网技术的典型应用

Industries/companies	Aims	Improvements	Future research	Refs.
Smart community, Canada and China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neighborhood watch</li> <li>• Pervasive healthcare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Value-added services such as utility management and social networking</li> <li>• Suspicious event detection in neighborhood watch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cooperative authentication</li> <li>• Detecting unreliable nodes</li> <li>• Target tracking and intrusion detection</li> </ul>	[58]
A cloud implementation using Aneka, Australia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sharing data between application developers</li> <li>• IoT application-specific framework</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A seamless independent IoT working architecture</li> <li>• Open and dynamic resource provisioning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrated IoT and cloud computing</li> <li>• Big data for IoT applications</li> </ul>	[59]
Healthcare and social applications, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improving the quality of human life</li> <li>• Examining potential societal impacts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enabling ambient intelligence</li> <li>• Ubiquitous communication</li> <li>• Increased processing capabilities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IoT theory for management and operations</li> <li>• IoT data complexity analysis</li> <li>• IoT-enabled global business and commerce</li> </ul>	[60]
Machine-to-machine measurement, Ireland and France	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Easing the interpretation of sensor data</li> <li>• Combining domains</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cross-domain connection</li> <li>• Improved performance</li> <li>• Enhanced interpretation from users</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Domain knowledge extraction</li> <li>• Interoperable ontologies and datasets</li> </ul>	[61]
Smart cities, Padova, Italy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing open access to selected subsets</li> <li>• Building an urban IoT system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improved energy efficiency</li> <li>• Reduced traffic congestion</li> <li>• Smart lighting and parking</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Smart city data analysis</li> <li>• Smart connectivity</li> <li>• System extension</li> </ul>	[62]
IoT Gateway system, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Helping telecom operators transmit data</li> <li>• Controlling functions for sensor network</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improved functions such as data display, topology, etc.</li> <li>• Enhanced data transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advanced IoT Gateway functions</li> <li>• Security management</li> </ul>	[63]
IoT application framework, India and France	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Developing an IoT application framework</li> <li>• Implementing the methodology to support stakeholders' actions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improved productivity of stakeholders</li> <li>• Improved collaborative work</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapping algorithm cognizant of heterogeneity</li> <li>• Developing concise notion for Srijan development language</li> <li>• Testing support for IoT application development</li> </ul>	[64]
IoT-enabled energy management, Italy and Spain	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Illustrating energy management at production level</li> <li>• Proposing IoT-based energy management in production</li> <li>• Providing a framework to support the integration of energy data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrated energy data management</li> <li>• Improved energy efficiency</li> <li>• Enhanced energy data analysis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conventional hypothesis testing</li> <li>• System extension</li> </ul>	[65]
IoT-enabled real-time information capturing and integration framework, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing a new paradigm of IoT to manufacturing</li> <li>• Designing a real-time manufacturing information integration service</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real-time information capturing</li> <li>• Improved logistics</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimal production using captured data</li> <li>• Prediction model of production exceptions</li> </ul>	[66]

计和开发的网络交互以及网络服务，如控制算法和计算能力。因此，大量的传感器在网络物理系统中起着重要的作用。例如，多种传感装置被广泛用于网络物理系统中以实现不同目的，如触摸屏、光传感器和力传感器。尽管如此，集成几个不同的子系统成本高、耗时长，而整个系统还必须保持可操作性和功能性。网络物理系统应用程序的异构性和复杂性使这一技术在开发和设计中的高可信度、安全和可认证的系统和控制方法方面产生了一些挑战[70]。

许多行业已经启动了在网络物理系统领域的项目。例如，Festo Motion Terminal是一个充分利用了机械、电子、嵌入式传感器和控制以及软件或是应用程序的智能融合的标准化平台[71]。数字气动技术使子系统可以自适应和自我调节[72]。利用基于传感器的通信

系统实现自我管理的典型网络物理系统应用程序已经见诸报端。在网络物理系统中，大量的无线传感器网络可以监督环境因素，使得来自环境的信息可以被集中控制并参与管理决策[73]。网络物理系统在不同领域都有应用，表3 [71,72,74–82]提供了网络物理系统的典型应用案例。

表3显示，网络物理系统是学术界和工业界都非常感兴趣的研究领域。很多国家已经投资开发网络物理系统，并把它作为保持全球经济竞争力的前瞻性概念。工程师、行业专家和计算机科学家之间展开了多学科合作，通过识别各个行业的需求、机遇和挑战加速了设计和开发这一系统的进程。如表3所示，这些进展对医疗保健、生物、土木工程、自动驾驶汽车、智能制造及配电等诸多领域都将产生重大影响。

表3 网络物理系统的典型应用

Industries/companies	Aims	Improvements	Future research	Refs.
Power systems, USA and Canada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPS test bed implemented in RTDS and OPNET</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing a realistic cyber-physical testing environment in real time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studying CPS vulnerabilities in various power system models</li> </ul>	[74]
Children keeper service, Korea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proposing a key design method for CPSs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designing CPSs with high-quality more feasibly and practically</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Data-driven CPS decision-making models</li> </ul>	[75]
Water distribution networks, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrated simulation method for reflecting the operation and interaction of CP networks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilitating modeling CPSs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extending the models and techniques for other CPS domains</li> </ul>	[76]
Civil structure, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Developing and assessing CPSs for real-time hybrid structural testing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Illustrating the feasibility of virtualizing CPS components</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improving hydraulic actuator models</li> <li>• Quantifying further scalability of the proposed approach</li> </ul>	[77]
Fire handling, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Developing a simulation model for emergency handling problems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtaining optimal sensing and robot scheduling policies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increasing computational time for more complicated scenarios</li> </ul>	[78]
Autonomous vehicles, USA and Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proposing a parallel programming model for CPSs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guaranteeing timeliness for complex real-time tasks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Addressing the dynamic nature of CPSs in the proposed model</li> </ul>	[79]
Intelligent manufacturing, Sweden and USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Associating a CPS with holons, agents, and function blocks</li> <li>• Using CPS to digitalize pneumatics with applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ease of system implementation in decentralized or cloud environment</li> <li>• Maximized flexibility and advanced condition monitoring</li> <li>• Self-adjusting and self-adopting subsystem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Practical in dynamic manufacturing with uncertainty</li> <li>• Time-sensitive networking for synchronized motion control</li> <li>• Distributed decision-making and self-organization between (sub) systems</li> </ul>	[71,72,80]
Healthcare, Brazil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model-based architecture for validating medical CPSs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing enough information to perform medical tests</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proposing architecture for other medical device models</li> </ul>	[81]
Communication, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyzing the features of machine-to-machine, wireless sensor networks, CPS, and the IoT</li> <li>• Reviewing home machine-to-machine networks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outlining the challenges related to CPS design</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Future design of CPSs</li> </ul>	[82]

RTDS: real-time digital simulator; CP: cyber-physical.

### 3.3. 云计算

云计算是一个通用术语，指的是通过互联网上可视化和可扩展的资源提供计算服务[30,83]。资源的可扩展性使得云计算吸引了众多企业所有者的目光，因为他们可以从较小的规模开始做起，当规模扩大时再投资以获得更多资源[84]。根据美国国家标准与技术研究院(NIST)的介绍，一个理想的云应该有五个特征：按需自助服务、高速网络接入、资源池、快速的任务弹性和可测量的服务。这个云模型由四个部署模型组成，即公共、私有、社区和混合云模式，以及三种交付模型——“软件即服务”“平台即服务”和“基础架构即服务”[85]。不同类型和规模的组织正在采用云计算，云计算可以最少的预算增加他们的容量，而不需要再投资新软件、新基础设施或培训新人员[86]。

尽管云计算具有明显的优势，但是有一些亟待解决的挑战会影响这个新型理念的可靠性[87]。研究人员和服务提供商已经进行了大量的研究来确定云计算相关的问题，并为其分类。基于文献资料，在云计算领域人们

最关心的问题与隐私，也与安全性有关[88–90]。诸如数据管理和资源分配[91,92]、负载平衡[93,94]、可扩展性和可用性[95]、迁移到云和兼容性[96,97]以及云之间的相互操作性和通信等[98,99]问题和挑战，降低了云基系统的可靠性和效率。参考文献[100]解决了这些挑战并为其提供了最合适解决方案。

随着信息通信技术的进步，云计算可以被认为是水、电、煤气和电话以外的“第五个实用工具”[101]。得益于近年来与之相关的大量创新和研究[102]，云计算得到了迅速发展。表4[103–111]列举了云计算的一些典型应用。

如表4所示，云计算从教育、医疗领域到制造、运输领域的应用已经被广泛报道。只要使用正确的中间件，云计算系统就可以执行普通计算机可以运行的所有应用程序。从通用文字处理软件到为组织设计和开发的定制业务程序，都能够在云系统上执行。由于灵活性高、成本低、弹性大以及资源利用率高，云计算获得了越来越高的竞争力。

表4 云计算的典型应用

Industries/organizations	Aims	Improvements	Future research	Refs.
Business, France	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proposing a method for cloud business applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducing the technical knowledge for provisioning cloud applications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integrating a discovery approach and semantic matching in the components discovery phase</li> <li>Adding a negotiator module</li> </ul>	[103]
National Natural Science Foundation, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Presenting a hybrid information fusion approach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Achieving multilayer information fusion</li> <li>Identifying global sensitivities of input factors under uncertainty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>More comprehensive information fusion approach</li> </ul>	[104]
Business and healthcare, UK	<ul style="list-style-type: none"> <li>Developing cloud computing in the life sciences</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introducing cloud models to life-science business</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifying major issues</li> </ul>	[105]
IT and business, UK	<ul style="list-style-type: none"> <li>Highlighting aspects and uniqueness of cloud computing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examining the true benefits and costs of cloud computing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Application extension in other industries</li> </ul>	[106]
Manufacturing, Iran	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proposing a service-oriented approach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adopting a layered platform (LAM-MOD) for distributed manufacturing agents</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Upgrading the XMLAYMOD layers' procedures and structures</li> </ul>	[107]
Education, India	<ul style="list-style-type: none"> <li>Outlining the benefits of using cloud computing for students</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Providing opportunities for students to test, learn, experiment, and innovate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>More cloud-based education applications</li> </ul>	[108]
ICT, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proposing a forensic method for efficient file extraction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efficient location of large files stored across data nodes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Researching the parallel extraction method for a Hadoop distributed file system</li> <li>Researching the analysis method on EditLogs</li> </ul>	[109]
ISO-New England, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Developing cloud-based power system simulation platform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Security schemes</li> <li>Cost savings</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Real-life applications of this system</li> </ul>	[110]
Transportation, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formulating a new entropy-cloud approach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solving the railway container station reselection problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Study, design, and plan for the transferring network</li> </ul>	[111]

### 3.4. 大数据分析

随着互联网和物联网的不断发展，数据越来越容易获取，且无处不在，导致了多个行业出现大数据问题[112]。大数据问题通常来自多个渠道，包括传感器、设备、视频/音频、网络、日志文件、交易应用程序、万维网以及社交媒体等[113]。“大数据环境”在制造业中逐渐成型。虽然物联网（如智能传感器）已经精简了数据收集的过程，但仍然存在问题：这些数据是否能够被适当处理，以便在合适的时间为了明确的目的提供正确的信息[114]。在大数据环境下，数据集要大得多，传统数据分析软件可能无法分析如此复杂的数据[115]。因此，对于拥有大量来自操作和车间的数据的组织 and 生厂商来说，找到隐藏模式、位置相关性、市场趋势、客户偏好和其他有用的商业信息对高级分析技术来说至关重要。

学术界和工业界的研究表明，零售商可以通过引进BDA技术，使投资回报率提高15%~20% [116]。在大多数行业，对客户关系管理（CRM）数据进行分析，被认为是一种能有效提高客户参与度和满意度的方法[117]。例如，汽车公司可以通过分析历史订单和客户反馈信息，推出一款改进车型，比以前更能满足客户要求

[118]。而且，对于机器和生产过程数据的进行深入分析，也能够激发企业的生产力并提高其竞争力[119]。例如，在生物制药生产过程中，必须监控数百种变量，以保证准确性、质量和产量。通过处理大数据，制造商可以发现对质量或者产量影响最大的重要参数[120]。为了研究BDA在各个行业的应用程序，表5[112,118,120-124]列举了典型的应用案例。

现在BDA技术已经日趋成熟，如表5所示，互联网巨头（如Google）和大型零售商（如Tesco）并不是BDA技术的唯一受益者。越来越多的制造企业[如通用电气（GE）]也致力于在大数据环境下优化生产和维护流程。这里列出的应用程序大部分是关于制造业的，而各行各业的情况可能不尽相同。对于热衷于应用BDA并获得显著价值的制造商，可以参考电子商务公司和金融投资机构的大量申请。

### 3.5. 信息和通信技术

信息通信技术（ICT）是一种经过扩展的信息技术，这种技术强调了统一通信和电信一体以及其他能够存储、传输和操作数据和信息的技术[125]。ICT涵盖了广泛的计算机科学和信号处理技术，如无线系统、企业中



表5 BDA的典型应用

Industries/companies	Aims	Improvements	Future research	Refs.
Google, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Refining its core search and ad-serving algorithms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Searching patterns and recommended searches based on what others have searched, external events, and etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Studying the algorithm</li> </ul>	[121]
Retailers, UK and USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tesco: precise promotions and strategic segmentation of customers</li> <li>Amazon: accurate recommendations for customers</li> <li>Wal-Mart: supply-chain optimization</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mining customer data from loyalty program</li> <li>Recommendation engine based on collaborative filtering</li> <li>Enabling vendor-managed inventory based on big data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducing potential risks of sharing data</li> <li>Avoiding using sensitive personal information</li> <li>Protecting IT infrastructure from cyber attacks</li> </ul>	[112]
Biopharmaceutical industry, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducing process flaws</li> <li>Eliminating yield variation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Making targeted process changes according to statistical analysis</li> <li>Increasing its vaccine yield by more than 50%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Making a long-term investment in systems to collect more data</li> <li>More advanced analytics</li> </ul>	[120]
Remote monitoring application for heavy-duty equipment vehicle, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assessing and predicting the health of the diesel engine component</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizing classification model to detect analogous engine behavior</li> <li>Fuzzy logic-based algorithm for remaining life prediction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Predictive manufacturing process</li> <li>More comprehensive big data environment</li> </ul>	[122]
Tata Motor, India	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driving quality and reducing cost in manufacturing process</li> <li>Increasing customer satisfaction level</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizes process excellence and Six Sigma principles</li> <li>Analytics of CRM system data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combination of optimization, emotion, and empathic use of data</li> </ul>	[118]
Premier Healthcare Alliance (vendor: IBM), USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving patient outcomes</li> <li>Reducing expenditure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Collecting data from different departmental systems and sending to central data warehouse</li> <li>Generating reports to help users recognize emerging healthcare issues by data processing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Developing efficient unstructured data analytical algorithms and applications</li> </ul>	[123]
General Electric (Global Software and Analytics Center), USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Boosting industrial product sales</li> <li>Reducing after-sale maintenance cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimizing the service contracts and maintenance intervals for industrial products</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration with data processing in production process</li> </ul>	[121]
Aerospace industry, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Predicting number of returns in the future</li> <li>Minimizing product escapes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combining large datasets (manufacturing and repair) together</li> <li>Using predictive algorithm to analyze data in aerospace test environments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automated process of datasets combination</li> </ul>	[124]

件和视听系统。它侧重于通过有线或无线通信标准等各种电子媒体进行信息传输，由于智能制造的生产作业和决策过程十分依赖数据，因此这项技术至关重要。可以确认的是，ICT对于企业组织有着极大的影响，因此，为给工厂管理人员和工人提供更好的信息通信技术，它将会带来更多的自主权和更广泛的控制权[126]。例如，ICT被认为是欧洲提高制造业竞争力的主要因素之一，因为它帮助企业提高了业务敏捷性、灵活性和生产力。

对于中小企业来说，信息通信技术已经被证明是提升竞争力的关键因素，因为它能对变化的市场做出迅速的反应。信息通信技术的应用促进了信息资源的处理，降低了成本并提高了客户服从性[127]。在现代制造时代，数十亿的数字设备都可以访问互联网的网络。这种快速增长已经使信息通信技术成为制造系统的基石，数字和虚拟生产、建模、模拟和演示工具的

支持会帮助实现高度定制产品的快速和适应性设计、生产和交付[128]。

ICT在很多领域被广泛报道过，如教育业、旅游业、制造业、社会科学的实施方面、通信业、医疗保健业、远程医疗以及临床应用。表6[129–137]列举了ICT的几个典型应用。

从表6可以看出，在多种产业中，相比BDA等其他科技，ICT的应用有着更深厚的历史。这是因为ICT是计算机技术的一个延伸，并且已经投入使用几十年了。当前ICT的应用主要集中在与其他科技的集成上，如云运算和物联网，所以产业现有的信息系统才能够与前沿科技结合在一起。在许多现实案例中，ICT的应用已经产生了重大影响。因此，各行业公司正在寻找多种基于ICT的方案来解决当下难题。在工业4.0中，我们可以预见到未来会在更大程度上依赖ICT来集成层出不穷的科技，以解决在众多产业中出现的难题。

表6 ICT的典型应用

Industries/companies	Aims	Improvements	Future research	Refs.
Nigerian national policy analysis, Nigeria	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examining the ICT impacts on education</li> <li>Determining suitable policy for ICT potential in the Nigerian education system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration in teaching and learning</li> <li>Improving teachers' professional development</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximizing ICT potential</li> <li>Proper ICT implementation and monitoring</li> </ul>	[129]
Foresight processes, Delphi, Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifying the channels for ICT in foresight</li> <li>Determining the focus on foresight processes using ICT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>More precise strategic decision-making</li> <li>Increasing product variety in ICT-based foresight tools</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Insights concerning specific tools</li> <li>Expanding the scope</li> </ul>	[130]
Job satisfaction evaluation, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examining the association between ICT factors and job satisfaction</li> <li>Examining technology orientation impacts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving sales and job satisfaction</li> <li>Integrating ICT tools in daily professional activities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ICT-enabled training</li> <li>Educational influence of ICT</li> </ul>	[131]
Tourism, Hong Kong, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establishing the process of ICT in tourism</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving hospitality in tourism</li> <li>Improving tourism services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industry applications</li> <li>Incorporating ICT into business missions</li> </ul>	[132]
Water and soil monitoring, Taiwan, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Using ICT to efficiently improve monitoring systems</li> <li>Classifying the focal area into different agricultural environmental risk zones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving environmental assessments and environmental management decisions</li> <li>Increasing awareness of ecosystem services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Collecting data analytics</li> <li>Increasing the potential of environmental monitoring coverage</li> </ul>	[133]
Nursing education, Australia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examining e-learning with ICT</li> <li>Finding the impact of ICT changes on nursing education</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving learning efficiency</li> <li>Increasing motivation for learning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Learning-quality evaluation</li> <li>Preregistration nursing curricula</li> </ul>	[134]
Women's primary healthcare, Brazil	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyzing the ICT incorporation in primary care</li> <li>Identifying different aspects associated with better quality in the care</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving women's healthcare</li> <li>Improving ICT resources utilization</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incorporation and the quality of primary healthcare</li> <li>Policies implementation</li> </ul>	[135]
Emergency medical services, China	<ul style="list-style-type: none"> <li>Storing and interpreting data</li> <li>Building an ICT system for emergency medical services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving emergency medical rescuing processes</li> <li>Increasing data access</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Applying standard data models</li> <li>Short value chain</li> </ul>	[136]
ICT-enabled manufacturing landscape, Germany	<ul style="list-style-type: none"> <li>Examining industry decision-making using ICT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improving decision-making efficiency</li> <li>Improving product quality</li> <li>Decreasing time-to-market</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Allocating production capacity within a value chain</li> <li>Establishing a heterogeneous tool environment</li> </ul>	[137]

## 4. 国际合作

这个部分综合论述了工业4.0背景下的全球现行的智能制造计划以及项目。

### 4.1. 欧盟

在2013年，德国推出了工业4.0计划，这个计划指的是第四次工业革命，在这个工业革命中，智能机器和产品占据了制造工业，其创造的智能系统和网络能够相互独立地进行通信[138]。德国正着眼于研究针对制造商的潜在科技，如智能传感、无线传感器网络以及CPS。例如，西门子的数字云服务平台Sinalytics[139]能够提供安全的通信和集成，还能对机器生成的大量数据进行分析，从而通过数据分析与反馈来提高对多种设施的监控和优化能力（如燃气涡轮和医疗系统）。

在工业4.0下，IMS也能够生成大量的实时数据，这

些数据对智能分析与决策起着重大的作用，从而将生产模式转化成为智能制造模式、基于云的合作制造以及定制化制造。工业4.0的目标是通过CPS技术与原理，实现“智能工厂”。例如，制造机器将通过集成不同传感器和精确的过程控制来获得实时传感能力。像物联网或者云运算等一系列技术都会被用于管理生产。这些技术构建了一个服务云，并提供拥有信息感知、网络通信、精准控制以及远程协调能力的物理设备[140]。所有这些活动中的标准化努力是德国倡议的核心内容，其中包括ZVEI在RAMI4.0模型上所做的努力，也就是在设备上的“管理壳”的努力[35,36]。

随着德国工业4.0计划的启动，欧盟推出了其最大规模的研究和创新项目——“地平线2020”[141]，未来七年（2014—2020年）将把800多亿欧元投入该项目。在“地平线2020”计划中，未来工厂（FoF）的新契约——公私合作伙伴关系（PPP）将在欧盟第七个研究和技术

发展框架（FP7 2007—2013年）FoF PPP成功的基础上建立起来。从2014年到2020年，FoF“多年度路线图”（multi-annual roadmap）为未来工厂设定了愿景，并勾勒出高附加值制造技术的路线，这些技术将是清洁、高效、环保和社会可持续的。经过广泛的公众协商后，这些计划在整个欧洲的利益相关群体中达成了一致。

#### 4.2. 美国

2012年，通用电气引入了物联网（IIoT）的概念，认为智能机器、先进的分析和互联的人类是未来制造业的关键要素，从而使人类和机器能做出更明智的决策。工业互联网的三个主要组成部分是智能设备、智能系统和智能决策[142]。最突出的组织是工业互联网联盟（IIC）[143]，它是在2014年由美国通用电气公司、美国电话电报公司、思科、英特尔和IBM支持成立的。IIC旨在提供关于IIoT技术的资源、想法、试点项目以及活动，并保证这些技术的安全性。

IIoT是数据、硬件、软件和智能的流通，通过存储、分析和可视化通过智能机器和网络获取的数据进行最终的智能决策，从而实现它们之间的互动联通[144]。通过智能设备、智能系统和智能决策三部分的全面整合，激发工业互联网的最大潜力。物联网的最大潜能将由三个重要部分的整合而被充分激发，即智能装备、智能系统以及智能决策。通过一个由机器、材料、工人和系统组成的网络，IIoT最终将在工业4.0背景下建成智能工厂。

美国的重点主要集中在顶层的IT方面，如云计算、大数据和虚拟现实（VR）[145]。Predix是一个IIoT平台（也就是基于云的作为服务平台的平台）[146]，由美国通用电气公司研发。据称通过提供一套连接机器、数据和人的标准方法，它能进行工业规模分析，以实现资产绩效管理和运营优化。由于Predix建立在Cloud Foundry开源技术的基础之上，因此它能提供一个基于微服务的交付模型和分布式架构（云和在线）[147]。Predix包括四个核心部分：网络资产的安全监控、工业数据的管理、工业数据分析以及云应用程序和移动性。这几个核心部分将所有种类的工业设备和供应厂商同云连接在了一起，从而提供资产绩效管理和运营优化服务[148]。

#### 4.3. 日本

2015年，日本开始实施与德国工业4.0计划相对应的工业价值链计划（IVI）[149]，以便通过互联网把企

业连接在一起。30个日本公司，包括三菱电机、富士通公司、日产汽车和松下公司都加入了这一计划。IVI是一个通过将制造业和信息技术相结合来设计一个新的社区的论坛，并将创造一个空间供企业合作。为了使联动工厂和联网制造投入使用，IVI各成员公司的代表们对真实的工业场景中的现实情况进行了讨论，以便发现问题并确立可实现的理想状况[150]。论坛积极地讨论了随着物联网问世，原本以人为中心的制造业将如何改变。IVI放弃了有竞争力的个体企业的优势，并在各个公司自然协作的情况下，建立一个双向连接的系统架构。这基于两个原理：连接制造以及宽松明确的标准。前者旨在通过数字化连接的公司和工厂清除过度负担、浪费和不平衡，并创建基于自动化和人类能力的智能价值链；后者则旨在促成一个可适应而并不僵化的模型。它采取了务实方法，从当今最先进的技术开始发展下一阶段的制造业，从而通过利用网络物理生产系统提升每个企业的价值[151]。

#### 4.4. 中国

2015年，国务院公布实施十年计划以提升国家的制造能力，使之能够追上德国、美国等生产大国。工业和信息化部（MIIT）启动了“中国制造2025”计划[143]。这项计划旨在：①加强在国内制造业的创新能力；②促进信息与工业化的深度融合；③加强基本工业化能力；④促进中国质量品牌的建设；⑤发展生态保护的制造业；⑥在重要的产业方面取得突破；⑦加速制造产业的调整；⑧推进服务导向型制造业以及制造业相关的服务产业；⑨增加国际力量参与制造业。为了支持制造业的转型，中国政府又提出了以下战略计划：国务院关于促进互联网+行动的指导、国务院关于深化制造业和互联网一体化的指导意见及“十三五”国家科技创新规划[6]。

云制造是由中国首先提出的，也是新型智能制造形式的第一次尝试[25]。它的成就在许多学术著作中被广泛提及和应用[144]。此外，在智能制造业的特定领域中，如在高端计算机数控机器工具、工业机器人、智能工具，还有附加制造业方面，中国做出了巨大的贡献，并初步建立了智能制造业标准体系[145]。通过中国智能制造产业的发展壮大，网络基础设施得到了史无前例的发展，在高性能运算、网络通信设备、智能终端以及软件方面也取得了突破，由此形成了一系列在移动互联网、大数据和云计算方面领先的企业，这些企业无一例外都支持着智能制造业的发展[145]。

## 5. 未来展望

工业4.0时代智能制造业的未来研究发展方向主要在以下几个领域：智能制造业通用框架、数据驱动的智能制造业模型、IMS、人机协作以及智能制造业的运用。

### 5.1. 智能制造业通用框架

鉴于工业4.0的深度融合，针对智能制造业建立一个通用框架是很重要的，因为在未来，制造科学与技术、ICT，还有传感科技会被高度融合在一起。这一通用框架将涵盖在不同企业中使用的大型领域，以便指导和规范智能制造的实施。一些典型的技术，如高级传感器、无线通信标准、大数据处理模型和算法以及应用程序会被包含在这个框架中。因此，一个智能层次体系结构将作为工业4.0的基础被制定出来。智能电网就是这样一个领域，它被设计成一个生态系统，在这个生态系统中，不同的要素可以被广泛地结合起来，以便高效地运作[152]。

为了全面实现智能制造，平台技术（如网络和物联网技术、虚拟化和服务技术以及智能实体/资产技术）更应该值得重视，因为来自客户定制化的要求变得越来越多，进而增加了制造成本。平台技术通过智能设计、生产、物流和供应链管理，充分利用灵活且可重构的制

造系统降低成本。多元的平台技术，特别是针对设计与开发的技术，将会提供新颖的方案以解决高度定制化产品的难题[153]。因此人们需要一个更开放的创新框架来融合各方协作和努力，以进行更多的下游和上游活动。因此，服务导向型的智能制造概念将成为工业4.0的关键组成部分。

图2展示了工业4.0 IMS的框架，其中，研究方向被分为了智能设计、智能机器、智能监控、智能控制以及智能调度。

- 智能设计。随着虚拟现实和增强现实（AR）等新技术的飞速发展，传统设计将升级换代，并将进入“智能时代”。设计软件如计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）能够实时与物理智能原型系统交互，通过三维（3D）打印技术与CPS和AR集成。

- 智能机器。在工业4.0中，智能机器可以借助智能机器人和其他各种能够实时感知和相互作用的智能实体得以实现。比如，CPS驱动的智能机器工具能够捕获实时数据并且将其发送至基于云的中央系统，这样一来，机器工具与其孪生的服务便能够实现同步从而来提供智能制造的解决方案。

- 智能监控。监控是对工业4.0制造系统的操作、维护以及优化调度的一个重要方面。各种类型传感器广泛部署就有望实现智能监控。例如，可以实时获取温度、

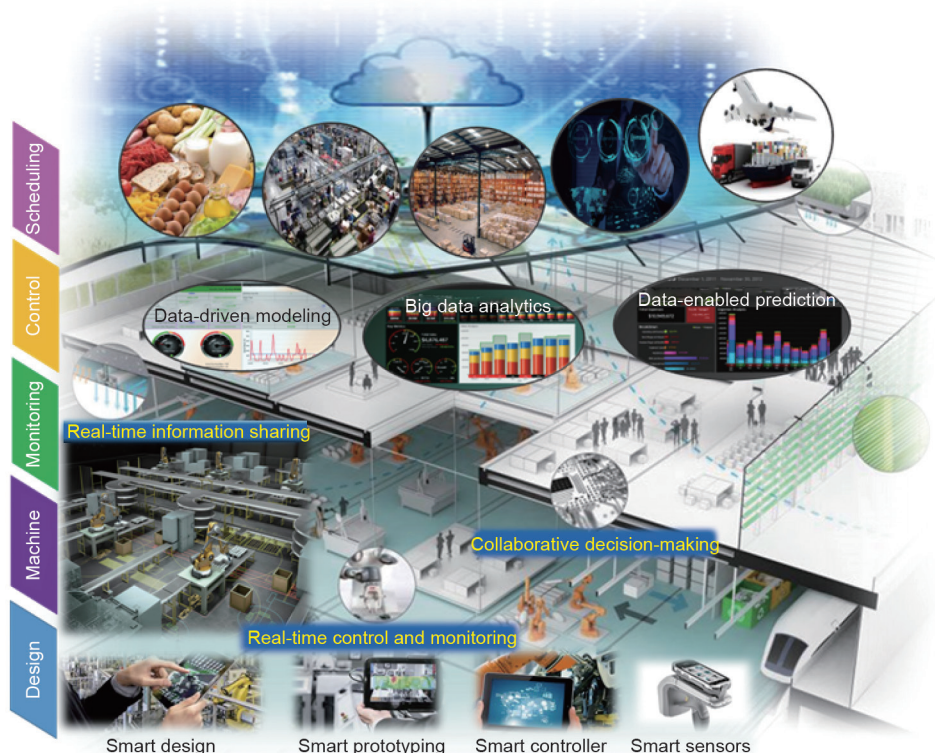


图2. 工业4.0 IMS的框架。

电耗、振动和速度等各种制造因素的数据和信息。

- 智能控制。在工业4.0中，高分辨率、适应性强的生产控制（也就是智能控制）能够通过发展网络物理信息系统而实现。智能控制主要是为了通过一个云平台来管理各种智能机器或工具。终端用户可以通过智能手机关闭机器或机器人。

- 智能调度。智能调度层主要利用先进的模型和算法来提取传感器捕获的数据。数据驱动技术和高级决策体系结构可以用于智能调度。比如，为了达到实时、可靠的调度与执行目的，可以采用分散式分层交互架构的智能模型。

## 5.2. 数据驱动的智能制造模型

大量携带RFID和（或）智能传感器的数字设备的大量增加，将会导致大量数据产生。这些数据携带丰富的信息或知识，可以用于不同的决策场合[154]。因此，数据的有效使用不仅可以提高生产效率，而且还能促进更大的灵活性，还能与物流和供应链管理实体等其他各方进行更深入的融合。例如，芯片制造商英特尔使用数据分析方法对来自制造设备的数据进行预测，以解决质量问题。这种用法极大地减少了质量测试数量，并提升了生产速度。基于数据的模型每小时使用5 TB的机器数据来做出质量预测。

生产系统中的动态变化会严重影响质量与效率。数据驱动模型能够充分利用历史与实时数据进行系统诊断和预测，这是基于信息或知识集成、数据挖掘以及数据分析之上的[155,156]。比如，一个运用数据驱动的两级维护框架用于半导体制造业的退化预测[157]。很明显，在未来，基于数据的或知识驱动的模型和服务将主要用于智能制造。一个关键的研究领域是将云服务与知识管理集成在一个平台上，而该平台能够提供智能设计和制造、生产建模和仿真、物流和供应链管理等企业服务。该平台将从配备智能传感器或数字设备的各种制造设备中积累大量生产数据，以便将人类、机器、材料、工作和制造逻辑结合在一起。基于云端的智能车间操作中心可以运用自学模型，来建立制造系统中用于决策的更先进的智能模型和算法。

## 5.3. 智能制造系统

IMS的设计和开发需要在整个企业和行业范围内进行越来越多的协作。协同制造模式或机制，如基于云制造资源或实体管理系统，将集中控制生产实物，以便IMS能够准确有效地工作[158]。在工业4.0的背景之下，

对于任何想要计划部署先进技术从而创造出更多增值过程与服务的企业来说，正如与数字化气动所展示的那样，IMS都是其基础[71,72]。未来的一个关键研究领域是分散控制服务，其中，每个系统的智能组件可以做出自适应决策。比如，装配线上每个阶段运作的智能部件都能够与移动的工件以及其他装配线进行无缝合作，以保持同步生产的节奏。

自主智能制造单位对于IMS也是很重要的。这些单位是建立在更加先进的、能够自动识别出部件、能监控在线设施并且能够移动工件的嵌入式芯片或者传感器基础上的。加之有先进的自主无人操纵的设备，如自动导引车（AGV）的帮助，基于此系统的制造执行将会变得更加高效。未来的研究重点可能会集中在诸如增强现实和虚拟现实等支持技术上，以建立一个更安全的生产工厂[159]。先进的制造过程与服务将会很轻松地整合在IMS中，所以对制造公司，特别是中小型企业来说，开放的平台会变得很有利。

## 5.4. 人机协作

在工业4.0时代，人类和机器将通过工业环境中的认知技术协同工作。通过语音识别、计算机视觉、机器学习和先进的同步模型，智能机器能够帮助人类完成大部分工作[160]。因此，为机器人等机器设计的高级学习模型十分重要，这样人类和机器就能在任何工作条件下发展相互补充的技能。未来研究的一个方向是“人在回路”机器学习方法，该方法使得人类能够有效地与决策模型进行交互。因此，由数据驱动的机器学习机制可以通过使用人类专业知识更好地理解协作。例如，传统的机器学习系统或算法可以与人类的知识进行交互，从而使一个真实世界的传感系统能够帮助改善人机交互和通信。例如，费斯托的仿生学习网络发现了许多应用程序，如使用AI进行自学习算法的学习抓手[161]，以及BionicANT项目，该项目使用多代理系统，使机器人以自组织方式行动并以团队形式解决指定的任务[162]。

在支持人机协作方面，机器智能扮演着重要的角色，因为机器将为每一个工作、每一个角色，以及出现动态情况的制造现场所发生的任何事情提供帮助[163]。安全问题可能是一个至关重要的研究课题，因为配备有智能控制系统的机器开始在现实生产场所（如车间）中表现和行动。这种机器通过自学和进化程序可以轻松地与工人沟通。例如，智能人机集成的自动化设计可以从基于本体的知识管理和局部到全局的个体转换以及基于认知的耦合设计理念的认知过程中实现[164]。因此，

人类可以在复杂的制造环境中实施智能人机交互，以最终实现未来的制造智能。

### 5.5. 智能制造的应用

工业4.0中，用于整个企业或行业的智能制造应用程序是非常重要的，现实生活中的企业可以从尖端技术中受益。由于制造企业可能涉及制造过程计划与调度、车间监控与仓库管理等多个不同要素，因此基于代理的IMS框架是一个解决生产计划与调度问题的合适方案。基于代理的方案能够确定工作流程并遵循制造逻辑，从而可以有效地做出与这些要素有关的决策[41]。以制造系统中的自动化为例，多代理技术可以用于并行控制机器人，而机器人通过基于代理的体系结构与分布式代理来操作，以便实现智能制造[165]。

未来智能制造的另一个方向是基于云的解决方案；这些解决方案使用云计算和SOA来分享或流通制造资源。几个不同的云平台将被建立以充分利用IMS，使制造能力和资源为终端用户提供按需服务。未来，工业4.0时代的关键研究将涉及对制造资源的建模，因为安装了先进传感器的典型资源具有智能性，能够在给定的不同制造要求和情况下做出反应，实现感知甚至“思考”。如何将资源转换为服务并将其置于基于云的平台上，这是一个具有挑战性的问题。

## 6. 结语

随着工业4.0计划日益受到重视，智能制造在现代工业和经济的发展中越来越重要。通过将先进技术应用于制造和服务产业的传统产品中，智能制造为各种产品和系统提供附加价值，在未来的研究和应用上具有重要地位。产品服务系统将继续取代传统的产品类型。本文介绍了关键概念、主要技术和全球应用等内容。进行系统评估之后，本文对未来的研究和应用进行了重点描述。

我们希望本文能够警醒并激励研究人员和工业界人士为推动制造业向前发展做出贡献。我们也希望本文所讨论的概念能够为实现备受期待的第四次工业革命带来新的思路。

## Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the contributions from the Laboratory for Industry 4.0 Smart Manufacturing Systems (LISMS) at the University of Auckland, and par-

ticular those of Pai Zheng, Seyyed Reza Hamzeh, and Shiqiang Yu.

## Compliance with ethics guidelines

Ray Y. Zhong, Xun Xu, Eberhard Klotz, and Stephen T. Newman declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf Lett* 2015;3:18–23.
- [2] Lasi H, Fettke P, Kemper HG, Feld T, Hoffmann M. Industry 4.0. *Bus Inform Syst Eng* 2014;6(4):239–42.
- [3] Wang S, Wan J, Zhang D, Li D, Zhang C. Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Comput Netw* 2016;101:158–68.
- [4] Shen WM, Norrie DH. Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey. *Knowl Inf Syst* 1999;1(2):129–56.
- [5] Wan J, Tang S, Li D, Wang S, Liu C, Abbas H, et al. A manufacturing big data solution for active preventive maintenance. *IEEE Trans Ind Inform* 2017;13(4):2039–47.
- [6] Wang SY, Wan J, Li D, Zhang C. Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *Int J Distrib Sens N* 2016;2016:3159805.
- [7] McFarlane D, Sarma S, Chirn JL, Wong CY, Ashton K. Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Eng Appl Artif Intel* 2003;16(4):365–76.
- [8] Kusiak A. *Intelligent manufacturing systems*. Old Tappan: Prentice Hall Press; 1990.
- [9] Li B, Hou B, Yu W, Lu X, Yang C. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: A review. *Front Inform Tech E* 2017;18(1):86–96.
- [10] Davis J, Edgar T, Porter J, Bernaden J, Sarli M. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Comput Chem Eng* 2012;47:145–56.
- [11] Feeney AB, Frechette SP, Srinivasan V. A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems. *J Comput Inf Sci Eng* 2015;15(2):021001.
- [12] Festo Group. *Qualification for Industry 4.0*. Denkendorf: Festo Didactic SE; 2017.
- [13] Oztemel E. Intelligent manufacturing systems. In: Benyoussef L, Grabot B, editors. *Artificial intelligence techniques for networked manufacturing enterprises management*. London: Springer; 2010. p. 1–41.
- [14] Koren Y, Wang W, Gu X. Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems. *Int J Prod Res* 2017;55(5): 1227–42.
- [15] Barbosa J, Leitão P, Adam E, Trentesaux D. Dynamic self-organization in holoic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Comput Ind* 2015;66:99–111.
- [16] Zhong RY, Dai QY, Qu T, Hu GJ, Huang GQ. RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production. *Robot Com-Int Manuf* 2013;29(2):283–92.
- [17] Tao F, Cheng Y, Xu LD, Zhang L, Li BH. CClIoT-CMfg: Cloud computing and Internet of Things-based cloud manufacturing service system. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1435–42.
- [18] Bi Z, Xu LD, Wang C. Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1537–46.
- [19] Lu BH, Bateman RJ, Cheng K. RFID enabled manufacturing: Fundamentals, methodology and applications. *Int J Agile Syst Manage* 2006;1(1):73–92.
- [20] Zhong RY, Li Z, Pang LY, Pan Y, Qu T, Huang GQ. RFID-enabled real-time advanced planning and scheduling shell for production decision making. *Int J Comp Integ M* 2013;26(7):649–62.
- [21] Huang GQ, Zhang YF, Chen X, Newman ST. RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control. *J Intell Manuf* 2008;19(6):701–13.
- [22] Liu WN, Zheng LJ, Sun DH, Liao XY, Zhao M, Su JM, et al. RFID-enabled real-time production management system for Loncin motorcycle assembly line. *Int J Comp Integ M* 2012;25(1):86–99.
- [23] Dai QY, Zhong RY, Huang GQ, Qu T, Zhang T, Luo TY. Radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system: A case study in an automotive part manufacturer. *Int J Comp Integ M* 2012;25(1):51–65.
- [24] Qu T, Yang HD, Huang GQ, Zhang YF, Luo H, Qin W. A radio frequency identification-based real-time shop-floor material management for household electrical appliance manufacturers. *J Intell Manuf* 2012;23(6):2343–56.
- [25] Wang ML, Qu T, Zhong RY, Dai QY, Zhang XW, He JB. A radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system for one-of-a-kind production manufacturing: A case study in mould industry. *Int J Comp Integ M* 2012;25(1):20–34.
- [26] Huang GQ, Qu T, Zhang YF, Yang HD. RFID-enabled product-service system

- for automotive part and accessory manufacturing alliances. *Int J Prod Res* 2012;50(14):3821–40.
- [27] Cao H, Folan P, Mascolo J, Browne J. RFID in product lifecycle management: A case in the automotive industry. *Int J Comp Integ M* 2009;22(7):616–37.
- [28] Saygin C, Tamma S. RFID-enabled shared resource management for aerospace maintenance operations: A dynamic resource allocation model. *Int J Comp Integ M* 2012;25(1):100–11.
- [29] 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* 2010;16(1):1–7. Chinese.
- [30] Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot Com-Int Manuf* 2012;28(1):75–86.
- [31] Zhang L, Luo Y, Tao F, Li BH, Ren L, Zhang X, et al. Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm. *Enterp Inf Syst—UK* 2014;8(2):167–87.
- [32] Wu DZ, Greer MJ, Rosen DW, Schaefer D. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art. *J Manuf Syst* 2013;32(4):564–79.
- [33] Lu YQ, Xu X. A semantic web-based framework for service composition in a cloud manufacturing environment. *J Manuf Syst* 2017;42:69–81.
- [34] Tao F, Zuo Y, Xu LD, Zhang L. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1547–57.
- [35] Hoffmeister M, Grahle R. DIN SPEC 91345:2016-04 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) [Internet]. 2016 [cited 2017 Mar 20]. Available from: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128>. German.
- [36] Adolphs P, Auer S, Bedenbender H, Billmann M, Hankel M, Heidel R, et al. Struktur der verwaltungsschale: Fortentwicklung des referenzmodells für die Industrie 4.0-komponente [Internet]. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); 2016 [cited 2017 Mar 20]. Available from: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/struktur-der-verwaltungsschale.html>. German.
- [37] Wang X, Xu XW. An interoperable solution for cloud manufacturing. *Robot Com-Int Manuf* 2013;29(4):232–47.
- [38] Liu YK, Xu X, Zhang L, Wang L, Zhong RY. Workload-based multi-task scheduling in cloud manufacturing. *Robot Com-Int Manuf* 2017;45:3–20.
- [39] Helu M, Hedberg T Jr. Enabling smart manufacturing research and development using a product lifecycle test bed. *Procedia Manuf* 2015;1:86–97.
- [40] Shen WM, 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.
- [41] Shen WM, Hao Q, Wang S, Li Y, Ghenniwa H. An agent-based service-oriented integration architecture for collaborative intelligent manufacturing. *Robot Com-Int Manuf* 2007;23(3):315–25.
- [42] Zijm WHM. Towards intelligent manufacturing planning and control systems. *OR-Spectrum* 2000;22(3):313–45.
- [43] Poon TC, Choy KL, Chow HKH, Lau HCW, Chan FTS, Ho KC. A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses. *Expert Syst Appl* 2009;36(4):8277–301.
- [44] Huang GQ, Zhang YF, Jiang PY. RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories. *Int J Adv Manuf Tech* 2008;36(7–8):752–64.
- [45] Zhang YF, Jiang P, Huang G. RFID-based smart Kanbans for Just-In-Time manufacturing. *Int J Mater Prod Tec* 2008;33(1–2):170–84.
- [46] Wang M, Zhong RY, Dai Q, Huang GQ. A MPN-based scheduling model for IoT-enabled hybrid flow shop manufacturing. *Adv Eng Inform* 2016;30(4):728–36.
- [47] Zhong RY, Peng Y, Xue F, Fang J, Zou W, Luo H, et al. Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things. *Automat Constr* 2017;76:59–70.
- [48] Zhong RY, Lan S, Xu C, Dai Q, Huang GQ. Visualization of RFID-enabled shopfloor logistics Big Data in Cloud Manufacturing. *Int J Adv Manuf Tech* 2016;84(1–4):5–16.
- [49] Huang B, Li C, Tao F. A chaos control optimal algorithm for QoS-based service composition selection in cloud manufacturing system. *Enterp Inf Syst—UK* 2014;8(4):445–63.
- [50] Qu T, Lei SP, Wang ZZ, Nie DX, Chen X, Huang GQ. IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing. *Int J Adv Manuf Tech* 2016;84(1–4):147–64.
- [51] Liu YK, Xu X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. *J Manuf Sci Eng* 2017;139(3):034701–8.
- [52] Xia F, Yang LT, Wang L, Vinel A. Internet of Things. *Int J Commun Syst* 2012;25(9):1101–2.
- [53] Farooq MU, Waseem M, Mazhar S, Khairi A, Kamal T. A review on Internet of Things (IoT). *Int J Comput Appl* 2015;113(1):1–7.
- [54] Xu LD, He W, Li S. Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(4):2233–43.
- [55] Lund D, MacGillivray C, Turner V, Morales M. Worldwide and regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 forecast: A virtuous circle of proven value and demand. Framingham: International Data Corporation; 2014 May. Report No.: IDC #248451.
- [56] Wang YM, Wang YS, Yang YF. Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry. *Technol Forecast Soc* 2010;77(5):803–15.
- [57] Guo ZX, Ngai EWT, Yang C, Liang X. An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment. *Int J Prod Econ* 2015;159:16–28.
- [58] Li X, Lu R, Liang X, Shen X, Chen J, Lin X. Smart community: An Internet of Things application. *IEEE Commun Mag* 2011;49(11):68–75.
- [59] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener Comp Sys* 2013;29(7):1645–60.
- [60] Whitmore A, Agarwal A, Da Xu L. The Internet of Things—A survey of topics and trends. *Inf Syst Front* 2015;17(2):261–74.
- [61] Gyrard A, Datta SK, Bonnet C, Boudaoud K. Cross-domain Internet of Things application development: M3 framework and evaluation. In: Awan I, Younas M, Mecella M, editors *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud*; 2015 Aug 24–25; Rome, Italy. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2015. p. 9–16.
- [62] Zanella A, Bui N, Castellani A, Vangelista L, Zorzi M. Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet Things* 2014;1(1):22–32.
- [63] Zhu Q, Wang R, Chen Q, Liu Y, Qin W. IOT Gateway: Bridging wireless sensor networks into Internet of Things. In: *Proceedings of the 8th IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*; 2010 Dec 11–13; Hong Kong, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2010. p. 347–52.
- [64] Patel P, Cassou D. Enabling high-level application development for the Internet of Things. *J Syst Software* 2015;103:62–84.
- [65] Shrouf F, Miragliotta G. Energy management based on Internet of Things: Practices and framework for adoption in production management. *J Clean Prod* 2015;100:235–46.
- [66] Zhang Y, Zhang G, Wang J, Sun S, Si S, Yang T. Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things. *Int J Comp Integ M* 2015;28(8):811–22.
- [67] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. In: Samad T, Annaswamy AM, editors *The impact of control technology: Overview, success stories, and research challenges*. New York: IEEE Control Systems Society; 2011. p. 161–6.
- [68] Lee EA. Cyber physical systems: Design challenges. In: *Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*; 2008 May 5–7; Orlando, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2008. p. 363–9.
- [69] Tan Y, Goddard S, Pérez LC. A prototype architecture for cyber-physical systems. *ACM SIGBED Rev* 2008;5(1):26.
- [70] Derler P, Lee EA, Vincentelli AS. Modeling cyber-physical systems. *Proc IEEE* 2012;100(1):13–28.
- [71] . Digital pneumatics: The first valve to be controlled using apps [Internet]. Esslingen: Festo AG & Co. KG; [cited 2017 Mar 20]. Available from: <https://www.festo.com/vtem/en/cms/10169.htm>.
- [72] Klotz E, Duwe J. A pneumatic revolution in automation. *Control Eng Europe* 2017 Apr:34–5.
- [73] Ali S, Qaisar SB, Saeed H, Khan MF, Naeem M, Anpalagan A. Network challenges for cyber physical systems with tiny wireless devices: A case study on reliable pipeline condition monitoring. *Sensors (Basel)* 2015;15(4):7172–205.
- [74] Chen B, Butler-Purry KL, Goulart A, Kundur D. Implementing a real-time cyber-physical system test bed in RTDS and OPNET. In: *Proceedings of the 2014 North American Power Symposium*; 2014 Sep 7–9; Pullman, WA, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2014.
- [75] La HJ, Kim SD. A service-based approach to designing cyber physical systems. In: Matsuo T, Ishii N, Lee R, editors *Proceedings of the 9th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*; 2010 Aug18–20; Yamagata, Japan. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2010. p. 895–900.
- [76] Lin J, Sedigh S, Miller A. Towards integrated simulation of cyber-physical systems: A case study on intelligent water distribution. In: Yang B, Zhu W, Dai Y, Yang LT, Ma J, editors *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing*; 2009 Dec 12–14; Chengdu, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2009. p. 690–5.
- [77] Huang HM, Tidwell T, Gill C, Lu C, Gao X, Dyke S. Cyber-physical systems for real-time hybrid structural testing: A case study. In: *Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*; 2010 Apr 13–15; Stockholm, Sweden. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2010. p. 69–78.
- [78] Meng W, Liu Q, Xu W, Zhou Z. A cyber-physical system for public environment perception and emergency handling. In: Thulasiraman P, Yang LT, Pan Q, Liu X, Chen YC, Huang YP, et al., editors *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*; 2011 Sep 2–4; Banff, AB, Canada. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2011. p. 734–8.
- [79] Kim J, Kim H, Lakshmanan K, Rajkumar R. Parallel scheduling for cyber-physical systems: Analysis and case study on a self-driving car. In: *Proceedings of 2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*; 2013 Apr 8–11; Philadelphia, PA, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013. p. 31–40.
- [80] Wang L, Haghghi A. Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems. *J Manuf Syst* 2016;40(Pt 2):25–34.
- [81] Silva LC, Perkusich M, Bublitz FM, Almeida HO, Perkusich A. A model-based architecture for testing medical cyber-physical systems. In: *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing*; 2014 Mar 24–28; Gyeongju, Korea. New York: Association for Computing Machinery, Inc.; 2014. p. 25–30.
- [82] Wan J, Yan H, Liu Q, Zhou K, Lu R, Li D. Enabling cyber-physical systems with

- machine-to-machine technologies. *Int J Ad Hoc Ubiqu Co* 2013;13(3-4):187-96.
- [83] Armbrust M, Fox A, Griffith R, Joseph AD, Katz R, Konwinski A, et al. A view of cloud computing. *Commun ACM* 2010;53(4):50-8.
- [84] Zhang Q, Cheng L, Boutaba R. Cloud computing: State-of-the-art and research challenges. *J Int Serv Appl* 2010;1(1):7-18.
- [85] Mell P, Grance T. The NIST definition of cloud computing. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2011.
- [86] Saxena VK, Pushkar S. Cloud computing challenges and implementations. In: *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*; 2016 Mar 3-5; Chennai, India. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2016. p. 2583-8.
- [87] Tan X, Ai B. The issues of cloud computing security in high-speed railway. In: *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*; 2011 Aug 12-14; Harbin, China. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2011. p. 4358-63.
- [88] DE Chaves SA, Westphal CB, Westphal CM, Gerônimo GA. Customer security concerns in cloud computing. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Networks*; 2011 Jan 23-28; St. Maarten, the Netherlands Antilles. Wilmington: IARIA XPS Press; 2011. p. 7-11.
- [89] Hajivali M, Moghaddam FF, Alrashdan MT, Alothmani AZM. Applying an agent-based user authentication and access control model for cloud servers. In: *Proceedings of 2013 International Conference on ICT Convergence*; 2013 Oct 14-16; Jeju Island, Korea. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013. p. 807-12.
- [90] Banyal RK, Jain P, Jain VK. Multi-factor authentication framework for cloud computing. In: Al-Dabass D, Babulak E, Kim D, Shin DR, Kim HS, editors *Proceedings of the 5th International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*; 2013 Sep 24-26; Seoul, Korea. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013. p. 105-10.
- [91] Maguluri ST, Srikant R, Ying L. Stochastic models of load balancing and scheduling in cloud computing clusters. In: *Proceedings of 2012 IEEE INFOCOM*; 2012 Mar 25-30; Orlando, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2012. p. 702-10.
- [92] Abu Sharkh M, Jammal M, Shami A, Ouda A. Resource allocation in a network-based cloud computing environment: Design challenges. *IEEE Commun Mag* 2013;51(11):46-52.
- [93] Randles M, Lamb D, Taleb-Bendiab A. A comparative study into distributed load balancing algorithms for cloud computing. In: *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*; 2010 Apr 20-23; Perth, Australia. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2010. p. 551-6.
- [94] Nuaimi KA, Mohamed N, Nuaimi MA, Al-Jaroodi J. A survey of load balancing in cloud computing: Challenges and algorithms. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Symposium on Network Cloud Computing and Applications*; 2012 Dec 3-4; London, UK. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2012. p. 137-42.
- [95] Moreno-Vozmediano R, Montero RS, Llorente IM. Key challenges in cloud computing: Enabling the future internet of services. *IEEE Internet Comput* 2013;17(4):18-25.
- [96] Chauhan MA, Babar MA. Migrating service-oriented system to cloud computing: An experience report. In: Liu L, Parashar M, editors *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Cloud Computing*; 2011 Jul 4-9; Washington, DC, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2011. p. 404-11.
- [97] Khajeh-Hosseini A, Greenwood D, Sommerville I. Cloud migration: A case study of migrating an enterprise IT system to IaaS. In: *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing*; 2010 Jul 5-10; Miami, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2010. p. 450-7.
- [98] Schubert L. The future of cloud computing: Opportunities for European cloud computing beyond 2010. Jeffery K, Neidecker-Lutz B, editors. Brussels: European Commission; 2010.
- [99] Petcu D. Portability and interoperability between clouds: Challenges and case study. In: Abramowicz W, Llorente IM, SurrIDGE M, Zisman A, Vayssière J, editors *Towards a service-based internet*. Berlin: Springer; 2011. p. 62-74.
- [100] Moghaddam FF, Ahmadi M, Sarvari S, Eslami M, Golkar A. Cloud computing challenges and opportunities: A survey. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks*; 2015 May 26-28; Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2015. p. 34-8.
- [101] Buyya R, Yeo CS, Venugopal S, Broberg J, Brandic I. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Gener Comp Sy* 2009;25(6):599-616.
- [102] Yang H, Tate M. Where are we at with cloud computing? A descriptive literature review. In: *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Information Systems*; 2009 Dec 2-4; Melbourne, Australia; 2009. p. 807-19.
- [103] Benfenatki H, Ferreira Da Silva C, Kemp G, Benharkat AN, Ghodous P, Maamar Z. MADONA: A method for automated provisioning of cloud-based component-oriented business applications. *Serv Oriented Comput Appl* 2017;11(1):87-100.
- [104] Wu X, Duan J, Zhang L, AbouRizk SM. A hybrid information fusion approach to safety risk perception using sensor data under uncertainty. *Stoch Environ Res Risk Assess* 2017. In press.
- [105] Sultan N. Discovering the potential of cloud computing in accelerating the search for curing serious illnesses. *Int J Inform Manage* 2014;34(2):221-5.
- [106] Sultan NA. Reaching for the "cloud": How SMEs can manage. *Int J Inform Manage* 2011;31(3):272-8.
- [107] Valilai OF, Houshmand M. A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm. *Robot Com-Int Manuf* 2013;29(1):110-27.
- [108] Kumar V, Sharma D. Cloud computing as a catalyst in STEM education. *Int J Inf Commun Technol Educ* 2017;13(2):38-51.
- [109] Gao Y, Li B. A forensic method for efficient file extraction in HDFS based on three-level mapping. *Wuhan Univ J Nat Sci* 2017;22(2):114-26.
- [110] Ma F, Luo X, Litvinov E. Cloud computing for power system simulations at ISO New England—Experiences and challenges. *IEEE Trans Smart Grid* 2016;7(6):2596-603.
- [111] Huang W, Shuai B, Wang L, Antwi E. Railway container station reselection approach and application: Based on entropy-cloud model. *Math Probl Eng* 2017;2017:8701081.
- [112] Manyika J, Chui M, Brown B, Bughin J, Dobbs R, Roxburgh C, et al. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. New York: McKinsey Global Institute; 2011.
- [113] Rich S. Big data is a "new natural resource," IBM says. 2012 Jun 27 [cited 2017 Mar 20]. Available from: <http://www.govtech.com/policy-management/Big-Data-Is-a-New-Natural-Resource-IBM-Says.html>.
- [114] Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf Lett* 2013;1(1):38-41.
- [115] Barton D, Court D. Making advanced analytics work for you. *Harv Bus Rev* 2012;90(10):78-83,128.
- [116] Perrey J, Spillecke D, Umblijs A. Smart analytics: How marketing drives short-term and long-term growth. In: Court D, Perrey J, McGuire T, Gordon J, Spillecke D. *Big data, analytics, and the future of marketing & sales*. New York: McKinsey & Company; 2013.
- [117] 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.
- [118] Agarwal R, Weill P. The benefits of combining data with empathy. *MIT Sloan Manag Rev* [Internet]. 2012 Sep [cited 2017 Mar 20];54(1). Available from: <http://sloanreview.mit.edu/article/the-benefits-of-combining-data-with-empathy/>.
- [119] 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.
- [120] Brown B, Chui M, Manyika J. Are you ready for the era of "big data"? *McKinsey Quarterly* 2011;(4):24-35.
- [121] Davenport TH. The human side of big data and high-performance analytics. Research Report. Portland: International Institute for Analytics; 2012 Aug.
- [122] Lee J, Kao HA, Yang S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP* 2014;16:3-8.
- [123] Wang Y, Kung LA, Byrd TA. Big data analytics: Understanding its capabilities and potential benefits for healthcare organizations. *Technol Forecast Soc. In press*.
- [124] Armes T, Refern M. Using big data and predictive machine learning in aerospace test environments. In: *Proceedings of the 2013 IEEE AUTOTESTCON*; 2013 Sep 16-19; Schaumburg, IL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2013.
- [125] Hashim J. Information communication technology (ICT) adoption among SME owners in Malaysia. *Int J Bus Inform* 2007;2(2):221-40.
- [126] Bloom N, Garicano L, Sadun R, Van Reenen J. The distinct effects of information technology and communication technology on firm organization. *Manag Sci* 2014;60(12):2859-85.
- [127] Colin M, Galindo R, Hernández O. Information and communication technology as a key strategy for efficient supply chain management in manufacturing SMEs. *Procedia Comput Sci* 2015;55:833-42.
- [128] Ketteni E, Kottaridi C, Mamuneas TP. Information and communication technology and foreign direct investment: Interactions and contributions to economic growth. *Empir Econ* 2015;48(4):1525-39.
- [129] Yusuf MO. Information and communication technology and education: Analysing the Nigerian national policy for information technology. *Int Educ J* 2005;6(3):316-21.
- [130] Keller J, von der Gracht HA. The influence of information and communication technology (ICT) on future foresight processes—Results from a Delphi survey. *Technol Forecast Soc* 2014;85:81-92.
- [131] Limbu YB, Jayachandran C, Babin BJ. Does information and communication technology improve job satisfaction? The moderating role of sales technology orientation. *Ind Market Manag* 2014;43(7):1236-45.
- [132] Law R, Buhalis D, Cobanoglu C. Progress on information and communication technologies in hospitality and tourism. *Int J Contemp Hosp M* 2014;26(5):727-50.
- [133] Lin YP, Chang TK, Fan C, Anthony J, Petway JR, Lien WY, et al. Applications of information and communication technology for improvements of water and soil monitoring and assessments in agricultural areas—A case study in the Taoyuan irrigation district. *Environments* 2017;4(1):6.
- [134] Button D, Harrington A, Belan I. E-learning & information communication technology (ICT) in nursing education: A review of the literature. *Nurs Educ Today* 2014;34(10):1311-23.



- [135] Matta-Machado ATG, de Lima ÂMLD, de Abreu DMX, Araújo LL, Sobrinho DF, Lopes ÉAS, et al. Is the use of information and communication technology associated with aspects of women's primary health care in Brazil? *J Ambul Care Manage* 2017;40 Suppl 2:S49–59.
- [136] Xu B, Xu LD, Cai H, Xie C, Hu J, Bu F. Ubiquitous data accessing method in IoT-based information system for emergency medical services. *IEEE Trans Ind Inform* 2014;10(2):1578–86.
- [137] Brettel M, Friederichsen N, Keller M, Rosenberg M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 perspective. *Int J Mech Ind Sci Eng* 2014;8(1):37–44.
- [138] Kagermann H, Wahlster W, Helbig J; National Academy of Science and Engineering. 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; 2013 Apr.
- [139] Siemens AG. Sinalytics: The new Siemens platform for digital services [Internet]. 2015 Dec 08 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <http://www.midleeast.siemens.com/pool/brochures/factsheet-sinalytics-e.pdf>.
- [140] Zhong RY, Huang GQ, Dai QY, Zhang T. Mining SOTs and dispatching rules from RFID-enabled real-time shopfloor production data. *J Intell Manuf* 2014;25(4):825–43.
- [141] Horizon 2020: The EU framework programme for research and innovation [Internet]. Brussels: European Commission; [cited 2017 Mar 30]. Available from: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>.
- [142] Evans PC, Annunziata M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines. Boston: General Electric Company; 2012 Nov.
- [143] Iiconsortium.org [Internet]. Needham: Object Management Group, Inc.; c2017 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <http://www.iiconsortium.org/>.
- [144] Qiu X, Luo H, Xu G, Zhong RY, Huang GQ. Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP). *Int J Prod Econ* 2015;159:4–15.
- [145] Posada J, Toro C, Barandiaran I, Oyarzun D, Stricker D, de Amicis R, et al. Visual computing as a key enabling technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Comput Graph Appl* 2015;35(2):26–40.
- [146] Predix [Internet]. Boston: General Electric Company; c2017 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <https://www.ge.com/digital/predix>.
- [147] Gee S. Predix—A platform for the Industrial Internet of Things [Internet]. 2015 June 30 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <http://www.i-programmer.info/news/0/8686.html>.
- [148] Winig L. GE's big bet on data and analytics. *MIT Sloan Manag Rev* [Internet]. 2016 Mar [cited 2017 Mar 30];57(3):[about 12 p]. Available from: <https://sloanreview.mit.edu/case-study/ge-big-bet-on-data-and-analytics/>.
- [149] What is IVI? [Internet]. Tokyo: Industrial Value Chain Initiative; c2017 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <https://www.iv-i.org/wp/en/what-is-ivi/>.
- [150] An outline of smart manufacturing scenarios 2016 [Internet]. Tokyo: Industrial Value Chain Initiative; 2017 Feb 23 [cited 2017 Mar 30]. Available from: [https://iv-i.org/en/docs/ScenarioWG\\_2016.pdf](https://iv-i.org/en/docs/ScenarioWG_2016.pdf).
- [151] Dressler U. Internet of Things in Japan: Quietly, systematically plowing ahead [Internet]. 2016 Apr 25 [cited 2017 Mar 30]. Available from: <https://www.japanindustrynews.com/2016/04/internet-things-japan-quietly-systematically-plowing-ahead/>.
- [152] Jiang B, Fei Y. Smart home in smart microgrid: A cost-effective energy ecosystem with intelligent hierarchical agents. *IEEE Trans Smart Grid* 2015;6(1):3–13.
- [153] Simpson TW, Jiao JR, Siddique Z, Hölltä-Otto K, editors. Advances in product family and product platform design: Methods & applications. New York: Springer-Verlag; 2014.
- [154] Zhong RY, Newman ST, Huang GQ, Lan S. Big data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives. *Comput Ind Eng* 2016;101:572–91.
- [155] Zou J, Chang Q, Arinez J, Xiao G, Lei Y. Dynamic production system diagnosis and prognosis using model-based data-driven method. *Expert Syst Appl* 2017;80:200–9.
- [156] Zhong RY, Huang GQ, Lan S, Dai QY, Zhang T, Xu C. A two-level advanced production planning and scheduling model for RFID-enabled ubiquitous manufacturing. *Adv Eng Inform* 2015;29(4):799–812.
- [157] Luo M, Yan HC, Hu B, Zhou JH, Pang CK. A data-driven two-stage maintenance framework for degradation prediction in semiconductor manufacturing industries. *Comput Ind Eng* 2015;85:414–22.
- [158] Zhong RY, Huang GQ, Lan S, Dai QY, Chen X, Zhang T. A big data approach for logistics trajectory discovery from RFID-enabled production data. *Int J Prod Econ* 2015;165:260–72.
- [159] Yew AWW, Ong SK, Nee AYC. Towards a griddable distributed manufacturing system with augmented reality interfaces. *Robot Com-Int Manuf* 2016;39:43–55.
- [160] Antrobus V, Burnett G, Krehl C. Driver-passenger collaboration as a basis for human-machine interface design for vehicle navigation systems. *Ergonomics* 2017;60(3): 321–32.
- [161] LearningGripper: Gripping and positioning through independent learning [Internet]. Esslingen: Festo AG & Co. KG; 2013 Apr [cited 2017 Mar 30]. Available from: [https://www.festo.com/PDF\\_Flip/corp/Festo\\_LearningGripper/en/index.html#6/z](https://www.festo.com/PDF_Flip/corp/Festo_LearningGripper/en/index.html#6/z).
- [162] BionicANTs: Cooperative behaviour based on natural model [Internet]. Esslingen: Festo AG & Co. KG; 2015 Apr [cited 2017 Mar 30]. Available from: [https://www.festo.com/PDF\\_Flip/corp/Festo\\_BionicANTs/en/#8/z](https://www.festo.com/PDF_Flip/corp/Festo_BionicANTs/en/#8/z).
- [163] Xu X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. *Int J Adv Manuf Tech* 2017;92(5–8):1893–900.
- [164] Yin YH, Nee AYC, Ong SK, Zhu JY, Gu PH, Chen LJ. Automating design with intelligent human-machine integration. *CIRP Ann-Manuf Tech* 2015;64(2):655–77.
- [165] Priego R, Iriondo N, Gangoiti U, Marcos M. Agent-based middleware architecture for reconfigurable manufacturing systems. *Int J Adv Manuf Tech* 2017;92(5–8):1579–90.