

工业物联网：基本概念、关键技术与核心应用

王飞跃^{1,2,3} 张军⁴ 张俊^{1,5} 王晓^{1,2,3}

摘要 本文首先阐述了工业网联技术的演化过程, 重点讨论了工业物联网产生的技术和时代背景. 然后探讨了工业物联网的基本概念、内涵与应用领域. 本文详细介绍了工业物联网的关键技术, 包括数字虚拟工业技术、新一代知识工程技术、工业资源异构复杂网络管控技术、区块链智能、社会计算、边缘计算等, 及其技术平台架构. 最后我们以智能工业新模式和工业系统价值挖掘为示例, 举例说明工业物联网的应用模式.

关键词 工业物联网, 知识自动化, 虚拟数字工业, 复杂系统理论, 区块链, 社会计算

引用格式 王飞跃, 张军, 张俊, 王晓. 工业物联网: 基本概念、关键技术与核心应用. 自动化学报, 2018, 44(9): 1606–1617

DOI 10.16383/j.aas.2018.y000004

Industrial Internet of Minds: Concept, Technology and Application

WANG Fei-Yue^{1,2,3} ZHANG Jun⁴ ZHANG Jun^{1,5} WANG Xiao^{1,2,3}

Abstract This article illustrates the concept, technology and applications of industrial internet of minds (IIoM). The evolutionary process of inter-connected industrial technology is introduced with emphasis on the background for IIoM's emergence. The basic concepts of IIoM are explained in details, including digital virtual industrial technology, new-generation knowledge engineering, complex heterogeneous industrial resource networks, blockchain intelligence, social computing, edge computing, etc. Two exemplar applications in intelligent industries and system value mining are used for demonstrating the applicable scenarios of IIoM, followed by conclusion remarks.

Key words Industrial internet of minds, knowledge automation, digital virtual industry technology, complex system theory, blockchain, social computing

Citation Wang Fei-Yue, Zhang Jun, Zhang Jun, Wang Xiao. Industrial internet of minds: concept, technology and application. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1606–1617

自上世纪中期以来, 工业技术 (Industrial technology) 和信息技术 (Information technology) 融合的过程就已经开始, 其进程由于网络技术的发展而加速, 而工业控制系统的演化就是这一融合过程

的范例. 网络化的工业控制主要经历了以下几个阶段: 20 世纪六七十年代的模拟仪表控制系统、八九十年代的集散控制系统、21 世纪的现场总线系统. 在这些阶段, 技术发展聚焦于在工业现场本地的工业过程信息化与自动化.

2012 年, 对应网络信息技术的发展, 国际工业技术巨头 GE (General Electric) 公司提出了工业互联网的概念并发表工业互联网白皮书^[1]. 在白皮书中, GE 将工业互联网的精髓阐述为: 智能机器 (Intelligent machines)、高级分析 (Advanced analytics)、工作人员 (People at work) 三要素的深度融合. 纵观 GE 的工业互联网, 是以工业系统为中心的基于互联网的工业、信息、网络、人机结合的融合技术.

随着科技的飞速发展, 物联网 (Internet of things, IoT) 概念和技术也得到了迅速的普及. 物联网理念的起源比较公认的说法是由 Kevin Aston 在 1999 年在 Procter & Gamble (P&G) 的一次演讲中提出^[2], 其工业应用的价值与意义显而易见. 对应于物联网技术, 工业互联网的概念逐步演变成成为工业物联网的概念, 但工业物联网 (Industrial internet of things, IIoT) 的起源却没有公认的结

收稿日期 2018-03-01 录用日期 2018-07-01
Manuscript received March 1, 2018; accepted July 1, 2018
国家自然科学基金 (61702519, 61533019, 91720000, 61501461), 北京市科技项目 (Z181100008918007) 和英特尔智能网联汽车大学合作研究中心项目 (ICRI-IACV) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61702519, 61533019, 91720000, 61501461), Beijing Municipal Science and Technology Commission Program (Z181100008918007) and the Intel Collaborative Research Institute for Intelligent and Automated Connected Vehicles (ICRI-IACV)

本文责任编辑 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong

1. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266109
 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190
 3. 英特尔智能网联汽车大学合作研究中心 北京 100190
 4. 北京理工大学 北京 100081
 5. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072
1. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109
 2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
 3. the Intel Collaborative Research Institute for Intelligent and Automated Connected Vehicles, Beijing 100190
 4. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081
 5. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072

论. 2016 和 2017 年, 王飞跃教授分别在 IEEE TAB (Technical activity board meeting) 未来方向 IoT 会议和 IEEE 射频识别委员会 (Council on RFID) 上提出设立工业物联网专业工作委员会. 2017 年底, IEEE 计算机学会将工业物联网列为 2018 年的十大技术发展趋势之一.

对于从工业互联网到工业物联网的转换过程, GE 在其官网上一方面宣称“工业物联网即工业互联网”(“The industrial internet of things (IIoT), also known as the industrial internet”)[3], 而在同一篇文章里, GE 也承认工业物联网确是工业互联网在客户端的扩展: “One perspective is to think of the Industrial Internet as connecting machines and devices in industries ... On the other hand, the Internet of Things tend to include consumer-level devices ...”

在最近的发展中, 工业物联网的概念正迅速取代工业互联网的概念, 无论是在以 GE 为代表的美国工业界还是以西门子、ABB 为代表的欧洲工业界, 工业物联网已成为工业网联系统的主流技术框架. 2017 年 8 月, GE 数字部门 CEO, William Ruh 在官网发表文章“为什么 GE 数字部门定位于工业物联网领袖 (Why GE digital is positioned to lead the industrial internet of things)”[4], 而在这篇文章里通篇再未见“工业互联网”字样. 西门子工业也将其工业平台 MindSphere 定义为“MindSphere 是基于云技术的、开放物联网操作系统 (MindSphere is the cloud-based, open IoT operating system)”.

图 1 描述了工业网联技术在各个时期的不同发展阶段. 我们认为工业互联网是其中的一个重要发展阶段, 就是基于互联网技术发展出的联结业务、商务、供应链等信息的网络系统和技术, 而工业物联网是其向边缘装置的深入发展. 当前的工业物联网

技术能在系统感知与控制层次上解决复杂工业系统的管控问题, 但是在更高的智能层次上, 在系统资源的使用效率、自适应性、自主性、自组织性和安全性上, 还缺乏有效的、融合系统工程技术的智能科技. 由此, 工业物联网应运而生, 其使命就是实现工业过程的知识自动化, 为新一代的工业智能产业提供智能科技.

工业物联网旨在实现海量工业实体的智能化协同, 改变工业生产形态的未来工业基础设施, 需要运用新一代技术理念, 对不同种类工业实体乃至整个工业网络进行建模和管控, 对工业和社会资源进行高效整合, 从而实现工业实体的智能化发展.

在工业物联网的架构下, 会催生以下的物联网架构, 包括:

1) 农业物联网: 农业物联网将农业生产的各个物理、流程和知识环节通过智能技术有机地融合成一体, 使其能够自动、自主、自适应、自优化运行. 逐渐实现从以人的体力和智力为中心、农业装备为辅助设施的生产模式, 向以人机协同智能体为中心的, 自动化、智能化、知识化农业生产转变.

2) 交通物联网: 交通物联网实现交通运输系统中社会、人、交通装备、基础设施、货物、环境等异构交通要素在智能与知识层面上的融合, 从而建立起一种可自适应、自优化、自运行的综合交通运输管控系统.

3) 能源物联网: 能源的产生、传输、分配、销售是能源工业的核心业务. 围绕这些核心业务, 能源工业的其他业务也包括公司运营、投资管理、监管法规等. 我们期望能源物联网为以上的能源工业组件提供极大提升其工业效率的技术方法和系统平台.

4) 企业物联网: 当代企业管理已经从信息管理向知识管理迈进. 企业物联网为企业提供知识化和智能化的管理能力, 并为管理者提供崭新的管理工

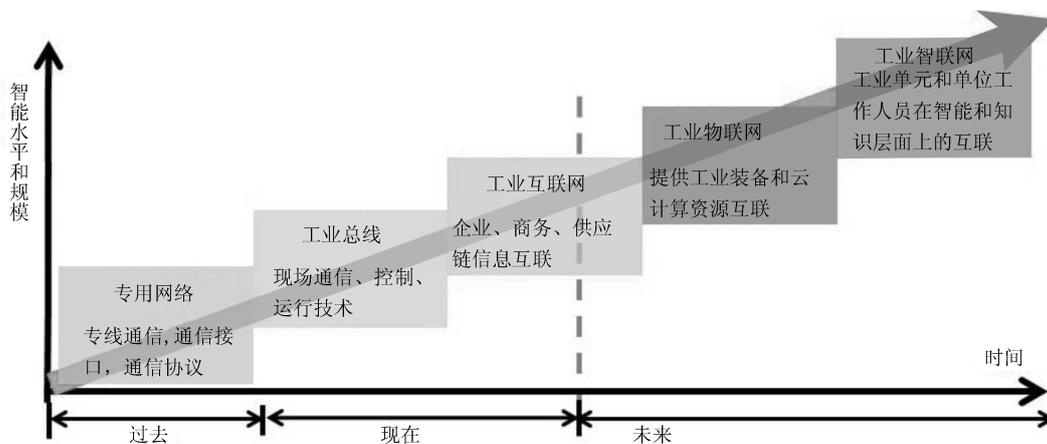


图 1 工业网联技术的演进过程

Fig. 1 The evolutionary process of inter-connected industrial technology

具与手段。

5) 社会物联网: 旨在基于物联网技术和平台, 实现社会和经济的自主优化和管控, 基于物理空间和虚拟空间的融合而实现对社会、经济问题的描述、预测、引导, 促使向新的智能社会形态的迈进。

因此, 工业物联网是一门与工业互联网、工业物联网紧密结合, 深度融合的智能技术和知识工程技术, 其目标为建立包含人机物在内的智能实体之间知识层次的联结、实现各智能体间知识的互联互通, 是一种全新的、直接面向全社会智能的复杂协同数信、感控、知识自动化系统。工业物联网的实施则能够以极高的效率整合各种工业和社会资源, 极大地减少工业资源的浪费和消耗, 极大地解放工业生产力, 拓展即将出现的“软件定义工业”、“类工业领域”、“广义工业”、“社会制造”、“社会工业”等智能产业新形态^[5]。

本文旨在阐述工业物联网的基本概念、关键技术和核心应用, 并对其发展和应用进行展望。

1 工业物联网的基本概念

工业物联网属于复杂系统的范畴, 因此本文对工业物联网做一个多方位的定义:

1) 工业物联网作为新兴的科学技术门类: 物联网的目标是达成智能体群体的“协同知识自动化”和“协同认知智能”, 即以某种协同的方式进行从原始经验数据的主动采集、获取知识、交换知识、关联知识, 到知识功能, 如推理、策略、决策、规划、管控等全自动化过程, 因此物联网的实质是一种全新的、直接面向智能的复杂、协同知识自动化系统理论和工程技术。

2) 工业物联网作为未来工业基础设施: 工业物联网是由社会工程系统联合感知与驱动以及多层次一体化通信计算系统支撑的工业系统智能技术系统和知识服务平台。

3) 工业物联网作为工业资源整合配置工具: 工业物联网深度融合互联网、物联网、人机交互、大数据、智能技术, 实现研发、生产、供应、销售、服务等工业全链条要素的全面联结、协同与智能化, 使海量工业智能实体完成社会化知识协同, 彻底地改变了工业生产形态, 极大地解放和提升社会生产力。

4) 工业物联网作为智能产业经济管控手段: 工业物联网的使命是重组各种产业, 对其进行建模、分析、管控, 使其以难以想象的高效率自主地运转和发展; 所有工业实体运行在智能产业网络的虚拟空间中, 使得监视和管控各个工业单元的运行状况成为可能, 使得分析每一个产业的宏观数据和微观数据成为可能, 最终形成真正的数据化、知识化、智能化的智能产业。

具体而言, 工业物联网的内涵包括: 1) 知识工

程与知识自动化: 知识自动化^[6-7], 在广义上暂无精确的定义, 粗略上可以理解为是一种以自动化的方式变革性地改变知识产生、获取、分析、影响、实施的有效途径。狭义上, 知识自动化可认为是广义知识自动化的应用。知识自动化的关键, 在于如何将信息、情报等与任务和决策无缝、准确、及时、在线地整合起来, 从而实现自动完成各种知识功能与知识服务。这种由知识自动化技术构成的系统, 即为知识自动化系统。知识自动化系统不断与真实世界进行行为互动、知识交互, 不间断获取海量的不同领域、异构、高度并发的数据。知识自动化系统是一个动态且时变的系统, 通过经验知识的获取和积累, 不断改变系统内部内容、形态、方法和结构, 它用自身的复杂性、时变性来理解真实世界的复杂性和时变性。

2) 虚实纠缠的新兴工业形态: 针对传统的工业系统, 在信息化、数字化的基础上, 通过计算与实验的方法构建出虚拟工业系统。通过传统工业系统与虚拟工业系统的交互, 实现建立智能化虚实交互、纠缠的新工业系统, 完成对实际工业系统的管理与控制、分析与优化^[8]。3) 人在环、社会在环的社会工程系统: 社会系统由三部分系统构成, 即“物理空间”对应的物理工程系统, “赛博空间”对应的人工工程系统以及“社会空间”对应的社会工程系统。根据实际物理工程系统, 构建出相应的人工工程系统。人工工程系统基于大数据技术和 AI 技术完成对物理系统的实时控制, 两者同时完成对社会系统的引导^[9]。社会系统同时对物理系统和人工系统完成实时反馈, 最终实现物理空间、赛博空间、社会空间的互联互通, 共同融合。4) 工业资源异构网络及其新型管控模式: 实际的工业资源, 存在着时空尺度异构、实体异构、关系异构等, 借助社会传感或物理传感、驱动、通信、计算等技术, 构建形成工业资源异构网络。通过智能技术、复杂系统工程技术、区块链智能技术等相关技术手段进行优化、运营、管控。工业资源异构网络功能通过数据中心/计算架构处理, 转化成知识, 并最终形成知识服务。

2 工业物联网架构与核心技术

工业物联网的技术架构主要由数据接入层、通信计算层、虚拟操作系统层、知识解析综合层、以及知识服务层组成, 其结构如图 2 所示。图 3 中所示是在该体系结构下, 新出现的核心技术。本文将工业物联网新出现的架构与核心技术归纳如下。

2.1 数字虚拟工业技术

数字虚拟工业技术基于实际工业设备运行数据, 通过学习和优化, 建立对应于实际工业系统的虚拟工业系统。借助软硬件接口, 两个系统在运行过程中进行信息的交互, 协同发展, 基于学习过程中累

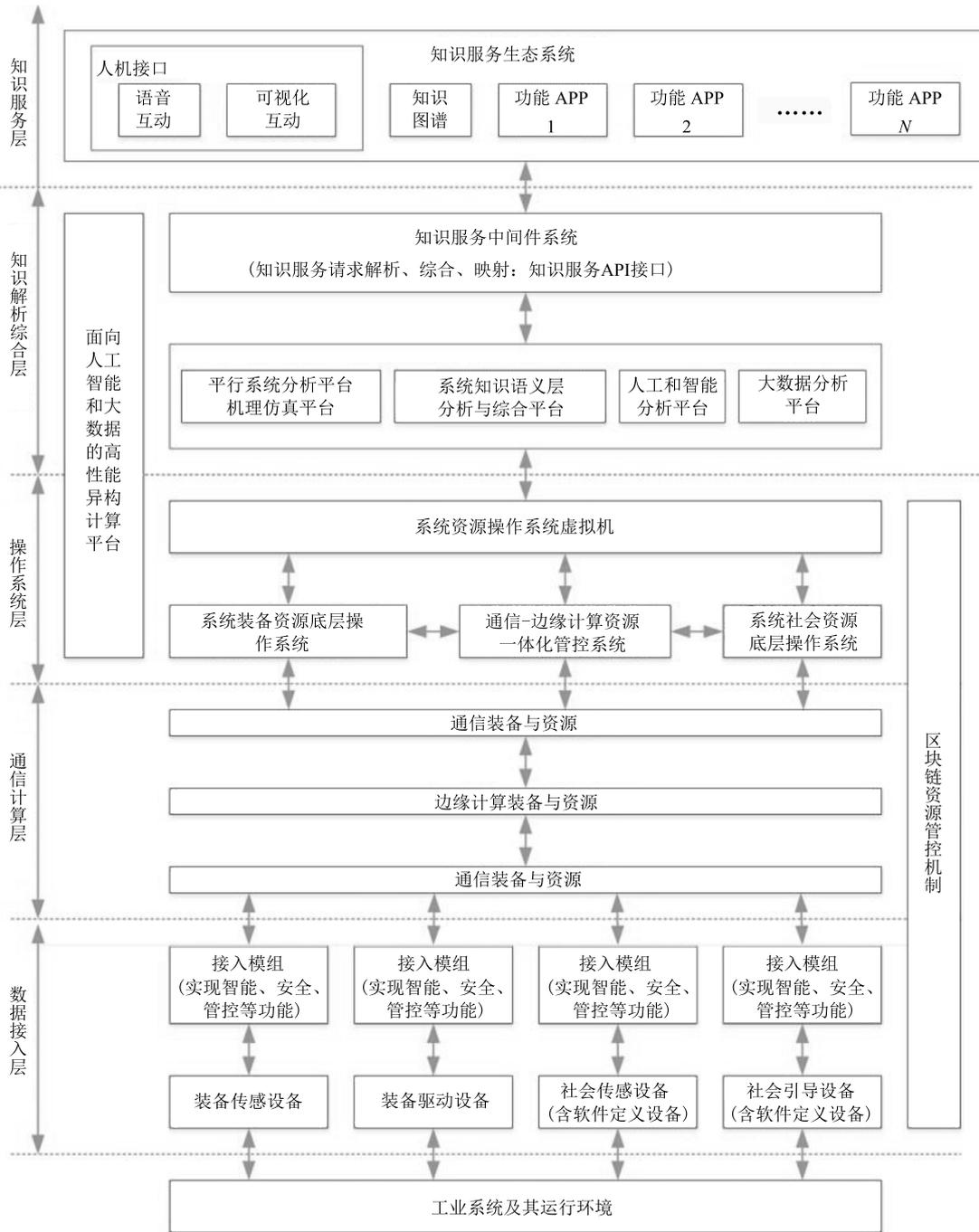


图 2 工业物联网的技术平台架构

Fig. 2 Framework of the technological platform of IIoM

积的知识, 逐步完善的虚拟工业系统结合实际运行数据, 对工业实体状态进行评估, 并设计场景进行演化计算实验对未来态势进行预测, 帮助实现对复杂实际工业系统的管理控制, 而对实际工业系统实施管控措施后的实时信息将反馈给虚拟工业系统做后续的评判推演, 两个系统随时间不断进行类似的交互反馈^[10]. 数字虚拟工业技术的原理及流程如图 4 所示.

利用数字虚拟工业技术, 能够建立虚实纠缠的工业系统, 从而可挖掘分析实际运行数据, 构建工业设备数字化寿命模型, 预判运行状态发展趋势, 智能辅助运行人员决策, 实现对工业实体的精确描述、实时预测和智能引导^[11]. 虚实交互系统的具体设计和交互架构如图 5 所示.

2.2 新一代知识工程技术

新一代知识工程技术包括单智能体自主获取知

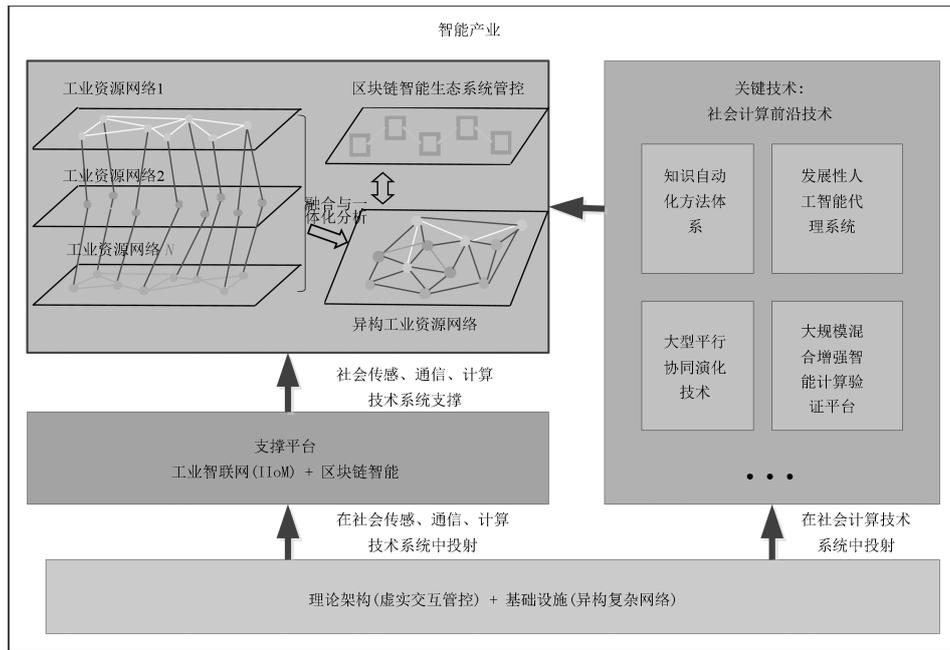


图3 工业物联网概念架构与核心技术

Fig.3 Illustration of the concepts and core technologies of IIoM

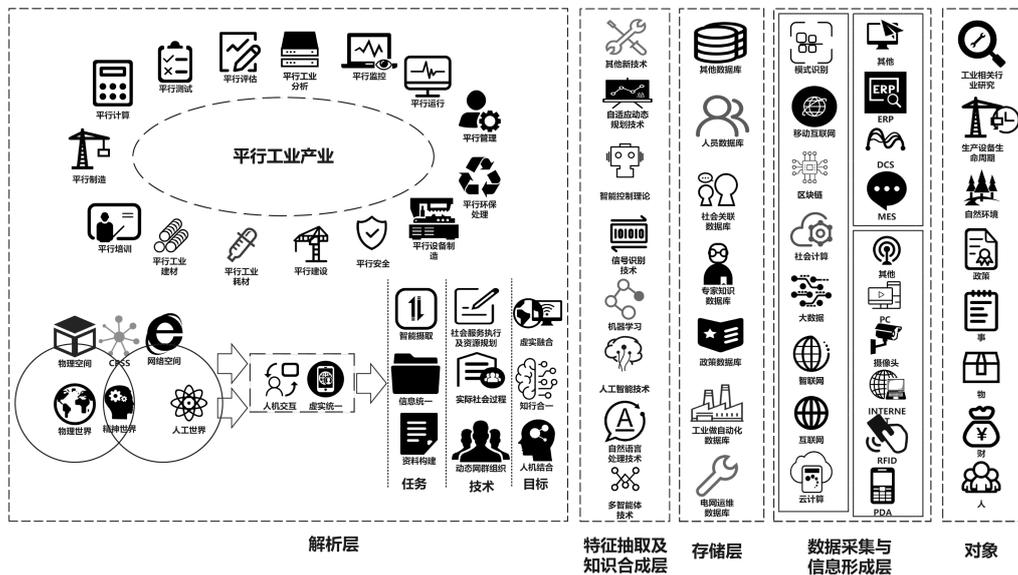


图4 数字虚拟工业技术

Fig.4 Digital virtual industrial technology

识的知识自动化技术和多智能体的知识协同技术。知识自动化，在广义上可以定义为是一种以自动化的方式变革性地改变知识产生、获取、分析、影响、实施的有效途径，其关键在于对原始信息、目标任务与最终决策的自然、准确、在线结合^[12]。知识自动化通过对多尺度时空信息的组织和特征化，揭示数据的低层次内在特征，而后进行知识对象及知识对象属性的提取，获取有知识价值的对象及其属性，

构建知识空间，最终实现知识的表示和知识功能的实现。知识的协同技术主要包括知识的协同表征与传递，以及知识的联结与协同运行，它通过建立智能实体之间知识层次的互联互通，在联合知识空间中完成知识功能^[13]。如图6所示，人们的社会、经济、技术活动通过“翻译”的方式实现了自然语言与人工语言的智能交互，最终通过互联网的多种协同结构实现了支撑知识服务、完成知识功能、实现知识消

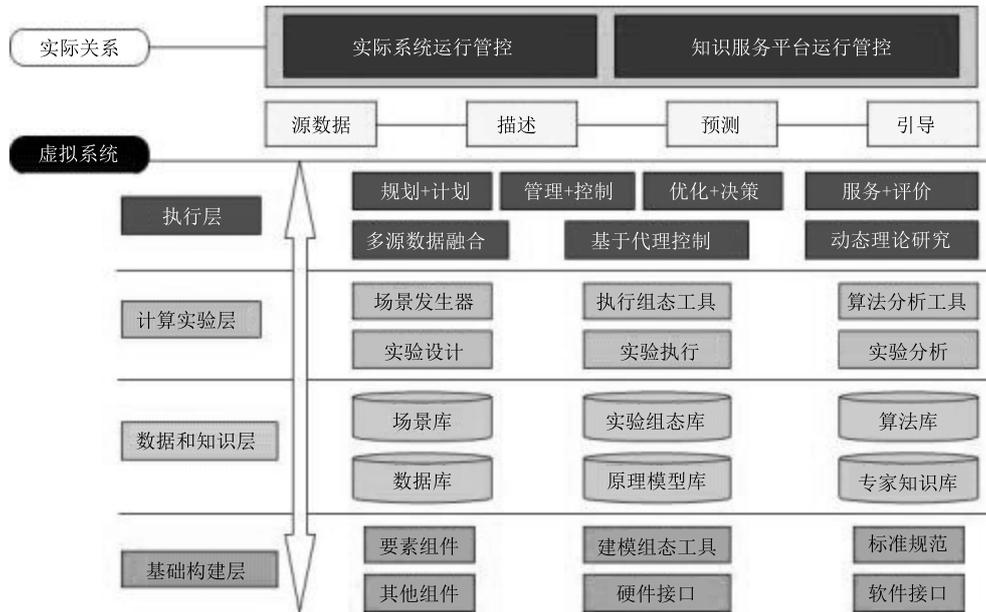


图 5 虚实交互系统

Fig. 5 Virtual and real interaction system

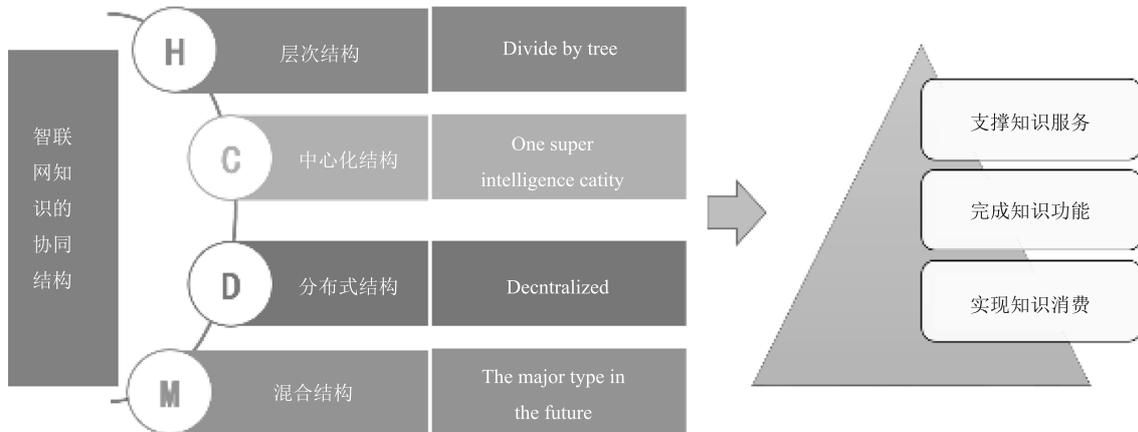
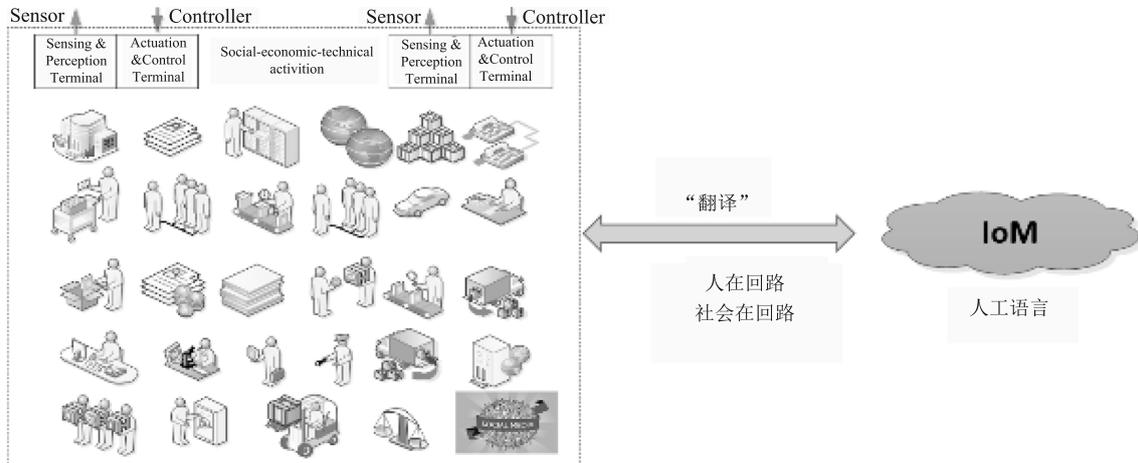


图 6 新一代知识工程技术

Fig. 6 New generation knowledge engineering technology

费等多种功能。

将新一代知识工程技术运用于工业物联网中,不仅能够基于单个工业实体的实际运行数据,完成在生产过程中的知识发现和表示,进行情景预测和辅助决策,实现单个工业实体的安全运行和工艺调整;更重要的是,能够建立不同工业实体之间的知识联结网络,达到工业知识的协同运行,在整个工业体系中完成对全链条工业实体的综合分析和统一决策,实现工业结构整体优化和生产全面提高。

2.3 工业资源异构复杂网络的建模、分析及管控技术

工业资源异构复杂网络的建模、分析及管控(图7)借助图处理、深度学习等智能技术,对不同类型的工业资源网络进行数字化建模,基于不同工业资源网络之间的数据映射关系、逻辑关联性特征进行融合性分析,形成异构工业资源网络,从而对异构工业资源网络产生的各类数据信息进行一体化的挖掘。同时,利用区块链网络智能合约不可篡改特征和通证属性对建立的工业资源异构复杂网络进行管理和控制。

利用异构网络建模、分析和管控技术,可对海量的不同种类工业资源进行深度整合、统一管理和信息挖掘,实现高效、安全、准确的分析与控制。

2.4 区块链智能

区块链智能技术是一种广泛应用于社会经济领域的一种新型技术,它包括应用于底层的区块链技术和运作于区块链之上的通证经济体系。如图8所示,区块链具有去中心化、自治化、透明不可篡改、可追溯性等特性^[14-15],其应用使传统上难以流通和商品化的“注意力”与“信用度”成为可以批量化生产的流通商品,革命性地提升经济活动范围与社会效率,区块链技术具有成为智能经济的基石的潜质。通证经济是支撑区块链实现权益快速流动与安全交

换的一种机制^[16],构建改变生产力和生产关系的智能经济模式离不开通证经济体系。利用区块链的特性和通证经济的行为激励作用,社会智能经济体系中良性经济行为的参与者会逐步增多,最终会引领社会经济导向,使得整个社会参与者的收益增多。同时,通证经济的激励作用还会优化社会的资源匹配,通过社会认知学习和沟通交流来提高社会效率。

区块链智能技术是智能世界中大数据和人工智能体可靠、可信、安全、高效的联结途径,它利用多代理技术、智能合约和不可篡改的特性实现对工业资源的安全可信管控,利用区块链通证属性对资源进行评估、管理、激励和引导,引导工业生态的健康成长和运行^[17]。基于区块链智能技术架构的工业资源管控系统可以实现对混合异构工业资源网络的一体化建模、调控、优化和管控,最终构建一个完整的智能工业生态系统。

区块链技术可以实现高可信度、无法篡改的分布式数据库需求,而运作在其系统上的通证经济体系又可以通过激励作用对工业资源进行调控、优化和管控,因此可以建立起区块链管控系统对工业资源进行安全可信管控。首先,在工业资源平台服务器上搭建区块链平台,设置准入机制,配置不同的组织关系,并为各个组织配置相应的通道,完成底层基础网络的搭建;其次,针对不同工业资源的特性以及个性化的定制需求,在区块链系统中安装共识机制互异的智能合约,并设置排序节点中的最大区块数量和最大数据量,智能合约的自动执行形成了新型的高效智能工业链形式^[18-19];最后,采用一定的选择机制让某一组织节点对交易进行打包形成区块,并对该节点配给一定的通证奖励,同时利用大数据分析平台对工业资产进行评估,对评估良好的工业资源配给一定数量的通证奖励,在后续的交易中通证可以作为手续费附加在智能合约中被优先打包成区块,由此对工业生态的健康成长和运行进行

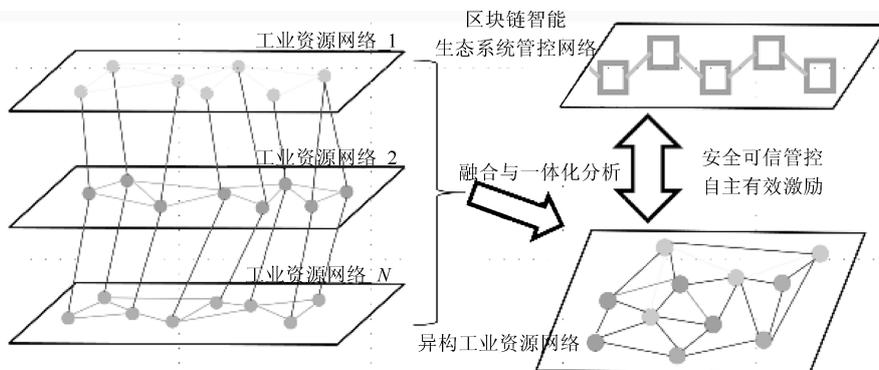


图7 工业资源异构复杂网络的建模、分析及管控

Fig. 7 Complex heterogeneous industrial resource networks

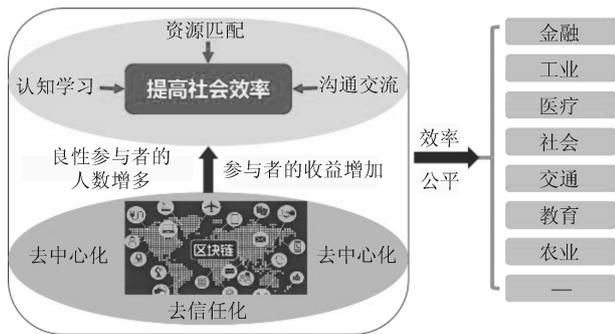


图 8 区块链智能技术
Fig. 8 Blockchain intelligence

一定程度的引导. 区块链上的每个组织都会有记账节点来进行分布式记账, 并维护全网的一个公共的账本; 同时, 对于工业资产数据的读写操作均会被记录到区块链中, 以实现全方位的安全可信管控.

2.5 社会计算

大数据、物联网、云计算等信息技术的蓬勃发展深刻改变了人与人、人与物、物与物之间的交互方式, 社会计算理论^[20-26] 作为社会科学和计算科学的交叉融合, 侧重于信息技术在社会活动中的应用以及社会知识在信息技术中的嵌入和使用, 可有效应对社会及工业问题中的各种复杂动态^[27].

图 9 所示为社会计算的整体框架, 包含基于开源信息能源情报的广泛采集、深度分析、个性化影响、协同产生等多个关键步骤. 传统的物理系统

通过各类传感器获得系统的物理信号, 工程控制论在物理过程的自动化中发挥了极其重要的作用. 社会传感器, 就是力图将物理系统中传感网络获取物理信号的概念和手段推广到网站、博客、论坛等各类网络空间, 用于社会信号的采集, 获取所关注的社会信号并从中提取出感兴趣的信息. 任何企业运营、社会事务、生产过程等方面的管理, 都可以将问题的求解过程扩展到由物理信号和社会信号共同构成的高维解空间中. 其中, 融合了物理和社会信号的数据具有海量、形式多样、高度分散等特点, 采用分布式文件系统实现对大规模社会数据的存储和管理, 通过机器学习、数据挖掘、模式识别、自然语言理解等技术对海量信息进行准确抽取、分析, 并以用户可理解的方式展现出来, 最终实现信息自动抓取、数据规整、数据量化、自动分类聚类、主题检测等功能, 从而为各行各业的决策提供坚实有力的量化支持.

社会计算系统主要包含四个子系统, 分别是: 大数据存储与计算平台、全方位社会传感系统、智能检索系统、深度挖掘与分析决策系统. 互联网数据结构的多样性使得数据的处理复杂化, 数据规模的海量性使得计算的巨量化, 数据不确定性和动态性使得信息处理工作繁琐化. 针对社会信号大规模存储与计算的需求, 需要采用计算机集群进行分布式存储, 支持各种结构的数据的存储问题, 采用并行计算机制可提高海量数据的处理效率, 使平台达到功能完善、性能稳定、海量存储能力、高可靠性和高安全性的目标, 从整体上保证社会计算平台的工作效率. 通

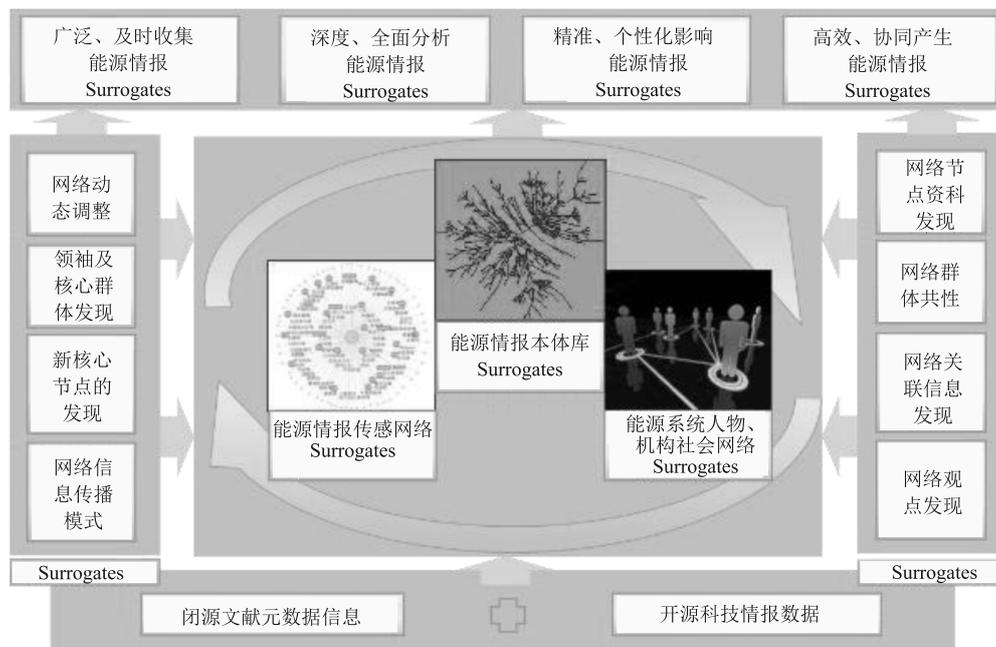


图 9 社会计算框架
Fig. 9 Architecture of social computing

过分布广泛的社会传感器,对各种社会信号和社会数据进行不间断的采集和监控.在网络空间中,可采用网络爬虫的手段抓取项目所需的开源信息,对多种 Web 资源的信息内容进行有序抽取和整理,提高数据源的智能选择及情报精确率.在实际的生产管理系统中,建立从数据源到数据库间的信息通道,实现信息的高速无差传输.对于海量数据综合运用查询扩展、知识图谱等技术,构建跨媒体的工业数据智能检索平台,提高数据处理的并行度,实现智能检索.通过机器学习、数据挖掘、模式识别、自然语言理解等技术对海量的社会信息进行准确抽取、分析,并以用户可理解的方式进行展现,为工业数据的分析决策提供量化支持.

2.6 边缘计算

边缘计算作为一种新型计算模式,是实现工业互联网的支撑技术之一^[28].相较于云计算,其可以实现对工业边缘设备大数据的实时处理,减少了因数据传输给云计算中心带来的网络带宽问题和实时性需求,且边缘计算能够考虑到边缘数据的隐私问题及数据上传时边缘设备电能损耗问题^[29].边缘计算通过整合工业网络边缘上的计算、存储、网络等形成合一的平台为工业用户提供服务,使得数据在源头侧就能得到有效及时的处理,或者将边缘数据部分处理后将数据传到云计算中心处理,减少点云计算中心的压力^[30].

边缘计算主要是对工业互联网中边缘设备产生的海量数据进行存储和处理,边缘计算的下行数据代表着云服务,上行数据表代表着工业智联服务^[31].工业网络边缘设备既从云计算服务中心请求内容及服务,也进行数据存储、处理、缓存及隐私保护等任务.传统的 MapReduce 及 Spark 等数据处理方法处理不了工业边缘设备产生的海量边缘异构数据,构建适合于工业互联网的边缘计算平台至关重要.根据边缘计算产业联盟(ECC)的边缘计算参考架构 1.0,边缘计算包括四个功能域,分别是应用域、数据域、网络域及设备域^[32].应用域支持行业应用本地化入驻,支撑行业的全生命周期活动、边缘业务的高效运营与可视化管理;数据域对海量边缘数据进行数据分析与呈现,数据聚合与互操作,同时保护数据安全及数据隐私;网络域提供数据的聚合及系统的互联;设备域通过车床、发动机等工业设备来实现工业现场设备的实时智能互联及相关的智能应用.

3 应用模式举例

3.1 工业互联网催生智能工业新模式示例

工业互联网的高速发展催生了种类繁多的智能工业新模式.图 10 展示了社会化大规模商品定制模式的基本流程,各工业单位通过采用工业互联网的技术,将串行的工业生产流水线拆分成了单一的生产单元,结合区块链智能合约技术,每个生产单元通过智能合约将自己的产品连接进不同的产业链中.消费者可通过在智能终端输入需求数据,制定自己需要的专属商品,需求确立后,将触发整个生产链的智能合约,生产链中与商品相关的生产单元将通过智能合约实时定义组成多条生产线,完成相应的生产指令.生产完成的产品通过智能合约进行运输,直接送到消费者手中,从而实现商品的社会化大规模定制.同时,消费者还可通过工业互联网技术对商品的原材料、零件生产、拼装运输等流程进行回溯,保证生产过程的透明化,保证商品的高质量和高可信度.

工业资源的管控新模式则是通过工业互联网技术,对传感、控制、信息、计算等不同结构的工业资源网络,进行一体化建模分析、决策和自主运行,实现异构网络的互联互通,并提供准入接口,提高异构网络成为智能工业生态系统的可能性.同时采用分布式管理、智能合约技术以及不可篡改的方法实现对工业资源的安全可信的管理.

3.2 工业互联网催生工业系统价值挖掘新模式

在工业互联网环境下,对工业系统的价值挖掘工作包括对内生价值的挖掘以及对外在资源的挖掘.图 11 阐释了内生价值挖掘过程中采用的相关技术、解决的实际问题以及最终的实现效果.对于工业系统的内生价值挖掘,具体是通过诸如数字虚拟工业技术、知识工程技术、异构复杂网络建模分析技术以及区块链技术等技术,并建立虚拟的工业系统模型,模拟分析实体工业运行情况,保证系统运行稳定;通过发现生产架构知识,优化生产结构,降低产品生产成本;通过探索资源消耗关系,合理调整资源配置,提高资源的有效利用;通过构建部门参与机制,建立高效的信号激励制度,增强企业内部的活力.图 12 阐释了在外在资源挖掘过程中使用的工业互联网相关技术及可达到的实现效果,对于外在资源的挖掘,可结合社会计算、物联网数据采集以及知识工程等技术,通过描绘用户消费特征,以用户消费特征为生产导向,实现商品的针对

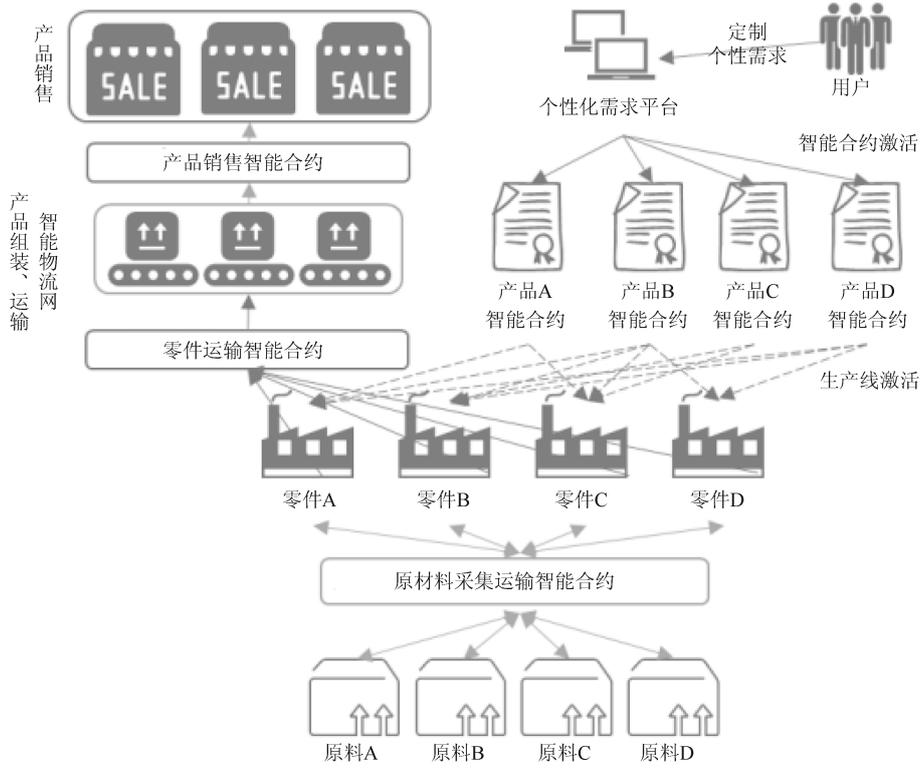


图 10 社会化大规模定制流程图

Fig. 10 Socialized massive customization process

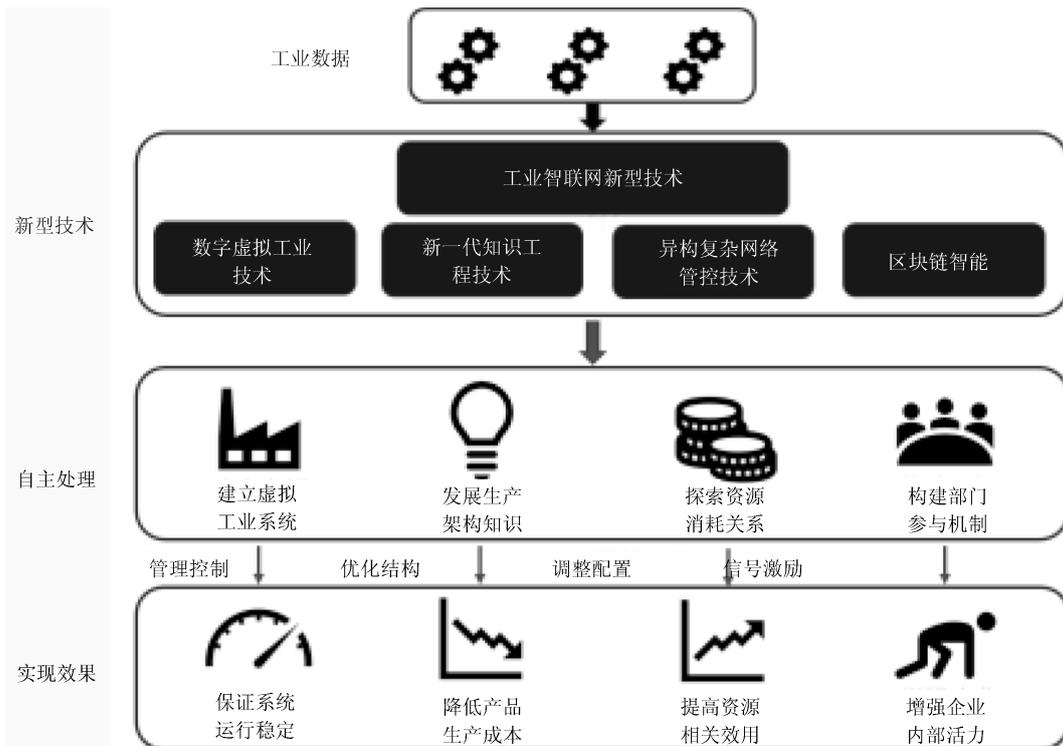


图 11 工业物联网内生价值挖掘

Fig. 11 Endogenous value mining IIoM

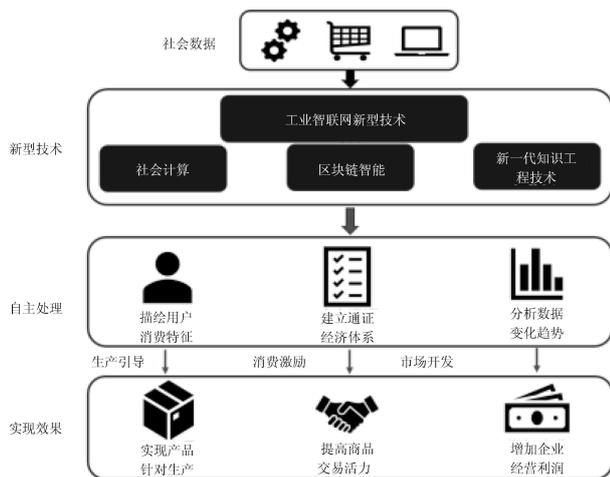


图 12 工业物联网外在资源挖掘

Fig. 12 External resource mining of IIoM

性生产；通过建立通证经济体系，制定相应的消费激励措施，提高商品交易的活力；通过分析市场数据的变化趋势，提前制定市场开发计划，增加企业经营的利润。

通过智能技术将工业系统的内生价值和外在资源相融合，在保证工业系统数据资源安全可靠的基础上，实现内在优化价值支撑外在产品推广，外在资源引导内在价值发展的良性循环。

4 结论

本文详细地阐述了工业物联网产生的技术和时代背景、定义与内涵、平台架构与关键技术，以及其应用模式的两个示例。

对于当前的工业系统与技术而言，单个和孤立的智能技术已经取得了一定的成绩，然而，工业系统中即将涌现海量的具有一定智能的实体，而这些实体在智能与知识层面上的如何协同和合作却还是一个开放的问题。如果这个目标能够实现，其对社会生产力的提升和对社会形态的影响，将是难以想象的。因此，工业物联网的大规模研究与开发势在必行，而我们也期望工业物联网将为社会化智能大工业提供一条切实可行而又富有成效的技术路径与顶层设计。

References

- 1 P. C. Evans, M. Annunziata. Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines [Online], available: https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf, June 15, 2017.
- 2 Wikipedia. Kevin Ashton [Online], available: https://en.wikipedia.org/wiki/Kevin_Ashton, September 20, 2017.
- 3 GE Digital. Everything You Need to Know About the Industrial Internet of Things [Online], available: <https://www.ge.com/digital/blog/everything-you-need-know-about-industrial-internet-things>, December 8, 2017.
- 4 W. Ruh. Why GE Digital Is Positioned To Lead The Industrial Internet Of Things [Online], available: <https://www.ge.com/reports/ge-digital-positioned-lead-industrial-internet-things-2/>, December 19, 2017.
- 5 Wang Fei-Yue, Zhang Jun. Internet of minds: the concept, issues and platforms. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(12): 2061–2070
(王飞跃, 张俊. 物联网: 概念、问题和平台. 自动化学报, 2017, **43**(12): 2061–2070)
- 6 Wang Fei-Yue. The destiny: towards knowledge automation — preface of the special issue for the 50th anniversary of Acta Automatica Sinica. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1741–1743
(王飞跃. 天命唯新: 迈向知识自动化 — 《自动化学报》创刊 50 周年专刊序. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1741–1743)
- 7 Wang Fei-Yue. On future development of robotics: from industrial automation to knowledge automation. *Science & Technology Review*, 2015, **33**(21): 39–44
(王飞跃. 机器人的未来发展: 从工业自动化到知识自动化. 科技导报, 2015, **33**(21): 39–44)
- 8 Li L, Lin Y L, Zheng N N, Wang F Y. Parallel learning: a perspective and a framework. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 389–395
- 9 Wang F Y, Zhang J J, Wang X. Parallel intelligence: toward lifelong and eternal developmental AI and learning in cyber-physical-social spaces. *Frontiers of Computer Science*, 2018, **12**(3): 401–405
- 10 Giacobini M, Brabazon A, Cagnoni S, Di Caro G A, Drechsler R, Ekart A, et al. *Applications of Evolutionary Computing*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 1–698
- 11 Dong M X, Ranjan R, Zomaya A Y, Lin M. Guest editorial on advances in tools and techniques for enabling cyber-physical-social systems — Part I. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2015, **2**(3): 38–40
- 12 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1–8
(王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. 自动化学报, 2015, **41**(1): 1–8)
- 13 Wang Fei-Yue, Sun Qi, Jiang Guo-Jin, Tan Ke, Zhang Jun, Hou Jia-Chen, et al. Nuclear energy 5.0: new formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(5): 922–934
(王飞跃, 孙奇, 江国进, 谭珂, 张俊, 侯家琛, 等. 核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构. 自动化学报, 2018, **44**(5): 922–934)
- 14 Zhang Jun, Gao Wen-Zhong, Zhang Ying-Chen, Zheng Xin-Hu, Yang Liu-Qing, Hao Jun, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1544–1554
(张俊, 高文忠, 张应晨, 郑心湖, 杨柳青, 郝君, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望. 自动化学报, 2017, **43**(9): 1544–1554)
- 15 Ping Jian, Chen Si-Jie, Zhang Ning, Yan Zheng, Yao Liang-Zhong. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37**(13): 3682–3690
(平健, 陈思捷, 张宁, 严正, 姚良忠. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制. 中国电机工程学报, 2017, **37**(13): 3682–3690)
- 16 Zhang J, Wang F Y, Chen S Y. Token economics in energy systems: concept, functionality and applications. eprint arXiv: 1808.01261, 2018.
- 17 Klitgaard T, Reddy R. Lowering electricity prices through deregulation. *Current Issues in Economics and Finance*, 2000, **6**(14): 1–6

- 18 Hu Kai, Bai Xiao-Min, Gao Ling-Chao, Dong Ai-Qiang. Formal verification method of smart contract. *Journal of Information Security Research*, 2016, **2**(12): 1080–1089
(胡凯, 白晓敏, 高灵超, 董爱强. 智能合约的形式化验证方法. 信息安全研究, 2016, **2**(12): 1080–1089)
- 19 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Blockchain: the state of the art and future trends. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(4): 481–494
(袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. 自动化学报, 2016, **42**(4): 481–494)
- 20 Wang F Y. Social computing: concepts, contents, and methods. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2004, **9**(2): 91–96
- 21 Wang Fei-Yue. The significance of social computing and its prospects. *Communications of CCF*, 2006, **2**(2): 8–17
(王飞跃. 社会计算的意义及其展望. 中国计算机学会通讯, 2006, **2**(2): 8–17)
- 22 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(4): 25–35
(王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统—关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(4): 25–35)
- 23 Wang F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(5): 65–67
- 24 Lazer D, Pentland A, Adamic L, Aral S, Barabasi A-L, Brewer D, et al. Social science: computational social science. *Science*, 2009, **323**(5915): 721–723
- 25 Schuler D. Social computing. *Communications of the ACM*, 1994, **37**(1): 28–29
- 26 Yang Q, Zhou Z H, Mao W J, Li W, Liu N N. Social learning. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 9–11
- 27 Leskovec J, Huttenlocher D, Kleinberg J. Predicting positive and negative links in online social networks. In: Proceedings of the 19th International Conferences on World Wide Web. Raleigh, North Carolina: ACM, 2010. 641–650
- 28 Satyanarayanan M. The emergence of edge computing. *Computer*, 2017, **50**(1): 30–39
- 29 Shi W S, Cao J, Zhang Q, Li Y Z, Xu L Y. Edge computing: vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, **3**(5): 637–646
- 30 Shi W S, Dustdar S. The promise of edge computing. *Computer*, 2016, **49**(5): 78–81
- 31 Shi Wei-Song, Sun Hui, Cao Jie, Zhang Quan, Liu Wei. Edge computing—an emerging computing model for the internet of everything era. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, **54**(5): 907–924
(施巍松, 孙辉, 曹杰, 张权, 刘伟. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型. 计算机研究与发展, 2017, **54**(5): 907–924)
- 32 Edge Computing Consortium. White Paper of Edge Computing Consortium [Online], available: <http://www.eccconsortium.net/Uploads/file/20161208/1481181867831374.pdf>, June 15, 2017.



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化. 本文通信作者. E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

者. E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(WANG Fei-Yue State specially appointed expert and director of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. Director of China Economic and Social Security Research Center in University of Chinese Academy of Sciences. Dean of Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers methods and applications for parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation. Corresponding author of this paper.)



张军 北京理工大学校长, 兼任国家空管新航行系统技术重点实验室主任、综合交通大数据应用技术国家工程实验室主任. 2013 年当选为中国工程院院士. 主要研究方向为民航航路网运行监控、星基航路运行监视、民航飞行校验, 综合交通大数据. E-mail: zhjun@bit.edu.cn

(ZHANG Jun Professor Jun Zhang

is the President of Beijing Institute of Technology, Director of National Key Laboratory of CNS/ATM, as well as Director of National Engineering Laboratory for Integrated Transportation Big Data. Since 2013, he is an Academician of the Chinese Academy of Engineering. His research interest covers air traffic management, communication/navigation/surveillance, unmanned aerial system, and multi-modal transportation.)



张俊 武汉大学电气工程学院教授. 主要研究方向为智能系统, 人工智能, 知识自动化, 及其在智能电力和能源系统中的应用. E-mail: jun.zhang@qaii.ac.cn

(ZHANG Jun Professor at School of Electrical Engineering, Wuhan University. His research interest covers intelligent systems, artificial intelligence, knowledge automation, and their applications in intelligent power and energy systems.)



王晓 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员. 2016 年获得中国科学院大学社会计算博士学位. 研究方向为社会交通, 动态网群组织, 人工智能和社交网络分析. E-mail: x.wang@ia.ac.cn

(WANG Xiao Assistant professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph.D. degree in social computing from University of Chinese Academy of Sciences, in 2016. Her research interest covers social transportation, cyber movement organizations, artificial intelligence, and social network analysis.)