

物联网: 概念、问题和平台

王飞跃^{1, 2, 3, 4} 张俊^{1, 5}

摘要 本文旨在讨论物联网 (Internet of minds, IoM) 的基本概念, 核心问题和关键平台技术. 首先阐述物联网概念的智能时代发展需求和科学哲学思想基础, 然后阐述物联网技术的背景、定义、实质, 及其实现协同认知智能的目标, 并举例说明其前沿应用领域, 包括物理信息社会系统、软件定义系统及流程、工业物联网. 接下来探讨物联网的核心问题: 知识的获取、知识的协同表征和传递、以及知识的关联和协同运行. 最后简单描述了物联网的关键平台技术, 包括虚实平行的平台体系和基于互联网、物联网、区块链和软件定义网络的社会化通信计算平台, 为分布式、自组织、自运行的安全物联网系统提供基础设施.

关键词 物联网, 知识自动化, 人工语言系统, 平行系统, ACP 方法, 知识动力学, 知识计算, 区块链, 平行区块链

引用格式 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

DOI 10.16383/j.aas.2017.y000006

Internet of Minds: The Concept, Issues and Platforms

WANG Fei-Yue^{1, 2, 3, 4} ZHANG Jun^{1, 5}

Abstract This paper aims to provide a blueprint for Internet of minds (IoM), discussing its concept, issues and platforms. We begin with the social and philosophical foundations for IoM, then its background is illustrated along with its concept, definition, essence and its nature of coordinative cognitive intelligence, as well as cyber-physical-social-systems (CPSS), software-defined systems (SDS), and industrial IoM being the three exemplary frontier application areas. We expound the core issues of IoM, including acquisition of knowledge, coordinative representation and delivery of knowledge, and relation and coordinative operation of knowledge. We also describe IoM's key platform technology, including real-virtual parallel platform, and social computing and communication architecture based on Internet, Internet of things, blockchain, and software-defined networks, which provides the foundation of a decentralized, autonomous, self-organized, and secured IoM infrastructure and applications.

Key words Internet of minds (IoM), knowledge automation, artificial language system, parallel systems, ACP approach, knowledge dynamics, knowledge computing, blockchain, parallel blockchain

Citation Wang Fei-Yue, Zhang Jun. Internet of minds: the concept, issues and platforms. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2061–2070

1 新时代, 新思想

卡尔·波普尔, 当代西方最有影响的科学哲学家, 认为现实是由三个世界组成的: 物理、心理和

人工世界^[1]. 卡尔·雅斯贝思, 在中华人民共和国诞生的 1949 年写了一本在全世界深具影响的书, 名为《历史的起源与目标》, 提出了“轴心时代”这一概念, 如图 1 所示. 我们认为, 物理、心理和人工世界, 每个世界都应有自己的“轴心时代”, 雅斯贝思只是道出了第一物理世界的“轴心时代”: 公元前 800 到 200 年, 以中东、印度、中国、希腊–罗马为中心的人性大觉醒和哲学大突破时代. 对于其他两个世界, 第二心理世界的“轴心时代”刚刚结束, 就是从文艺复兴开始到爱因斯坦为代表的人类理性的大觉醒和科学的大突破的时代; 第三人工世界的“轴心时代”源自哥德尔的不完备定理, 激发了维纳、图灵和冯·诺依曼等对智能和计算的新认识, 将是智性的大觉醒和技术的大突破, 从而有了今天的人工智能和智能技术.

人类一直在围绕着三个世界建立“网”(Grids), 第一张网 Grids 1.0, 就是交通网; 接着 Grids 2.0, 能源网; Grids 3.0, 信息网或互联网; Grids 4.0, 物联网; 现在即将开始第五张网的建设: Grids 5.0, 物联网 (Internet of minds, IoM). 这五张网, 把三个世界

收稿日期 2017-10-10 录用日期 2017-12-01
Manuscript received October 10, 2017; accepted December 1, 2017

本文责任编辑 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
国家自然科学基金 (61533019, 71232006, 61233001) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61533019, 71232006, 61233001)

1. 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 2. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266109 3. 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术中心 长沙 410073 4. 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心 北京 101408 5. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109 3. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel System, National University of Defense Technology, Changsha 410073 4. Center of China Economic and Social Security, The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408 5. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072

整合在一起,其中交通、信息、智联分别是物理、心理、虚拟三个世界自己的主网,而能源和物联分别是第一和第二、第二和第三世界之间的过渡,即人类通过 Grids 2.0 从物理世界获得物质和能源,借助 Grids 4.0 由人工世界(或称虚拟世界、智理世界)取得智源和知识.围绕上述五张网,人类社会已经进行了一系列的工业革命.第一次工业革命的核心是蒸汽机,第二次工业革命的核心是电动机,第三次工业革命的核心是计算机技术,第四次工业革命的核心是网络,特别是物联网技术.我们认为,人类已开始步入稳定的第五次工业革命,即工业 5.0 之初始阶段,接下来就是虚实平行的智能机所推动的智能时代.



图 1 广义雅斯贝斯的“轴心时代”:三个世界与三个轴心时代

Fig. 1 Generalized Jasper's axial ages: three worlds and three axial ages

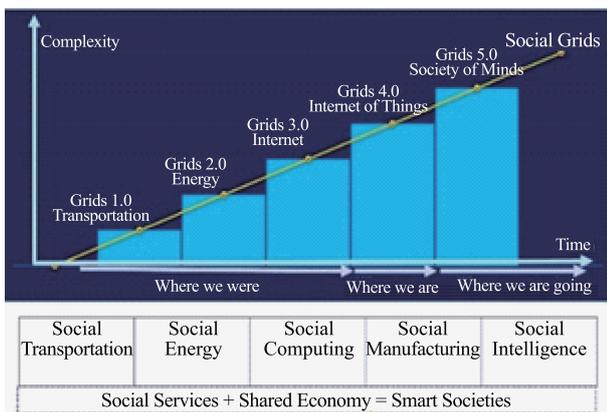


图 2 智能社会的智能基础设施

Fig. 2 Smart societies and intelligent infrastructure

第三轴心时代正在开启,我们即将面临第五次工业革命,因此必须开拓思路和重新审视并建立我们的智能技术基础设施:智联网.在智能时代,智联网必须在卡尔·波普尔的三个世界中整合 Grid 1.0 到 Grid 5.0 的特性和功能,形成一个合一的网.而这样的网和技术已经出现端倪,如社会交通(Uber, MoBike),社会能源(从智能电网、能源互联网再到社会能源),社会计算,社会制造,社会智能.而这些

最新出现的智能技术和系统,必将催生智能生态系统,共享服务,共享经济,最终形成智能社会.

2 智联网

2.1 概念与定义

背景:为什么需要智联网?简而言之,新轴心时代核心科技的必需.在智能时代新革命中,最显著的特征,就是智能科技作为人类和社会智能的直接延伸而出现.此时,复杂系统,特别是社会复杂系统的管理与控制需要超过人脑信息处理带宽和速度,导致人们更需要借助知识自动化所衍生出的机器智能来弥补其自身智能上的不足,进而才能去完成各种层出不穷的时变性、不定性、多样性、复杂性^[2].而整个社会正在涌现海量的、各种层次上的大数据和智能体.尽管这些智能体在数据和信息的层面上实现了互相连通,但是由于缺乏智能联结机制,它们在知识层面上并未做到直接连通.智联网,正是实现借助机器智能的联结来协同人类社会各种纷杂智能体的核心科技.而只有在实现社会化的智能体知识互联之后,人工智能技术才能够形成真正的社会化生态系统.

如果说互联网的实质是实现“虚连”或“被动联结”,物联网的实质是“实连”或“在线联结”,则智联网的实质是“真联”或“主动联结”.智联网是新智能时代的核心科技,毫无疑问,只有在智联网建成之后才可以宣告智能时代的全面来临.

智联网定义:在这里为智联网的定义做一个初步简要的阐述:智联网,以互联网、物联网技术为前序基础科技,在此之上以知识自动化系统为核心系统,以知识计算为核心技术,以获取知识、表达知识、交换知识、关联知识为关键任务,进而建立包含人机物在内的智能实体之间语义层次的联结、实现各智能体所拥有的知识之间的互联互通;智联网的最终目的是支撑和完成需要大规模社会化协作的、特别是在复杂系统中需要的知识功能和知识服务.

实质:智联网并非空中楼阁,智联网是建立在互联网(数据信息互联)和物联网(感知控制互联)基础上的,目标是“知识智能互联”的系统.智联网的目标是达成智能体群体之间的“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、管控等的全自动化过程,因此智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.

协同认知智能:以人体大脑以及神经系统作为比喻,互联网完成的是信息的互联互通,有如遍布人体的神经传导和连接;物联网完成了万物互联的信息采集和驱动控制,有如负责反射的脊髓神经系统、负责处理传感信息的传感系统、负责协调控制人体

的小脑、脑干、中脑、脑中等系统, 其功能即根据环境输入, 协调和决定控制输出, 属于反应智能 (动物智能). 而智联网追求的是认知智能, 即描述智能、预测智能、引导智能的合一体, 完成对系统在知识层面的思考, 自动、自觉地完成系统高级知识功能, 如长短期规划、重大决策、策略制定、基于环境动态的适应、复杂系统状态分析、复杂系统管控等. 智联网、物联网、互联网需要将高等 (认知)、中等 (反应)、低等 (反射) 智能通过某种机制统摄到一起, 类似于人体就是三种智能的统一体一样, 形成感知、认知、思维、行动一体化的大智能系统.

更进一步, 智联网智能最大的特征, 是实现海量智能体在知识层面的直接连通, 即“协同智能”; 互联网传输的是数据与信息, 实现的是信息的协同, 物联网传输的是传感和管控的数据, 实现的是感知和控制的协同; 而智联网的智能互联, 交换的是知识本身, 经过充分的交互, 在知识的交换中完成复杂知识系统的建立、配置和优化; 同时海量的智能实体, 组成由知识联结的复杂系统, 依据一定的运行规则和机制, 如同人类社会一样, 形成社会化的自组织、自运行、自优化、自适应、自协作的网络组织. 我们期待基于智联网所实现的协同智能能够创造出新的人

工智能科技和应用的范式转移, 使人类社会的智能水平能够跃升到全新的高度, 同时我们更期待在这样一个由智能体组成的复杂系统中, 全新的智能现象能够从复杂性中涌现并带来革命性的突破.

2.2 智联网前沿应用领域

智联网意味向社会化的知识连通、智能整合的跃进; 意味着从相对独立的简单知识系统, 向着基于知识联结的、整合为一的复杂知识系统的跃进; 意味着从以“牛顿定律”为代表的精确物质系统, 向以“默顿定律”为代表的自由意志系统的跃进. 因此, 可以预见, 智联网的实现标志着新智能时代全面到来, 将是未来智能技术的核心之一, 具有极其广阔的革命性应用前景. 本节简述其的三个前沿应用领域作为示例.

1) 信息物理社会系统 (Cyber-physical-social systems, CPSS): 随着信息和物理系统被进一步融合贯通, 形成了高级、复杂的信息物理系统 (CPS). CPS 理念被广泛应用于交通、能源、国防、制造、医疗、电力、农业等方面. 显然, 作为 CPS 系统的设计者、制造者、管理者和使用者, 人与 CPS 系统是紧密结合在一起的, 需要人参与其中才能使系统更高

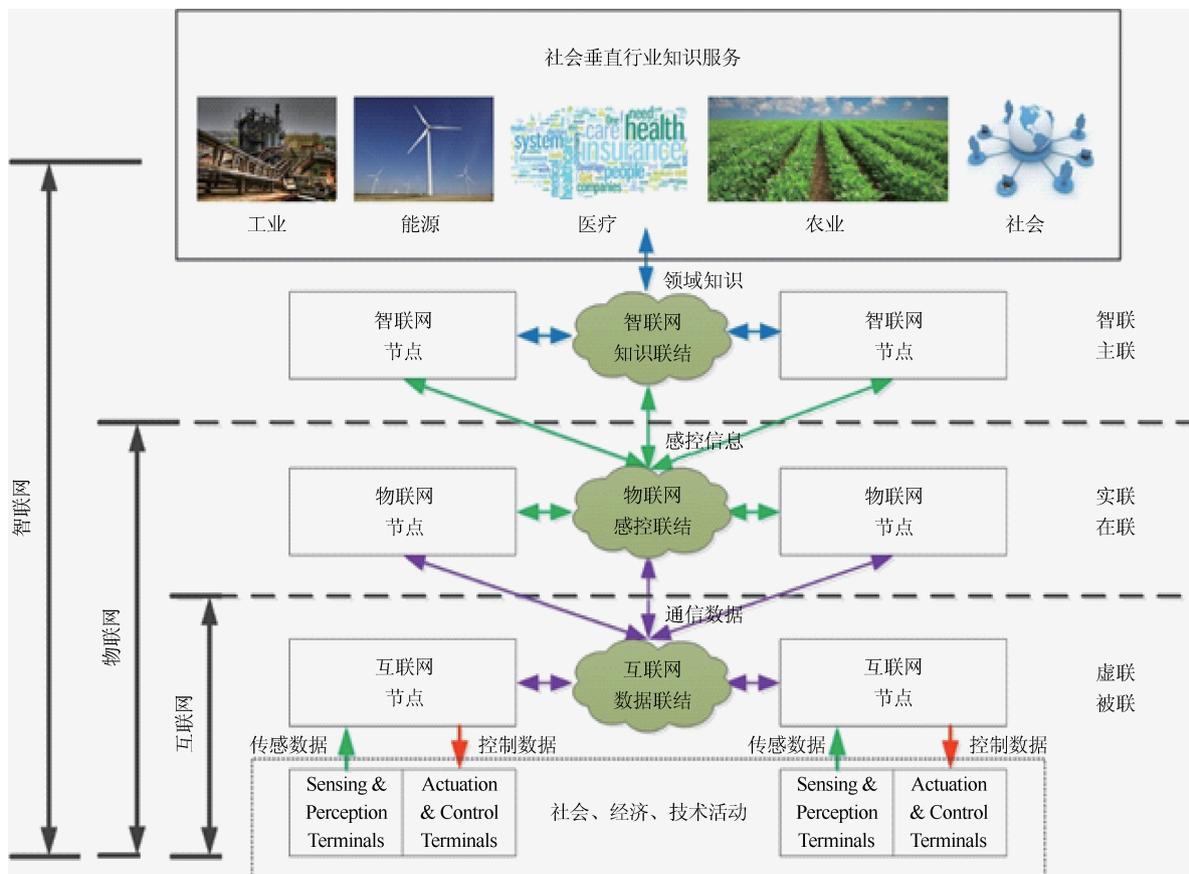


图 3 智联网的基本概念和框架
Fig. 3 Concept and Architecture of IoM

效、安全、可靠地运行。在这其中,人与信息物理系统之间的运行模式有共融、协同、主导、辅助、监管等,催生了信息物理社会系统(CPSS)的诞生和发展。中国科学家团体已经开展富有成果的探索,但其解决途径与方法,我们认为只能蕴含在物理空间和虚拟空间 Cyberspace 融合的求解空间之中^[3]。而且关键在于引入能提供社会信号的智能实体,构建专业和社会性的知识网络,认知和感知社会或企业等组织,通过 CPSS,实现智慧运营和管理。CPSS 的知识,蕴含和隐匿在海量物理和社会智能实体之内,对知识获取和运用,需要社会化的智能协作,因此必须借助智能和知识工程技术,也就是说,知识自动化和物联网将在 CPSS 中发挥核心的作用^[4-5]。

2) 软件定义的流程与系统:在工程领域,越来越多的系统打破常规,并通过开放的软件定义的系统接口实现系统功能的灵活重构,使得未来工程系统成为智能实体的联合体,极大地改善了系统的扩展能力和灵活性。当代软件定义系统前沿的代表为软件定义网络(SDN),敏捷虚拟企业(Agile virtual enterprise, AVE)^[6]和社会制造(众包)^[7]。知识自动化和物联网,是软件定义流程与系统的核心:结合知识表示和知识工程,联结智能实体,构造和支撑各类针对特定领域和问题的软件定义的流程(Software-defined processes, SDP)和软件定义的系统(Software-defined systems, SDS)。通过 SDP 和 SDS,使常识、经验、猜测、假定、希望、创新、想象等形式化和实质化,并使其组织、过程、功能等软件化,变为可操作、可计算、可试验的流程和系统,从而能够进一步落实复杂知识自动化系统的构想、设计、实施、运营、管理与控制^[8]。

3) 工业物联网:从上世纪中期开始,网络化工业控制及其自动化经过了 20 世纪 60~70 年代的模拟仪表控制系统、80~90 年代的集散控制系统、21 世纪初的占主导地位的现场总线控制系统,以及当前正在普及应用中的工业物联网。网络化工控系统总体趋势是从简单的本地仪控,慢慢演化到远程智能的复杂系统管控。当前的工业物联网的注意力主要放在工业网络的精确性、确定性、自适应性、安全性等以工业用通信为中心的研发和应用上。但是随着智能制造的广度和深度进一步发展,即将出现“软件定义工业”、“类工业领域”、“广义工业”、“社会制造”、“社会工业”等智能大工业新形态,而物联网将在该发展过程中起决定性的作用。工业物联网的诞生,将会以极高的效率整合各种工业和社会资源、极大减小工业过程中的浪费和消耗、极大地解放工业生产力,并促进智能大工业的出现和高速发展。

以上只是对物联网前沿应用的举例,在社会的各种行业和产业中,其应用还包括农业物联网、能源物联网、医疗物联网、教育物联网和各种社会管理

和服务物联网等等。如上所述,尽管物联网及协同知识自动化系统在新智能时代具有决定性的地位,但是作为一门崭新的学科,缺乏基础理论支持,也缺乏实际应用平台与实践验证。本文的目的,抛砖引玉,提出物联网的概念和定义,论证物联网的核心问题,并探索物联网的可行的技术路径。

3 物联网的核心问题

物联网是以互联网、物联网为前序基础科技,在其之上建立起来的全新的面向智能的语义知识网络。在建立起这样的网络之前,我们归纳了其必须解决的核心问题,即知识的获取,知识的表达,知识的传递,知识的联结和知识的利用。需要强调的是,这五个核心问题并非互相孤立的,而是在逻辑上紧密相连、互相覆盖的。知识的发现、表达、传递、联结和利用既是古老的哲学和科学命题,也是当今智能科学的前沿研究课题。本文中并无意图(也无可能)对这些问题做出全面的解答,而将围绕已有学术理论对前四个问题简要地进行阐述。

3.1 知识的获取

文献[4]中,我们提出了一种一般化的知识自动化系统和知识计算架构,工作过程依次包括:1) 构建多尺度时空数据模型:数据模型是感性混杂的数据的抽象组织形式,用于描述和模拟现实世界的信息结构及其变化^[9];2) 时空数据子集特征化:特征化的目的是为了让信息从原始的数据空间转换到特征空间,揭示数据内在特征;3) 知识对象的检测与提取:旨在从时空数据集的某个子空间中“分割”出具有知识价值的对象;4) 知识对象属性的提取和概念的形成:人工智能通过多种知识表征,表现领域实体的本质及实体间的关联;5) 知识空间和知识库构建:利用从特征化的多尺度时空数据中提取的知识对象,以及知识对象的各种属性,利用集合论和粒度计算理论,即可实现知识空间和知识库的构建^[10-15];6) 知识动力学:为知识体系和知识过程建立一个可描述的、可计算的、可数值求解的理论框架。

这里所述的知识自动化系统构建方法,实际上是单个智能体从复杂世界的感性混杂数据中获取和积累知识的过程。利用这些知识,以达到描述、预测、控制和评估目标问题的目的。为了使智能分析和综合达到系统化、一致性、形式化,我们提出知识动力学系统,其中,问题、情形、策略、观察、目标和评估使用知识来表达,进而有效地直接利用知识来处理目标问题的建模、分析和综合^[16-19]。而多个智能体的协同,则依赖下述的知识协同表征与传递,以及知识的联结与协同运行。

3.2 知识的协同表征与传递

我们将知识的表达与知识的传递合为一个主题

讨论, 这是因为这两个核心问题在逻辑上关系极为紧密. 对于单个的智能体, 在上一小节中建立的一般性知识自动化过程即可完成从数据到知识的转化. 但在协同知识自动化过程中, 就会产生新的问题: 单个智能体的知识获取是智能体内在的过程, 而知识的协同却是一个外在的过程, 需要一种可以表达知识的公共机制, 从而实现知识的传递. 该公共机制, 即是广义下的“语言”. 因此, 知识的表达与传递的核心问题就是为互联网定义和建立一套语言系统, 使得不同智能实体之间、不同的智能群体之间拥有公共的知识表达机制和方式, 从而使得知识的传递成为可能.

1) 知识的表征: 知识的表征是智能实体对知识结构、方式和内容的系统性标识. 知识表征的方法有多种, 广泛使用的包括: 谓词逻辑、语义网络、概念图、产生式系统、框架表示、面向对象表示、表象计算模型, 以及当前被集中研究的连接主义表征等. 一种知识内容可以用单种表征形式来表述, 也可用多种表征形式来联合描述. 以上节描述的一般性知识自动化系统为例, 对该系统知识表征需要描述数据的时空模型、数据特征、对象、属性、概念等基本知识元素, 也需要描述命题、任务、功能、策略、行为、过程等高级知识过程. 因此既会用到面向对象表示、框架表示、连接主义表征等偏重本体的表征来描述基本知识元素; 同时, 又会使用谓词逻辑、语义网络、产生式系统、概念图等偏重关系的表征来描述高级的知识过程.

2) 协同知识表征: 如上文所述, 知识的表征是单个智能体内部的过程. 详细而言, 对于知识元素(时空模型、数据特征、对象、属性、概念等)和知识过程(命题、任务、功能、策略、行为、过程等)如何进行“指称”, 对于一个智能实体, 这是它的“内部过程”. 然而, 当把单个智能体的概念推广到智能实体网络, 即互联网时, 对于同一个知识元素或知识过程, 所用相关智能实体对其的“指称”必须统一. 举例而言, 正如在人类语言中, 对一个客观对象, 所有说同一种语言的人, 在某一种特定的语境下, 对该对象的“指称”是统一的. 互联网为其中所有的智能实体统一是“指称”过程, 可以采用不同的手段. 在人类社会, 统一指称的过程大多采用的基于语言的教育和广播过程, 即通过广播或者教育的手段解释对象的概念和属性, 并给予其一个公共统一的“指称”. 互联网也可以采取相类似的方法, 由网内一个(或一组)智能实体专门负责统一网内知识元素及过程等对象的指称处理的功能, 包括搜集、合并、定义、命名、教育、广播等. 在人类社会一个相似的例子是“一体化医学语言系统”(Unified Medical Language System, UMLS), 又称为统一医学语言系统, 提供了对生物医学科学领域内许多受

控词表的一部纲目式汇编, 是生物医学概念所构成的一部广泛全面的叙词表和本体. 目前, 在很多其他专业领域也有相似例子, 如XBRL, 商务汇报语言, eXtensible Business Reporting Language. 而互联网需要将这个工作自动化和智能化地实现.

3) 互联网语言: 基于协同知识表征和统一的对象指称, 即可以为互联网设计用于在语义层次上交流的人工语言系统. 人工语言的作用是提供各种智能实体之间交换知识的规范方式, 不同于现在的通信标准(面向数据传递和信息传递), 这是一种以语言形式存在的高级通信标准, 直接面向知识传递. 在语言的层面上, 互联网人工语言需要遵守如下基本规则:

- 指称和概念的一致性: 上文已经简要解释, 不再赘述;

- 知识表征的一致性: 相互关联的知识(稍后阐述关联的概念), 具有一致的知识表征形式以利于联合知识计算, 如果知识表征形式不一致, 必须考虑如何进行表征转换从而统一到可关联的统一表征;

- 语法的一致性: 各个互联网中的实体必须遵守统一的语法, 即统一的语言形式;

- 通过以上各个一致性原则, 即可以为互联网建立一种公共的知识交换机制, 也就是某种互联网公共语言;

- 不同互联网公共语言之间如果需要进行知识交换, 则需要实施一定的“翻译”机制.

4) 互联网人工语言系统: 在互联网中存在着对知识有不同需求的智能实体和实体族群, 有的需要知识粒度较大但是范围很广的知识, 有的需要知识粒度较小但是范围较窄的知识. 人工语言所表征的知识的粒度和广度, 表征了其描述的智能系统的复杂度. 所以对于不同领域、不同复杂度的智能实体, 所需的描述它们的人工语言的子集也不一样. 各种不同的智能实体和智能实体族群使用的语言, 构成了互联网人工语言生态式系统. 总体而言, 这个人工语言系统有以下几个维度. 第一个维度, 是在专业领域内智能实体族群内部的语言, 一般来说粒度小、范围窄、专业领域指称多; 第二个维度, 智能实体族群间互联需要的公共语言, 是族群间共同自主地制定的, 利于族群间知识交互的语言, 一般来说粒度大、范围广、公共指称多; 上述的具有多维度特征的语言构成语言系统, 实现领域内、领域间、层次间知识描述和传播.

5) “人在回路中”的互联网: “人”作为社会中的智能实体, 如果存在自然语言和互联网的人工语言之间的“翻译”机制, 即可成为互联网的一员并参与知识协同过程. “人在回路中”、“社会在回路中”的互联网概念因此具有实现的可能性.

3.3 知识的联结与协同运行

在知识可以被协同表征和传递以后, 下一个智联网的核心问题就是如何将各智能实体所具有的知识联结在一起, 建立联合的知识系统和知识空间, 在联合知识空间中以一定的形式完成知识功能, 支撑知识服务, 最终实现协同知识自动化。

这里我们从知识动力学的观点来阐述知识联结的定义和原理. 首先我们利用模糊逻辑简单地给知识动力学提供一个基本数学框架. 记 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 为论域, 映射 $\mu_A U \rightarrow [0, 1]$ 是模糊集合 A 的隶属函数. 该模糊集合的模糊幂集 $F(2^U)$ 由 U 上的所有模糊子集组成, 是一个模糊超立方体 $I^N = [0, 1]^N$. 利用 $F(2^U)$, 模糊子集可以看作一个点或向量 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in F(2^U)$, 其中 $x_i = \mu_A(u_i)$. 然而, 立方体 I^N 为普通布尔幂集 2^U , 它由所有的 2^N 维非模糊集的格组成. 模糊超立方体实际上可以看成 N 维欧几里得空间的一部分, 因此, 可以引入诸如两个模糊集合之间的距离和一个模糊集合的邻域等概念, 为知识的定量研究提供新的思路. 基于模糊集映射方法, 我们可将模糊集合的模糊超立方体空间映射看作知识状态的表示, 其公式化描述如下.

- 状态方程: $X_{k+1} = F(X_k, \Phi_k, k)$, 其中 $F : I^N \times I^\Gamma \times Z^+ \rightarrow I^N$
- 输出方程: $Y_k = H(X_k, k)$, 其中 $H : I^N \times Z^+ \rightarrow I^\Delta$
- 反馈控制: $\Phi_k = R(Y_k, V_k, k)$, 其中 $R : I^\Delta \times I^Q \times Z^+ \rightarrow I^\Gamma$

这里, $Z^+ = \{0, 1, \dots, K\}$, $X_k \in I^N$ 是表示系统状态的向量, $Y_k \in I^\Delta$ 是输出, $V_k \in I^Q$ 是输入, $\Phi_k \in I^\Gamma$ 是控制, k 是离散时间, F, H, R 是模糊逻辑算子, 它们各自定义了知识动力学中的系统、输出和控制映射. 上面系统中各个变量的定义域定义为 $D_X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, $D_Y = \{y_1, y_2, \dots, y_\Delta\}$, $D_\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\Gamma\}$, $D_V = \{v_1, v_2, \dots, v_Q\}$. 相应的知识模糊集合定义为状态知识: $X = \sum_{x_i \in D_x} \mu_X(x_i)/x_i$; 输出知识: $Y = \sum_{y_i \in D_y} \mu_Y(y_i)/y_i$; 控制知识: $\Phi = \sum_{\phi_i \in D_\Phi} \mu_\Phi(\phi_i)/\phi_i$; 输入知识: $V = \sum_{v_i \in D_v} \mu_V(v_i)/v_i$.

从知识动力学空间的视角, 各种知识对应就是知识空间中的点、点集、点集所组成的图、轨迹、轨迹簇等, 而最终的空间的总体知识体现为一个复杂的有限知识状态机, 用智联网统一的形式语言所描述. 而这些知识, 以集合论的观点就是知识对象的各种集合. 因此, 两个知识空间是否可能存在关联, 决定于张成这两个知识空间的知识对象是否有交集, 也就是, 构成知识的知识对象集合是否有交集.

定义 1. 定义 $U_{KDS} = \{D_X, D_Y, D_\Phi, D_V\}$ 是某知识动力学空间 KDS 中状态变量论域、输入变量论域、输出变量论域、控制变量论域的集合, 并将 U_{KDS} 称为知识动力学空间 KDS 的论域.

定义 2. 记 U_A 和 U_B 分别是知识动力学空间 A 和 B 的论域, 如果 $U_A \cap U_B \neq \emptyset$, 则称知识动力学空间 A 和 B 存在互相关联的关系; 或等效的说, 总可以构造或已经存在一个“联结知识” C , 同时属于 U_A 和 U_B , 即 $C \subseteq (U_A \cap U_B)$.

进一步解释定义 2, 我们可知, 如果两个知识空间是关联的, 那么它们的知识动力学空间论域至少有一部分是交织在一起的. 可能的情况包括: 共有知识空间状态的某一个子集; 共享输入、输出、控制变量; 可从一个空间观测另外一个空间状态、输入、输出、控制变量; 一个空间的输出变量是另一个空间输入变量; 一个空间的输出变量是另一个空间的控制变量, 等等. 由于在同一个智联网内的、张成空间 A 和 B 的对象已经做了语义上的统一, 定义 2 中所定义的“联结知识” C 也会有明确的语义, 因此智联网智能实体所对应的知识空间 A 和 B 实现了语义上的联结.

智联网知识的协同运行: 基于知识的获取、协同表征、传递和联结, 智联网的海量知识的协同运行成为可能, 并用以支撑知识服务、完成知识功能, 实现知识服务和消费. 为此, 我们必须就知识的协同运行方式, 智联网知识系统的时变性, 和协同知识自动化过程的标准化进行论述.

知识的协同运行方式: 知识的协同运行取决于智联网的知识联结形式. 换言之, 就是智联网内智能实体之间地位关系如何, 何种智能实体提供何种知识、提供给谁、作何用途、知识的汇总如何进行、知识服务由谁定义和发起等等. 以下举例说明智联网知识系统协同运用的几种模式.

1) 层次型: 该模式将智联网总体的知识空间按树状层次结构依次划分, 协同运用知识的时候, 将较小粒度知识逐步从叶节点向根节点汇总成较大粒度的知识, 达成协同知识运行;

2) 集中型: 该模式的智联网包含一个超级智能实体, 其将来自所有智能实体的知识汇总, 并在一个集中式的超算平台上完成知识的中心化协同运用;

3) 分布型: 该模式的智联网并不依赖某个超级智能体, 通过某种事先定义的分布式知识交换和处理机制, 完成去中心化的知识协同运用;

4) 混合型: 在一个智联网内同时兼有层次、集中、分布等几种协同方式的模式, 即混合型知识协同运用. 可以预见, 在复杂智联网中, 混合型知识协同运行将会是主要形态.

智联网知识的发展性、时变性与自适应性: 由于

物联网中各智能实体不断地与环境及其他实体发生信息、知识的交换, 因此其内在智能和知识也不断发生变化, 因此, 以某种形式组织而成的物联网, 必定具有发展性、时变性与自适应性的特性, 根据不断变化的经验知识, 其结构、形态、功能也不断进行自我演化与调整.

协同知识自动化过程的标准化: 物联网知识的获取过程、协同表征、人工语言系统、联结方式、协同运用, 应该考虑进行标准化, 进而产生标准化知识自动化流程, 区块链技术及其相关方法将发挥关键作用. 只有这样, 才能使大规模社会化智能实体联结和知识自动化生产成为可能.

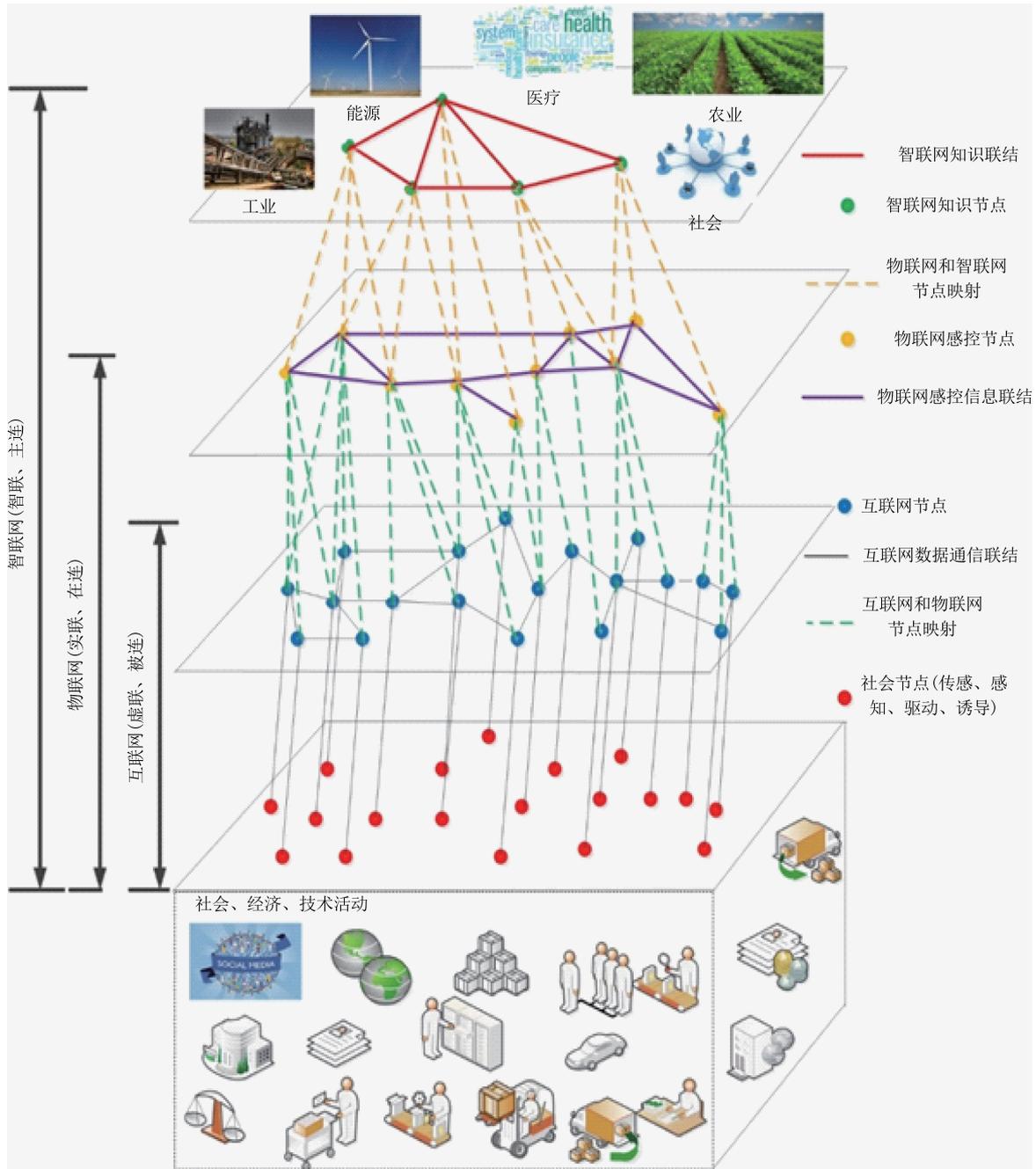


图 4 物联网支撑平台与架构示意图

Fig. 4 The supporting platform and architecture diagram of IoM

4 互联网的支撑平台技术

与互联网核心问题同等重要的,是互联网的支撑平台技术,即在何种平台上,互联网能够得以研究、开发、实施、运行、管理与控制.本文中简要讨论虚实平行系统,社会化通信计算平台,及基于区块链物联网的分布式自组织自运行实现.

4.1 虚实平行系统

“知识”是一个虚拟的概念,在物理世界中并无实体的存在,因此,知识的产生和运行是在虚拟的知识空间中进行的.虚拟的知识空间是对物理实在空间的反映、提取、总结和升华,同时,知识空间又反过来影响、诱导、管控它所对应的物理实在空间.因此,知识虚拟空间和物理实在空间形成了互相纠缠、互相决定的虚实一体的合一空间.

针对这种一体化的虚实空间问题,平行系统理论给出了一个完整的理论框架.平行系统理论的特征包括数据驱动、人工系统建模、和基于计算实验的系统分析以及虚实互动的平行执行机制.平行系统方法的核心是建立一个或者多个具有某种目的(规划、控制、检测、管理等)的且与实际系统对应的虚拟系统,通过对虚拟系统的学习和优化,进而和实际系统交互,最终实现对复杂实际系统的控制与管理.由平行系统为基本框架,衍生出了平行智能、平行学习、平行动态规划方法等^[20-23].

虚实平行系统的构建、分析和管控采用基于大数据解析的计算复杂系统分析方法 ACP,即基于人工系统(Artificial societies, A)的建模方法、计算实验(Computational experiments, C)的系统分析和评估、平行执行智能实体(Parallel execution, P)的系统控制管理^[24-25],其具体含义如下:

1) 人工系统(A):数据来自于智能实体,采用数据驱动和语义建模,利用默顿定律,构建信息和行为之间的反馈;通过数据挖掘,发现海量信息的“内在意义”,让数据来说话.在解决了互联网核心问题,即知识获取、知识协同表征与传递、知识联结与协同运行后,互联网的虚拟知识空间(人工系统)即宣告建立.

2) 计算实验(C):在虚拟知识空间中,通过知识集成深度计算、知识群体广度计算、知识历史计算等计算技术,获得虚拟人工系统的各种知识模态的结果.借助于知识计算,实现互联网内各智能实体之间相互深度知识交互以及融合,实现互联网智能体的知识协作,最终落实虚实系统的知识协同.

3) 平行执行(P):虚拟人工系统(知识系统)和物理实际系统组成一对平行系统,虚实互动构成新型反馈闭环机制;物理过程与人工知识计算过程的平行交互;通过虚实互动进行求解和相互管控.

基于 ACP 方法的平行系统在互联网中的运用

有以下两个主要任务.

1) 虚实平行系统的管控:目标就是促使物理实际系统流程趋向人工知识流程,通过知识计算、比较、发现更优化的运行状态,引导物理实际系统逼近人工系统,从而借助人工流程减少实际系统相关目标的不确定性,化多样为归一,使复杂变简单,以此实现系统运营的智慧管控.

2) 知识空间本身的认知管控:我们可以将整个互联网理解成一个巨型的协作认知系统,知识获取、知识协同表征与传递、知识联结与协同运作就是这个认知系统所要完成的认知任务和要达到的认知智能,对于这个复杂认知系统的管控,将是平行系统在平行智能互联网中运用的另一个领域.

4.2 互联网与社会化通信计算基础设施的映射关系

如上所述,互联网和物联网是互联网的前序基础科技,因此也是互联网关键平台,在此不再赘述.在这里需要补充的是,互联网和社会化通信计算基础设施之间的映射关系.

互联网的协同知识自动化系统架构,为建立复杂而高效的多层次社会化的通信和计算系统提供了逻辑结构和建设蓝图.当前,社会化通信计算基础设施正在从单一的远程云计算,向由云计算、边缘计算、普适计算相结合的社会化基础设施平台演化.而连接各种传感、驱动、计算设施的通信网络,也正从传统的基于交换机、路由器等设备的被动式“哑”网络,向软件定义网络(SDN)和平行网络演化^[26-31].计算的最重要目的,即是获取和应用知识.因此,当互联网的协同知识自动化系统的逻辑架构建立以后,根据知识功能的数据需求、实时性要求和知识计算量,即可以设计和建立相应的社会化通信和计算基础设施.

4.3 基于区块链的互联网的 DAO 实现

区块链和平行区块技术是一种全网共识共同维护且保有所有历史交易数据的分布式数据库.其所采用的时间戳、非对称加密、分布式共识、可灵活编程等技术使其具备了去中心化、时间可追溯性、自治性、开放性以及信息不可篡改等特性.区块链技术的基本构架大致可以分为六层,即涵括所有基层信息数据和加密技术等的数据层、连接所有节点完成数据传播以及验证的网络层、涵括各种共识算法与机制的共识层、制定奖励与惩戒的激励层、封装算法和智能合约的合约层、以及具体化区块链应用场景的应用层^[32-33].

区块链的智能合约技术可以真正做到在无外部监督的情况下,以极小的运营成本支撑大型智能实体网络的运行,即“分布式自治组织”(Distributed autonomous organization, DAO).DAO 运用智能合约执行一系列公开、公平、公道的系统运行规则,

在无人管理和监督的情况下实现自主运行和自主进化. 结合前文提到的物联网知识的协同运行方式(层次型、集中型、分布型、混合型), 基于区块链的 DAO 为物联网的运营提供了理想的平台, 从而实现按照一定组织规则来自动组织智能体和开展协同知识自动化. 更进一步, 通过出售或收购 DAO 的股权, 提供或者购买 DAO 的知识服务, 开放物联网 DAO 知识服务 API 等种种知识消费商业和技术创新, 物联网可以成为一种社会化的技术生态系统.

5 总结与展望

5.1 总结

本文旨在讨论物联网 (Internet of minds, IoM) 的概念, 核心问题和关键平台技术. 本文的围绕物联网所提出的主要观点和内容归纳如下:

1) 物联网出现的智能时代基础和科学哲学思想基础;

2) 物联网的背景、概念、定义、实质, 以及协同认知智能的目标;

3) 物联网的前沿应用领域: CPSS, 软件定义系统及流程, 工业物联网;

4) 物联网的核心问题: a) 知识的获取: 一般性知识自动化系统从感性混杂数据中获取经验知识; b) 知识的协同表征和传递: 物联网协同知识表征, 人工语言系统的建立; c) 知识的关联和协同运行: 从知识动力学的观点定义知识关联, 以及基于知识关联的知识协同运行方式;

5) 物联网的关键平台技术: 虚实平行系统平台实现物联网的管控和知识空间的管控; 基于互联网、物联网、区块链和并行网络的社会化通信计算基础平台, 为分布式、自组织、自运行的安全物联网系统提供基础设施.

5.2 展望: 物联网和第五次工业革命

物联网的建成将标志着新智能时代的全面到来以及第五次工业革命的全面展开. 回顾人类社会的工业化进程, 第一次工业革命实现全社会的机械化协同, 第二次工业革命实现全社会的电气化协同, 第三、四次工业革命实现全社会的信息化和自动化协同. 而物联网的实质, 即是协同知识自动化系统, 物联网的建设最终将完成的是全社会的智能化协同. 我们认为, 知识化和智能化协同, 就是第五次工业革命追求的终极目标, 达到此目标, 就是新智能时代的全面到来.

每一次工业革命的完成, 都伴随着某种核心科技的社会化协同的完成, 其结果都是极大地解放和提升社会生产力, 并对社会形态带来巨大的冲击. 第五次技术革命刚刚拉开帷幕, 单个和孤立的智能技术就已经取得了令人惊异的成绩, 而当海量智能实

体完成社会化知识协同的时候, 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, 应当尽快开展物联网的研究与开发, 在即将到来的新智能时代中取得研究和技術上的先发优势, 同时也在即将到来的第五次工业革命中争取主导地位.

致谢

自 2009 年起, 王飞跃教授就基于 ACP 的平行智能、平行网络和智能网络及 CPSS 等完成了一系列的技术报告和学术讲座^[34-40]. 本文是对这些报告的总结和深化, 作者对王晓博士和袁勇博士等在此过程中的帮助和研讨表示深深的感谢.

References

- 1 王飞跃. 新 IT 与新轴心时代: 未来的起源与目标. 探索与争鸣, 2017 年第 10 期: 23-27
- 2 王飞跃. 面向人机物一体化 CPSS 的控制发展: 知识自动化的挑战与机遇. 见: 中国自动化大会暨自动化领域协同创新大会. 长沙: 中国自动化学会, 2013.
- 3 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85-88
- 4 王飞跃, 张俊, 王晓. 知识计算和知识自动化: 新轴心时代的核心需求. 张江科技评论, 2017, (4): 25-27
- 5 王飞跃. 迈向知识自动化. 中国科学报, 2013 [Online], available: http://www.cas.cn/xw/zjsd/201401/t20140103_4009925.shtm, October 1, 2017
- 6 Zhao Li-Quan. Study on the Model Granular Computing [Ph. D. dissertation], Anhui Universit, China, 2007. (赵立权. 粒度计算的模型研究 [博士学位论文], 安徽大学, 中国, 2007.)
- 7 Wang Fei-Yue. From social computing to social manufacturing: the coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social space. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, **27**(6): 658-669 (王飞跃. 从社会计算到社会制造: 一场即将来临的产业革命. 中国科学院院刊, 2012, **27**(6): 658-669)
- 8 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)
- 9 Zhu W, Wang F Y. The fourth type of covering-based rough sets. *Information Sciences*, 2012, **201**(19): 80-92
- 10 Ma Bo-Ning. Research on Spatial Data Multi-scale Modeling [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2014. (马伯宁. 空间数据多尺度建模关键技术研究 [博士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2014.)
- 11 Wang Fei-Yue, Mo Hong. Some fundamental issues on type-2 fuzzy sets. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(7): 1114-1141 (王飞跃, 莫红. 关于二型模糊集合的一些基本问题. 自动化学报, 2017, **43**(7): 1114-1141)
- 12 Zhang L, Zhang B. *Quotient Space based Problem Solving A Theoretical Foundation of Granular Computing*. Burlington: Elsevier Science, 2014.
- 13 Xu Ji, Wang Guo-Yin, Yu Hong. Review of big data processing based on granular computing. *Chinese Journal of Computers*, 2015, **38**(8): 1497-1517 (徐计, 王国胤, 于洪. 基于粒计算的大数据处理. 计算机学报, 2015, **38**(8): 1497-1517)
- 14 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 李德玉. 粗糙集理论与方法. 北京: 科学出版社, 2001.

- 15 Pedrycz W, Skowron A, Kreinovich V. *Handbook of Granular Computing*. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- 16 Zhu W, Wang F Y. A new type of covering rough set. In: Proceedings of the 3rd International IEEE Conference Intelligent Systems. London, UK: IEEE, 2006. 444–449
- 17 Wang Fei-Yue. Computing with words and a framework for computational linguistic dynamic systems. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2001, **14**(4): 377–384
(王飞跃. 词计算和语言动力学系统的计算理论框架. 模式识别与人工智能, 2001, **14**(4): 377–384)
- 18 Wang Fei-Yue. Fundamental issues in research of computing with words and linguistic dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2005, **31**(6): 844–852
(王飞跃. 词计算和语言动力学系统的基本问题和研究. 自动化学报, 2005, **31**(6): 844–852)
- 19 Zhao L. Overview of linguistic dynamic systems based on perception information. In: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2012. 7519–7524
- 20 Mo Hong. Linguistic dynamic orbits in the time varying universe of discourse. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(10): 1585–1594
(莫红. 时变论域下的语言动力学轨迹. 自动化学报, 2012, **38**(10): 1585–1594)
- 21 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
- 22 Wang F Y, Zhang J, Wei Q L, Zheng X H, Li L. PDP: parallel dynamic programming. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(1): 1–5
- 23 Li Li, Lin Yi-Lun, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel learning — a new framework for machine learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 1–8
(李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习 — 机器学习的一个新型理论框架. 自动化学报, 2017, **43**(1): 1–8)
- 24 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293–302)
- 25 Wang F Y, Wong P K. Intelligent systems and technology for integrative and predictive medicine: an ACP approach. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2013, **4**(2): Article No. 32
- 26 Wang Fei-Yue, Yang Liu-Qing, Hu Xiao-Ya, Cheng Xiang, Han Shuang-Shuang, Yang Jian. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture. *Scientia Sinica Informationis*, 2017, **47**(7): 811–831
(王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 程翔, 韩双双, 杨坚. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构. 中国科学: 信息科学, 2017, **47**(7): 811–831)
- 27 Wang F Y, Yang L Q, Cheng X, Han S S, Yang J. Network softwarization and parallel networks: beyond software-defined networks. *IEEE Network*, 2016, **30**(4): 60–65
- 28 Wang Fei-Yue, Yang Jian, Han Shuang-Shuang, Yang Liu-Qing, Cheng Xiang. The framework of parallel network based on the parallel system theory. *Journal of Command and Control*, 2016, **2**(1): 71–77
(王飞跃, 杨坚, 韩双双, 杨柳青, 程翔. 基于平行系统理论的平行网络架构. 指挥与控制学报, 2016, **2**(1): 71–77)
- 29 Yang Liu-Qing, Wang Fei-Yue, Zhang Yan-Li, Han Shuang-Shuang, Yang Jian, Zhao Kai, Cheng Xiang. The urban parallel parking system based on ACP approach. *Journal of Command and Control*, 2015, **1**(4): 384–390
(杨柳青, 王飞跃, 张艳丽, 韩双双, 杨坚, 赵恺, 程翔. 基于 ACP 方法的城市平行停车系统. 指挥与控制学报, 2015, **1**(4): 384–390)
- 30 韩双双, 王迎春, 姜婷婷, 曹东璞, 王飞跃. 平行智能车: 基于 CPSS 的网联自动驾驶汽车. 见: 2017 中国自动化大会暨中国国际智能制造大会. 济南, 中国: 中国自动化学会, 2017.
- 31 Wang F Y. Driving into the future with ITS. *IEEE Intelligent Systems*, 2006, **21**(3): 94–95
- 32 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)
- 33 Wang Fei-Yue. Parallel blockchain: concept, methods and issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(10): 1703–1712
(袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念、方法与内涵解析. 自动化学报, 2017, **43**(10): 1703–1712)
- 34 王飞跃. 智能与时代: 历史的使命与未来. 战略发展报告, 2009.
- 35 王飞跃. 未来世界与复杂系统. 中国国际战略研究基金会“面向未来”复杂性科学专题讲座, 2009 年 11 月 20 日
- 36 王飞跃. 面向未来 — 未来世界的复杂性. 科学发展与战略研究/中国国际战略研究基金会编著: 知识产权出版社, 北京, 2012 年 8 月第 1 版, 137–162
- 37 王飞跃. 面向 CPSS 的指挥与控制: 关于平行军事体系的理论、方法及应用. 第一届中国指挥控制大会, 北京, 2013 年 8 月 5 日
- 38 王飞跃. 基于软件定义的企业智能管理与控制: 基于 ACP 的平行系统方法, “探索·制造业的未来” 西门子工业论坛, 北京, 2014 年 7 月 10 日
- 39 Wang F Y. Grids 5.0 and social energy: from internet of things to the society of minds. In: Proceedings of the 48th North American Power Symposium (NAPS). Denver, USA: September 19, 2016.
- 40 Wang F Y, ACP-based parallel systems: knowledge automation and smart adaptability for complex adaptive systems. In: Proceedings of the 2016 Complex Adaptive Systems Conference. Los Angeles, CA, USA: November 3, 2016.



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研究员. 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. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模、分析与控制. 本文通信作者.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(WANG Fei-Yue Professor at The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Director of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. Corresponding author of this paper.)



张俊 武汉大学电气工程学院教授, 2003 年和 2005 年分别获得华中科技大学电子信息与通信工程系学士与硕士学位. 2008 年获得亚利桑那州立大学电气工程博士学位. 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. He received his B. E. and M. E. degrees in Electrical Engineering from Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, in 2003 and 2005, respectively, and his Ph.D. in Electrical Engineering from Arizona State University, USA, in 2008. His research interest covers intelligent systems, artificial intelligence, knowledge automation, and their applications in intelligent power and energy systems.)