



专栏：能源互联网

信息能源融合发展策略和体系架构

高鹏¹, 肖子玉¹, 张晟²

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080;

2. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100032)

摘要: 深度剖析了全球绿色低碳发展的迫切需求, 全球碳排放量持续上升, 仍不足以实现巴黎协定的温度目标, 绿色低碳发展已成为全球共识和发展趋势。进一步分析了我国能源现状及相关政策, 提出信息能源融合发展是未来社会数智化、低碳化发展的必然选择。随后提出信息能源融合发展的目标和体系架构, 并以信息系统为核心论证了信息能源融合的架构设计。该架构具有三大核心功能, 即智能化控制能源各环节的高效管理、信息通信与能源网络跨域协同、信息网络技术赋能各行业低碳化发展。同时, 还探讨了信息能源融合架构中的系统协同机制, 并提出针对信息能源融合发展的实施路径和策略建议。

关键词: 信息通信技术; 能源; 融合; 绿色低碳; 体系架构

中图分类号: TP27; TQ01

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024031

Strategies and system architecture for the ICT-Energy convergence

GAO Peng¹, XIAO Ziyu¹, ZHANG Sheng²

1. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: The global demand for green and low-carbon development was analyzed, highlighting that despite sustained increases in global carbon emissions, current efforts fall short of achieving the temperature targets set forth by the Paris Agreement. Green and low-carbon development has thus emerged as a universal consensus and a prevailing trend worldwide. China's current energy situation and relevant policies were further described, asserting that the ICT-Energy convergence is an inevitable path for future societal digitalization and low-carbonization. Then, the objectives and system architecture of ICT-Energy convergence were proposed. Central to the role of ICT Systems, the architecture embodies three core functionalities, realizing efficient management across all segments of the energy sector through intelligent control, fostering cross-domain synergy between ICT and energy networks and empowering various industries. An exploration of the system synergy mechanisms was conducted within the ICT-Energy converged architecture, and implementation pathways and strategic recommendations for ICT-Energy convergence were outlined.

Key Words: ICT, energy, convergence, green and low-carbon, architecture

0 引言

(1) 全球绿色低碳发展需求

信息能源协同发展的提出来自全球绿色低碳可持续发展的目标。全球可持续发展目标(sustainable development goal, SDG)是在联合国的主持下,2015 年 9 月在联合国可持续发展峰会上由世界各国政府共同参与制定的一系列旨在解决全球重大社会、经济和环境挑战的目标。这些目标旨在指导国际社会在 2015—2030 年间共同努力,确保地球能够在满足当前需求的同时,不损害后代满足其自身需要的能力,其中第 12 条提出采取紧急行动应对气候变化及其影响。2015 年 12 月,《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)第 21 次缔约方会议(COP21)在法国巴黎通过了《巴黎协定》,该协定设定了全球共同努力的目标之一,即全球气温上升控制目标:将全球平均气温升幅与前工业化时期相比控制在远低于 2℃,并努力限制在 1.5℃ 以内。

2023 年联合国气候大会发布的《2023 年排放差距报告》指出,全球碳排放量自 2019 年以来持

续上升,尽管全球在减少温室气体排放方面取得了一些进展,但仍不足以实现巴黎协定的温度目标。到 2030 年温室气体排放仍需分别下降 28% 和 42%,才能达到《巴黎协定》的气温上升 2℃ 和 1.5℃ 的目标。《2023 年排放差距报告》中给出的现有化石燃料基础设施的 CO₂ 排放示意图如图 1 所示,描述了承诺排放的化石能源开采的全生命周期和能源消费包括能源发、输、储、配、荷的基础设施与气温上升 1.5℃ 和 2℃ 的碳预算的关系。可见能源是温室气体排放的主要来源,目前占全球 CO₂ 排放量的 86%。

(2) 我国电力能源现状和政策分析

我国电力能源网低碳占比正在持续增强。根据中国电力企业联合会发布《中国电力行业年度发展报告 2023》,截至 2022 年,我国非化石能源(如风能、太阳能、水力、核能等)发电量为 31 443 亿千瓦时,比上年增长 8.6%,占总发电量比重 36.2%。电力能源网源、网、荷、储的能效和高效资源配置需要通过数字化和智能化手段进一步提升。信息通信网络作为支撑全社会数智化转型的新型基础设施,三大运营商总用电量虽然不到全社会用

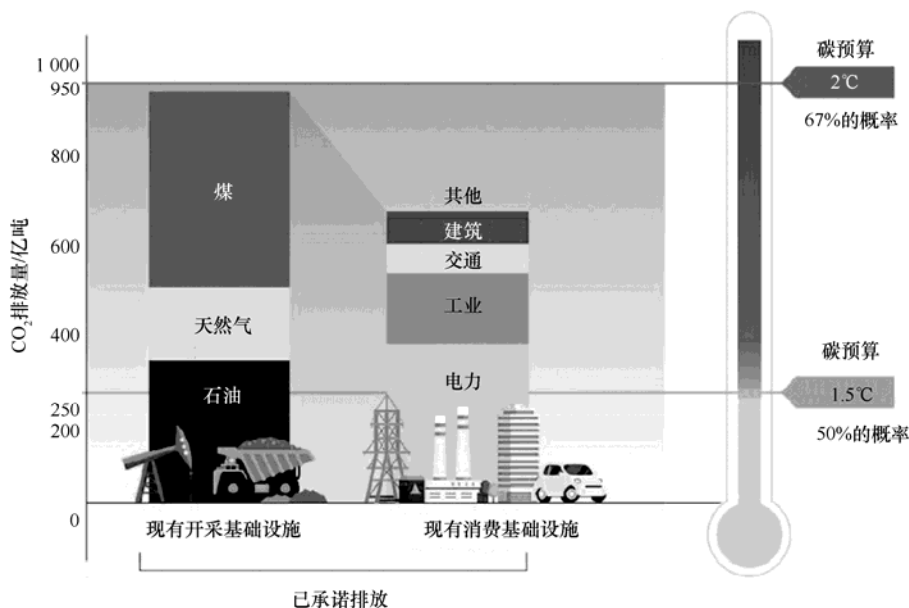


图 1 现有化石燃料基础设施的 CO₂ 排放示意图



电量的 2%，但其高速发展带来的倍增和飞轮效应，拉动产业数字化高速发展。通过优化和提高源、网、荷、储能效，促进全社会各行业能源高效利用，资源高效配置。

国家政策方面，“东数西算”政策旨在构建信息基础设施和数据流通治理协调发展布局，推动“能源换数据”，拉动西部能源丰富地区经济增长，助力“双碳”目标实现。《算力基础设施高质量发展行动计划》提出坚持绿色低碳发展，全面提升算力设施能源利用效率和算力碳效水平，深化算力赋能行业应用，并进一步明确到 2025 年，全国新建大型、超大型数据中心能源使用效率（power usage effectiveness, PUE）降到 1.3 以下，明确了促进绿色低碳算力发展的重点任务。《关于深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》明确提出协同推进“东数西算”工程，形成跨地域、跨部门协同发展合力，统筹算力和绿色电力协同建设的目标举措。

（3）信息能源融合的发展趋势

“十四五”时期，我国信息通信技术与经济社会各领域深度融合。到 2025 年，数字经济核心产业增加值占 GDP 比重达到 10%，数智化创新引领发展能力大幅提升，终端连接数大于 45 亿，工业互联网标识注册量达 500 亿。预计 70% 的规模以上制造业企业基本实现数字化。国家发展和改革委员会等部委《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》中，针对能源网的数智化发展提出推动能源网与物联网之间信息设施的连接与深度融合的目标。文献[1]提出构建融合信息技术与能源技术的新型能源体系，即能源互联网。文献[2]提出信息技术与能源系统的深度耦合，以信息技术引导传统能源产业向高效、智能、绿色的方向变革，即“比特”驱动“瓦特”变革，实现能源生产和消费模式的创新升级。文献[3]提出基于系统内部的自主、相互以及群体间的立体协同机制，解决复杂环境下能源生产和消耗的动态平衡与资

源配置问题。文献[4]提出通过借鉴和利用“信息—能量”基本关系原理，实现能源系统在采集、传输、存储及使用过程中的智能化与高效化，构建信息与能源一体化的新体系架构。文献[5]设计了适用于分布式信息能源系统的网络架构和评估节点重要度的方法，提升分布式信息能源系统的稳定性和效率。文献[6]针对无通信的信息物理系统，如内嵌数字控制系统的并网逆变器系统的稳定性问题进行研究，提出信息能源系统的信—物融合稳定性分析技术。文献[7]研究针对新一代信息能源系统，提出了一种考虑多元信息扰动的供能可靠性影响分析法。文献[8]实现微能源网全运行阶段基于信息物理融合的统一精准调控架构。文献[9]设计了“消纳评估模型层—电力市场运营管理层”的新能源消纳信息架构和数据标准化建模方法。文献[10]提出了一种多态能源协调控制策略，以实现最优控制。文献[11]针对我国能源与矿业安全风险提出信息技术助力我国能源与矿业治理体系变革的技术路径。文献[12]设计了一种信息共享方法，降低光伏清洁能源数据的差异化程度。文献[13]提出一种基于信息物理融合的可再生能源电网分布式能量控制模型。文献[14]建立了基于信息物理系统的能源路由器模型，并设计了计及多时间尺度能源的多能源路由器优化调度方法。文献[15]建立多能信息互补优化方法，对多能协同过程进行精准刻画与通用计算，提出了基于影响增量的可靠性评估方法。文献[16]定义了信息物理子系统的概念，并提出了一种适用于综合能源信息物理系统的可靠性评价指标。文献[17]提出了一种分层一体化建模方法。

从以上发展趋势看，以信息技术驱动工业、能源基础设施数智化、低碳化发展是社会发展的必然趋势。从信息能源融合研究方向上看，主要聚焦能源基础设施，通过信息物理模型、数据共享、人工智能和数据分析等数智化手段提升能源生产和消费模式，同时研究分布式信息能源系

统、多能微网控制、协同优化方法和关键技术，旨在全面提升能源系统的智能化水平和整体运行效能。而作为赋能数智化、低碳化的信息基础设施和能源基础设施从架构到跨域协同的研究较少涉及。

因此，本文针对信息基础设施与能源系统的融合发展方向，提出信息能源融合发展的目标和体系架构，并以信息系统为核心提出信息能源融合的架构设计。最后提出信息能源融合发展的策略建议。

1 信息能源融合发展目标和体系架构

1.1 信息能源融合发展目标

在国家“双碳”目标的驱动下，在“东数西算”工程部署、“云网强基”行动等政策共同推动下，为实现绿色低碳可持续发展，本文提出信息能源融合发展的目标。一是推动信息通信技术与经济社会各领域发展深度融合，信息系统、能源系统两大基础设施融合赋能产业数智化、低碳化转型发展，拉动全社会产业数智化升级和服务能力提升；二是信息系统和能源基础设施协同发展，实现信息网和能源网在空间、时间维度的高效协同配置和能效提升。以此为目标，进一步提出信息能源融合体系架构。

1.2 信息能源融合体系架构

信息能源融合体系架构如图 2 所示，提出四域协同一体闭环体系。四域指能源域、信息系统域、产业数字化域和信息能源管控域；协同指能源域的发（电）、输（电）、储（电）、配（电）域内高效协同，信息系统域内业（务）、算（力）、网（络）、能（源）高效协同，产业数字化域内生产系统和供能系统协同，以及能源域、信息系统域和产业数字化域的跨域时间、空间上的供需协同。例如，信息系统域内实现空间上业务应用层到信息系统算网层的协同、信息系统算网层到基础设施层的协同，时间上信息处理和信息传递的忙闲、峰谷协同，实现信息存储的热、温、冷、备协同，在时间和空间上实现能源供给与能源需求的协同。一体闭环体系包括信息感知、度量、预测和控制的闭环。

一体闭环的信息能源管控体系通过域内和跨域的协同优化，提高设计运维的质量、效率和可持续性。通过多维协同信息感知、度量、预测和控制的方法论，确保优化配置和优化运行。

- 信息感知：通过历史数据、多维数据的采集实现信息感知。
- 度量：通过 AI、大数据技术对感知信息进行处理分析，构建动态资源画像和统一指

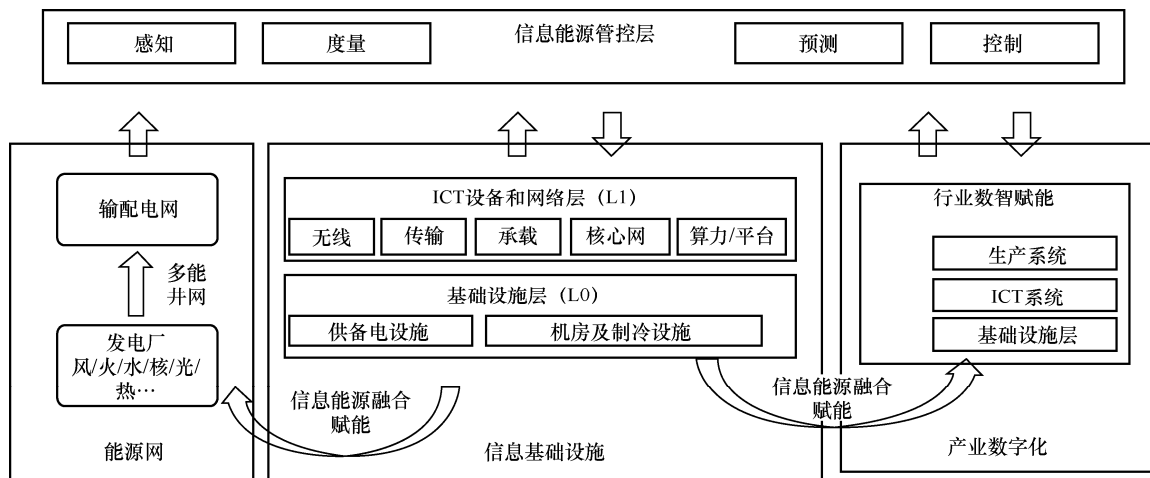


图 2 信息能源融合体系架构



标模型，实现在约束条件下的优化预测。

- 预测：基于度量评估和预测分析，构建协同优化策略。
- 控制：评估优化策略的可行性，并执行优化策略完成资源的协同优化，控制指令下发执行。

综上所述，信息能源融合体系通过整合四域资源，构建起一体化的闭环管理与优化系统。强调了各领域内部及其之间的深度协同，旨在提升能源利用效率、信息技术应用效能及产业运行智能化水平。信息能源融合体系的提出将助力信息化技术赋能产业升级，构建新型智慧能源生态，实现能源互联网的互联互通，提高社会经济可持续发展能力。

2 以信息系统为核心的信息能源融合架构设计

2.1 以信息系统为核心的信息能源融合功能和架构

信息能源融合发展是在绿色低碳背景下，实现信息系统对能源网和产业数字化赋能，并在空间、时间维度实现域内和域间的资源高效协同配置。信息能源融合架构要满足以下三大功能。

(1) 实现能源的发生、输送、存储和分配各环节的智能化控制。结合信息通信网络与电力网络的分布式态势，开展融合网络架构设计。

(2) 实现信息通信网络与能源网络跨域的协同设计，实现高效用能和智能管控。

(3) 通过信息网络技术和能源技术对各行业产业数字化、低碳化发展赋能。

以信息系统为核心的信息能源融合架构如图 3 所示，以下将针对信息系统域阐述信息能源融合的架构设计。

(1) 信息系统域信息应用层到信息网络系统层实现空间协同

信息系统域的发展需要满足不断叠加多样性应用需求，各应用场景对资源的要求不同。按用户群体分为面向个人和家庭类公众应用，面向行业、企业、政府类集客应用，面向新兴市场的创新应用。按应用的技术特性分为现场计算类（如算力主机、家庭网关）、边缘计算类（如云游戏、云安防）、远程计算类（如云计算、智能计算和推理）、存储类（如云盘、云备份）、任务类（如计时计算任务、计时存储任务、计时传送任务）等。各类应用与算网资源配置紧密相关，需要实现高效协同。

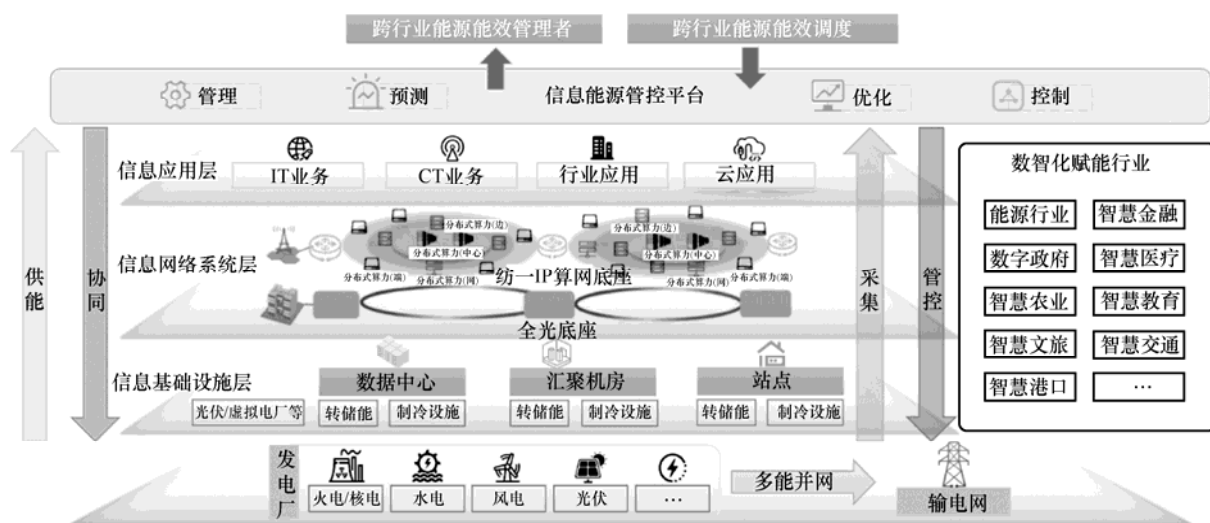


图 3 以信息系统为核心的信息能源融合架构

(2) 信息网络系统层到信息基础设施层实现空间协同

随着国家“东数西算”战略的逐步落实,结合京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝四大热点业务区域发展,全国各大运营商均提出数据中心资源布局的体系。总结为:面向四大热点业务区域集约化布局,增强西部国家枢纽节点能力,形成跨区辐射和边缘覆盖的梯次布局的信息基础设施。基于此空间布局,需要协同算网资源部署需求,实现面向计算类通用计算和智算需求、面向存储类低时延存储和存储备份需求、面向任务类服务需求能力与数据中心和互联网络资源的协同。

(3) 信息网络系统层内信息处理和信息传送的忙闲、峰谷上实现时间协同

结合用户行为的显著特征,通过云计算负荷率、网络流量负载、能耗的时间序列研究,分析和预测云服务、网络、能源的使用情况随时间变化的模式。一是优化应用系统部署策略;二是提高资源管理能力,制定资源弹性使用策略;三是提升资源的协同使用效率。

(4) 信息网络系统层内信息存储的热、温、冷、备实现时间协同

数据存储中的热、温、冷数据是根据数据的访问频率和重要性对数据进行分类的方式。热数据(hot data)是指频繁访问的在线类数据,温数据(warm data)是非即时的状态和行为数据,冷数据(cold data)指离线类不经常访问的数据。通过分类优化部署、优化存储资源,实现关键数据的可用性和经济性的高效平衡。

(5) 能源供给与能源需求的时空协同

实现信息通信处理与绿色能源供给在空间上的高效协同,信息通信和能源分配在时间上的高效协同,最终实现高效用能、智能管控。针对信息通信网络,实现纵向跨层信息能源协同;针对从数据中心到边缘节点的信息通信系统与能源系统的跨专业能效优化、协同调度。

2.2 信息系统域协同机制理论分析

(1) 信息应用布局的协同优化

- 应用到服务器的布局:了解服务器利用率随时间的变化、各类服务器工作负载的分布及其相关的硬件需求,量化针对特定工作负载优化硬件配置,形成优化业务模型。
- 服务器所在数据中心布局:结合业务访问时延限制、业务可用性可靠性要求、资源可分配状态、算效能效、绿能使用占比等多维因素,优化资源布局。

(2) 数据中心服务器负载与 PUE 的协同优化来自谷歌数据中心的一项研究^[18]给出的历史数据分析结论,数据中心 PUE 与服务器系统负载的相关性如图 4 所示,显示了 PUE 与服务器负载之间的关系。在 0~70%最大负载范围内出现了较大的 PUE 效率增益,并且渐近下降超过 70%。随着服务器系统负载率的逐步提高,数据中心供电和制冷装置更有效率地利用, PUE 随着负荷的增加而迅速降低。

由此可以得出以下结论, ICT 系统的设计负载与数据中心基础设施设计应协同优化;业务/应用系统设计和部署的运行负载利用率与算力设计应协同优化。

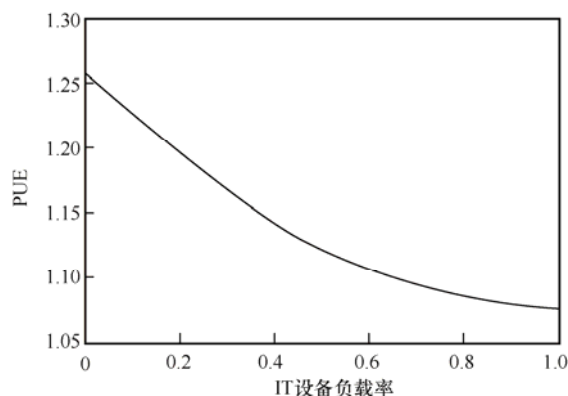


图4 数据中心 PUE 与服务器系统负载的相关性

(3) 服务器利用率及功率占比的协同优化

在服务器平均利用率下消耗的功率取决于服务器功耗与利用率的相关性。用于量化此相关性的



指标之一是最低功率（空闲功率）占比。受服务器性能、管理、设置的影响，不同服务器差异较大。根据美国数据中心能源使用报告^[19]，到 2020 年最低功率占比将达到约 44%，2023 年 SPEC 数据库中的值多在 20%到 28%之间，因为该数据库通常被认为代表了性能良好的服务器。此外，服务器利用率与功耗之间关系曲线通常是非线性的，因此对服务器能源使用的平均利用率水平建立非线性扩展曲线模型，有助于实施利用率优化措施。如有针对性地降低空闲状态下的功耗或在空闲时段关闭服务器，以及通过虚拟化整合提高服务器利用率。

3 结束语

信息技术与能源技术的协同发展是构建智能、绿色、可持续发展体系的重要路径，本文提出以下发展策略建议：明确信息能源融合的总体目标、体系架构和技术路径，促进商业模式和产业生态成熟发展；支持信息技术与能源技术的交叉融合研究，利用信息技术提升能源供给和消费各环节实现数字化、网络化、智能化；结合通信网络与电力网络的分布式发展态势，开展融合网络架构设计，促进信息流与能量流的深度融合；实现信息系统高效用能、智能管控架构，实现跨域、跨层信息能源协同；面向产业数字化行业，形成利用信息能源协同提升能效的理论体系及实现方案；建立信息技术与能源技术融合的标准体系，统一数据接口、通信协议和度量标准，提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7, 16.
- [2] 孙秋野, 王一帆, 杨凌霄, 等. 比特驱动的瓦特变革: 信息能源系统研究综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(1): 50-63.
- [3] 胡杰, 孙秋野, 胡旌伟, 等. 信息能源系统自-互-群立体协同优化方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 457-465.
- [4] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息-能量”基本关系看信息能源深度融合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2289-2296.
- [5] 龚钢军, 张哲宁, 张心语, 等. 分布式信息能源系统的耦合模型、网络架构与节点重要度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5412-5426.
- [6] 王睿, 孙秋野, 张化光. 信息能源系统的信-物融合稳定性分析[J]. 自动化学报, 2023, 49(2): 307-316.
- [7] 郭宏伟, 潘杰峰, 葛少云, 等. 考虑多元信息扰动的新一代信息能源系统供能可靠性分析[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 3-12.
- [8] 杨义, 杨苹, 李壮壮, 等. 基于信息物理融合的微能源网统一调控架构及优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 34-41.
- [9] 徐箭, 吴煜晖, 廖思阳, 等. 面向新能源消纳的信息-物理-社会标准化信息模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 104-113.
- [10] 席磊, 金澄心, 李彦营, 等. 基于信息松弛的多态能源协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 1-12.

- XI L, JIN C X, LI Y Y, et al. A polymorphic energy-coordinated control strategy based on information relaxation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 1-12.
- [11] 王国法, 张铁岗, 王成山, 等. 基于新一代信息技术的能源与矿业治理体系发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 176-189.
- WANG G F, ZHANG T G, WANG C S, et al. Development of energy and mining governance system based on new-generation information technology[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 176-189.
- [12] 徐潜, 益西措姆, 白玛央宗, 等. 基于信息共享的光伏清洁能源输出功率预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 153-158.
- XU Q, YIXICUOMU, BAIMAYANGZONG, et al. A forecasting method of photovoltaic clean energy output power based on information sharing[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 153-158.
- [13] 朱灵子, 翟勇, 唐建兴, 等. 基于信息物理模型的可再生能源电网能量平衡控制[J]. 可再生能源, 2022, 40(2): 254-259.
- ZHU L Z, ZHAI Y, TANG J X, et al. Energy balance control of renewable energy grid based on cyber-physical model[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(2): 254-259.
- [14] 柳梦琳, 马大中, 孙秋野. 基于信息—物理模型的多能源路由多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 32-41.
- LIU M L, MA D Z, SUN Q Y. Multi-objective optimization of multi-energy router based on a cyber physical model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 32-41.
- [15] 张军, 霍现旭, 戚艳, 等. 多能信息交互支撑的综合能源协同优化调度对综合供能可靠性影响分析技术[J]. 供用电, 2022, 39(3): 9-17.
- ZHANG J, HUO X X, QI Y, et al. Impact analytical technique for reliability of complementary integrated energy system based on the multi-energy information interaction scheme[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(3): 9-17.
- [16] 郑焕坤, 吕婷婷, 孙耀斌, 等. 考虑信息设备故障的综合能源信息物理系统可靠性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3078-3087.
- ZHENG H K, LYU T T, SUN Y B, et al. Reliability analysis of integrated energy cyber physical system considering information equipment failure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3078-3087.
- [17] 范宏, 王宏祥, 张树卿. 综合能源信息物理系统的分层建模和能量-信息流混合计算方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3028-3039.
- FAN H, WANG H X, ZHANG S Q. Hierarchical modeling and energy-information flow hybrid calculation of integrated energy cyber physical system[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3028-3039.
- [18] GAO J. Machine learning applications for data center optimization[R]. Google, 2014.
- [19] SHEHABI A, SMITH S, SARTOR D, et al. United States Data Center energy usage report[R]. 2016.

[作者简介]



高鹏 (1970—), 男, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司正高级工程师、副院长兼总工程师, 主要研究方向为通信组网与智慧运维。



肖子玉 (1969—), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司正高级工程师、专业总师, 主要研究方向为算力网络、5G/6G 网络。



张晨 (1970—), 男, 中国移动通信集团有限公司正高级工程师, 主要研究方向为 5G/6G 网络、绿色节能技术、信息能源融合技术等。