

# 工业智能网——工业互联网的深化与升级

张平, 刘会永, 李文璟, 周凡钦

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 制造业是我国国民经济的主要支柱。国际社会普遍认同新一轮制造业升级的核心是实现智能制造, 为此美国、德国等技术强国提出了“工业互联网”和“工业 4.0”的概念, 制定了适合本国国情的制造业发展战略。我国提出了“中国制造 2025”, 从国家发展战略的层面确定了以智能制造为主的发展方向。以我国工业智能制造现状和技术优势为依据, 以灵活、平滑、成本可控的方式帮助大中小生产型企业实现工业智能化为目的, 提出了“工业智能网”的概念, 融合我国在信息基础设施建设、认知识别、人工智能等方面的条件和优势, 构建工业智能网, 以服务方式向大中小企业提供工业智能化解决方案, 让更大范围内的生产型企业以更低成本的方式实现智能制造。

**关键词:** 工业智能网; 人工智能; 工业行为识别; 虚拟现实

**中图分类号:** TN929.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018292

## Industrial intelligent network: deepening and upgrading of industrial Internet

ZHANG Ping, LIU Huiyong, LI Wenjing, ZHOU Fanqin

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Manufacturing founds a major pillar of the national economy. The international community generally agrees that the core of the new wave of manufacturing upgrade is to achieve intelligent manufacturing. For this reason, the concepts of “Industrial Internet” and “Industry 4.0” was proposed by united state, Germany and other technologied, and formulated manufacturing development strategies suited to their national conditions. “Made in China 2025” was proposed by China which determines the development direction based on intelligent manufacturing in the level of national development strategy. Based on the status quo and technological advantages of China's industrial intelligent manufacturing, and aiming to help large, medium and small-sized production enterprises achieve industrial intelligence in a flexible, smooth and cost-controllable manner, the concept of “industrial intelligent network” was proposed to integrate the conditions and advantages in aspects of China's information infrastructure construction, cognitive identification, artificial intelligence, etc., to build an industrial intelligent network, to provide industrial intelligent services to large, medium and small-sized enterprises, so that production enterprises within a broader scale can benefit from intelligent manufacturing with lower costs.

**Key words:** industrial intelligent network, artificial intelligence, industrial behavior recognition, virtual reality

### 1 引言

制造业是我国国民经济的主要支柱, 也是今后我国经济“创新驱动, 转型升级”的主战场。打造中国制造新优势, 实现由制造大国向制造强国的转变, 是我国新时期经济发展的迫切需求目

标。2015 年 3 月 5 日, 李克强总理在政府工作报告中指出要实施“中国制造 2025”, 加快从制造大国转向制造强国。同年 5 月 8 日, 国务院印发《中国制造 2025》, 部署全面推进实施制造强国战略, 这是我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领<sup>[1]</sup>。

智能制造是基于物联网、互联网、大数据、云

计算等新一代信息技术，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、制造系统与模式的总称<sup>[2]</sup>。为了实现智能制造，制造强国纷纷推出了国家层面的发展战略，如美国提出了“工业互联网”<sup>[3-4]</sup>、德国提出的“工业 4.0”<sup>[5-7]</sup>等，主要目的是通过新一代信息和网络技术，将高度自动化的制造业进行系统化升级和改造，高效地统筹资源、生产和市场的关系，保持本国制造业在国际上的竞争优势。

“中国制造 2025”以创新驱动发展为基本方针，以推进智能制造为主攻方向。将智能制造作为制高点、突破口。智能制造将是新一轮工业革命的核心技术，将成为新一轮工业变革的核心驱动和战略焦点<sup>[8]</sup>。工业互联网是智能制造的关键基础，也是推进工业智能化变革的关键手段。

但是目前我国发展工业互联网存在如下瓶颈：

1) 由于工业设备智能化程度不同，工业互联网水平参差不齐，发展不均衡<sup>[9]</sup>；2) 工业设备接口各异，标准体系不完善，导致工业互联网互通性差，统一接入难度大<sup>[10]</sup>；3) 工业互联网现实基础与国家层面的期望间存在较大差距，产业支撑能力不足，平台综合能力差<sup>[11]</sup>；4) 部分领域实现了“工业+互联网”，但缺乏工业与智能的真正融合，难以真正提高智能制造水平。总体来看，我国的工业互联网在行业覆盖范围、平台综合能力、智能应用水平等方面尚存在较大限制，没有充分利用我国在 5G 通信、认知识别、人工智能等技术和基础设施上的条件优势。

立足于上述现状及问题，本文提出“工业智能网”的概念，即利用先进的第五代（5G, 5<sup>th</sup> generation）及未来第六代通信网络、云平台、人工智能等技术，以视频和传感器方式实时收集、传输和处理工业现场和环境数据，并将分析结果生成控制命令，反馈到工业现场进行指挥调度，充分利用云平台提供工业智能服务，降低制造业对本地智能设备的依赖。从架构层面来看，工业智能网是一个面向工业普适化创新的基础体系；从技术层面来看，工业智能网是工业互联网与人工智能的融合；从行业应用层面来看，工业智能网是一种与具体工业细分领域密切相关且场景化特征突出的应用集合。

工业互联网是通过将互联网技术延展到工业

领域，利用智能技术提升网络性能，帮助企业实现工业自动化，如思科公司提出的“工业自动化智能网”，中科院自动化研究所提出的“工业智联网”<sup>[12]</sup>等。与工业互联网相比，本文提出的工业智能网的概念将为工业、制造业提供智能助力，主要表现在将人工智能（AI, artificial intelligence）等智能技术渗透在制造业的各个环节，形成可以闭环自治的智能化工业环境。具体表现：1) 提供完整的“工业+互联网+AI”解决方案，不需要企业开发工业设备级的接入接口，不需要企业直接投入研发人员，实现傻瓜式接入；2) 屏蔽不同行业的工业设备差异，不论其智能化如何、接口适配能力如何，均采用统一的技术方案实现工业智能化；3) 充分利用学术界的科研能力和产业界的工程技术能力，结合云计算、边缘计算、大数据、图像识别、行为识别、虚拟/增强现实等技术，实现工业与智能的真正融合。

## 2 工业智能网体系架构

工业智能网的基本思想是打造为工业和制造业提供专业的工业智能服务的网络和平台体系，即将传统工业设备、车间或厂房粒度的认知和决策智能迁移到具有更强大智能载体的网络云上，以服务的形式提供工业智能，以网络的形式延展工业智能服务，从而降低工业厂区对本地智能化工业设备的依赖<sup>[13]</sup>。

工业智能网体系架构如图 1 所示。主要包括本地接入、云平台 and 互联网这 3 部分，各部分的功能分别如下。

1) 本地接入部分主要是工业现场的超高清摄像头和传感器等设备，通过设备级的多路精准同步汇聚网关、本地级的边缘物联网网关接入到本地云。为满足具有不同服务质量要求的无线连接服务，本地接入部分将主要采用 5G 网络技术。

2) 云平台部分包括本地云和全国云，其中本地云位于工业智能网边缘并靠近生产现场，集成重要的智能服务，以保证重要业务的实时响应；全国云分布于互联网云平台，能够聚合海量计算资源，融合多维智能技术，具有强大的分析、处理和服务能力，为业务决策提供智能引擎。

3) 互联网部分既包含工业设备间的工业互联网，也包含普通意义的互联网。工业互联网为生产现场及环境信息的准确采集和可靠交互提供保障，

而互联网将打通本地服务到云端决策引擎的信息通道。

工业智能网面向制造业的数字化、网络化和智能化需求,提供开放式、专业化服务平台,以工业思维和能力与信息技术思维 and 能力的集成、融合、创新为基础,实现工业全要素的泛在连接、弹性供给和高效配置,是加速制造业创新体系和发展模式转变的重要引擎。

### 3 工业智能网关键技术

#### 3.1 安全高效的工业视频采集与处理

安全高效的工业视频采集与处理是工业智能网的重要基础<sup>[14]</sup>。只有实现了对于工业行为针对性的精准建模、深入分析、智能识别、适配控制,才能全面、准确地实现工业环境的采集和控制,最终实现智能制造,主要相关技术包括以下 2 种。

1) 视频采集设备安装部署方案及部署算法<sup>[15]</sup>。为准确了解甚至还原生产环境的细节,需要部署一定量的摄像头、传感器采集多维度的设备、人员和环境信息,视频采集设备安装部署方案及部署算法将直接影响采集效果和部署成本。

2) 基于采集的视频进行人员行为识别和基础工业行为的基本识别<sup>[16]</sup>。包括行为抓取、特征抽取、质量判断、识别比对等,实现对工厂或车间监测范

围内的人员异常行为和工业机器人异常操作进行判定、预警等功能。

#### 3.2 基于视频内容的工业环境行为识别

工业智能网通过视频设备采集到的工业环境和设备信息发掘生产环境中的异常信息,需要对采集到的视频内容进行深入分析和识别,这是工业智能网实现的关键技术<sup>[17]</sup>。相关主要技术有包括以下几方面。

1) 工业生产场景中环境、工业设备、人类行为建模技术。对各类工业设备(机器人、智能机械加工设备等)的行为及相应的流水线行为(时序行为)建立模型,以及人类行为建立模型。

2) 构建并迭代工业环境下行为数据库。基于大量数据训练,构造各类工业设备标准行为数据库及标准时序行为数据库,以及工业环境中人类正常与异常行为数据库。

3) 实时行为识别技术<sup>[18]</sup>。根据采集的原始视频数据(或者经过初步处理和识别后的数据),进行工业设备行为与人类行为的实时识别。将实时识别结果与标准数据库进行比对分析,进一步完善标准行为与异常行为数据库。并对识别出的异常行为进行预警。

4) 基于识别结果的解决方案构建技术。通过与工业智能网上的工业智能代理应用的交互,构建和优化行为规则库,判断异常行为类别,给出纠正策

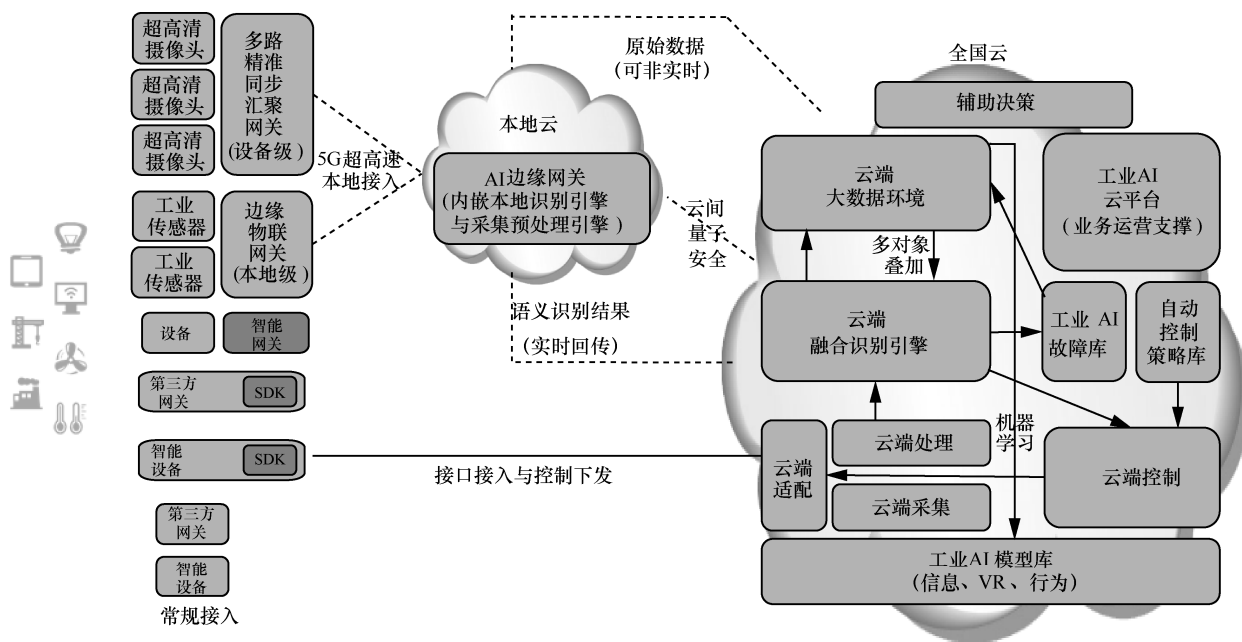


图 1 工业智能网体系架构

略与措施，并通过接口下发控制指令。

### 3.3 面向复杂工业场景的虚拟现实构建

基于已有的视频采集设备、基础网络和云服务设施，构建基于虚拟现实技术的工业场景，实现对工业设备标准操作的讲解、培训、教学、仿真测试、演练等工作内容，是工业智能网的关键技术。主要相关技术包括以下几个方面。

1) 工厂车间的三维仿真与虚拟现实技术<sup>[19]</sup>。该技术可以全方位还原工厂车间内外原貌，在获取全景图像对应的环境模型后，实现工厂车间全景空间与真实环境的一一映射。

2) 工业设备行为的三维仿真与虚拟现实技术。该技术全方位还原工业设备的精细操作行为和精准流水线协作行为，并进行三维建模，实现工业设备标准操作及标准流程的三维虚拟现实仿真。

### 3.4 可靠高带宽的泛在网络服务

上述关键技术是构成工业智能的重要组成部分，这些部分需要高带宽高可靠的泛在网络服务才能形成工业智能网，才能真正提供完整工业智能解决方案<sup>[20]</sup>。主要相关技术包括以下几种。

1) 可靠低时延高带宽接入<sup>[21]</sup>技术。实时监测工业生产现场，及时采集并实时传输分析高清摄像头的视频数据，这就需要高带宽高可靠低时延网络服务来保证视频内容安全及时传入云端<sup>[22]</sup>。

2) 安全的大规模泛在物联接入<sup>[23]</sup>技术。生产环境中包含大量传感器设备，保障海量传感器及视频采集据安全和可靠的传输，是工业大数据分析和形成工业智能的重要数据来源。

3) 服务质量保证的网络切片技术。工业智能网承载的海量通信业务具有不同服务质量要求。网络切片技术会将相似特性的业务聚合起来，提供差异性服务，提高网络资源利用率。

4) 提供分布式云服务的边缘计算技术<sup>[24-25]</sup>。工业智能网提供智能服务需要依托云端的计算资源，快速及时地处理数据要求云处理节点延伸到网络边缘，在接近工业现场的地方提供智能服务<sup>[26]</sup>。

## 4 工业智能网带来的机遇

### 4.1 降低工业智能与设备的耦合性

在现有设备基础上引入智能服务，平滑地对现有生产方式和生产流程进行智能化改造是更符合我国国情的方式。工业智能网创新地以视频内容的行为识别技术为切入点，通过深入分析和识别特定

环境下设备或工人的行为，及时发现生产条件、流程中存在的问题，并针对性地发出告警或改进指令。将具体智能设备的要求，转变为具有一定通用性的智能服务，并利用云端资源提供智能服务，这就降低了在产业智能化过程中对具体自动化和智能化设备的依赖程度，实现了工业智能与工业设备的解耦性，降低了工业智能化门槛。

### 4.2 调动多产业的资源和能力

智能制造是我国制造业发展的核心目标，实现智能制造将是长期坚持的制造业发展战略，工业智能化必将利用全社会各个产业的技术优势和经验，为实现智能制造提供全方位助力。

工业智能网将充分发挥我国在 5G 网络研究的技术优势，以泛在网络服务为工业智能网提供有力的媒介支撑，云计算和边缘计算技术为工业智能网提供优质载体<sup>[27]</sup>。

工业大数据处理技术，能深入挖掘价值信息，是自动化的分析工业场景，加速构建工业知识体系，获取工业智能的重要途径。

快速发展的人工智能技术为工业智能网的实现提供了智能引擎，使工业智能可以通过一种更通用的形式产生和实现，从而降低对基于具体设备的逻辑范式型智能的依赖。

虚拟现实（VR, virtual reality）技术将打通制造业现场、客户和用户群体、从业者群体间的信息高速公路<sup>[28]</sup>。利用 VR 技术还原的制造场景，将可以有效地提升企业与客户的沟通效率，准确地传达企业能力和价值，并帮助从业者更快地进入生产环境。

### 4.3 以微服务方式提供和迭代工业智能

工业智能网可使工业智能成为一种服务，灵活地提供给制造业企业。

当前技术条件下，智能技术的智能水平取决于硬件的算力，而硬件性能和成本在高性能硬件和云计算技术的支持下可以按需进行成本控制，降低企业获取工业智能的成本，从而降低了制造业实现智能化的整体门槛。为灵活地进行工业智能生产、组装和供给，企业智能应该以微服务的形式提供，一方面允许企业以便利形式获取针对性的企业智能化解决方案；另一方面，支持快速构建涵盖人员、设备/产品、生产资源、标准业务、智能排障等一系列高度解耦的、可复用的工业微服务及微组件<sup>[29]</sup>，从而实现工业智能的灵活提供和不断迭代。

#### 4.4 构建良性循环创新生态

工业智能网平台通过优势互补、强强联合、跨界合作,打通技术和专业壁垒,共享数据资源,构建了新型制造业创新生态环境。以平台建设运营商为主导,通过建立一套实现资源共享、动态协作的价值分享机制,广泛汇聚 IT 基础设施提供商、微服务组件提供商、边缘解决方案提供商、工业资源拥有方、数据资源拥有方、工业应用开发者、工业应用用户等,形成需求与供给高效精准匹配、应用与服务持续迭代、多方共生共赢的良性发展生态。

### 5 工业智能网应用场景和价值

#### 5.1 智能化制造型企业

工厂或车间现场部署高清视频采集装置,将实时采集到的工业设备运转及相关人员操作的视频信息通过网络传递到云平台。云平台通过人工智能技术开展工业应用分析。云平台将分析结果反馈回工业现场,或者根据分析结果生成控制命令通过控制接口传送到工业现场进行指挥调度。

通过 IT 资源的池化管理与弹性分配,降低企业信息化和智能化成本。工业智能网基于具备服务计算能力的 5G 网络,对智能服务资源进行池化管理,满足对智能服务资源的分级分域调度,实现资源的集约化管理与使用,有效契合制造型企业的智能化需求,极大降低其软硬件投入成本及信息化门槛,推动制造业智能化水平快速提升。

#### 5.2 生产风险预警与故障定位

工业智能网的云端智能应用能根据终端采集到的生产现场的视频和传感器信息,构建工业环境中的设备和人员的行为模型数据库,通过与收集到的实时数据进行对比和分析,实时动态地发现工业生产过程中的异常情况,并对潜在的生产风险和故障进行动态智能地预测和定位,避免事故发生。

通过智能计算技术<sup>[30]</sup>,实现生产过程中风险预警和故障诊断的智能化。工业智能网络提供云端强计算能力支撑,能融合快速发展的智能计算技术和大数据技术,提升计算模型的表达能力和适配性,使自动构建和完善生产过程中的环境和行为模型成为可能,有效地降低模型构建的难度和复杂度。智能计算技术也大幅提高了模式和行为识别的准确度,为工业智能网实现异常检测、风险预测和故障定位提供有力支撑。

#### 5.3 临场体验的虚拟工厂

通过虚拟现实技术,将工厂的生产能力进行虚拟化,用户通过虚拟现实技术了解生产能力。用户不需要关注物理工厂的实际作业流程,只需要根据在虚拟环境提交目标任务,虚拟工厂会根据所提交的目标任务和需要的生产能力,将具体任务指派给合适的物理工厂完成生产。在生产过程中用户可以通过视频设备,远程监控生产过程。

通过制造能力的在线交易和按需匹配,优化社会资源配置。通过广泛连接工业资源、构建资源的数字孪生、形成模块化的制造能力、促进制造能力的供需对接,工业互联网平台带来全社会资源的网络化动态配置,引导企业、行业、区域间制造能力互补,形成制造能力社会化共享的良好格局。

#### 5.4 万众参与的工业智能化创新

通过将采集的工业环境和生产数据构建为标准的工业行为模型和行为数据库,以虚拟现实的方式提供人机物接口,以微服务的形式提供工业智能应用和构造工业智能化解决方案。来自各个产业、地区和学界的创新力量,可以以低成本和便利的方式,对工业智能网的各个环节和方面进行微创新,使工业智能网技术体系快速持续迭代,推动工业知识在实践中的深度应用。

### 6 结束语

工业智能网是智能制造的创新模式,也是工业互联网走向纵深的必然发展趋势。我国拥有完备的工业体系、创新引领的互联网生态、庞大的专业人才队伍、超大规模的应用市场需求,具备加快建设工业智能网平台的基础和优势。

目前我国智能制造处于初级发展水平,亟需有一个有力抓手来快速提升我国智能制造水平,而工业智能网能提供完整的“工业制造+互联网+人工智能”解决方案。从企业角度来说,工业智能网不需要企业开发工业设备级的接入接口,不需要企业直接投入研发人员,可以实现工业企业的“傻瓜式”接入,解决了企业的研发短板问题;从业界角度来说,工业智能网可以屏蔽不同行业的工业设备差异,不论其智能化程度如何、接口适配能力如何,都采用统一的技术方案实现工业智能化;从产学研用结合角度来说,工业智能网充分利用学术界的科研能力和产业界的工程技术能力,结合云计算、边缘计算、大数据、图像识别、行为识别、虚拟/增强

现实等技术, 实现工业与智能的真正融合。

本文提出了工业智能网的核心思想和概念, 明确其基本架构和技术体系, 将为引导我国工业智能化, 促进工业经济向数据驱动型创新和发展模式转变提供有益借鉴。工业智能网是一个跨界融合的创新体系, 是一个由政府主导下的多方合力推动的宏大事业, 需要融合工业界、互联网界的力量, 构成工业智能网运营体系, 聚集学术、科研、产业、应用多方角色合力, 形成长效机制, 实现我国“技术、应用、产业”的协调发展。

### 参考文献:

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.  
ZHOU J. Intelligent manufacturing——main direction of “made in China 2025”[J]. Chinese Academy Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] 国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 智能制造 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
NMSAC, BIDCENTER. Intelligent manufacturing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [3] 巍毅寅, 柴旭东. 工业互联网——技术与实践[M]. 北京: 机械工业出版社 2017.  
WEI Y Y, CHAI X D. Industrial internet[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [4] 通用电气公司, 工业互联网: 打破智慧与机器的边界[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015(08): 70-73.  
GE. Industrial internet: pushing the boundaries of mind and machines[M]. Beijing: China Machine Press, 2015(08): 70-73.
- [5] 李金华, 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015(05): 71-79.  
LI J H. Comparison and enlightenment between “industry 4.0” in Germany and “made in China 2025”[J]. Social Sciences Edition Journal of China University of Geosciences, 2015(05): 71-79.
- [6] 杜品圣. 智能工厂——德国推进工业 4.0 战略的第一步(上)[J]. 自动化博览, 2014(1): 22-25.  
DU P S. Smart factories——the first step in Germany’s industrial 4.0 strategy: part 1[J]. Automation Panorama, 2014(1): 22-25
- [7] 杜品圣. 智能工厂——德国推进工业 4.0 战略的第一步(下) [J]. 自动化博览, 2014(1): 50-55.  
DU P S. Smart factories——the first step in Germany’s industrial 4.0 strategy: part 2[J]. Automation Panorama, 2014(1): 50-55.
- [8] 王钦, 张蓓. “中国制造 2025”实施的切入点与架构[J]. 中州学刊, 2015(10): 3237.  
WANG Q, ZHANG H. The entry point and framework for the implementation of “made in China 2025”[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2015(10): 32-37.
- [9] 肖琳琳. 国内外工业互联网平台对比研究[J]. 信息通信技术, 2018(03): 27-30.  
XIAO L L. A comparative study on the industrial internet of things platform at home and abroad[J]. China Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, 2018(3): 27-30.
- [10] 王力轩. 基于嵌入式系统工业串口集线器的设计与测试[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.  
WANG L X. Design and testing of industrial hub base on embedded system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [11] 余菲菲, 高霞. 产业互联网下中国制造企业战略转型路径探究[J]. 科学学研究, 2018, 36(10): 1770-1778.  
YU F F, GAO X. Research on the strategic transformation path of Chinese manufacturing enterprises under the industrial internet[J]. Studies in Science of Science, 2018, 36(10): 1770-1778.
- [12] 王飞跃, 张军, 张俊, 等. 工业智联网: 基本概念、关键技术与核心应用[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1606-1617.  
WANG F Y, ZHANG J, ZHANG J, et al. Industrial Internet of Minds: Concept, Technology and Application[J]. Automatica Sinica, 2018, 44(9): 1606-1617.
- [13] DONG M X, RANJAN R, ZOMAYA A Y, et al. Guest editorial on advances in tools and techniques for enabling cyber- physical-social systems—Part I[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2015, 2(3): 38-40.
- [14] 徐子睿. 基于工业互联网的井下车辆视频采集、定位与避障技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
XU Z R. Autonomous underground vehicle video capture, localization and obstacle avoidance based on industrial internet[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [15] 张永强, 赵永勇, 李崇德. 嵌入式远程视频采集系统的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2006(4): 75-77.  
ZHANG Y Q, ZHAO Y Y, LI C D. Design and implementation of embedded remote video capture system[J]. Modern Electronics Technique, 2006(04): 75-77.
- [16] 王耀南, 陈铁健, 贺振东, 等. 智能制造装备视觉检测控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(03): 273-286.  
WANG Y N, CHEN T J, HE Z D, et al. Review on the machine vision measurement and control technology for intelligent manufacturing equipment[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32 (03): 273-286.
- [17] 阮涛涛. 基于视觉的人体行为检测识别研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.  
YUAN T T. Research on Detection and Recognition of Vision-based Human Activity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [18] 于成龙. 基于视频的人体行为识别关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
YU C L. Research on Key Technologies of Video-based Human Behavior Recognition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [19] 丁利敬. 虚拟现实技术在工业设计中的模型应用研究[J]. 洛阳师范学院学报, 2018, 37(05): 66-68+82.  
DING L J. Research on model application of virtual reality technology in industrial designing[J]. Journal of Luoyang Normal University, 2018, 37(05): 66-68+82.
- [20] 王慧强, 温秀秀, 吕宏武, 等. 面向移动物联网的可信超网络概念及构架研究[J]. 计算机科学, 2017, 44(05): 75-80.  
WANG H Q, WEN X X, LV H W, et al. Concept and architecture of trustworthy super network for mobile internet of things[J]. Computer Science, 2017, 44(05): 75-80.
- [21] 孙新江. 无线传感器网络中可靠安全数据传输问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
SUN X J. Research on reliable and secure data transmissions in wireless sensor networks[D]. Nanjing University of Science & Technology, 2016.

- [22] 王建新, 龚皓, 陈建二. 高带宽延时网络中一种协同式拥塞控制协议[J]. 软件学报, 2008(1):125-135.  
WANG J X, GONG H, CHEN J E. A cooperant congestion control protocol in high bandwidth-delay product networks[J]. School of Information Science and Engineering, 2008(1):125-135.
- [23] 王海勇. 无线传感器网络数据可靠传输关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.  
WANG H Y. Research on Key Techniques of Data Reliable Transmission in Wireless Sensor Networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Post and Telecommunications, 2016.
- [24] 马吉军, 贾雪琴, 寿颜波, 等. 基于边缘计算的工业数据采集[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(4):91-93.  
MA J J, JIA X Q, SHOU Y B, et al. Edge computing based industrial data acquisition[J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(4):91-93.
- [25] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5):907-924.  
SHI W S, SUN H, CAO J, et al. Edge computing—an emerging computing model for the internet of everything era[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [26] 秦秀磊, 张文博, 魏峻, 等. 云计算环境下分布式缓存技术的现状与挑战[J]. 软件学报, 2013, 24(1):50-66.  
QIN X L, ZHANG W B, WEI J, et al. Progress and challenges of distributed caching techniques in cloud computing[J]. Journal of Software, 2013, 24(1):50-66.
- [27] 谭建荣, 刘达新, 刘振宇, 等. 从数字制造到智能制造的关键技术途径研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3):39-44.  
TAN J R, LIU D X, LIU Z Y, et al. Research on key technical approaches for the transition from digital manufacturing to intelligent manufacturing[J]. Engineering Sciences, 2017, 19(3):39-44.
- [28] 章红波. 基于 VR 的虚拟工业生产环境交互技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(13):193.  
ZHANG H B. Research on interactive technology of virtual industrial production environment based on VR[J]. Electronic technology & Software Engineering, 2016(13):193.
- [29] 李君, 邱君降, 窦克勤. 工业互联网平台参考架构、核心功能与应用价值研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(6): 103-106+126.  
LI J, QIU J J, DOU K Q. Research on the reference architecture, core function and application value of industrial internet platform[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(6): 103-106, 126.
- [30] 黄德双. 智能计算研究进展与发展趋势[J]. 中国科学院院刊,

2006(1): 46-52.

HUANG D S. The development and prospects of intelligent computing technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2006(1): 46-52.

## [作者简介]



张平 (1959-), 男, 陕西汉中, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、认知无线网络、TD-LTE、OFDM。



刘会永 (1979-), 男, 河南宝丰人, 博士, 北京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络管理、大数据、工业互联网。



李文璟 (1973-), 女, 山西太谷人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络管理与通信软件、无线网络管理与优化。



周凡钦 (1988-), 男, 河南郑州人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为网络切片与资源管理。