

平行核电：迈向智慧核电的智能技术

侯家琛^{1,2}, 董西松^{1,2}, 熊刚^{2,3}, 张俊^{1,2}, 谭珂⁴

(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&北京市智能化技术与系统工程研究中心, 北京 100190;

2. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266113;

3. 中国科学院云计算产业技术创新与育成中心, 广东 东莞 523808;

4. 中国广核集团有限公司, 广东 深圳 518028)

摘要: 将基于 ACP 的平行系统思想与核电领域相结合, 形成一种新的研究框架, 即平行核电系统, 为核电站在复杂环境中实验、学习与实际工作提供便捷、安全的平台。基于平行核电理念, 阐述了平行核电系统的基本框架, 并介绍了描述、预测、引导模块的基本功能与实现方法, 探讨了其中的关键技术; 然后围绕核应急方面展望了平行核电系统在实际中的应用和所面临的挑战, 提出了平行核电系统的未来发展方向。

关键词: ACP 理论; 平行核电; 知识自动化; 核应急; 智慧决策

中图分类号: TP13

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201912

Parallel nuclear power: intelligent technology for smart nuclear power

HOU Jiachen^{1,2}, DONG Xisong^{1,2}, XIONG Gang^{2,3}, ZHANG Jun^{1,2}, TAN Ke⁴

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems & Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266113, China

3. Chinese Academy of Cloud Computing Industry Technology Innovation and Incubation Center, Dongguan 523808, China

4. China General Nuclear Power Group, Shenzhen 518028, China

Abstract: A framework to incorporate nuclear plants using the ACP based parallel system theory was proposed. This research framework has established a convenient and safe platform for nuclear power plants to experiment, learn and work in complex environments, namely parallel nuclear power system. Proceeding from the basic concept of parallel nuclear power, the basic framework of parallel nuclear power system was proposed, and the elementary functions and implementation methods of description, prediction and guidance module were also introduced. The key technologies were also further discussed. At last, this paper looks forward to the nuclear power system application in emergency, and the future development direction of parallel nuclear power system was proposed.

Key words: ACP theory, parallel nuclear power, knowledge automation, nuclear emergency, intelligence strategy

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-03-26

通信作者: 熊刚, gang.xiong@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目 (No.2018YFB1004800); 国家自然科学基金资助项目 (No.61773381, No.61773382, No.61533019); 广东省科技厅基金资助项目 (No.2016B090910001, No.2017B090912001)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (No.2018YFB1004800), The National Natural Science Foundation of China (No.61773381, No.61773382, No.61533019), Guangdong Science and Technology Department Project (No.2016B090910001, No.2017B090912001)

1 引言

近年来,我国核电产业不断坚持自主创新,产业规模与能力得到大幅提升。根据中国核能行业协会发布的《中国核能发展报告》(2018)蓝皮书^[1],截至2017年年底,我国在运核电机组达到37台,位列全球第四;发电量达2474.7亿千瓦时,位列全球第三。清洁能源占比过小是目前中国能源结构的突出问题,过于依赖火电导致中国环境问题日趋严重。核电属于清洁能源,较之煤炭发电,更能节约资源,符合国家节约资源的政策。可以预见,未来5~10年,在国家政策的强力推动下,以核电为首的清洁能源比例将得到大幅提升。

尽管核电正在向着信息化、智能化的方向稳步前进,但距离完整落地、成为生产力代表尚有距离。例如,核电站能否在大规模复杂电力供求下稳态运行?能否在多智能体系统间优化运行?能否在人在回路中找到最优收敛方案?这些都需要大量成本去追溯。然而,核电站却有着生产资料贵、研究代价高、场景高度危险等实际问题,还涉及种种社会因素,这些都导致核电站处在实验难的处境^[2]。

因此,本文尝试利用基于ACP(人工社会(artificial societies)、计算实验(computational experiments)和平行执行(parallel execution))的平行系统理论去解决核电站研究面临的问题。将理论研究、科学实验和计算技术3种科学研究手段结合起来,在常规核电研究的基础上,添加社会性关联问题的探索,解释各要素间关系的演化,以及自适应处理各类异常状态的能力,在复杂核电系统研究的多元化和集成化上又向前推进了一步,对核电系统迈向智能化发展具有重要的意义。

2 平行核电的发展历程

平行系统(parallel systems)的构想起源于1994年的智能系统研究。王飞跃提出了嵌入式协同仿真方法——即将协同仿真(co-simulation)嵌入实际系统以实现对实际系统的智能控制,并将其命名为影子系统(shadow systems)^[3]。2004年,王飞跃研究了复杂系统领域的人工现象(如人工生命、人工系统、人工社会)问题^[4],并强调了“虚”空间的重要作用;同时从不同层面开展了复杂系统与人工社会交叉融合^[5]的系统性研究,以及基于人工社会的计算实验理论与仿真研究^[6],提出了利用平行系统方法

解决复杂系统的管理与控制问题^[7]。同年,王飞跃就如何利用计算方法来综合解决复杂社会经济系统和城市综合发展的科学问题,正式提出了人工社会(artificial societies)、计算实验(computational experiments)与平行执行(parallel execution)相结合的ACP方法^[8-9]。2009年,王飞跃聚焦我国核电产业发展问题,将平行理论应用到核电领域,撰写了题为《平行核电体系与先进中国核电站ACP系统的框架》的国核自仪系统工程公司建议报告^[10]。针对美国AP1000型核电站,提出利用平行思想构建中国自己的更安全、更可靠、更高效的“先进中国核电站ACP(advanced China plants)”设想,首次提出了“平行核电”的概念,系统阐述了平行核电的指导思想、基础原理、应用方向和解决方案,以解决核电复杂系统中不可准确预测、难以拆分还原、无法重复实验等复杂性问题。同年,王飞跃在国核自仪系统工程公司杭州研讨会^[11]上系统地阐述了平行理论与核电产业结合的具体实施方法,以反应堆、核电站、核工业等为落地点,针对核电体系的实际系统流程,将生产内容分解成可定量、可计算、可执行的过程,使来自物理、社会及信息社会的知识经验形式化、计算化、可视化,促使实际流程向人工流程转变,从而化繁为简、减小核电系统相关目标的不确定性,实现核电系统的智能管控。

平行核电的涵义在于首先通过核电数据、算法、模型等在虚拟空间中构建人工系统;然后将人工核电系统作为虚拟空间的实验室,并在其中采用计算实验方法研究各种可能的现实情景,对影响复杂系统行为的各种可能的因素进行定量分析;最后,通过多种数据感知与数据同化方法实现人工系统与实际系统的平行执行^[12],测量实际核电系统的状态数据,更新人工系统的模型、参数、算法,确保人工系统的计算实验结果的可靠性,并通过计算实验分析支持实际核电系统的优化管理与控制。

此外,平行系统强调人工系统和实际核电系统的虚实互动和协同演化,注重从实际系统中测量系统状态和采集数据,并反馈到人工系统中更新系统状态、模型和参数,使得人工系统基于实际系统的实时状态开展计算,提高对实际核电系统行为预测的准确性。

3 平行核电系统架构

平行核电系统的构建及其与实际系统的互动

涵盖了描述智能、预测智能和引导智能3个层次^[12]。

3.1 平行核电之描述智能

描述智能 (descriptive intelligence) 解决如何在虚拟空间 (cyberspace) 构建人工系统、描述实际系统。由于核电系统具有很强的不确定性、多样性、复杂性, 无法满足可实验、可重复等要求, 很多实验难以或无法进行, 例如反应堆融堆、主泵损坏、安全壳碎裂等。因此, 复杂核电系统通常进行的是离线化、经验性的分析, 难以满足实时化、精确化的需求。

传统的核电描述主要是对核电物理的模拟, 进一步是对发电环境, 乃至社会环境的模拟和建模, 逐渐使得虚实之间形成了巨大的鸿沟。由于建模鸿沟的存在, 描述系统的建模方法由直接控制系统行为的“牛顿定律”转向间接影响系统行为的“默顿定律”^[13]。

描述智能特指基于数据通过学习和训练而构建的模型。现有大部分核电设备和环境模型的特

征在于, 给定当前系统参数时, 理论上可通过公式求解准确获得系统后续动态, 使系统可计算、可预测, 这类系统称为牛顿系统。对于一个仅由作物与环境构成的系统, 牛顿系统在一定范围内适用。但由于核反应的模型复杂度高, 实际应用中往往会替代为基于数据和智能算法的模型。这类基于数据的统计模型 (黑箱模型) 包括人工神经网络、支持向量机和模糊方法等, 是核电智能管理和控制的基础。以数值反应堆为例, 通过建立一个可预测的虚拟数值反应堆集成环境进行多专业化精准计算分析, 实现耦合协同, 预测真实反应堆从设计、制造、运行到退役等全生命周期内的各种性能、参数等^[14]。

平行核电的逻辑和原理如图1和图2所示。

平行核电的模型包括基于知识的模型、基于数据的模型, 以及数据和知识共同驱动的模式3类。

① 基于知识的模型。核电的知识描述主要包括主要反应堆因子的描述; 核反应的模拟为发电的

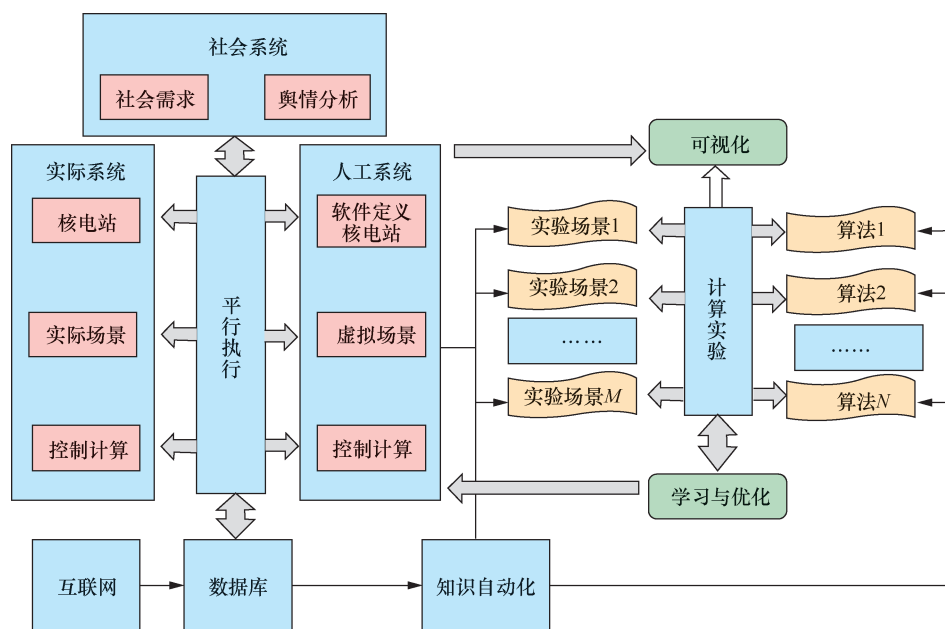


图1 平行核电逻辑

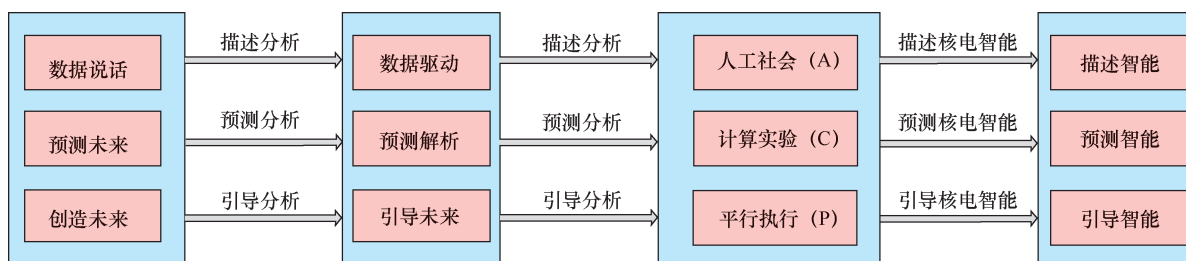


图2 平行核电原理

描述提供输入数据。一方面是社会用电需求的模拟，包括各种电力上网模型；另一方面是热循环模型，包括反应堆温度以及蒸汽温度模型。核反应的模拟可用于核电站的设计以及对核岛内能量流动的理解和教学。发电管理则包括仪控仪表系统、物资系统、人员因素与时间确定等，以对核电生产进行定量研究。核电经济因素的描述，包括核电站的投入与产出关系、电力市场价格的描述，以期指导未来的生产计划^[15]。

② 基于数据的模型。人工系统的构建方法将对象视为黑箱，关注输入和产出之间的关系，而不去对反应堆内部的复杂过程进行建模和模拟。通过构建堆芯、反应堆、核岛、核电站、社会相关模型，在数据充分的条件下，可以通过反复训练和学习达到期望的效果，实现人工系统构建的目的。

③ 数据和知识共同驱动的模式。核电站生产受核电站本身和外部环境影响，在不同的社会环境下，尽管人和社会因素有一定的不确定性，但仍保持一定的规律。根据人和社会规律的描述与数学统计模型相结合的思路，将描述核电站全生命周期的模型与机器学习相耦合，使得模型有很强的可塑性，同时还可以计算多种状态变量，使得对过程的完全不可知具有一定的透明性。这种方式不仅降低了对数据的依赖性，而且弥补了传统模型难以模拟

和预测人员操作等行为的不足。

3.2 平行核电之预测智能

预测智能（predictive intelligence）是建立在描述智能基础之上的对未来发展的预估和优化，其基于计算实验实现，反映的是基于当前和过去的规律的对未来的认识。

借助信息技术和人工系统，在虚拟空间中可快速预测不同环境或控制管理下的核电站，例如不同温度、堆芯、压力条件下的发电响应，以及在假定电力市场变化的判断下发电量的变化。除了受环境影响，核电站还受内在人员的影响。基于人的干预，对不同行为信息进行发电模拟和预测，以实现目标场景下的生成设计。

平行核电预测智能框架如图3所示。

要实现期望的目标，归根结底要解决如何对企业的生产过程、生产环境进行更好的管理和控制的问题。预测智能通过计算实验，对不同层面的管理进行预估和优化，认识实际系统各要素间的关系。实际上，核电系统每天都在产生并存储大量的数据，这些数据包含控制系统和设备运行的重要信息。利用大量的离线、在线数据和知识，实现面向计算实验的人工系统的分析和评估、控制器优化。同时实现计算实验的方案设计和验证，利用计算实验实现实际系统组成与行为的主动辨识和控制。

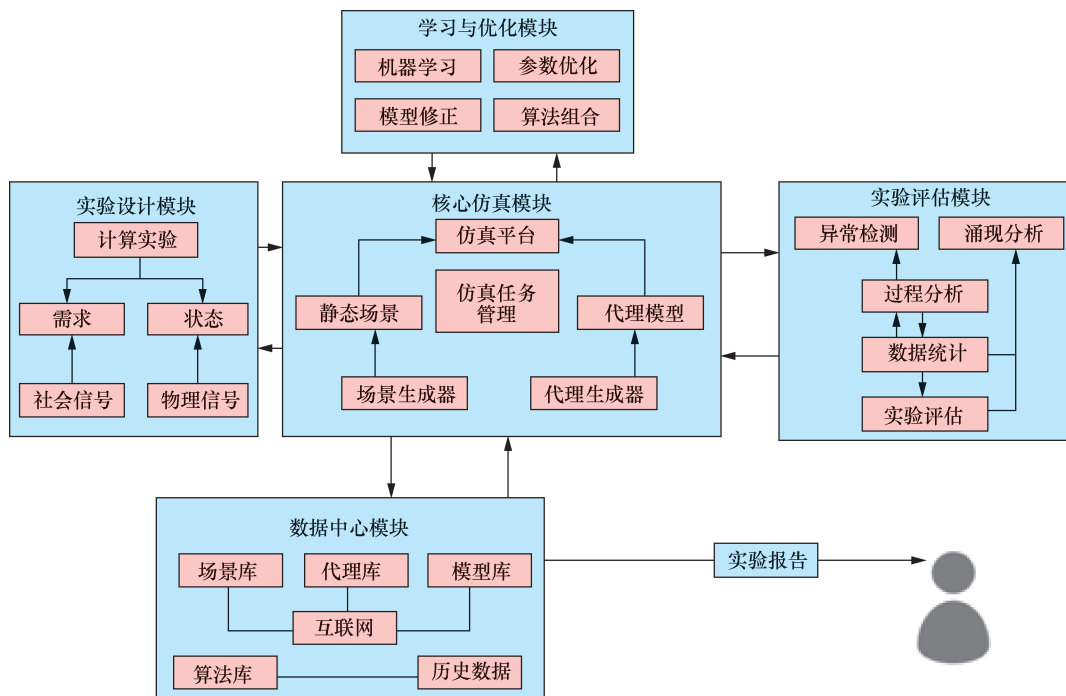


图3 平行核电预测智能框架

计算实验包含5个功能模块,即核心仿真模块、数据中心模块、实验设计模块、学习与优化模块、实验评估模块,通过模块间的协同,最终实现闭环交互。

(1) 核心仿真模块

经过可信度验证的人工核电系统,加载各类模型,添加各种假设和可能的情况到场景库,通过计算实验来验证。统计分析各个阶段的数据,反馈至系统初始建模阶段以提高平行核电的仿真效果。将虚实系统的单一组件或多组件相连,同时保持整体一致性,通过人工系统与实际系统的比较,动态修正人工核电系统模型。

(2) 数据中心模块

为了弥补实际数据在时间、空间、来源等方面的不足,在核电实际数据的基础上,通过计算实验,自我生成虚拟大数据,采用对偶方式进行虚实互动,修订、补足和平滑数据。通过多次迭代,逐步逼近实际分布,逐渐完备数据。虚拟数据是大数据,其大小由耦合关系和实验规模决定。

从产生数据到解决问题,每条数据会经历多次循环往复,每次循环过程包括6个阶段:数据获取、数据清洗、数据表示、数据解析、数据智能,数据引擎。数据集在各阶段的表现不同,从获取问题相关的数据集,到解决问题的数据集,数据集的动态反映为一个动力学轨迹,该轨迹包括了实际数据集、虚拟数据集、智能数据集的动态变化过程。经过多次扩张收敛、循环往复,最终收敛为核电系统的各类解决方案。

(3) 实验设计模块

利用核电站相关信息,为核电站设计各类实验情景,以计算机为试验场,进行各类软性实验。通过计算实验的场景生成、驱动机制、结果分析和实验评估等关键技术(并在此基础上针对特定的核电领域设计多种场景化实验),研究动态演化规律及其常规和非常规管控策略。

在人工系统上进行各种核电站异常情况下的计算实验是平行控制的特色。通过复杂核电系统异常情况下的计算实验,对系统的故障行为进行预测和分析,以形成应急预案,提前演练,减少实际系统发生故障的可能性和危害。在人工建模与验证研究的基础上,利用计算实验方法进行各种各样的“加速”“压力”“极限”“失效”“突变”等实验,分析复杂系统的演化结果,形成正常情况与应急情况下的应对方案,以指导复杂核电系统^[16]的安全、高效、可靠运行。

计算实验在数据处理阶段,从原始数据中选取特定的“小数据”,结合先验知识,并将其输入人工系统。结合特定的原始小数据与人工系统,使用预测学习的方法产生大量的新数据,构成解决问题所需要的“大数据”。在行动学习中运用强化学习思想,使用迁移学习来描述系统的动态变迁,通过指示学习的方式在人工核电系统对行动空间进行探索。通过学习提取,得到小知识,用于场景的精准知识,并将其应用于平行控制。而平行控制对引导系统进行特定的数据采集,获得新的原始数据,并再次进行新的平行学习,使系统在数据和行动之间^[17]得到优化。

(4) 学习与优化模块

学习与优化模块用于在计算实验中选择并训练算法,也可用于实际运行算法的优化。此处的学习与优化模块泛指使用机器学习或其他优化方法,可以是模糊规则推理、遗传算法、蚁群算法等控制领域的优化方法,也可以是强化学习、深度学习、迁移学习等人工智能方法^[18]。

(5) 实验评估模块

平行系统通过计算实验对不同的核电方案进行试验结果评估,如运行方案的有效性、事件反应方案的合理性、核电站规划的效益性等。有效解决方案的试验评估方式包括专家经验评估方式和模糊评估方案等。充分利用在计算实验设计、统计学习与数据挖掘方面的研究基础,研究基于实验数据的系统内在特性分析方法。采用贝叶斯网络模型、马尔可夫随机场模型、随机森林模型等,描述大规模复杂过程工业系统各要素间可能存在的相互关系,利用基于子空间分解的大规模智能优化算法的研究成果,实现超高维图概率模型的高效构建。在此基础上,研究基于关联存储的遗传规划技术,辅以响应面分析,从大规模复杂过程工业系统的各要素中发现那些对系统有重要影响的敏感要素,为系统预测与引导提供参考^[19]。

3.3 平行核电之引导智能

引导智能(prescriptive intelligence)是通过描述智能与预测智能找到有利的或优化的策略。在平行执行过程中,平行与实际系统持续相互反馈、相互引导,不仅要利用当前和过去的的数据,而且还要综合考虑期望结果、所处环境、资源条件等更多影响因素,在不停地对比分析所有可能方案的基础上,提出可以直接用于决策的建议或方案。通过提

高人工系统的地位与作用，构建实际系统与人工系统之间交互运行和过程演化的平行控制系统，采用可计算、可实验、可操作的方法，并采用传统的滚动优化与综合集成研讨厅的方法研究复杂系统中的科学决策问题，按照“不断探索和改善”的原则实现对智能的引导^[20-25]。

在核电领域，主要通过对实际系统和平行系统进行行为对比分析，完成对各自未来状况的预测，相应地调整控制方式，达到共同优化控制的目的。核电的引导智能包括平行核电系统的交互执行与过程演化策略。通过人工系统和实际系统之间的平行引导方式、相互作用机理和协议、交互学习控制策略，以及平行系统的交互执行和过程演化，解析各系统的动态，并对各种方案的执行效果进行评估，作为依据用于支撑控制决策。通过观察对评估方式或参数进行修正，并迭代进行优化和评估，实现滚动优化引导。与此同时，在引导过程中对平行控制系统的稳定性进行及时有效的评估，保证平行执行过程的可控性和可靠性^[26-30]。

平行核电引导智能框架如图4所示。

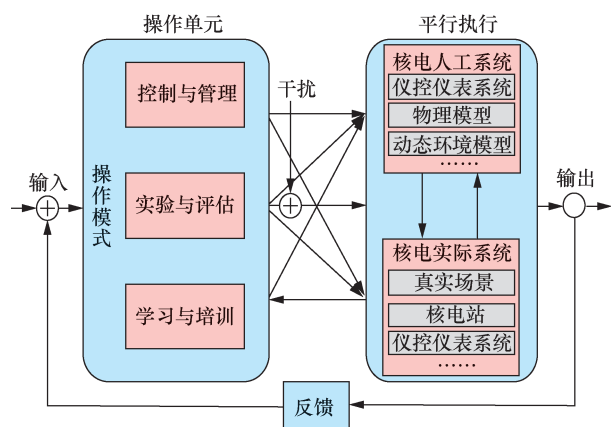


图4 平行核电引导智能框架

通过牛顿系统，对核电系统的各项参数进行控制，进而进行引导以及虚实交互。主要是选取各类指标，引导执行控制效果。从众多控制 Agent 中选取最适合用于平行执行的 Agent，通过基于 Agent 控制产生的数据，采用基于数据方法分析评价函数的 Lyapunov 性质对系统进行稳定性引导，同时对实际系统演化过程的评价函数进行迭代，采用基于数据的值迭代与策略迭代方法对系统最优性进行引导。

通过引入社会因子的默顿系统引导智能，实现核电系统的“数信协同”“感控协同”和“知智协

同”。通过多层次协同，海量的知智实体、感控实体、数信实体组成了由知识联结的复杂系统，依据一定的运行规则和机制，形成社会化的自组织、自运行、自优化、自适应、自协作的大核电组织，最大限度地解决了对核电系统中最关键的“人”的管控的难题，充分发挥平行系统的引导优势。通过引导，实现仿真人群体向真人的在线学习，从而实现虚实结合的自我探索学习^[31-36]。

4 平行核电系统的应用

我国“一案三制”的核应急管理体系，为各类非常规核突发事件提供了顶层解决框架和相应的管控模式。核事故灾害处理作为一项复杂的系统工程，其应对方式与体系结构运用基于 ACP 的平行系统理论框架来设计，进而从资源整合、信息交互、预案处置、决策机制、法律依循等方面分别提升现行虚实结合、可计算、可验证的核应急管理模式；同时，除了应急智能的培育与生成，还会计算各系统间的有机链接，借助信息集成、高性能计算、智能决策等方面的能力，以及人工智能重新定义应急管理体系的集成性、智能性，进而为现行核应急体系注入新的思路。

从核应急表征出发，面向核事故情景应对的需求，基于核应急技术体系，可设计源于情景的核应急管理机制和平战结合的平行核应急管理系统，其逻辑框架如图5所示^[37-40]。

(1) 情景驱动的平行核应急管理机制

由于核灾害的突发性，必须快速、准确地从灾害中做出决策响应。基于平行理论，结合非常规突发事件情景应对管理体制，给出情景应对驱动的平行核应急策略。以时间维度将平行核应急管理机制划分为事前准备、事中响应与事后恢复三部分。

事前应急准备机制主要是常态下的管理机制，利用物联网对关键核设施、设备及其区域内的设施进行管理监控，同时管理核应急演练、培训、指挥、预案评估、核应急资源管控等。

事中响应机制通过实时数据集成，综合核灾害现场以及可用应急资源状况，运用大规模计算进行综合研判，进而对灾害类型、状态和应急响应级别进行判定；根据判定结果启动相应的响应预案链，并运用现有资源、组织以及演化实验结果，通过细化重组，对预案和行动方式进行动态调整，形成新的整体响应方案；通过调配相应的资源，实现跨部

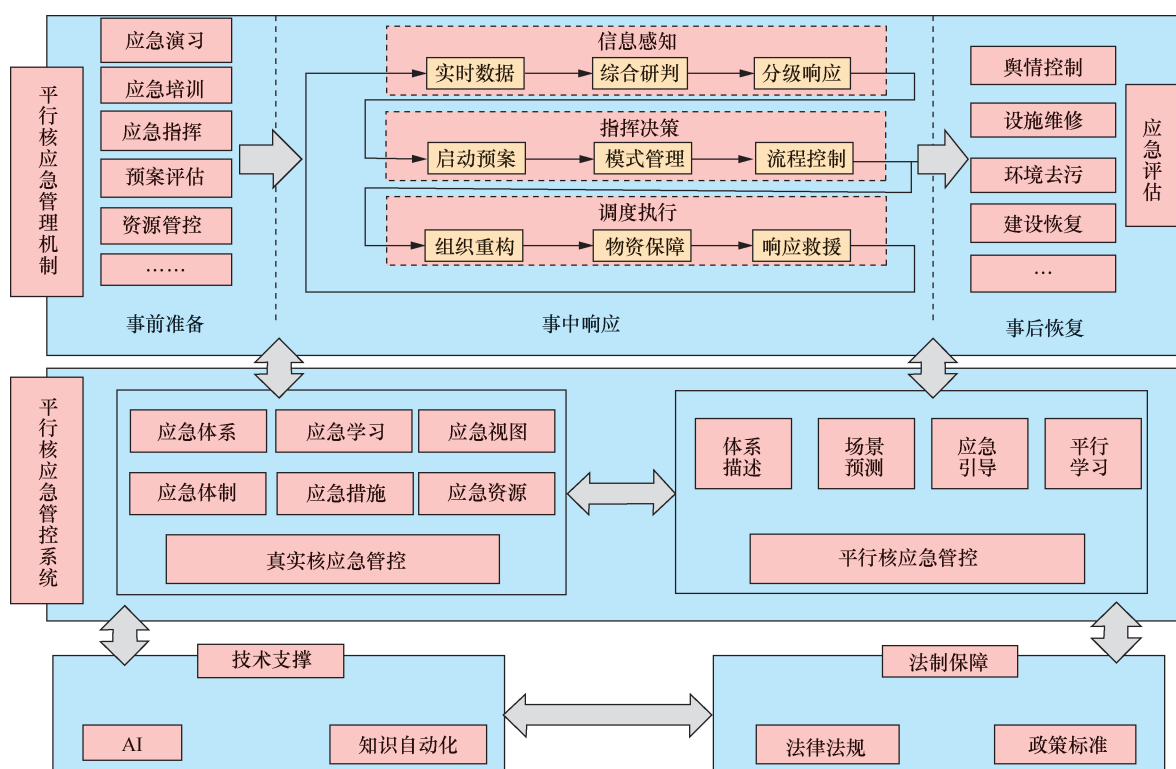


图 5 平行核电应急框架

门组织资源应急联动，协作执行响应救援任务。响应全过程将基于互联网实现，完成应急执行方案的动态调整，形成决策指挥、执行调度的闭环响应机制。

事后恢复机制是指核应急响应过程完成的后续过程，包括舆情监控、设施维修、恢复重建以及响应效果评估与经验报告总结等。

（2）虚实结合的平行核应急管控系统

为了在核应急中确保精确管控，智慧化运转核应急整体体系及各个环节，必须采用平行核应急管控系统。一方面，管理真实核应急管控系统，即核应急体系、应急视图、应急体制、应急措施等，建立在功能、层级、资源等方面的整合；另一方面，在平行核应急管控系统（即基于 ACP 理论的人工核应急系统）中，构建基于描述—预测—引导的平行体系，通过计算实验，对可能发生灾害情景的各时间节点建立时空切片进行分解，对不同的应急预案进行评估，预案包括可执行应急标准流程，并针对现有人、财、物的实际情况动态调整方案，使之具有高可行性。通过平行执行，快速实施跨领域集成的核应急方案。最后，通过人工智能技术、知识自动化等技术，为核应急响应提供技术支持。

平行核电应急系统如图 6 所示。

核应急系统采用基于 ACP 理论的平行方法，以大数据为基础，建立具有弹性、灵活扩展、按需分配的核应急平行系统，以满足核电系统信息应急对抗演练、重要基础设施与信息系统的应急测评、应急预警的需要。

平行系统由耦合的人工系统与真实系统构成。真实系统包括现实世界运用的应急系统、用户和核电站等应急参与者；人工应急系统与真实应急系统平行执行，是存在于计算机上的关键字应急“计算实验室”。平行系统实时监控真实与人工应急系统中的交易数据并存储到平行系统数据库中，人工应急系统基于虚拟与真实的应急数据，通过生成大量精确可控的计算实验来辅助产生最优决策并指导真实的应急过程；同时根据真实系统的反馈信息实现计算实验方案、决策支持算法等的研究、优化和创新。

核应急体系的表征在于，在给定当前状态与参数的情况下，无法通过求解而准确获得系统下一步的状态（即行为难以被精确预测）时，借助 ACP 理论与默顿系统，由信念和行为反馈出发，直接或间接地促成体系自我优化。这正是平行核应急系统的意义之所在。

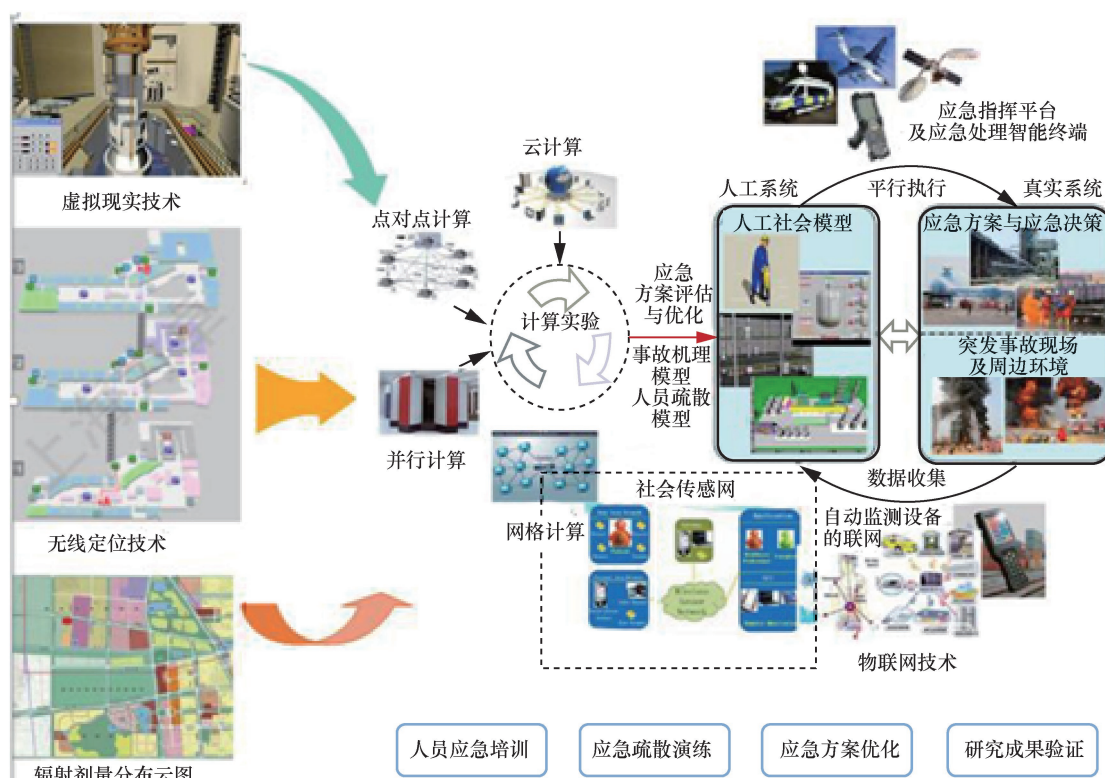


图6 平行核电应急系统

5 结束语

本文结合信息技术和核电发展进程,分析了发展平行核电的必要性和迫切性,提出了平行核电的理念和应用技术,介绍了平行核电系统体系及其实施领域,最后讨论了核应急管控系统的具体应用案例。

展望未来,通过基于 ACP 理论的平行系统,并结合知识自动化、云计算、大数据、人工智能等技术手段,可实现有机整合的、虚实结合的核电站控制管理系统,在一个平台上实现社会物理信息系统的深度融合,从而进一步提高我国核电产业的发展水平。

致谢

感谢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王飞跃教授在论文研究中给予的支持和指导。

参考文献:

- [1] 张廷克, 李闽榕, 潘启龙. 中国核能发展报告(2018)[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.
ZHANG T K, LI M R, PAN Q L. China nuclear energy development report(2018)[R]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2018.
- [2] 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[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
XUE Y S, XIAO S J. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [3] WANG F Y. Shadow systems: a new concept for nested and embedded co-simulation for intelligent systems[R]. 1994.
- [4] 王飞跃, 史帝夫·兰森. 从人工生命到人工社会——复杂社会系统研究的现状和展望[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 33-41.
WANG F Y, LANSING J S. From artificial life to artificial societies-new methods for studies of complex social systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(1): 33-41.
- [5] 王飞跃. 从一无所有到万象所归: 人工社会与复杂系统研究[N]. 科学时报, 2004, 4: 3-17.
WANG F Y. From nothing to where everything goes: research on artificial societies and complex systems[N]. Science Times, 2004, 4: 3-17.
- [6] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893-897.
WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 893-897.
- [7] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489.
- [8] 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[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.

- WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25-35.
- [9] WANG F Y, TANG S. Artificial societies for integrated and sustainable development of metropolitan systems[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2004, 19(4): 82-87.
- [10] 王飞跃. 平行核电体系与先进中国核电站 ACP 系统的框架[R]. 2009.
- WANG F Y. Parallel nuclear power system and framework of advanced China nuclear power plant ACP system[R]. 2009.
- [11] WANG F Y. Parallel control and management for complex system [R]. 2009.
- [12] 段伟. 平行仿真的内涵、发展与应用[J]. *指挥与控制学报*, 2019, 5(2): 82-86.
- DUAN W. Parallel simulation: motivation, concept and application[J]. *Journal of Command and Control*, 2019, 5(2): 82-86.
- [13] 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 等. 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[J]. *自动化学报*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- DENG J L, WANG F Y, CHEN Y B, et al. From industries 4.0 to energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2003-2016.
- [14] 白天翔, 曹东璞, 郑南宁, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用[J]. *自动化学报*, 2017, 5(15): 161-175.
- BAI T X, ZHENG N N, WANG F Y, et al. Parallel robotics and parallel unmanned systems: framework, structure, process, platform and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 8(15): 161-175.
- [15] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 1-8.
- XUE Y S, LAI Y N. Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 1-8.
- [16] 王飞跃, 孙奇, 江国进, 等. 核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. *自动化学报*, 2018, 5(13): 922-934.
- WANG F Y, SUN Q, JIANG G J, et al. Nuclear energy 5.0: new formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 5(13): 922-934.
- [17] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 40-51.
- LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 40-51.
- [18] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网动态协调优化控制体系[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- SUN Q Y, TENG F, ZHANG H G. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy Internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [19] 王飞跃, 李晓晨, 毛文吉, 等. 社会计算的基本方法与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.
- WANG F Y, LI X C, MAO W J, et al. Social computing: methods and applications[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.
- [20] 张俊, 王飞跃, 方舟, 等. 社会能源: 从社会中获取能源[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 7-20.
- ZHANG J, WANG F Y, FANG Z. Social energy: mining energy from the society[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 7-20.
- [21] 杨克巍, 李明浩, 鲁延京. 基于平行执行的装备体系涌现行为导向性方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 6(8): 1218-1225.
- YANG K W, LI M H, LU Y J. Parallel executing based method towards guiding emerged behaviors of weapon system of systems[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 6(8): 1218-1225.
- [22] 信息物理系统白皮书(2017)[R]. 中国信息物理系统发展论坛, 2017.
- Information Physics System White Paper (2017)[R]. China Information Physics System Development Forum, 2017.
- [23] ZHANG J, ZHENG X H, LI L. PDP: parallel dynamic programming[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 1(5): 1-5.
- [24] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习——机器学习的一个新型理论框架[J]. *自动化学报*, 2017, 43(1): 1-8.
- LI L, LIN Y L, CAO D P, et al. Parallel learning: a new framework for machine learning[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(1): 1-8.
- [25] XIN H, WANG F Y. Generative adversarial networks: introduction and outlook[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 4(11): 588-598.
- [26] WANG F Y, ZHENG N N, CAO D P, et al. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 4(11): 577-587.
- [27] 刘昕, 王晓, 张卫山. 平行数据: 从大数据到数据智能[J]. *模式识别与人工智能*, 2017, 8(9): 673-681.
- LIU X, WANG X, ZHANG W S. Parallel data: from big data to data intelligence[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, 8(9): 673-681.
- [28] 苏罡. 中国核能科技“三步走”发展战略的思考[J]. *科技导报*, 2016, 34(15): 33-41.
- SU G. The “three steps development strategy” of China nuclear power science and technology[J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(15): 33-41.
- [29] 李鹏程, 张力, 戴立操, 等. 核电厂数字化主控室操纵员的情景意识可靠性模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(1): 243-252.
- LI P C, ZHANG L, DAI L C, et al. Operator's situation awareness reliability model in digital main control rooms of nuclear power plants[J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2016, 36(1): 243-252.
- [30] 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[J]. *公共管理学报*, 2016, 2: 97-106.
- ZHU Z W, WANG Q, LV S P. Research on differences of multiple stakeholders' risk perception and social conflict—Empirical investigation of Z nuclear power project[J]. *Journal of Public Management*, 2016, 2: 97-106.
- [31] 王飞跃, 张俊. 物联网: 概念、问题和平台[J]. *自动化学报*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- WANG F Y, ZHANG J. Internet of minds: the concept, issues and platforms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- [32] 熊刚, 侯家琛, 刘胜, 等. 控制科学与工程学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 176-181.
- XIONG G, HOU J C, LIU S, et al. Chapter: nuclear power automation[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011: 176-181.
- [33] 熊刚, 王飞跃, 侯家琛, 等. 提高核电站应急可靠性的平行系统方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(5): 1018-1026.
- XIONG G, WANG F Y, HOU J C, et al. To improve safety and reliability of nuclear power plant with parallel system method[J]. *Systems Engineering-Theory and Practice*, 2012, 32(5): 1018-1026.
- [34] ZHANG L. The research on human reliability analysis technique in probabilistic safety assessment[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [35] 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系[J]. *指挥与控*

制学报, 2015, 1(1):107-120.

WANG F Y. CC 5.0: intelligent command and control systems in the parallel age[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 107-120.

- [36] 白天翔, 王帅, 赵学亮. 平行武器: 迈向智能战争的武器[J]. 指挥与控制学报, 2017, 2(10): 89-98.

BAI T X, WANG S, ZHAO X L. Parallel weapons: weapons towards intelligent warfare[J]. Journal of Command and Control, 2017, 2(10): 89-98.

- [37] HE Y L, LI X Y, WANG Y. Current research status and progress of nuclear energy virtual reactor in China and abroad[J]. Nuclear Science and Technology, 2015, 3(2): 41-47.

- [38] TOURAN N W, GILLELAND J, MALMGREN G T. Computational tools for the integrated design of advanced nuclear reactors[J]. Engineering, 2017, 3(9): 518-526.

- [39] 谢天, 周晓东, 王铁骊. 面向核应急响应的 S-BOX 集成模型[J]. 中国应急生产科学技术, 2015, 1(6): 22-27.

XIE T, ZHOU X D, WANG T L. Study on S-BOX integration model for nuclear emergency response[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 1(6): 22-27.

- [40] 谢天, 邹清明, 廖桑. 智慧核应急——新 ICT 环境下的新型核应急技术体系及管理模式[J]. 管理理论与方法, 2016, 17(6): 196-201.

XIE T, ZOU Q M, LIAO S. Smart nuclear emergency managing: a new technology system and management mode for nuclear emergency managing in new ICT era[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 17(6): 196-201.

[作者简介]



侯家琛(1986—), 男, 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。



董西松(1978—), 男, 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。



熊刚(1967—), 男, 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, 主要研究方向为复杂系统平行控制、智能制造、智能交通。



张俊(1981—), 男, 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。



谭珂(1975—), 男, 中国广核集团有限公司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站安全生产、智能控制。