

核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构

王飞跃^{1,5} 孙奇² 江国进³ 谭珂² 张俊⁴ 侯家琛⁵
熊刚¹ 朱风华¹ 韩双双¹ 董西松¹ 王嫫³

摘要 本文旨在讨论核能 5.0 (Nuclear Energy 5.0) 的基本概念、体系架构和关键平台技术等问题. 首先讨论了核能 5.0 出现的新智能时代基础, 阐述了虚拟数字工业崛起的技术背景. 详细叙述了核电工业新形态与体系结构, 即平行核能的定义、意义、研究内容、体系架构以及应用领域. 接下来讨论了核能 5.0 中新一代核心技术, 包括核能物联网、知识自动化、发展性人工智能、大规模协同演进技术、核能区块链等. 最后讨论了核能 5.0 中在核电系统的具体应用场景与案例, 重点是核电工控系统安全评估与核电站数字化仪控系统.

关键词 核能, 互联网, 知识自动化, 平行系统, ACP 方法, 区块链, 虚拟数字工业

引用格式 王飞跃, 孙奇, 江国进, 谭珂, 张俊, 侯家琛, 熊刚, 朱风华, 韩双双, 董西松, 王嫫. 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

DOI 10.16383/j.aas.2018.y000003

Nuclear Energy 5.0: New Formation and System Architecture of Nuclear Power Industry in the New IT Era

WANG Fei-Yue^{1,5} SUN Qi² JIANG Guo-Jin³ TAN Ke² ZHANG Jun⁴ HOU Jia-Chen⁵
XIONG Gang¹ ZHU Feng-Hua¹ HAN Shuang-Shuang¹ DONG Xi-Song¹ WANG Lei³

Abstract This paper aims to provide a blueprint for Nuclear Energy 5.0 (NE 5.0), discussing its concept, system architecture and platform technology. We start with a discussion on the social foundation for NE 5.0. Then we illustrate the background of NE 5.0's emergence, which is the rise of virtual digital industry together with its definition, essence, contents, system architecture and application areas. Next we discuss the novel platform technology of NE 5.0 including internet of minds, knowledge automation, developmental artificial intelligence, large-scale co-evolutionary techniques, industrial blockchain, etc. Finally we present two application case studies of NE 5.0 in nuclear power system, i.e., security assessment of nuclear power plant control system and nuclear power plant digital I&C system.

Key words Nuclear energy, internet of minds, knowledge automation, parallel system, ACP approach, blockchain, virtual digital industry

Citation Wang Fei-Yue, Sun Qi, Jiang Guo-Jin, Tan Ke, Zhang Jun, Hou Jia-Chen, Xiong Gang, Zhu Feng-Hua, Han Shuang-Shuang, Dong Xi-Song, Wang Lei. 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

1 引言

我国社会和经济的发展, 将会对社会供能提出严峻而又互相矛盾的挑战. 一方面, 要求能源供给持续而快速地增长, 否则将会制约经济的发展; 另一方面, 在十九大报告中提出的“加快生态文明体制改

革, 建设美丽中国”的精神指引下, 能源行业积极支持国内环境保护和减排, 必须大规模减少碳、石油等化石能源的消耗. 核能是清洁、低碳、供能稳定、高能量密度的新能源, 因此发展和运用核能是构建我国当前能源安全、经济安全、环境安全的可持续发展体系的重要支柱之一.

《中国核能发展报告》(2018) 蓝皮书显示, 截至 2017 年年底, 我国在运核电机组已经达到 37 台, 装机规模 3581 万千瓦, 位列全球第四; 发电量 2474.69 亿千瓦时, 占全国总发电量 3.94%, 位列全球第三. 机组运行安全稳定, 总体运行业绩指标优良. 报告显示, 核电发电量占全球发电量的 10.6%, 而我国仅为总发电量的 3.94%, 《电力发展十三五规划》提出, 到 2020 年我国核电运行和在装装机将达到 8800 万千瓦. 以目前国内情况看, 要想实现规划目标, 未来几年我国每年将新增建设 6~8 台百万千瓦核电机组. 因此, 中国核能和核电事业拥有巨大的发展空间^[1].

要实现《电力发展十三五规划》提出的宏伟目标, 实现中国核能的飞跃性发展, 在核能产业引入智能技术的支持, 极大地提升核能产业的效能与安全性, 成为一项必须进行而又紧迫的任务. 2017 年 7 月 20 日, 国务院正式印发《新一代人工智能战略规

收稿日期 2018-03-01 录用日期 2018-05-01
Manuscript received March 1, 2018; accepted May 1, 2018
本文责任编辑 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
国家重点研发计划项目 (2018YFB1004800), 国家自然科学基金 (61773381, 61773382, 61533019, 91520301), 广东省科技厅项目 (2016B090910001, 2017B090912001) 资助
Supported by National Research Development Program of China (2018YFB1004800), National Natural Science Foundation of China (61773381, 61773382, 61533019, 91520301), Guangdong's S&T Project (2016B090910001, 2017B090912001)
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. 中国广核集团有限公司 深圳 518038 3. 北京广利核系统工程技术有限公司 北京 100094 4. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072 5. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266109
1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. China General Nuclear Power Group, Shenzhen 518038 3. China Techenergy Co., Ltd, Beijing 100094 4. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072 5. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109

划),为我国的人工智能技术和产业发展设立了目标和蓝图,人工智能的发展已经上升到国家战略层面,也预示着在中国智能时代即将来临,智能技术会在各个方面和层面上对社会经济和产业进行冲击和改变,核电工业也不例外。本文要探讨的内容,即在智能时代中,核电工业的形态将会发生什么变化,伴随着这种变化的结果,又将产生什么样的核电工业体系架构。

1.1 新智能时代及其特征

卡尔波普尔,现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、心理和虚拟世界^[2]。卡尔雅思贝斯在《历史的起源与目标》^[3]一书中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、与哲学性的大觉醒时代。第二心理世界的“轴心时代”,就是从文艺复兴开始到爱因斯坦为代表的科学时代;第三虚拟世界的“轴心时代”源自哥德尔的不完备定理^[4],激发了维纳、图灵和冯诺依曼等对智能和计算的新认识,从而有了今天的人工智能和智能技术。三个世界的三个“轴心时代”,分别代表着人类在人性、理性和智性上的大觉醒,以及随之而来的在哲学、科学和技术上的大突破。

在正在全面到来的第三轴心时代,我们即将面临第五次工业革命,我们认为第五次工业革命的核心-智能科技,将会呈现以下特征。

IT 的融合与重定义,新智能时代的 IT,是工业科技(Industrial technology),信息科技(Information technology)和智能科技(Intelligent technology)的融合,因此,我们又将其命名为“新 IT”(New IT)。

对物理、心理、虚拟三个世界的联合探索,新一代人工智能技术的发展,为探索和发掘心理、虚拟世界提供了可能性。而对于这三个世界的联合探索,必将使得科技形态,乃至社会形态,发生革命性的根本变化^[5]。

ICT 与 CPS 的重定义,在工业 4.0 中,ICT 定义为 Information and communication technology, CPS 定义为 Cyber-physical systems;而在智能时代,工业 4.0 将会演变成工业 5.0 新范式,相应地,ICT 会演变为 Intelligent connection technology, CPS 则定义成 Cyber-physical-social systems^[6]。

智能社会基础设施的进化,社会基础设施在交通网、能源网、信息网或互联网、物联网之后,现在已经开始了第五张网:智联网^[7]。这五张网,把三个世界整合在一起,并实现物理和虚拟世界的数字信息协同、感知控制协同以及知识智能协同。

1.2 虚拟数字工业的崛起

随着新智能时代的到来,伴随而来的是各个社会产业的新形态,工业也不例外。智能技术最终将导致工业 4.0 时代向工业 5.0 时代的转换。我们将工业 5.0 时代的社会工业新形态概括为:实体物理工业和虚拟数字工业一体的,并以人工虚拟的数字工业为主导的新形态。简而言之,未来的工业拥有虚实一体的,却又是虚实分工的新形态,而“虚拟”工业会逐渐从“实体”工业手中取得工业运营和发展主导权。

这种向工业新形态的进化并非一夜之间发生的,而是会逐步进行,并且在当前已经开始。从上世纪中

期开始,网络化工业控制及其自动化经历了 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、安全性等以工业通信为主导中心的研发和应用上。

但是随着工业智能技术在广度和深度上的进一步发展,即将出现“类工业领域”、“广义工业”、“社会制造”、“社会工业”、“软件定义工业”等智能大工业新形态,而这些新形态都是以平行的物理和虚拟工业为最大的特征,而且最终虚拟数字工业会占据这个平行系统的主导地位^[8-9]。

虚拟数字工业诞生,将会是工业 5.0 时代的最大特征,将会以极高的效率整合各种工业资源、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^[10]。按照虚拟数字工业的崛起路径,我们将其划分为四个发展阶段:

使能与辅助,以当代各种工控系统为代表的系统,以工业总线、工业控制、运行技术(Operational technology)为关键技术,在当代工业中起着重要的使能与辅助作用。

支撑与服务,随着工业控制技术的进化,其作用的空间领域和逻辑范围越来越宽,演化出如工业物联网等概念,为整个工业体系提供重要的业务运行和运营的支撑和服务作用。

管控与主导,随着虚拟数字工业技术的进一步发展,以平行理论为代表的复杂系统管控科技开始发挥作用,从而使虚拟数字工业内生出基于人工智能技术的管控手段,同时开始对实体工业的运营进行微观与宏观层面上的主导作用。

支配与统治,虚拟数字工业技术的最终发展目标,是使得每一个工业体都拥有自己的伴生软件定义的人工工业体,而且其工业实力,很大程度上取决于其对虚实互动的认识、实践和效率,取决于与其伴生的软件定义的人工组织之规模。而运行在信息空间的数字工业体,运用智联网技术,当它们互相在智能和知识层面上联结后,无疑最终会占据实体工业体的统治地位,并支配各种产业经济的运行。

1.3 对中国核电工业的启示与思考

新智能时代向工业 5.0 新形态演进的进程已经全面启动。

2004 年,平行系统理论与方法正式提出^[11]。平行系统(Parallel systems)是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统,是控制系统、计算机仿真随着系统复杂程度的增加、计算技术和分析方法的进一步发展的必然结果,是弥补很难甚至无法对复杂系统进行精确建模和实验之不足的一种有效手段,也是对复杂系统进行管理和控制的一种可行方式,比如数字双胞胎可以视为平行系统的一种特例或子集,为特定的系统提供实时监测、调整和优化服务。

美国国防部、PTC 公司、西门子公司、达索公司、GE 等工业巨头在 2014 年前后以工业互联网、

数字双胞胎为关键技术着手,构建数字工业体系.数字工业具有更高的科技含量、更高的附加值利润和更广阔深邃的发展空间^[12].以虚实工业体系构建的工业体,将具有传统工业形态难以企及的高效运行模式,因此传统工业形态的淘汰是未来的必然结果,比如 GE 更是提出向数字工业形态全面转变,而最终达到“虚实分离”的数字工业形态^[13].到 2020 年,预计将有 10 000 台燃气轮机,68 000 架飞机引擎,1 亿支照明灯泡和 1.52 亿台汽车连入工业互联网.

不仅如此,虚拟数字工业体系也将彻底改变其商业模式,比如传统工业制造商向同业服务商的转变,就是虚拟数字工业体系的一个重要特征:通过对虚拟工业体的学习与实验,便可提供围绕该工业体的各类需求,如规划、制造、运维、运营提供各种精准服务业务.预计到 2020 年,GE 数字部门创造的收入将从 2016 年的 50 亿上升到 150 亿元,GE 也将由此跻身全球 10 大软件公司之列.更高的利润空间与科技含量,这也正是虚拟数字工业得以支配和统治实体工业的根本原因.

然而,在即将到来的虚拟数字工业时代,我们也应该有充分的危机感.尽管当前数字工业还在起步阶段,但是其初期核心技术却完全掌握在欧美工业科技巨头公司的手中,国内工业界对这些核心技术的关注和研发基本还未出现,也基本没有意识到这些颠覆性变化的可能性.现在虚拟数字工业处于“支撑与服务”的发展阶段,“管控与主导”阶段即将开始,而当“管控与主导”阶段来临时,如果中国还没有建立起自主研发的虚拟数字工业技术,则中国工业又将落后于世界先进水平,受制于世界工业巨头所掌控的虚拟工业技术.更有甚者,如果在“支配与统治”阶段,还没有自己的核心虚拟工业体系和技术,中国实体工业将彻底沦为世界虚拟化虚拟数字工业的附庸与殖民工业,成为依托各类产业链的下游工业实体.

如果说一般性的工业门类的虚拟数字化尚有引进、学习、升级的时间、机会和转圜余地,作为国家能源命脉和需要高度自主化的核电工业却没有这样的机会.如果不发展自主的虚拟数字工业体系,其结果要么是在未来的国际竞争中失去竞争力而逐步被市场边缘化,要么必须和国际工业巨头合作而丧失自主权.这两种结果显然都不是中国核电工业的选项.因此,研发和建设具有自主性的虚拟工业体系,是一项重要而且紧迫的战略性任务.本文所述的基于平行理论的核电工业新形态和体系架构,正是为这一战略性任务提供了顶层设计思想、体系结构理论以及关键技术路径.

2 核电工业新形态与体系结构

核能工业包含核能资源、核能燃料转换、核反应堆设计、核电站、辐射技术、核安全、核废料处理与环保、核辐射防护等多个组成部分,其各个组件之间互相关联和交互,形成一个复杂系统.本节讨论的是,在核能产业中占据重要位置的核电工业,以平行系统理论为基础,其发展态势会出现何种新形态与体系架构,如图 1 所示.

2.1 新形态:平行核电

核电系统是一个极其复杂的人机巨系统,其研

发、建造、运行等方面表现出了充分的复杂性.在工程建造阶段,其复杂性表现在核电工程建造为一个开放的系统,在设计、设备制造、建安、调试过程当中与整个核能工业链形成互动.在运行阶段,其复杂性一方面为核安全静态构成要素的复杂,具体表现在系统复杂、规模庞大、信息量巨大、分散,人作为核电安全重要能动主体但技能与素质差别大;另外一方面表现在核电安全动态复杂参数变化形成的系统状态组合非常复杂、人机交互场景难以预期,导致系统出现可能的不稳定状态.为进一步提高核电系统的安全运行水平,降低事故发生率,解决核电复杂系统难以建立精确数学模型的难题,需要采用新的方法理论体系.

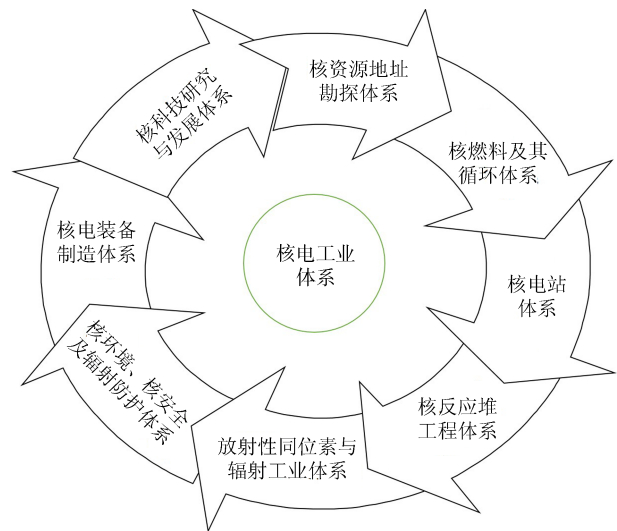


图 1 核电工业体系

Fig. 1 Nuclear energy industrial system

平行系统 (Parallel Systems),是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统,是控制系统、计算机仿真随着系统复杂程度的增加、计算技术和分析方法的进一步发展的必然结果,是弥补很难甚至无法对复杂系统进行精确建模和实验之不足的一种有效手段,也是对复杂系统进行管理和控制的一种可行方式.平行系统理论的核心应用方法为 ACP 方法,是指人工系统 (Artificial system)、计算实验 (Computational experiments)、平行执行 (Parallel execution) 之间的有机结合.人工系统可以理解为传统的数学或解析建模的扩展,计算实验是仿真模拟的升华,而平行执行就是自适应控制 (包括内模控制、预测控制、自适应动态规划 (Adaptive dynamic programming, ADP) 等) 的进一步推进升华^[14].

平行系统是仿真系统的高阶发展,其区别主要有以下几点:

- 1) 系统的仿真需要以现实系统为版本对系统进行模拟与分析,精度有限;而平行系统以现实系统为基础,利用神经网络等代理模型建立与实际系统对应的虚拟系统,解决复杂系统难以建模的难题.
- 2) 平行系统与实际系统之间存在交互,不断调整模型结构.
- 3) 平行系统可对系统状态进行在线推演,将系

统未来状态反馈给当前操作。

4) 平行系统中包含代理模型和智能算法如 ADP(自适应动态规划), 可实现对不同方案的自动计算, 同时可评估最优设计方案。

2.2 平行核电系统的研究意义

平行核电系统涵盖核电行业中运行、应急、设计、培训等各个方面。平行核电系统的研究, 充分发挥计算机强大的数据处理和推理能力, 以及人的创造力和在紧急事故情况下的事件的处理能力, 有助于及时发现核电复杂系统中存在的安全隐患, 保障人民群众的生命财产安全, 实现核电设计改进、事故规程优化、运行推演、并发事故情景模拟、学习培训、人员应急疏散演练、应急方案优化与验证等功能, 提高核电工业安全可靠, 对整个核电系统具有重要意义^[15-17]。

1) 开展核电设计的改进, 包括工艺参数、事故规程的优化设计, 提升设计质量, 可对不同的设计方案进行计算实验, 对实验效果进行动态评估, 并在指定的最优目标函数边界下, 自动计算最优设计方案。

2) 开展核电已知情景的综合模拟, 如事故并发模拟技术研究、设备意外失效情景模拟, 有助于查找核电安全隐患, 提高核电安全水平。

3) 开展智能应急管理技术研究, 可最大程度模拟真实应急场景, 保证应急最优方案的制订, 及应急情况下各项工作的顺利开展。

4) 开展操作运行在线推演与智能决策技术研究, 能准确、实时地评估出核电安全状态, 并与运行人员实现智能人机交互与智能决策, 降低核电厂巨大复杂系统运行安全存在的不确定性风险。

2.3 平行核电系统的研究内容

基于平行系统理念, 结合核电生产的实际特点, 平行核电系统包括基础构建层、数据和知识层、计算实验层和平行执行层等, 如图 2 所示。该系统可动态模拟核电真实系统复杂运行过程, 实现对核电生产过程的状态监测、核电系统未知情景的智能模拟计算、核电应急方案的滚动优化分析及核电运行过程的在线推演评估与优化、人机交互高风险区域分析等, 增强核电安全固有属性, 提升核电整体安全性与竞争力。其核心思想为, 通过神经网络、行为分析模型等代理建模方法, 对电厂系统、设备、人员建立模型, 组成同实际系统等价的人工系统。在人工系统上, 通过计算实验或试验来认识实际系统各要素间正常和非正常状态下的演化规律和相互作用关系, 通过两者的相互连接, 对两者之间的行为进行对比和分析, 研究对各自未来状态的借鉴和预估, 相应调节各自的控制与管理方式, 最后利用所认识的规律, 通过平行控制实现正常情况下优化实际系统的控制和较少意外的发生, 非正常情况下找到让系统迅速恢复正常的方法, 提高应急控制水平^[18-22]。

基础构件: 构建具备大规模数据分布式存储与海量数据分布式计算能力的基于 SOA (Service-oriented architecture) (或云计算) 平台。遵循 FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents) 规范建立多智能体环境, 并开发代理管理系统、分布式目录服务器和代理通信通道等多代理平台组件, 实现平台内部的代理生命周期服务、消息通信服务; 最后, 结合实验平台的具体应用, 构建应用领域本

体, 以实现平台内部代理间的语义互操作性。

数据和知识: 运用基于代理建模方法对具体应用示范领域中的参与者、环境、规则和机制建模并构建各自的模型库; 其次, 结合各应用领域的发展现状, 基于实时监测数据构建场景库。基于 XML 语言设计一套形式化表示方法来统一描述实验平台中的领域知识, 并运用机器学习和自然语言处理技术半自动地构建领域知识库, 实现平台内部领域知识的存储、表达与推理。

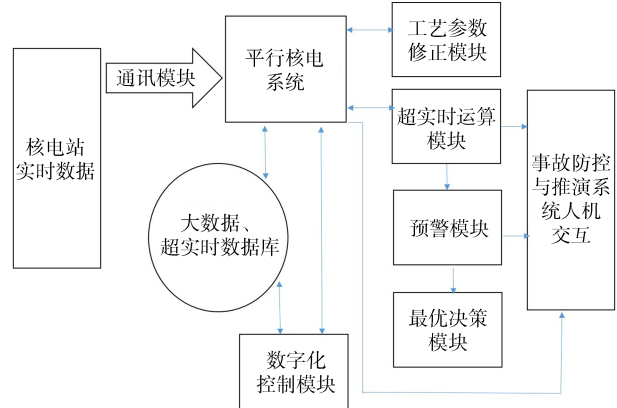
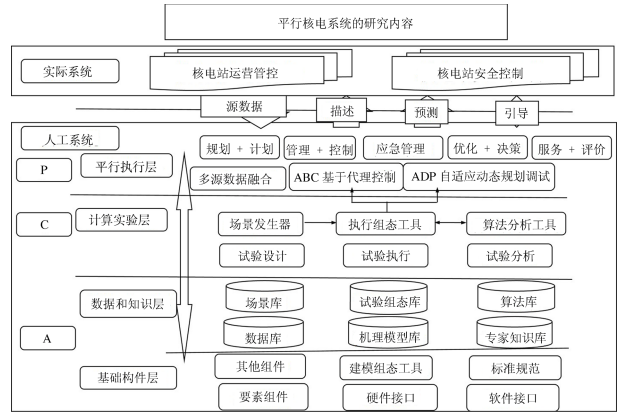


图 3 平行核电能系统运行流程图
Fig. 3 Operation flow chart of parallel nuclear power system

计算实验: 设计同时支持真实与虚拟实验场景的场景生成器。场景生成器能够接受最终用户输入的场景或自动提取场景库中的特定实验场景, 实例化实验场景中的交互机制与管理规则, 并传递给事件驱动引擎完成计算实验仿真; 基于离散事件仿真技术实现事件驱动引擎, 并动态模拟实验场景中各代理的交互与通信过程。事件驱动引擎采用仿真时钟模拟实验平台运行时的特定时刻和时间变化, 按时间顺序存储、分析和确定实验过程中离散事件及事件间的引发关系。通过仿真时钟的推进和离散事件的处理来驱动和模拟计算实验的过程; 最后, 研制适用于计算实验平台的算法分析工具, 并以模块和组件的形式应用于实验平台中。重点开发各类群体策略学习与优化算法、定性与定量计算实验研究算法以及对各应用领域提供特定支持的专用算法模块。

这些工具将动态地分析、研究和优化计算实验过程及其结果,并实时更新知识库。

平行控制:基于智能探测、传感网络与多源信息融合技术实时地监测、收集与融合互联网开源数据和各应用领域的结构化数据,并基于实时监测数据生成或调整实验场景;其次,设计一套完整的软件库和高层应用程序协议,服务于实验平台与终端用户之间的接口,使得终端用户能够方便地管理和配置实验平台以及实验平台内部代理的运行;实时监控和研究实验场景中的不安全因素,实现事件安全的被动式查询与主动式风险研究及预警;同时通过计算实验和反馈调控实现半自动化计算研究和优化,生成实时最优决策。最后,设计动态可视化的人机交互界面,以文本、图、表等形式全方位地呈现计算实验模拟及其交互控制过程^[23-25],如图3所示。

2.4 平行核电体系架构

为实现虚实结合的平行控制,平行核电管控系统如图4所示。

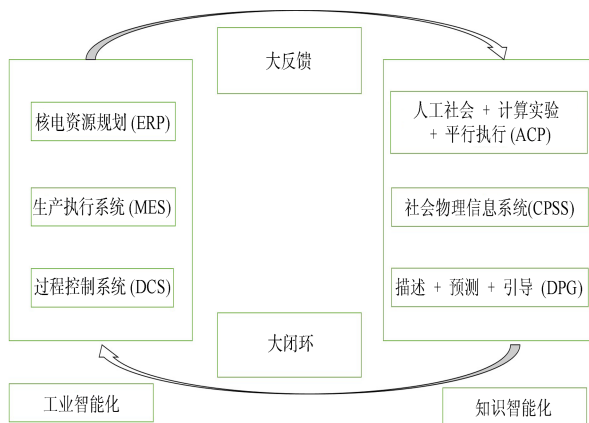


图4 平行核电管控系统

Fig. 4 Parallel nuclear power control and management systems

图4中左侧为目前传统的核电工业自动化领域,包括底层过程控制系统(Distributed control system, DCS)、生产执行系统(Manufacturing execution system, MES)及企业资源规划管理系统(Enterprise resource planning, ERP)。右侧为本文提出的虚拟人工核电系统,对应的知识自动化领域,采用构建人工系统、计算实验和平行执行(ACP),实现对核电工业自动化系统的建模、计算和控制;基于ACP的虚拟人工核电系统和核电工业自动化系统形成核电社会物理信息系统(Cyber-physical-social systems, CPSS);采用ACP反复观察评估后,通过虚实平行互动,形成描述、预测和引导(Description, prediction, prescription, DPP)的分析、决策和执行过程,最终利用虚拟核电系统对实际核电系统实施闭环有效的控制与管理。

虚拟人工核电系统从工业自动化领域通过大反馈获得核电系统的物理、现场运行及社会信息等大数据,通过机器学习、数据驱动和语言建模,进入知识自动化领域。知识自动化基于ACP、CPSS及DPP等建模、计算和控制过程,形成优化的控制决策、通过大闭环引导实际核电系统优化运行。

以核电相关群体为社会管理的观测、建模、计算及运营对象,知识自动化可实现对网络信息的捕捉、识别、追踪、解析及预测。其本质内容在于以用户为中心,通过采用面向基础设施的架构、面向平台的架构、面向软件的架构,使用Web挖掘等技术对互联网、移动互联网及智联网的文本、视频等数据进行采集;同时借助机器学习及云计算等技术实现数据的过滤、分析和结构化,获取信息特征;通过特定的建模手段及方法实现知识的合成,结合行为动力学特征,针对核电相关群体进行群体涌现行为计算与宏观社会现象预测,进而主动提供基于知识的智能推荐与基于决策的智慧服务,实现核电管理自动化的全过程^[26-28]。

基于以上论述系统架构分为六层,如图5所示:

对象层:对应物理核电系统,包括核电工业全产业链,囊括了核原料生产、加工、利用、废料处理等环节,核电站设计、建造、发电运维、改造、拆除等全生命周期环节,核电研究相关产业以及核电周边产业;同时包含人、财、物及社会等对核电工业系统的影响。

数据采集与信息形成层:分成两个部分,一是目前已有的工业自动化系统及信息系统,主要包括DCS系统、MES系统及企业级ERP系统。二是在互联网和多种通讯模式下,人与社会对核电工业的互动,将更加便捷和密切,通过Internet等渠道收集大量的信息,并作用于物理核电系统,称为感知和执行,这一过程产生的信息将包含大量的人与社会因素。最后通过大数据、模式识别、区块链、云计算和社会计算等手段,汇集以上所有数据信息,形成有效的信息层。

存储层:将数据采集和信息形成层形成的数据分门别类存入核电站运维数据库、工业自动化数据库、专家知识库、政策数据库、核电相关人员数据库等各种数据库。

特征抽取及知识合成层:采用自然语言处理、机器学习、智能控制等人工智能技术,实现特征抽取和知识合成。

解析层:基于特征抽取及知识合成层获得的知识 and 特征,通过人机结合、知行合一、虚实融合等手段,建立虚拟人工核电系统各环节模型和系统模型,实现虚拟人工核电系统的构建,完成物理世界、精神世界、人工世界的三统一。同时对平行核电产业进行平行系统建模,完成全产业链平行化的目标。

平行控制层:基于虚拟人工核电系统模型,采用计算实验,获得优化控制策略,采用平行执行模式,实现对虚拟人工核电系统和实际核电系统的同步反馈。平行执行对实际核电系统,引导人与社会的活动;采用软件定义机器模式,与物理定义机器进行控制互动。平行执行可以调整虚拟人工核电系统的模型、参数、运行方式,使虚拟人工系统与实际系统一致,为下一步引导实际系统做准备。最后,实现物理、社会、赛博空间的互联互通,共同融合,实现默顿牛顿系统的大统一。同时,在执行过程中,运用动态闭环的管理方式进行平行控制与管理^[29-33]。

2.5 平行核电系统的应用

平行核电系统的研究,可应用在核电系统设计

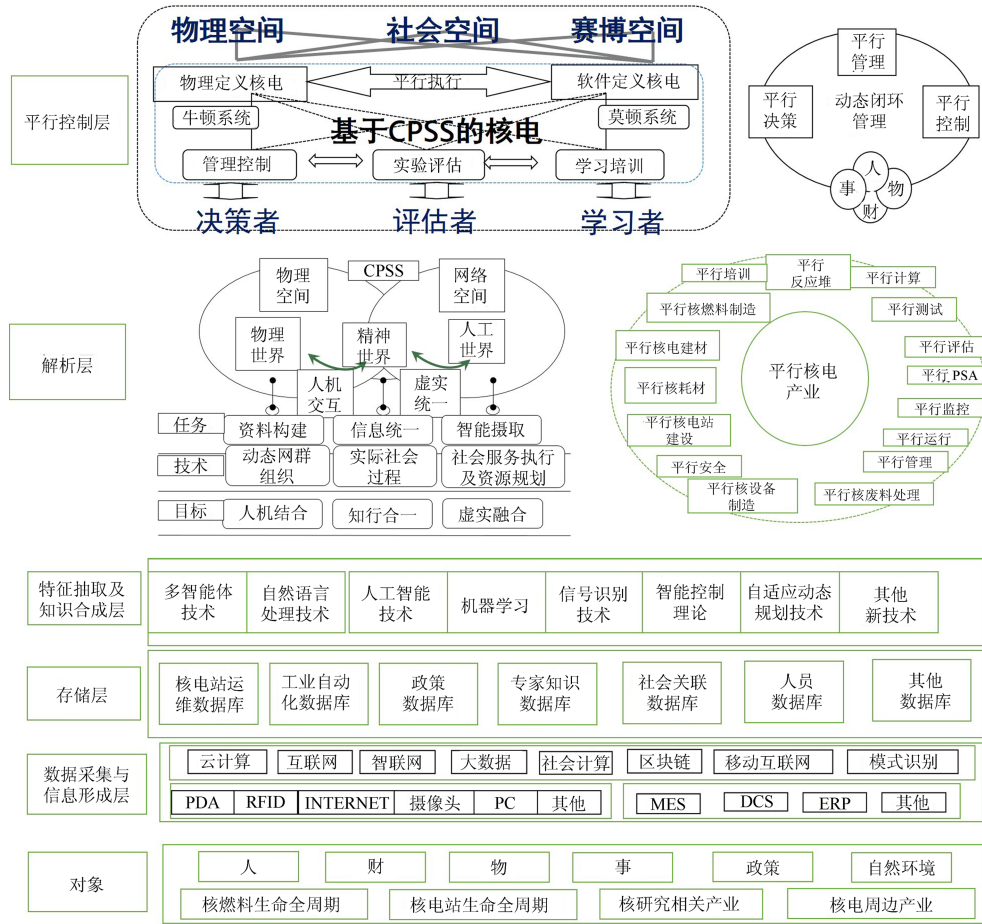


图 5 平行核电框架
Fig. 5 Parallel architecture of nuclear power

改进、事故规程优化、运行推演、并发事故情景模拟、学习培训、人员应急疏散演练、应急方案优化与验证等多个方向^[34-41], 如图 6 所示:

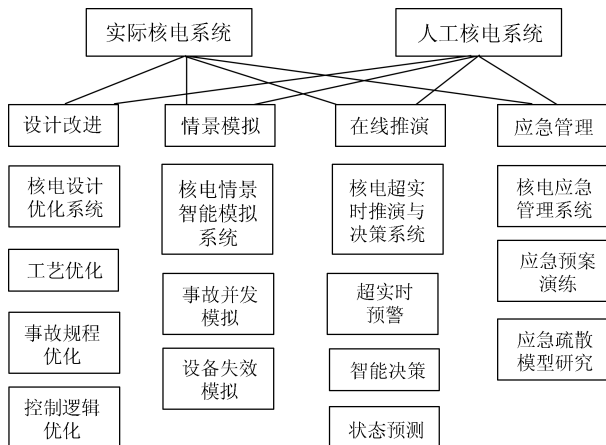


图 6 平行核电系统的主要应用
Fig. 6 The main applications of parallel nuclear power system

对运行部门, 提供核电系统的在线推演平台, 可以评估运行人员的操作风险, 以及对风险事件提供智能决策;

对应急部门, 模拟真实事故场景、同时考虑社会和人的心理行为主观能动影响等缺点, 保证在应急情况下人员的快速疏散及救援工作的顺利开展;

对设计部门, 可由事故后原因分析转变为事前设计预防, 改进设计方案, 防止此类事故的发生, 为在最大程度上避免重大核事故的发生;

对培训部门, 可以作为核电操作的辅助教学平台, 以直观的形式显示核电的运行机理, 同时, 可模拟更多故障事件, 提高操作人员处理事件能力。

3 核能 5.0 支撑平台新技术

3.1 物联网

物联网的定义为以互联网、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, 从而建立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的互联互通; 物联网的最终目的是支撑需要大规模社会化协作的、特别是在复杂系统中的知识功能和知识服务。物联网的实质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、决策、规划、管控等的全自动化过程, 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, 如图 7 所示。

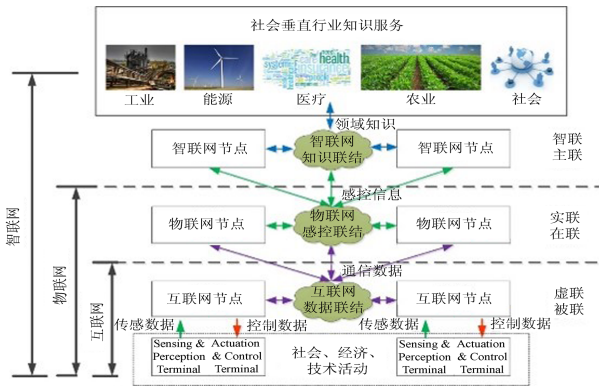


图7 智联网的基本概念示意图

Fig. 7 The basic concept diagram of internet of minds

研究和建设工业智联网,为工业发展分析与评估智能系统提供社会化基础设施和支撑平台;通过该支撑平台,基于平行系统理论的分析管控、基于工业 CPSS 的系统架构以及产业发展分析的各种社会计算核心技术得以实现.工业智联网并非空中楼阁,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.智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传感、通信和计算系统规划和设计提供了逻辑结构和全体系统化建设蓝图.

工业智联网最重要的应用之一,就是使能软件定义的工业体系.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(Software defined network, SDN), 敏捷虚拟企业(Agile virtual enterprise, AVE) 和社会制造(众包).知识自动化和智联网,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,从而进一步深入复杂知识自动化系统的构想、设计、实施、运营、管理与控制^[42].

3.2 知识自动化方法体系的研发

很多情况下,工业系统的众多过程呈现深度耦合、交互影响的特点,可利用知识自动化的手段对工业过程管理的现象进行捕捉、识别、追踪、解析、预测及诱导.更进一步来讲,针对具体的研究对象,通过广泛的感知、测量、采集和传递信息的设备或系统,对信息进行快速获取并分析,实现社会和技术信号的实时采集、数据融合和分析处理;然后,基于ACP方法,借助网络数据挖掘、自然语言处理及机器学习等技术,通过结构分析、语义分析等手段对工业活动、结构、组织和功能等进行深入解析,以获取实时、系统且全面的知识来解决特定的问题^[43].

3.3 发展性人工智能代理系统

多智能体系统的自治性、交互性、协同性、学习与推理等特点是研究复杂系统问题无可替代的绝佳手段.针对社会计算中多智能体系统的需求和发展方向,我们提出了一个新概念,即“发展性人工智能代理系统”^[44].发展性人工智能代理的核心特征是“终生学习”和“永继学习”.“终生学习”的概念指的是,一个发展性人工智能代理针对一个系统参与者(人、组织等社会实体),建立与之对应的终生学习和交互机制,终生获取、认知并管控参与者的数据和知识,从而做到智能代理的知识,随着参与者自身的变化及外部环境的变化而改变.“永继学习”的概念指的是,由于基于机器的人工智能代理的知识是可以作为数据直接传递的,因此在利用新的人工智能代理解决新一阶段出现的新系统问题的时候,可以直接利用前序阶段的人工智能代理知识而不用重新训练学习.基于这两个特征,发展性智能体具备的认知、规划、推理、学习、辅助和引导功能,是通过其与对应参与者的长期知识交互而形成,因此具备了深度认知能力,以及对参与者改变的适应性.

我们认为,针对目标工业的分析、决策、管控场景,发展性人工智能代理系统将是下一代多智能体系统的新范式,能够做到对复杂系统及系统中各参与者更精确的模拟,从而建立虚实系统智能体和人之间更加精确的互动机制,为分析复杂工业系统打下更坚实的基础.

3.4 大型平行协同演化技术

平行管理与控制的方法为有效建立混合增强智能的框架提供了理论体系与平台.由于系统的复杂性的存在,多数系统本质上不能解析建模.基于平行系统的理论,采用ACP方法可以对复杂系统进行闭环管理与控制.在实际系统的基础上,通过多智能体技术建立一个或多个虚拟的人工系统;以计算设施为实验室,通过对人工系统的计算实验,来解决实际系统中难以实验以及重复实验的难题;通过对实际系统与人工系统构成的平行系统进行虚实互动、平行执行来实现系统的管理和控制.

在平行执行的过程中,需要建立基于系统协同演化机制的场景推演模型.把实际系统与人工系统相交,建立协同演化的机制,通过虚实互动提高各自的性能并进行优化.在实际系统与人工系统协同演化的过程中,需要运用演化博弈思想对协同演化机制进行系统的分析.同时,把演化算法与博弈理论、多智能体系统理论相结合,并引入分布式计算技术,建立性能更高效的分布式系统演化算法,并将协同演化思想与人工神经网络算法、人工免疫算法、模拟退火算法等结合,集成现有智能算法中的不同搜索技术,建立功能强大的平行协同演化算法,与平行管理与控制相结合,实现人工系统与现实系统的虚实互动和平行执行.

3.5 大规模混合增强智能计算验证平台

结合典型工业应用,搭建面向不同结构、不同类型、快速多样的大数据计算实验平台,建立实际系统的分布式、自适应、动态感知机制,实时准确感知实际系统的多样化信息.以人工系统为基础,以目标工业管控系统传感与感知数据为输入,研究人工系统

智能体的动态标定方法,将智能体的微观推理决策参数与系统宏观运行演化特征相结合,完成匹配系统整体运行分布的智能体参数标定.在智能体参数标定的基础上,设计各参数科学合理的分布范围,完成单因素到多因素的多智能体协同、博弈、对抗等计算实验,分析影响工业运行的正负变量因子、主次变量因子,并采用统计评优的方法评估当前环境参数下工业运行的风险点和管控手段.

3.6 核能产业区块链

区块链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库层、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、制定奖励与惩处的激励层、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.

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正的系统运行规则,在无人管理和监督的情况下实现自组织和自主运行.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,旨在为全社会提供全方位的知识服务.

对于区块链的理解分为三种:“加密数字货币”、“分布式记账本技术”和“通证”.“通证”的观点是可以根据各种实现场景,构建一个基于区块链的系统,它是有真实应用的系统,且与许多传统的工业系统对接.“通证”可以把任何有价值的权益“通证化”,通证化结合区块链技术之后,就可以直接共享使用“通证权”融资,且透明可信,可快速流转,形成市场价格.所以,通证工业链就是真正的数字工业链,可以大幅提升工业经济的效率,激发出前所未有的创新和活力.

核能区块链的核心思想是提供一个可信底层平台,各种产业单元可以基于此底层构建各种智能合约,构建通证,实现链式协作.目前各种区块链平台的性能还达不到商用要求,区块链技术需要进行性能的提升,但是研发界抱乐观态度.

实现核能区块链和通证产业系统的基础是智能合约.标准化的智能合约可以由产业区块链官方制定,比如核能产业各个业务研发支撑一个区块链条,发行通证作为业务的一个记账单位,所有的利益相关部门使用这个底层基础设施,从而在核能生产网络中逐步实现通证产业系统.在形成通证经济系统雏形后,智能核能产业网络即形成.

基于区块链技术的智能核能产业网络,每一个

产业单元都通过智能合约标准,将自己的连入不同的产业链当中,或者说每一个产业单元通过各种智能合约范式与自己的产业链上下游相连,给自己的业务和整个产业链都在虚拟世界里构建出一个“虚实平行产业链”,这些“虚实平行产业链”,通过智能合约范式,接入电力产业体系中.核能产业运作时,整个产业链条的相关智能合约被不断触发,实现自主高效的运行,智能核能产业得以实现.

核能产业区块链技术,将从根本上变革核能工业生产方式,重塑整个工业的形态.整个核能生产都会运行在分布式的智能产业网络上,在区块链上监视和管控每一个产业单元的运行状况,分析产业的宏观数据和生产微观数据,真正实现虚拟数字核能产业的数据化、知识化、智能化^[45-47].

4 核能 5.0 运用场景实例

在本节,我们以核能产业的重要组成部分,核电工业为背景,以核电站工控系统安全评估和核电站数字化仪控系统为应用场景来分析相应的业务新技术与系统新形态.

4.1 核电工控系统安全评估

基于平行核电系统,可进行基于计算实验的核电工控安全系统信息安全威胁防护策略分析与研究^[48].利用核电工控系统信息安全保障方案的实时信息,设计不同的实验情景,把计算机作为实验室,进行各种各样的计算“软”实验,针对不同安全防护应用设计多种计算实验场景,研究网络安全攻击演化规律及其常态和非常态管理策略.在实际网络攻击场景和虚拟网络攻击场景平行执行的基础上,利用计算实验方法在平行安全防护演练平台上进行各种试验,对核电工控安全系统的防护行为进行预测和分析.实际安全防范系统中的算法分析工具以模块和组件的形式应用于平行系统实验平台中,其中包括各类学习策略与优化算法、定性与定量计算实验研究算法以及对各安全威胁场景(包括常规安全威胁场景、增强安全威胁场景和突发安全威胁场景)提供特定支持的专用算法模块,这些工具将动态地分析、研究和优化安全威胁计算实验过程及其结果,并结合评价指标体系更新评价结果^[49-51].主要步骤如下,如图8所示.

第一阶段:资产识别与评定

步骤 1. 定义业务或运营目标

识别和了解业务或运营目标对于真正理解风险可能对业务带来的后果和影响至关重要.因此,这一步骤也是制定适合自己的风险度量标准并对识别出的风险进行评分的基础.对于核电站工控系统来说,控制系统运行和实现自动化的过程都有哪些?在过程中或自动化步骤中都部署了哪些系统来支持这一过程?通过了解这些目标,就可以知道哪些系统对于实现目标更为关键.

步骤 2. 系统评定与分类

给予前一步骤中所识别的业务与运营目标以及与之关联的系统.首先对实现上述目标所需要的各个系统进行识别和评定,然后找出可能与系统相关联的潜在事件和后果,最后建立所导致的后果与业务目标之间的关联,以便根据系统关键性进行分类与优先级排序.

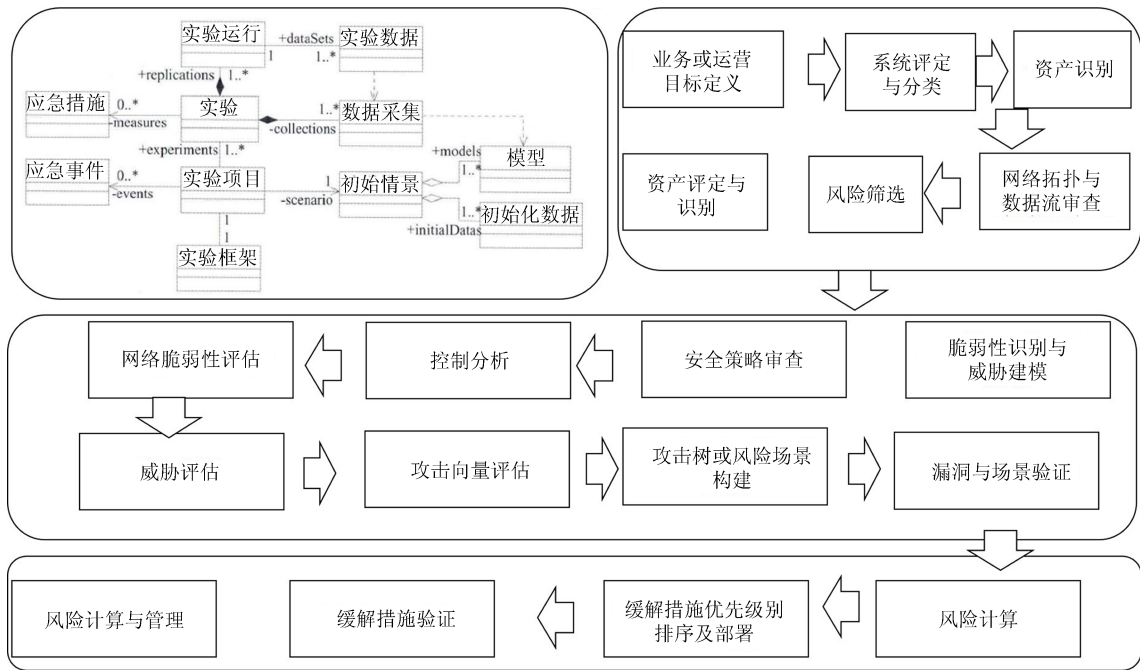


图8 核电工控系统信息安全保障方案平台评估流程

Fig.8 Nuclear power information security program for industrial control systems assessment process

步骤 3. 资产识别

尽可能全面的识别出所有资产无疑是至关重要的。然而，资产清单以及文件的收集比较困难，而且往往会有所遗漏。资产清单的收集与验证可以通过以下方式进行：与最新的、准确的网络拓扑图进行交叉验证。

步骤 4. 网络拓扑与数据流审查

网络拓扑图不仅对于正确识别资产非常重要，对于识别通信路径和数据流同样重要，从而有助于攻击向量识别。数据流分析还有助于发现网络中已经存在的问题。

步骤 5. 风险预算

风险筛选有助于实现各类评估，根据事先确定的评级可以对每项系统进行优先级排序和评估。评级方式可采用高、中、低的定性评级。

第二阶段：脆弱性识别与威胁建模

步骤 6. 安全策略审查

网络安全策略是保证安全状态的基线。通常安全策略都会存在薄弱环节。所以应该对作为安全状况根基的安全策略和程序进行审查和验证，如果安全策略存在薄弱环节，那么核电站的核心将面临巨大的风险。

步骤 7. 控制风险 (标准审查、差距分析)

控制风险步骤是针对某一标准或者策略所开展的差距分析或审计工作，也是大多数传统风险评估的中心工作。控制风险以行业标准和要求为基线，能对安全、整改、缓解等过程的聚焦提供指导。

步骤 8. 网络脆弱性评估

本步骤通常仅涉及已知的且已经公开披露的漏洞。主要涉及如下方法：

映射漏洞，将已知漏洞与现有系统进行手动匹配操作；

配置审查，对系统配置寻找错误配置；

漏洞扫描，对漏洞使用扫描工具进行搜寻；
实时网络流量分析，检测流量并进行分析；
控制分析，针对各种标准中的脆弱性进行排查。

步骤 9. 计算实验

通过平行系统，对评估实现仿真建模，进行计算实验。通过海量自我博弈提升自身能力，实现虚实结合的自我探索学习，系统智能水平将持续提升。理论上最终超越现实世界，达到人工世界为主导的目的，实现智能系统工程实用化，如图 9 所示。

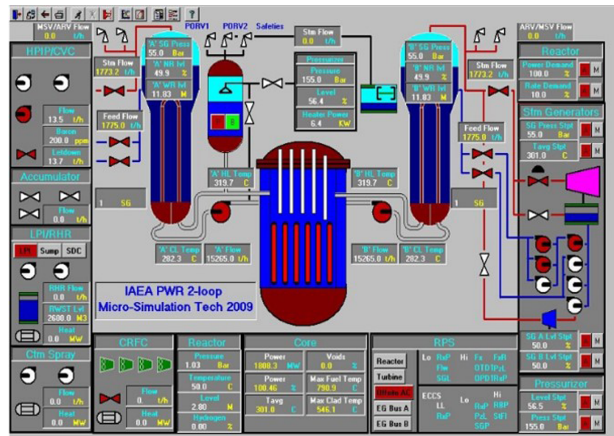


图9 核电工控系统信息安全计算实验图例

Fig.9 Nuclear power control system of information security computing experiments instance

4.2 智能平行核电站数字化仪控系统：下一代核电仪控范式

核电站数字化仪控系统 (Digital Control System, DCS), 控制着整个核电站从常规岛到核岛几乎所有的阀门、开关、继电器等，数据在系统中进行集

中显示, 计算处理并自动驱动执行机构, 具有高可靠性、开放性、灵活性、协调性、易于维护、控制功能齐全等特点. 它是核电站的大脑、神经中枢、运行中心和安全屏障, 是核电站四大关键性成套设备之一, 是整个核电站最关键、最核心技术的集中体现, 也是大型核电装备现代化程度的重要标志^[52-55], 基于平行理论的研究架构如图 10 所示.

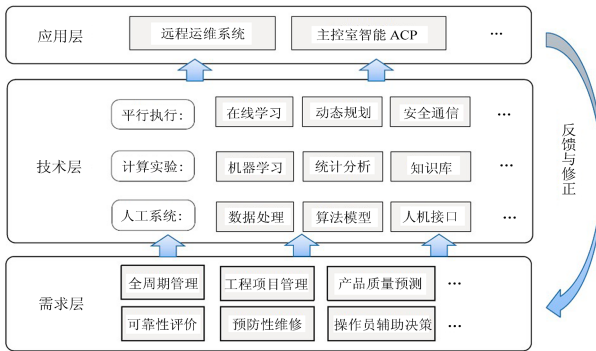


图 10 基于平行理论的核电仪控技术研究架构

Fig. 10 Parallel instrumentation and control system structure of nuclear power

作为核电机组这样一个以核反应堆为一次能源的高科技重大装备, 其控制系统与核反应过程密切相关, 控制系统的安全性、可靠性、精确度和完整性等各方面的功能和性能都直接影响到整个核电站运行的安全性和经济性, 因此在考虑核电机组装备本身的自主化时, 就必须同时考虑其控制系统的自主化. 只有掌握了自动化成套控制系统的关键技术, 我国核电站的安全、经济运行才能有真正的保障.

中国广核集团(简称中广核)为引领核电智能化技术的发展, 设立了“十三五”智能核电科技战略专项(Smart Nuclear Power, SNP), 提出了在全生命周期内构建“智能管理、协同设计、智能建造、智慧运营”的四大发展领域. 北京广利核系统工程有限公司是中广核旗下从事核电 DCS 设计、制造和工程服务的专业化企业, 正在从核电工程 DCS 系统供应商向核电 DCS “工程、运维、改造、服务”供应商转型, 从单一核电领域向高可靠控制领域转型, 从国内核电 DCS 设备供应商向全球核电 DCS 设备供应商转型, 并致力于在自动化、智能化、可视化方向取得技术突破. 作为专业的核电 DCS 供应商, 广利核公司可为各种不同堆型的核电站提供端对端、全生命周期的 DCS 解决方案, 实现高精度、快速及高稳定运行的目标, 如图 11 所示.

核电站的管理与控制问题, 不仅涉及到核电站的规划、设计、选址、建设等工程问题, 更涉及到管理、人为等社会因素, 以及地震、火灾等自然因素, 传统的理论建模方法难以对其进行研究, 需要新的理论方法来解决上述问题. 因此, 为了实现更优化、更有层次性的控制目标, 解决核电 DCS 系统中的复杂控制问题, 广利核公司基于平行智能理论方法及其技术路线, 采用大运维理念, 致力实现 DCS 全生命周期的智能化.

该系统采用基于 ACP 方法的平行智能理论, 以虚拟化、云计算、大数据为数据基础, 建立细粒度仿真、具有弹性、按需分配、灵活扩展的平行核电站数

字化仪控系统, 以满足核电系统信息安全对抗演练、技战术训练及实验、工业控制重要基础设施与信息系统的安全测评、安全预警的需要^[56], 如图 12 所示.

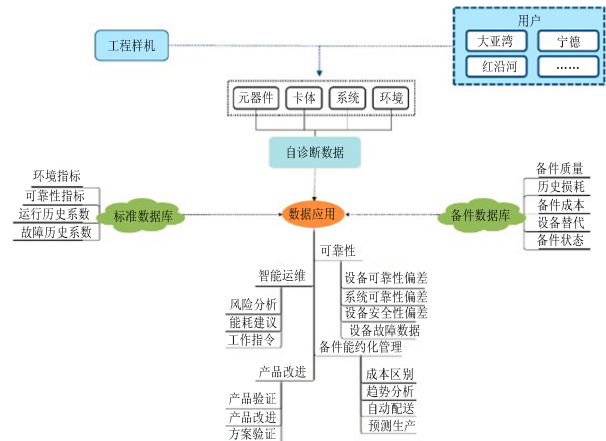


图 11 DCS 运维改造平台

Fig. 11 DCS operation and maintenance platform

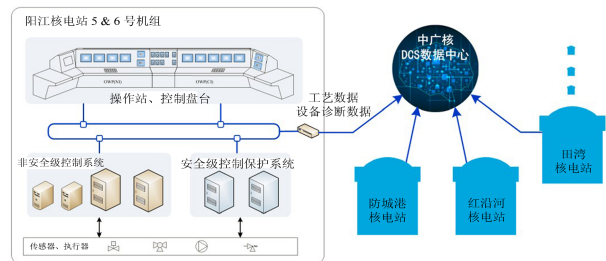


图 12 中广核 DCS 数据中心平台

Fig. 12 CGNPC DCS data center

5 结论与展望

本文首先讨论了核能 5.0 出现的新智能时代基础, 阐述了虚拟数字工业崛起的技术背景. 其后详细叙述了核能 5.0 及核电工业新形态与体系结构, 即平行核电的定义、意义、研究内容、体系架构以及应用领域, 并讨论了核能 5.0 中新一代核心技术, 包括物联网、知识自动化、发展性人工智能、大规模协同演进技术、工业区块链等. 最后讨论了核电工业中具体的应用场景与案例, 核电工控系统安全评估与核电站数字化仪控系统.

在新智能时代到来的时候, 以虚拟数字工业崛起为特征的工业转型正在逐步发生. 中国工业必须认清这一重大趋势, 尽早开始这一转型过程, 以避免在下一轮的全球工业竞争中处于劣势和下游地位. 中国核能工业, 无论在国家能源安全与经济命脉的层面上考虑, 还是在保持核电工业技术在世界上的竞争力的层面上考虑, 都更应该尽早意识到工业虚拟数字化的必要性与紧迫性, 并尽早开始其进程. 因此, 本文阐述了核能 5.0, 以平行核电为核心理念的虚实一体的核电工业新形态与系统架构, 提出了世界领先的理念、参考模型和技术框架, 为中国核能产业未来的自主发展描绘了前景、道路与期望.

References

- 1 张廷克, 李国裕, 潘启龙. 中国核能发展报告(2018). 北京: 社会科学文献出版社, 2018.

- 2 Popper K R. *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 1972.
(卡尔·波普尔. 客观知识: 一个进化论的研究. 上海: 上海译文出版社, 1972.)
- 3 Jaspers K. *The Origin and Goal of History*. Munich: Piper Verlag GmbH, 1949.
(卡尔·雅斯贝斯. 历史的起源与目标. 慕尼黑: Piper Verlag GmbH, 1949.)
- 4 Gödel K. *On Formally Undecidable Propositions of Principia Mathematica and Related Systems(I)*. 1931.
(库尔特·哥德尔. 《数学原理》及有关系统中的形式不可判定命题. 1931.)
- 5 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)
- 6 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85–88
- 7 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)
- 8 WANG Fei-Yue. X5.0: Parallel Intelligence System in Parallel ERA. The New Intelligence Age Forum. 2015.
(王飞跃. X5.0: 平行时代的平行智能体系. 新时代智能论坛, 2015.)
- 9 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485–489)
- 10 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)
- 11 Ning Bin, Wang Fei-yue, Dong Hai-rong, Wen Ding. Framework of parallel control and management for high-speed railway systems. *Complex Systems And Complexity Science*, 2010, **7**(4): 11–21
(宁滨, 王飞跃, 董海荣, 文丁. 高速铁路平行控制与管理系统研究框架. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(4): 11–21)
- 12 Glaessgen E H, Stargel D S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. In: Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2012.
- 13 Weber A. GE 'predix' the future of manufacturing. *Assembly*, 2017, **60**(3): GE70–GE76
- 14 Xiong Gang, Dong Xi-Song, Wang Zhao-Kui, Wang Fei-Yue. Research and Application Review of Parallel Control and Management. Chinese Aerospace Safety Symposium, 2017
(熊刚, 董西松, 王兆魁, 王飞跃. 平行控制与管理的研究及应用进展综述. 中国空天安全会议, 2017)
- 15 Wang Fei-Yue. New mechanisms for control and management of complex systems: research and development. In: Project to the Presidents Foundation for Special Projects, Chinese Academy of Sciences. Beijing, China, 2005.
(王飞跃. 复杂系统的控制与管理机制研究及其应用. 见: 中国科学院院长基金特别支持项目立项书. 北京, 2005.)
- 16 Wang F Y, Wang X, Li L X, Li L. Steps toward parallel intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(4): 345–348
- 17 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)
- 18 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
- 19 Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Yuan Yong, Wang Tao, Lin Yi-Lun. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(5–6): 460–469
(王飞跃, 王晓, 袁勇, 王涛, 林懿伦. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然. 科学通报, 2015, **60**(5–6): 460–469)
- 20 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
- 21 Wang F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(5): 65–67
- 22 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 23 Wang Fei-Yue, Li Xiao-Chen, Mao Wen-Ji, Wang Tao. *Social Computing: Methods and Applications*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.
(王飞跃, 李晓晨, 毛文吉, 王涛. 社会计算的基本方法与应用. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.)
- 24 Wang Fei-Yue. Social energy and parallel energy systems: towards the age of energy 5.0. In: Workshop on Distributed Energy Systems and Annual Symposium of IEEE ITSS Beijing Chapter. Beijing, China: North China University of Technology, 2015.
(王飞跃. 社会能源与平行能源系统: 迈向能源 5.0 的时代. 见: 分布式能源专业委员会筹委会及 IEEE ITSS 北京分会. 北京: 北方工业大学, 2015.)
- 25 Wang Fei-Yue, Zhao Jie, Lun Shu-Xian. Artificial power systems for the operation and management of complex power grids. *Southern Power System Technology*, 2008, **2**(3): 1–6
(王飞跃, 赵杰, 伦淑娴. 人工电力系统与复杂大电网的运营和管理. 南方电网技术, 2008, **2**(3): 1–6)
- 26 Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shuan, Xue Yu-Sheng, Dong Zhao-Yang. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(16): 1–8
(赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 董朝阳. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架. 电力系统自动化, 2011, **35**(16): 1–8)
- 27 Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shuan, Xue Yu-Sheng, Li Xue, Dong Zhao-Yang. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, **34**(16): 1–7
(赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 李雪, 董朝阳. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战. 电力系统自动化, 2010, **34**(16): 1–7)
- 28 Ilic M D, Xie L, Khan U A, Moura J M F. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans*, 2010, **40**(4): 825–838
- 29 Xie L, Ilic M D. Module-based modeling of cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 513–518
- 30 McMillin B. Complexities of information security in cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2009. 1–2
- 31 Singh C, Sprintson A. Reliability assurance of cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010. 1–6
- 32 Deng Jian-Ling, Wang Fei-Yue, Chen Yao-Bin, Zhao Xiang-Yang. From industries 4.0 to energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(12): 2003–2016
(邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 赵向阳. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架. 自动化学报, 2015, **41**(12): 2003–2016)
- 33 Wang Fei-Yue. CC 5.0: intelligent command and control systems in the parallel age. *Journal of Command and Control*, 2015, **1**(1): 107–120
(王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系. 指挥与控制学报, 2015, **1**(1): 107–120)
- 34 Jiang Ze-Min. Reflections on energy issues in China. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, **42**(3): 345–359
(江泽民. 对中国能源问题的思考. 上海交通大学学报, 2008, **42**(3): 345–359)

- 35 Zhang Li. The Research on Human Reliability Analysis Technique in Probabilistic Safety Assessment [Ph. D. dissertation], Hu'nan University, China, 2004
(张力. 概率安全评价中人因可靠性分析技术研究 [博士学位论文], 湖南大学, 中国, 2004)
- 36 Xue Yu-Sheng, Xiao Shi-Jie. Comprehensively defending high risk events with low probability. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(8): 1-11
(薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考. 电力系统自动化, 2011, **35**(8): 1-11)
- 37 Jing Chun-Ning, Zhao Ke, Zhang Li-You, Li Hui, Wang Cheng-Cheng, Qian Yi-Jie, et al. The design philosophy and general technical features of HPR1000. *China Nuclear Power*, 2017, **10**(4): 463-467
(荆春宁, 赵科, 张力友, 李辉, 王诚诚, 钱怡洁, 等. “华龙一号”的设计理念与总体技术特征. 中国核电, 2017, **10**(4): 463-467)
- 38 Zhu Zheng-Wei, Wang Qiong, Lv Shu-Peng. Research on differences of multiple stakeholders' risk perception and social conflict — Empirical investigation of Z nuclear power project. *Journal of Public Management*, 2016, (2): 97-106
(朱正威, 王琼, 吕书鹏. 多元主体风险感知与社会冲突差异性研究 — 基于 Z 核电项目的实证考察. 公共管理学报, 2016, (2): 97-106)
- 39 Li Peng-Cheng, Zhang Li, Dai Li-Cao, Zou Yan-Hua, Qing Tao, Hu Hong, et al. Operator's situation awareness reliability model in digital main control rooms of nuclear power plants. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2016, **36**(1): 243-252
(李鹏程, 张力, 戴立操, 邹衍华, 青涛, 胡鸿等. 核电厂数字化主控室操纵员的情景意识可靠性模型. 系统工程理论与实践, 2016, **36**(1): 243-252)
- 40 Wang Xiao-Lei, Lv Da-Gang. Review of seismic probability risk assessment of nuclear power plants. *China Civil Engineering Journal*, 2016, **49**(11): 52-68
(王晓磊, 吕大刚. 核电厂地震概率风险评估研究综述. 土木工程学报, 2016, **49**(11): 52-68)
- 41 Su Gang. The “three steps development strategy” of China nuclear power science and technology. *Science & Technology Review*, 2016, **34**(15): 33-41
(苏罡. 中国核能科技“三步走”发展战略的思考. 科技导报, 2016, **34**(15): 33-41)
- 42 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. 智联网: 概念、问题和平台. 自动化学报, 2017, **43**(12): 2061-2070)
- 43 Cheng Le-Feng, Yu Tao, Zhang Xiao-Shun, Yin Lin-Fei, Qu Kai-Ping. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges. *Proceedings of the CSEE*, 2018, **38**(1): 25-40
(程乐峰, 余涛, 张孝顺, 殷林飞, 瞿凯平. 信息 物理 社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战. 中国电机工程学报, 2018, **38**(1): 25-40)
- 44 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
- 45 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)
- 46 Yuan Yong, Zhou Tao, Zhou Ao-Ying, Duan Yong-Chao, Wang Fei-Yue. Blockchain technology: from data intelligence to knowledge automation. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1485-1490
(袁勇, 周涛, 周傲英, 段永朝, 王飞跃. 区块链技术: 从数据智能到知识自动化. 自动化学报, 2017, **43**(9): 1485-1490)
- 47 Yuan Yong, 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)
- 48 McClure S, Scambray J, Kurtz G [Author], Zhong Xiang-Qun [Translator]. *Hacking Exposed*. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
(麦克卢尔, 斯卡姆布智, 库尔茨 [著], 钟向群 [译]. 黑客大曝光. 北京: 清华大学出版社, 2010.)
- 49 Wang Fei-Yue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *Journal of System Simulation*, 2015, **16**(5): 893-897
(王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估. 系统仿真学报, 2015, **16**(5): 893-897)
- 50 Wang Fei-Yue, Qiu Xiao-Gang, Zeng Da-Jun, Cao Zhi-Dong, Fan Zong-Chen. A computational experimental platform for emergency response based on parallel systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, **7**(4): 1-10
(王飞跃, 邱晓刚, 曾大军, 曹志冬, 樊宗臣. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(4): 1-10)
- 51 Cui Kai-Nan, Zheng Xiao-Long, Wen Ding, Zhao Xue-Liang. Researches and applications of computational experiments. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(1): 1157-1169
(崔凯楠, 郑晓龙, 文丁, 赵学亮. 计算实验研究方法及应用. 自动化学报, 2013, **39**(1): 1157-1169)
- 52 Xiong Gang, Hou Jia-Chen, Liu Sheng, Zhang Jia-Lin, Fu Man-Chang. Chapter: Nuclear Power Automation, Report on Advances in Control Science and Engineering, Beijing: ChinaScience & Technology Press. 2011. 176-181
(熊刚, 侯家琛, 刘胜, 张家麟, 付满昌. 《控制科学与工程学科发展报告》专题报告“核电自动化”. 北京: 中国科学技术出版社, 2011. 176-181)
- 53 Xiong G, Dong X S, Hou J C. Chapter 14: Construction of artificial power systems based on ACP approach. *Service Science, Management, and Engineering*. Oxford: Elsevier Press and Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.
- 54 Wang Fei-Yue, Liu De-Rong, Xiong Gang, Cheng Chang-Jian, Zhao Dong-Bin. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, **9**(3): 1-12
(王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 程长建, 赵冬斌. 复杂系统的平行控制理论及应用. 复杂系统与复杂性科学, 2012, **9**(3): 1-12)
- 55 Gang Xiong, Wang Fei-Yue, Hou Jia-Chen, Dong Xi-Song, Zhang Jia-Lin, Fu Man-Chang. To improve safety and reliability of nuclear power plant with parallel system method. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2012, **32**(5): 1018-1026
(熊刚, 王飞跃, 侯家琛, 董西松, 张家麟, 付满昌. 提高核电站安全可靠性的平行系统方法. 系统工程理论与实践, 2012, **32**(5): 1018-1026)
- 56 Wang Dan, Bai Jia. FirmSys: a new business card of China's digital I&C system for nuclear power plant — Special interview with JIANG Guojin, Director, China Techenergy Co., Ltd.. *China Nuclear Power*, 2017, **10**(3): 302-305
(王丹, 白佳. “和睦系统”: 中国核电数字化仪控新名片 — 专访北京广利核系统工程有限责任公司总经理江国进. 中国核电, 2017, **10**(3): 302-305)



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 for Management and Control of 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.)



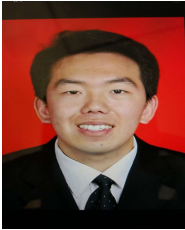
孙 奇 中广核工程有限公司公司首席信息官, 核电安全监控技术与装备国家重点实验室副主任. 主要研究方向为核电安全, 信息防护.

E-mail: sunqi@cgnpc.com.cn
(**SUN Qi** CIO of China General Nuclear Power Corporation (CGN). Deputy director of the State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment. His research interest covers nuclear power safety and information protection.)



江国进 北京广利核系统工程有限公司总经理, 研究员级高级工程师. 主要研究方向为通用核仪器, 核电站仪控系统.

E-mail: jiangguojin@cgnpc.com.cn
(**JIANG Guo-Jin** General manager of the China Techenergy Co., Ltd. His research interest covers general nuclear instruments and nuclear plant instrumentation and control system.)



谭 珂 中广核工程有限公司高级工程师, 核电安全监控技术与装备国家重点实验室副主任. 主要研究方向为核电控制, 仪控技术.

E-mail: tanke@cgnpc.com.cn
(**TAN Ke** Senior engineering of China General Nuclear Power Corporation (CGN). Deputy director of the State Key Laboratory of Nuclear Power

Safety Monitoring Technology and Equipment. His research interest covers nuclear power control and instrument and control technology.)



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.)



侯家琛 青岛智能产业研究院平行能源技术创新中心工程师. 主要研究方向为平行能源, 区块链, 智慧核电.

E-mail: jiachen.hou@qaii.ac.cn
(**HOU Jia-Chen** Engineer at Parallel Energy Technology Innovation Center, Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers parallel energy, blockchains, and smart

nuclear power.)



熊 刚 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, 北京市智能化技术与系统工程技术研究中心副主任. 主要研究方向为复杂系统平行控制, 智能制造, 智能交通.

E-mail: gang.xiong@ia.ac.cn
(**XIONG Gang** Professor at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems and Vice Director of the Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers parallel control of complex system, intelligent manufacturing, intelligent transportation.)



朱凤华 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副研究员. 2008 年于中国科学院自动化研究所获得工学博士学位. 主要研究方向为人工交通系统, 平行交通管理系统.

E-mail: fenghua.zhu@ia.ac.cn
(**ZHU Feng-Hua** Associate professor at the State Key Laboratory for

Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree in control theory and control engineering from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2008. His research interest covers artificial transportation systems and parallel transportation management systems.)



韩双双 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. 2013 年获得加拿大阿尔伯塔大学博士学位. 主要研究方向为平行网络, 物联网, 智能交通, 无线通信关键技术.

E-mail: shuangshuang.han@ia.ac.cn
(**HAN Shuang-Shuang** 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 from University of Alberta, Canada, in 2013. Her research interest covers parallel networks, internet of things, intelligent transportation system and wireless communications.)



董西松 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副研究员. 主要研究方向为复杂系统的建模与控制, 智能交通系统.

E-mail: xisong.dong@ia.ac.cn
(**DONG Xi-Song** Associate professor at the State Key Laboratory for

Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers the modeling and analysis of complex systems, and intelligent transportation system.)



王 嫻 北京广利核系统工程有限公司高级工程师. 2012 年获清华大学仪器科学与技术专业博士学位. 主要研究方向为核电数字化仪控系统安全评价与智能应用. E-mail: Wanglei5@cgnpc.com.cn

(**WANG Lei** Senior engineer of China. Techenergy Co., Ltd. She received her Ph.D. degree in instrument

science and technology from Tsinghua University in 2012. Her research interest covers the safety evaluation and intelligent application of nuclear power instrumentation and control system.)