

氢赋能零碳能源系统设计与优化研究进展

刘晋辉¹, 徐占伯¹, 吴江¹, 郭王懿¹, 简禧彦¹, 管晓宏^{1,2}

(1. 西安交通大学自动化科学与工程学院, 710049, 西安; 2. 清华大学自动化系, 100084, 北京)

摘要: 氢电互补是实现我国“双碳”目标的必然之路,然而氢能引入综合能源系统后,氢、电、冷、热、可再生等多种能源耦合使得零碳能源系统结构设计、运行优化以及控制的复杂性大幅增加。西安交通大学管晓宏教授团队在国家“双碳”目标指引下,在零碳能源系统结构设计、面向零碳运行的优化方法、能碳协同管控技术 3 个方面取得了开创性成果。首先,设计了氢赋能零碳能源系统供-储-需协同的新结构,提出了氢赋能零碳能源系统规划方法,支撑了百余个建筑或工业园区,数据中心等用能场景的零碳能源系统的最优规划。其次,针对能源系统中存在的供需随机特性以及跨时间尺度差异问题,从计算架构、不确定性建模与动态调度机制切入,提出了一系列创新性运行优化和能碳管理方法,在国际学术前沿取得了系列开创性成果。最后,开发了高效协同、适时交互的智能感知-弹性通信-自主计算-协同优化一体化平台,应用于榆林零碳分布式能源中心,实现系统年化运行成本降低超 36%,将每吨标煤能耗碳排放降低至 0.19 t,引领了能源系统的绿色化、智慧化发展。未来,氢赋能零碳能源系统在结构设计、运行优化和协同管控 3 个方向上仍需探索,其技术突破与工程落地将会是能源行业绿色变革的关键。

关键词: 零碳能源系统;氢能;结构设计;运行优化;能碳管理

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604008 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0099-16

Research Progress on Design and Optimization of Hydrogen-Enabled Zero-Carbon Energy Systems

LIU Jinhui¹, XU Zhanbo¹, WU Jiang¹, GUO Wangyi¹, JIAN Xiyan¹, GUAN Xiaohong^{1,2}

(1. School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Hydrogen-electricity complementarity is an inevitable pathway for achieving China's "dual-carbon" goals. However, the integration of hydrogen energy into integrated energy systems significantly increases the complexity of structural design, operational optimization, and control for zero-carbon energy systems, due to the coupling of multiple energy sources such as hydrogen, electricity, cooling, heating, and renewables. Guided by the national "dual-carbon" goals, pioneering achievements have been made by the research team led by professor Guan Xiaohong from Xi'an Jiaotong University in three key areas: the structural design of zero-carbon energy systems, optimization methods for zero-carbon operation, and energy-carbon coordinated management and control technologies. First, a novel "supply-storage-demand" collaborative structure for

收稿日期: 2025-09-26。 作者简介: 刘晋辉(1996—),男,助理教授;徐占伯(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62192755,62192752,623B2083)。

网络出版时间: 2025-12-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251218.1010.004>

hydrogen-enabled zero-carbon energy systems was designed, and a corresponding planning method was proposed. This method has supported the optimal planning of zero-carbon energy systems for over 100 energy-consuming scenarios, including buildings, industrial parks, and data centers. Second, to address the stochastic characteristics of supply and demand and cross-time-scale differences in energy systems, a series of innovative operational optimization and energy-carbon management methods were developed from the perspectives of computational architecture, uncertainty modeling, and dynamic scheduling mechanisms, yielding pioneering results at the international academic frontier. Finally, an integrated platform featuring efficient collaboration and timely interaction, encompassing “intelligent perception, elastic communication, autonomous computing, and collaborative optimization,” was developed. Applied in the Yulin zero-carbon distributed energy center, this platform has achieved a reduction of over 36% in the system’s annual operating cost and lowered carbon emissions per ton of standard coal equivalent to 0.19 tons, thereby advancing the green and intelligent development of energy systems. Future exploration in hydrogen-enabled zero-carbon energy systems is still required in the directions of structural design, operational optimization, and coordinated management and control. Technological breakthroughs and engineering implementation in these areas will be pivotal for the green transformation of the energy industry.

Keywords: zero-carbon energy systems; hydrogen energy; structural design; operational optimization; energy and carbon management

为了应对日益严重的能源和环境危机,推进绿色能源系统的低碳转型势在必行。据国际能源署统计,全球用于电力与热力行业的碳排放占比约为43%,在我国的比例则高达55%,电力与热力的生产与供应是我国减少碳排放的重点领域^[1]。

高比例可再生能源的集成是降低能源系统碳排放的必经之路。太阳能、风能和水能是可再生能源占比最高的3大形式,可再生能源被广泛用于替代化石燃料来减少碳排放。我国提前6年实现了2030年可再生装机容量1 200 GW的目标^[2],预计2030年全球新增可再生能源装机容量中有一半来自中国。然而,可再生能源的出力与能源需求的适配仍十分严峻。根据2025年的统计数据,我国风电和光伏的装机容量已经达到43.2%,但其出力占比仅23.6%^[3]。光伏和风电虽然成本较低并且应用广泛,但在当前电力能源结构对其功率要求瞬时平衡的前提下,这两种形式因存在间歇性、随机性和波动性而无法被充分利用^[4-5]。水力发电虽然具有惯性适合电力系统,但其开发在很大程度上依赖自然资源,通常需要巨额投资^[6-7]。

储能系统的集成是解决可再生能源随机性导致的弃风、弃光问题的重要手段。目前的工业级储能包括电化学储能、机械储能、热储能、化学储能等。储能系统通常与可再生能源资源、多能源负荷组成

分布式综合能源系统,其中包括:能量生产、能量存储、能量转化和能量消耗4大环节。由于分布式综合能源系统具备能源生产的灵活性、能源传输的延迟性和惯性、能源存储的时移特性以及能源消费的灵活性,通常能通过充分利用可再生能源来提高能源效率。在需求侧管理中,分布式综合能源系统通过激励措施和电价调整来控制需求,并解决特定时间点的供需差异。然而,分布式综合能源系统具有规模较小、供需随机性强、经济因素敏感等特点,因此储能系统的选型对其经济性和零碳运行至关重要^[8-9]。

氢能因其清洁性和可再生性被视为21世纪的终极能源^[10]。从储能成本和储能规模两个角度来看,氢能非常适配分布式综合能源系统。氢能易于在储罐中储存,氢燃料电池可高效转化为电能和热能,且零污染、零碳排放,其应用规模可从亚MW级到多MW级不等。氢燃料电池是一种很有前景的氢气利用技术,在该技术中,氢气与氧气反应生成水,并转化为电能和热能,从而形成一个热电联产系统。通过氢储存和协调运行,在许多情况下,可再生能源可以被100%利用,从而满足能源需求。这也为实现零碳能源供应铺平了道路,因为氢的生产和利用过程是一个水到水的循环,不产生污染和碳排放。

引入氢能设备虽然为系统提供了更大的灵活性,使其具备零碳供能的能力,但氢赋能零碳能源系统仍面临三重亟待突破的技术挑战。其一,高比例风电、光伏等可再生能源固有的间歇性、随机性与波动性,使系统实时供需平衡难度剧增,传统依赖化石能源调峰的调控模式已无法适配零碳目标下的运行需求,亟需研发兼顾灵活性与经济性的优化调度技术,以保障可再生能源的高效消纳。其二,氢能的引入虽为跨时间尺度储能与多能互补提供了有效路径,但氢、电、冷、热等多能深度耦合引发的设备动态特性差异(如电解槽启停时滞、燃料电池功率响应速度限制),能量转换环节损耗叠加等问题,导致大容量氢能与多能系统的高效集成及协同控制成为行业关键难题。其三,绿色低碳发展要求推动能源系统向全生命周期零碳演进,而数字化、智能化技术的革新虽为系统精准建模与实时调控提供了新工具,但如何实现数据-机理-决策深度融合,构建兼顾零碳目标与经济运行的能碳协同管控体系,仍是尚未完全攻克的技术卡点。

针对上述挑战,西安交通大学管晓宏教授团队深耕氢赋能零碳能源系统领域研究多年,以突破多能耦合系统设计、供需随机匹配优化调度、能碳协同智能管控3大核心技术瓶颈为目标,在零碳能源系统结构设计、面向零碳运行的优化调度方法及能碳协同管控技术3个方向取得开创性成果。在系统结构设计层面,创新性地提出氢赋能零碳能源系统供-储-需协同的新结构,支持风、光、绿电直连,实现了绿电完全消纳、高效能源供给、多能协同存储和余热回收利用等,研发适配建筑园区、数据中心、5G基站等多场景的系统规划设计方法,为氢能与多能系统高效集成提供了结构范式。在优化调度方法层面,针对能源系统供需随机特性(如可再生能源出力波动、用户负荷变化)及跨时间尺度差异(如氢能、地热的长时储能与电能短时调度协同),从计算架构、不确定性建模与动态调度机制切入,提出了一系列创新性运行优化方法,在国际学术前沿形成系列引领性理论成果。在能碳协同管控技术层面,开发了实时交互、高效协同的智能感知-弹性通信-自主计算-协同优化一体化平台,通过实时感知能耗模式、动态调整调控策略,实现零碳目标与经济运行的双重平衡。

上述研究成果已成功落地于榆林科创新城零碳智慧分布式能源中心,实践数据表明:该系统年化运行成本降低超36%,单位能耗碳排放控制在0.19 t标煤的超低水平,获得中国电力企业联合会“零碳园

区”认证。团队取得的系列研究成果与应用实践不仅解决了氢能引入综合能源系统的技术瓶颈,更引领能源系统向绿色化、智慧化方向发展,为我国能源行业绿色转型与“双碳”目标的实现提供了关键技术支撑与工程示范。

1 氢赋能零碳能源系统结构设计

1.1 氢赋能零碳能源系统结构

氢能为能源系统实现零碳提供了新的技术路径。氢赋能零碳能源系统是一种以氢能为核心能源介质的新型能源架构^[11-12],通常包括可再生能源、氢能系统、供冷供热设备、储能系统以及用户用能负荷,并可从电网、氢市场购入电能与氢能。氢赋能零碳能源系统的一种典型结构如图1所示。

由图1可知,典型可再生新能源包括光伏发电、太阳能集热、风力发电等。氢能系统包括燃料电池热电联产系统、电解槽。供冷供热设备包括吸收式制冷机、电制热设备、电制冷设备等,储能设备包括储氢罐、热水箱、冷水箱、蓄电池等。可再生能源产生的电力接入到系统供电线路,提供电力来源或用以制氢。电解槽利用富余可再生能源制氢,所制得氢能可存储在高压储氢罐中供燃料电池热电联产单元使用,同时,电解槽工作所产生的余热可加以利用。燃料电池热电联产单元利用储氢罐中所存储的氢或从氢市场购氢发电,在产电的同时产热。

储能系统是氢赋能零碳能源系统中的重要结构,为了实现整体零碳经济运行,系统通常包含多种储能设备,协同应对系统各个时间尺度上的波动性。通常在规划设计阶段根据系统规模、可再生能源资源、多能源需求特性来对储能系统进行选型定容。氢赋能零碳能源系统中的储能设备可以根据时间尺度和能源形式划分,其中秒级以及毫秒级尺度的储能主要为蓄电池,小时级储能包括储热罐和储冷罐,跨季节储能包括有储氢瓶以及地热井。系统通过协同多种时间尺度的储能设备协同运行,实现系统供需的多尺度匹配。

系统零碳运行的核心要求是其所有能量来源均为绿色清洁能源。氢赋能零碳能源系统的能量来源包括光伏等可再生能源和外购氢气,均为零碳能源形式。氢赋能零碳能源系统从结构上具备零碳供应多能源的潜力,氢能设备的引入也为系统提供了更大的灵活性,进而实现零碳供能。通过多种供储设备协同运行,可以实现可再生能源的100%利用并满足负荷需求^[11]。

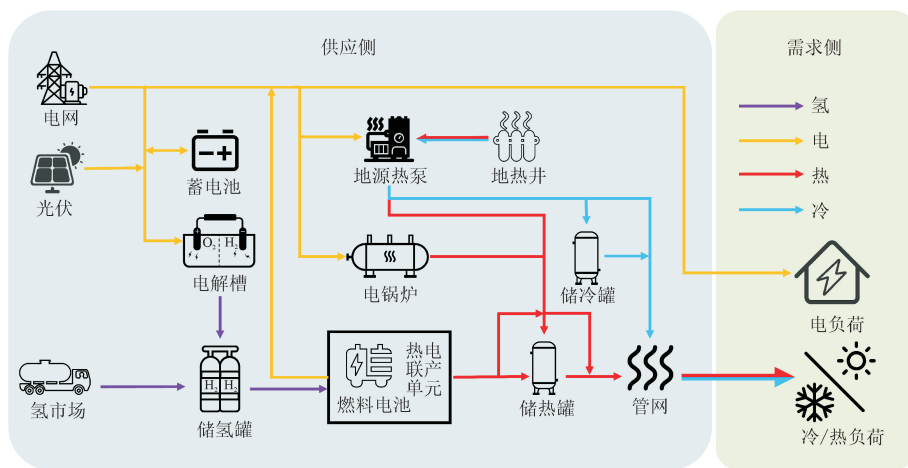


图 1 氢赋能零碳能源系统典型结构

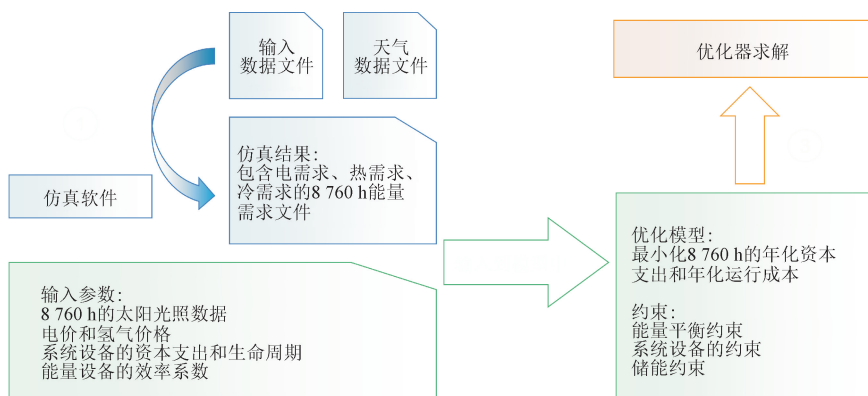
Fig. 1 Typical structure of a hydrogen-enabled zero-carbon energy system

1.2 系统容量最优规划设计方法

氢赋能零碳能源系统的规划设计是实现其安全、经济、零碳运行的关键环节。但是,氢赋能零碳能源系统的规划设计仍然面临两个关键挑战。其一,在氢赋能零碳能源系统中,氢、电、冷、热等多种能源介质与能流之间的复杂耦合与转换关系难以精细刻画。其二,系统结构中的储能单元导致能量供需关系呈现跨时段耦合特性。因此,氢赋能零碳能源系统的规划设计需在系统物理机理的基础上统筹考虑初投资与运行成本之间的权衡。构建包括多时间尺度储能设备的规划模型,例如构建短时间尺度的蓄电池、长时间尺度的储热储冷、跨季节储能的氢和地热等模型,通过求解最优规划问题进一步合理确定各类储能单元的容量配置,从而提升系统的整体经济性与环境效益。

为了克服上述挑战,作者团队^[13]首先基于对系

统中多种能源介质与能流间耦合转换关系的分析,明确描述了多能流供需能量平衡特性,并通过储能单元刻画其耦合与转换关系。进而,将该系统规划问题构建为混合整数线性规划模型,以系统年化投资成本与运行成本最小化为目标,优化确定供能设备与多种储能单元的容量配置及设备选型。算法框架如图 2 所示,该算法首先基于建筑结构、能源设备及气象参数数据,使用 EnergyPlus 进行能耗模拟,生成全球典型区域的全年逐时电力、供热与供冷能量需求曲线,进而构建规划问题求解最优配置。研究表明,所提规划方法可以显著降低系统成本和碳排放。与传统电力能源系统相比,氢赋能零碳能源系统在不同风光资源条件、不同负荷类型下均可实现高比例降碳,在强太阳辐射区域可以实现 100%降碳排放。此外,在美国能源部的目标氢价条件下,该系统运行成本最高可降低 60%。

图 2 系统容量最优规划算法框架^[13]Fig. 2 Algorithm framework for optimal planning of system capacity^[13]

1.3 典型应用场景

1.3.1 建筑园区

建筑能源系统的减碳工作至关重要,其碳排放量约占全球总量的21%^[14],在“双碳”目标推动下,建筑能源系统需要引入清洁能源以实现脱碳。但是,在建筑能源系统减碳的过程中,仍存在以下困难。第一,现有研究往往假定不同功能建筑具有同质化的用能特征,未能充分考虑建筑结构、使用模式及用能需求的差异性。第二,建筑用能需求模型多采用年度聚合或完全时间细化的建模方式,难以同时保证统计准确性与时序动态性,影响系统规划的精确度。第三,尽管基于概率方法在能源系统调度领域中被广泛应用,但在零碳系统规划中尚未得到充分重视,现有规划方法通常采用严格的零碳假设,导致电源与储能容量配置偏于保守,降低了系统经济性^[15-16]。

针对以上挑战,作者团队开发了适用于住宅、办公和商业建筑的氢赋能系统混合建模与规划框架^[17],如图3所示。该框架首先通过结合年度能源需求的统计估算与小时级物理仿真,开发了面向特定建筑类型的混合需求模型,以表征其用能特征。其次,在此基础上构建了混合整数线性规划模型,实现了在严格遵守零碳排放约束下能源设备容量与运行策略的协同优化。最后,为了缓解零碳排放约束所导致的系统容量严重冗余问题,作者团队通过机会约束规划框架对模型约束进行松弛,允许对碳排放限制进行可控概率的放宽,从而更好地平衡系统可持续性和经济性之间的权衡。实验结果表明:所提框架可使办公建筑在实现近零碳排放的同时,最高节省37.4%的系统成本;通过对多类型建筑进行整合优化,燃料电池的利用率显著提升,年化成本节约超过11%。

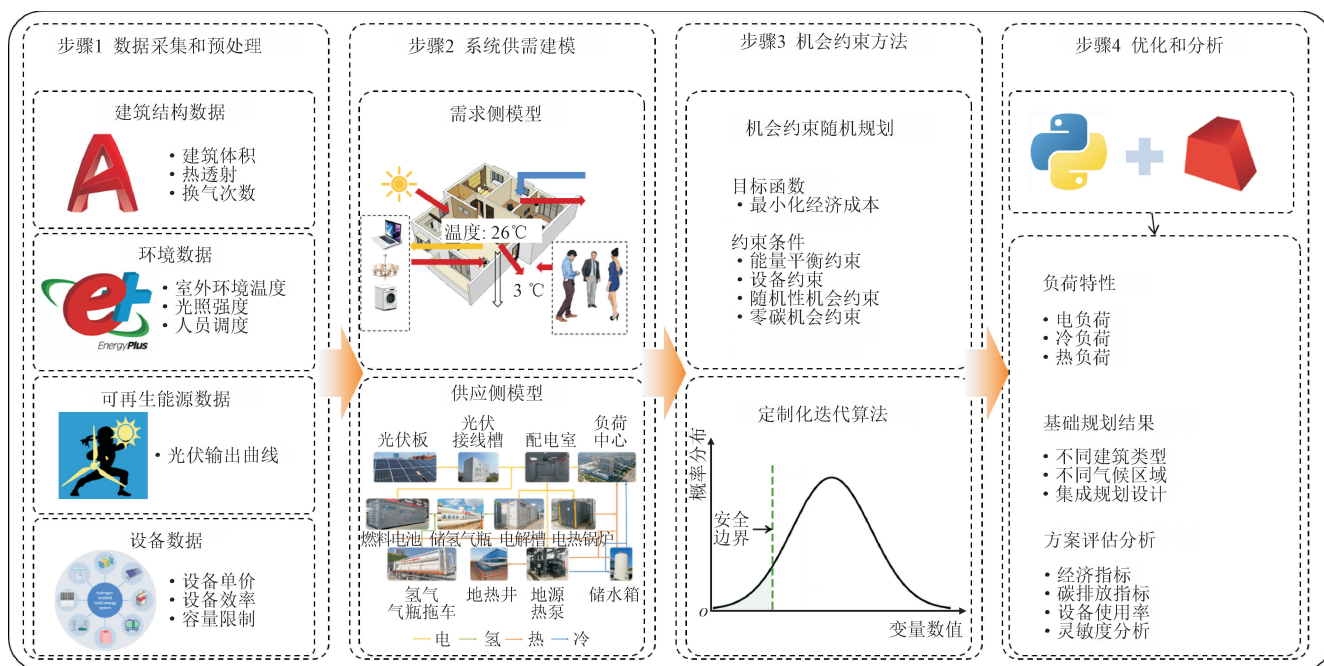


图3 建筑园区规划设计和评估分析方法^[17]

Fig. 3 Planning design and analytical assessment method for building park^[17]

1.3.2 数据中心

数据中心的节能降碳受到越来越多的关注,利用可再生能源、多介质储能和多种能源转换设备为数据中心供能,是减少碳排放的有效方式。然而,数据中心能耗模式、可靠性要求以及多能异质特性等因素,直接影响能源系统多能转换过程和多种介质储能容量配置,进而影响数据中心能源系统规划设计结果的可行性和经济性。因此如何在系统规划设计中考虑上述因素从而保证系统安全经济运行,是实现氢赋能零碳数据中心供需协同规划决策的核心

挑战。

针对这一挑战,基于多能供需平衡,作者团队建立了氢赋能零碳数据中心能源系统协同规划模型^[18],全面反应了系统多能协同耦合特性。进而,针对在规划模型中考虑系统能耗模式、运行可靠性要求、多能异质特性等因素而导致的优化计算复杂性难题,团队提出了基于可行割思想的分解优化算法,通过上层规划及常规运行主问题与下层考虑不同能源设备故障场景的运行子问题迭代求解,将规划问题和海量故障场景及其运行决策解耦,降低了

计算复杂度的同时,保证了规划结果的可靠性。实验结果表明:所开发的氢赋能零碳数据中心能源系统可以大幅度节能和降低碳排放量,其能源使用效率可低至 1.09,碳排放量相较传统电力驱动的数据中心能源系统降低 74.9%。

1.3.3 5G 基站

5G 网络的高带宽、多通道以及复杂设备架构特性导致基站能耗巨大,成为制约其推广应用的重要因素。因此,降低 5G 基站运行能耗至关重要。传统节能方法通过设计高能效硬件和优化网络架构或在运营层面依据业务流量动态管理资源以实现节能。然而,传统方法存在硬件升级成本高昂、节能策略可能会影响服务质量和网络关键性能指数、单一设备级节能方法弹性有限等缺陷。更为关键的是,传统方法普遍忽视了基站中能耗占比高达约 40% 的暖通空调(HVAC)系统。

针对上述问题,作者团队提出一种基站主设备与 HVAC 系统协同优化的新节能框架和方法^[19]。通过构建混合整数线性规划模型,精确刻画基站室内热力学过程及多能源耦合关系。同时,为应对业务负荷、天气等不确定性,提出基于滚动时域优化框架的两阶段闭环优化方法,在实时运行阶段结合图马尔可夫神经网络动态更新优化模型参数,并利用滚动时域优化算法在线调整 HVAC 运行策略,在严格保证设备运行环境要求的前提下,实现系统能耗与成本削减。团队新方法应用在中国广东省的各类 5G 基站,实测数据表明新方法可以使 5G 基站的总能源成本降低 12%。该方法无需改造现有硬件,即可适配各类基站环境,适用性强,在实现有效节能降本的同时,也因其部署便捷、成本低廉而极具应用价值。

2 多能供需协同优化方法

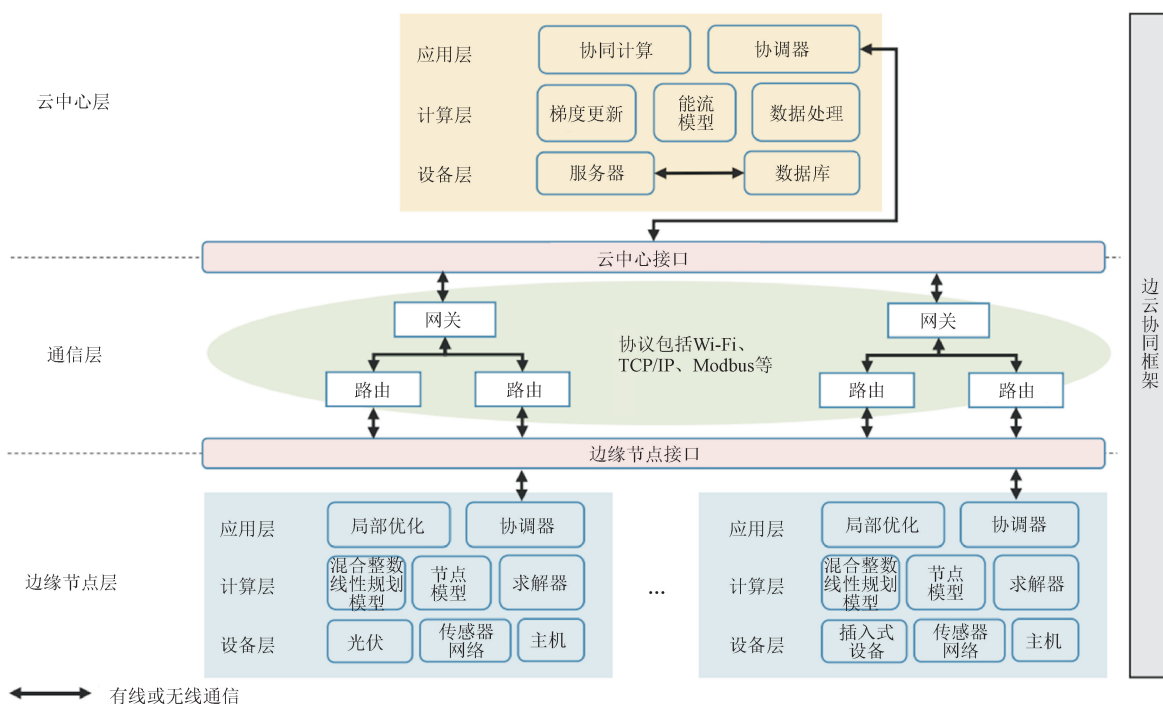
在多能供需协同优化框架下,氢赋能零碳能源系统的运行与控制需统筹考虑电、氢、热、气等多种能源的时空耦合特性与互补潜力。多能互补运行通过打破原有相对割裂的能流子系统,实现多类型能源的开放共享与协同优化。氢能作为理想的零碳能源载体,其制-储-用环节与可再生能源发电、储热装置及终端冷热电负荷紧密耦合,可在时间尺度上实现从秒级调节到季节性存储的广泛覆盖,为提升系统可再生能源消纳率、实现近零碳排放提供了关键路径^[20-21]。然而,氢能系统的深度融入也带来了多时间尺度动态耦合、强不确定性以及异质子系统协同困难等挑战,对传统的集中式优化与单一目标控

制方法提出了革新需求^[22]。本节将依次从运行优化与控制方法两个层面,系统阐述针对上述挑战的创新性解决方案,并介绍其在实际示范工程中的应用验证情况。

2.1 氢赋能零碳能源系统运行优化方法

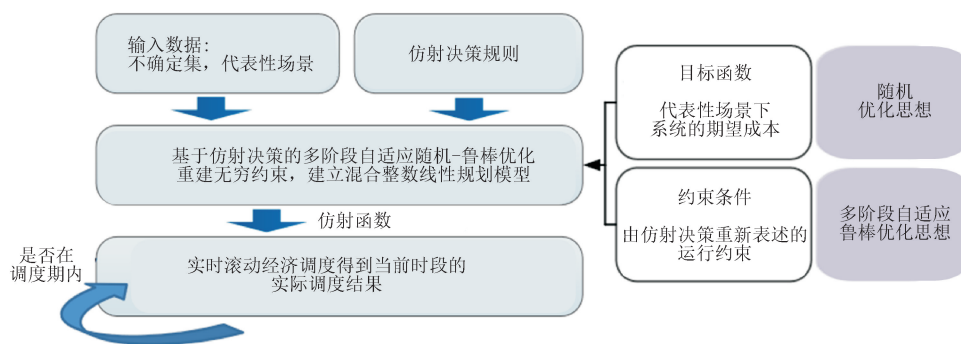
氢能作为实现零碳目标的关键能源载体,其与电、热、气等多能源系统的深度融合,为构建零碳能源系统提供了重要路径。然而,氢能系统的引入在提升系统灵活性的同时,也带来了多重运行优化挑战。具体而言,电解槽、燃料电池、储氢罐等氢能设施具有显著的异构性、非线性动态特性及多时间尺度响应能力,与电力系统快速调度要求之间存在固有矛盾,导致集中式优化方法面临计算效率低、可扩展性差的瓶颈^[23]。同时,高比例可再生能源的接入与多元负荷需求的双重不确定性,在电-氢-热耦合网络中传递与放大,使系统运行状态呈现强不确定、非平稳和时变特征,传统优化方法难以在经济性、鲁棒性与计算实时性之间取得平衡^[24]。此外,系统动态变化频繁,需实时响应突发波动,但传统周期性调度模式存在通信资源浪费和响应滞后问题。针对上述挑战,作者团队从计算架构、不确定性建模与动态调度机制 3 个维度切入,提出了一系列创新性的运行优化方法。

(1)基于边云协同的分布式优化建模与求解。受信息物理系统和边缘计算思想的启发,作者团队提出了适用于氢赋能零碳能源系统的边云协同分布式优化架构^[25],其结构如图 4 所示。该架构将系统中的多元设备(如光伏、电解槽、储氢罐、燃料电池、柔性负荷等)抽象为具有本地计算能力的边缘节点,每个节点负责管理本地设备模型、约束及目标函数,分布式求解获得本地的最优调度策略。云中心则作为协调器,不直接参与具体运算,而是通过与边缘节点交换协调信息,引导所有分布式节点协同趋近全局最优解。具体而言,作者团队建立了节点-流量模型。其中,节点模型描述各能源单元的本地能量转换与平衡,流量模型刻画了节点间的能量与信息交互。基于此模型,设计了分布式迭代优化算法,并证明了其收敛性。该方法将复杂的集中式全局优化问题分解为多个可并行求解的子问题,显著降低了对通信带宽和中央计算能力的要求。数值仿真表明:相较于集中式方法,该分布式算法在大规模案例中可将计算时间缩短 90% 以上,且最优性差距小于 0.1%,为大规模氢能系统的实时优化调度提供了可行方案。

图4 边云协同软硬件框架^[25]Fig. 4 Edge-cloud collaborative software and hardware framework^[25]

(2)多阶段自适应随机-鲁棒优化框架。为平衡经济性与鲁棒性,作者团队提出了多阶段自适应随机-鲁棒优化框架^[26],其算法架构如图5所示。该方法融合随机规划与多阶段鲁棒优化的优势:在目标函数中通过代表性场景刻画期望运行成本以追求经济性;在约束条件中引入仿射决策规则,将决策变量表示为不确定性实现的线性函数,从而将多阶段鲁棒模

型转化为可求解的混合整数线性规划问题。该框架确保了决策的非预期性(仅依赖当前及过去信息)和多阶段鲁棒性(对未来任意不确定性保持可行性),避免了传统两阶段鲁棒优化 min-max 结构的保守性。基于求解得到的仿射函数,作者团队设计了实时滚动经济调度和非滚动快速经济调度两种模式,分别适应经济性优先或计算速度优先的应用场景需求。

图5 基于仿射策略的多阶段自适应随机-鲁棒优化框架^[26]Fig. 5 Affine policy-based multi-stage adaptive stochastic-robust optimization solution approach^[26]

(3)事件驱动的动态优化方法。针对传统周期性调度响应滞后的问题,作者团队研究了事件驱动的动态优化方法^[27]。该方法通过深入分析氢-电-热-冷多能流耦合特性与系统决策空间结构,定义了包含人员活动、环境变化及设备运行状态等关键影

响因素的事件集,以事件触发代替固定周期调度,从而有效描述系统状态的动态演化过程,并简化信息物理融合系统的通信拓扑结构。该算法仅在预设触发条件满足时启动通信与计算流程,显著降低了系统通信负担与计算资源消耗。其固定时间收敛特性

保证了算法收敛时间上界独立于初始状态,仅由控制参数决定,为系统在遭遇大范围扰动后实现快速恢复提供了理论支撑。通过引入动态事件触发阈值策略,进一步减少了非必要触发次数,有效避免了 Zeno 现象(即在有限时间内发生无限次触发),确保了算法在实际工程中的可实施性。图 6 展示了氢赋能零碳能源系统在多种事件触发条件下的调度策略响应情况,研究结果表明:该方法能够显著减少冗余计算,降低优化过程的时间开销,从而赋予系统实时调度与动态控制能力^[28]。

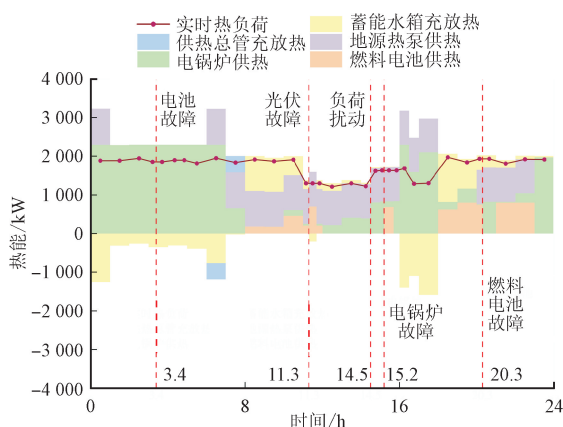


图 6 事件驱动的动态优化方法调度结果^[28]

Fig. 6 Dynamic real time event-triggered scheduling results^[28]

2.2 氢赋能零碳能源系统控制方法

氢能系统的引入在提升系统灵活性的同时,也给系统控制带来了新的挑战。具体而言,氢赋能零碳能源系统涉及电力系统、氢能系统和暖通系统 3 大子系统,各系统在动态响应特性、控制目标和运行约束方面存在显著差异。电力系统要求快速频率调节和功率平衡,但高比例可再生能源的接入导致系统惯量降低、波动性增强,传统基于精确模型的负荷频率控制方法难以适应非线性、强不确定性的运行环境^[29]。氢能系统涵盖电解、储运、燃料电池发电等多环节,其动态过程呈现慢动态特性,且涉及气-电-热多重能量转换,设备启停与功率调节需兼顾安全性与效率,现有控制策略往往缺乏多能流的协调机制^[11]。暖通系统作为建筑能源消费的主要部分,具有强非线性、大惯性、多区域耦合等特点,其控制需在保证室内环境舒适度的前提下实现能效优化,传统方法大多依赖精确的物理模型,难以应对人员活动随机变化、外部气候扰动等不确定因素^[30]。针对上述挑战,作者团队对电力系统、氢能系统和暖通系统 3 大子系统提出了一系列创新性控制方法。

(1)基于深度强化学习的非线性电力系统负荷频率控制。针对传统负荷频率控制方法依赖精确模型、难以适应非线性系统的问题,作者团队提出了基于深度确定性策略梯度的无模型负荷频率控制方法^[31],其架构如图 7 所示。该方法通过构建仿真网络替代传统评价网络,通过历史数据驱动的方式模拟电力系统动态特性,避免了对系统精确数学模型的依赖。在策略梯度计算中,引入零阶优化方法,有效克服深度神经网络在反向传播过程中易出现的梯度消失或爆炸问题,提升训练稳定性与收敛效率。所设计的控制器在含风电接入的电力系统中表现出良好的频率调节能力,频率波动显著降低,验证了该方法在非线性和高不确定性电力系统中的实用性与优越性。

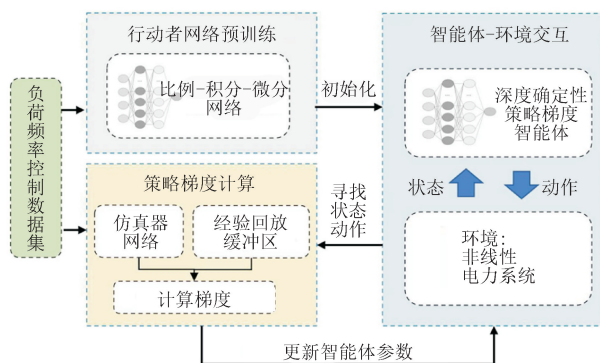
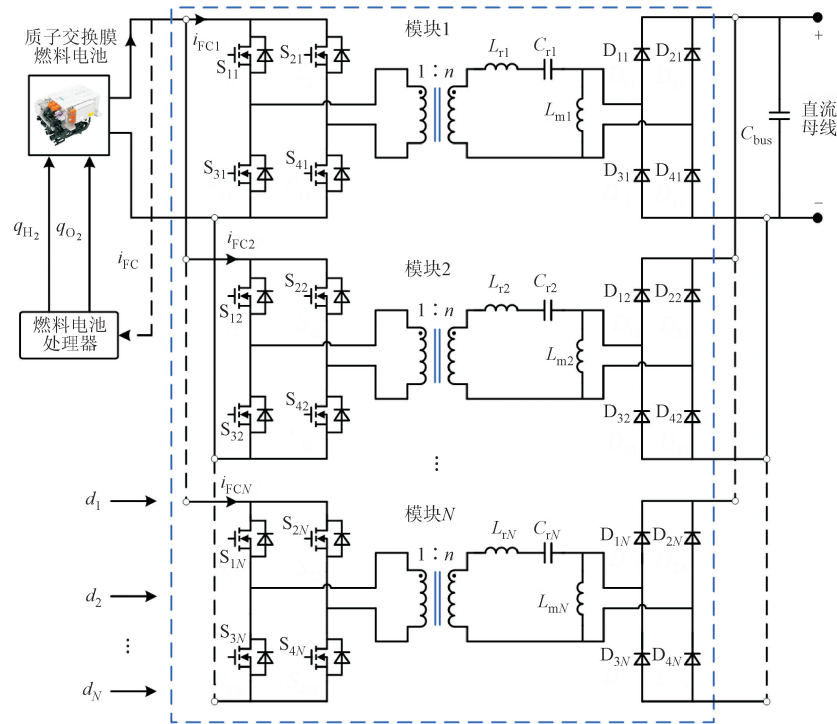


图 7 基于深度确定性策略梯度的无模型负荷频率控制方法框架^[31]

Fig. 7 Methodology framework of load frequency control based on model-free deep deterministic policy gradient^[31]

(2)多模式协同的氢能系统运行控制策略。为实现氢能系统中电解、储运、发电等环节的高效协调与控制,作者团队在实际规模的氢能微电网中,设计了基于主从与对等混合结构的系统级控制策略^[32]。在设备层面,针对质子交换膜燃料电池的动态响应特性,提出了基于输入并联输出并联结构的 LLC 谐振变换器及其功率调控方法,通过引入电流斜率限制机制,有效抑制电流突变对电堆的冲击,保障系统安全稳定运行,其结构如图 8 所示。在系统层面,通过配置具备多模式运行能力的双向互联变流器,支持有功功率-无功功率控制、恒压控制及下垂控制等多种策略,实现直流母线电压的精确调节与功率的灵活分配。该混合控制架构可根据可再生能源出力波动与负荷动态变化,自适应切换控制模式,从而在复杂运行工况下维持系统功率平衡与电压稳定。实际运行表明,所提策略显著提升了氢能微电网的供电可靠性与整体运行经济性。



i_{FC} —燃料电池电流; i_{FCj} —模块 j 燃料电池电流; d_j —模块 j 占空比; L_{rj} —模块 j 谐振电感; C_{rj} —模块 j 谐振电容; L_{mj} —模块 j 励磁电感;
 D_{lj} —模块 j 第 l 个二极管; S_{lj} —模块 j 第 l 个开关管; C_{bus} —变换器母线侧电容; n —线圈匝数比; q_{H_2} —氢气流量; q_{O_2} —氧气流量;
 $l = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, N$ 。

图 8 用于燃料电池发电机组的输入并联输出并联结构的多模块全桥 LLC 谐振 DC/DC 转换器^[32]

Fig. 8 Multi-module full-bridge LLC resonant DC/DC converter with a input-parallel output-parallel structure for fuel cell generating unit^[32]

(3)多智能体注意力机制驱动的暖通系统优化控制。针对多区域商业建筑中暖通通风空调(HVAC)系统存在的控制变量多、约束条件复杂、

难以建立精确数学模型的问题,作者团队提出了一种基于多智能体深度强化学习与注意力机制的分布式控制算法^[33],其架构如图 9 所示。该方法将各区

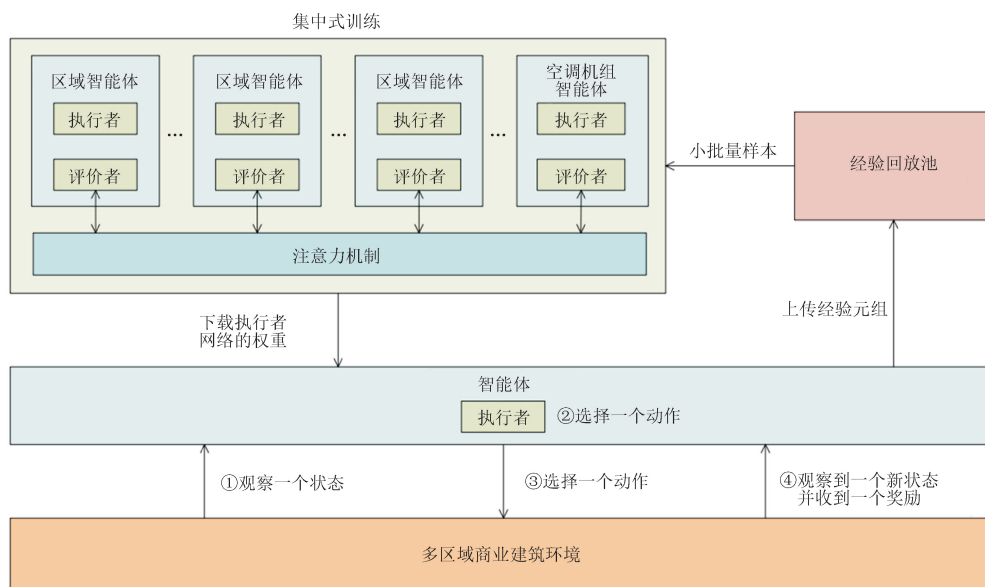


图 9 多智能体注意力机制驱动的 HVAC 系统优化控制算法架构^[33]

Fig. 9 Architecture for the proposed multi-agent deep reinforcement learning-based HVAC system control algorithm^[33]

域的送风量及空气处理机组风门位置的控制任务分配给相应的智能体,并利用注意力机制实现智能体之间的协同决策,从而在不依赖建筑热动力学显式模型的情况下,实现对室内温度与 CO_2 含量的有效调控。在算法设计中,通过构建综合考虑能耗成本、温度偏差和 CO_2 含量超限的奖励函数,并基于演员-评论家框架进行策略优化,在确保室内环境舒适度的同时,显著降低了系统运行能耗。实验结果表明:该方法具有良好的可扩展性与鲁棒性,适用于多区域复杂环境的 HVAC 系统优化控制。

3 能碳协同管控技术

氢赋能零碳分布式能源系统的运行中存在能耗模式的复杂多样性及能量流与信息流的深度协同交互特性,使得能碳协同管控技术在应用中面临双重核心挑战:一方面,系统能耗模式受人员活动、环境波动、设备运行状态等多因素动态影响,难以实现精准的实时感知与动态刻画;另一方面,优化模型需兼顾多能耦合场景下的计算精度与实时调度需求,二者间的权衡矛盾难以有效化解。上述挑战直接制约了能碳协同管控技术的工程落地效果,成为当前氢赋能零碳能源系统规模化推广应用的关键瓶颈。

3.1 系统能耗模式弹性动态感知技术

能耗模式及其弹性的精确感知是能碳协同管控的前提。受人员、环境、设备运行等因素影响,零碳能源系统的能耗模式及其弹性具有复杂多样、灵活多变、动态随机等特点,难以被精确定量动态刻画,传统的感知技术精度和实用性均无法满足能碳协同管控的需求,严重影响了系统规划和运行控制的可行性^[34-35]。

针对上述问题,作者团队首创了基于人员-环境-设备信息融合的能耗模式动态感知技术^[36]。该技术通过引入人员热舒适、环境热力动力学以及能源系统设备的运行机理,基于实际数据学习以表征人员、环境、设备与系统能耗的映射关系,建立了能耗特性预测模型,结合人机交互反馈信息动态更新模型参数并在线修正结果。图 10 概括了团队提出的基于信息物理融合的个人热舒适辨识方法。从该结构中可以看出,该模型由物理部分和数据驱动部分组成。通过物理部分获取居住者反馈的实际投票,并得到每个阶段的带标签训练数据集,用于训练回归模型。回归模型输出相应的个性化参数估计值,并将其传递给物理部分,以预测个性化热舒适度。结合这两部分,本模型能够通过输入可测量因素来预测个性化热舒适度。此外,通过热舒适度投票的反馈,模型可以动态更新。

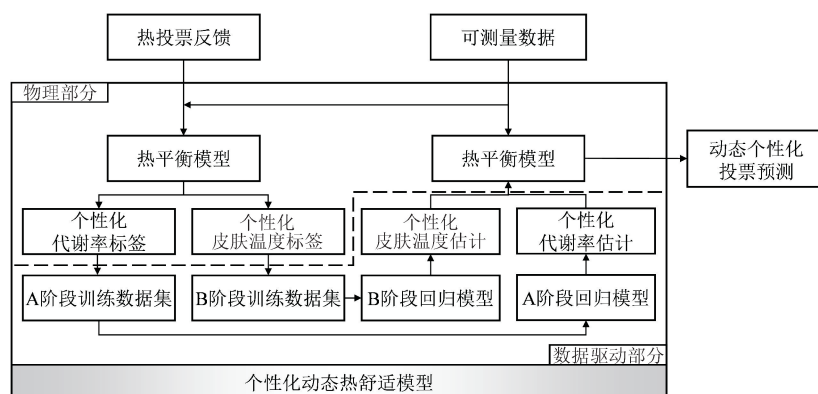
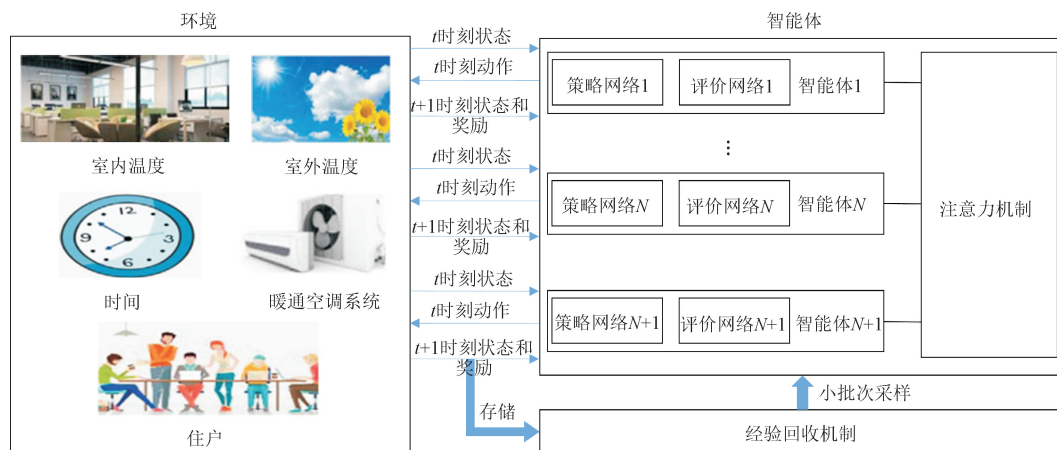


图 10 信息物理融合的个人热舒适辨识方法^[36]

Fig. 10 Cyber-physical method for personal thermal comfort identification^[36]

共享办公空间是典型的用热或用冷场景,协调个体舒适度和暖通空调是本技术的重要应用场景,可以在最小化总能耗的同时为使用者维持舒适的个人热环境。图 11 展示了一种基于注意力机制和多

智能体深度强化学习的分时控制算法,该算法无需建筑热动力学模型。基于真实世界的人员轨迹表明,本团队的工作可以将平均热舒适度偏差降低 64.13%~72.08%。

图11 基于多智能体深度强化学习的分时控制算法^[36]Fig. 11 Control algorithm based on multi-agent deep reinforcement learning^[36]

3.2 零碳能源系统信息物理融合建模技术

信息物理融合建模是氢赋能零碳能源系统规划设计和运行控制的基础,能量流和信息流在系统的供、储、需各个环节的转化交互特性十分复杂,具有多能流协同、多主体交互、多重网络耦合等特点^[37]。但在能碳平台部署应用的过程中,机理模型准确度高但计算建模复杂,数据驱动模型虽然模型简单但是严重依赖数据质量,在实际中面临模型精度与计算开销难以权衡的矛盾^[38]。

针对上述问题,作者团队提出了数据机理双驱动的信息物理融合建模技术。该技术利用能量平衡、设备运行约束等机理特性,推导策略的可行边界,将其融入数据的学习训练过程,实现对能源系统的代理模型构建。在保证最优性的前提下,简化了优化模型结构并降低了计算复杂度,突破了模型复杂度、精确度和计算效率相互制约的技术瓶颈。该信息物理融合模型通过定义含能源向量与信息向量的节点属性、加权邻接矩阵等,构建节点模型和流量模型来保障节点能量平衡与动态转化和描述能量信息传输。该模型在建筑能源系统进行测试,并以4栋建筑的能源网络为例验证模型有效性。未来,将进一步完善节点间信息交换机制及部分可观测马尔可夫决策过程问题的求解方法^[39]。

3.3 零碳能源系统多能耦合能源管理方法

零碳分布式能源系统在实际应用中通常需要集控平台和能量管理平台协同,传统的能源系统通常部署电气和暖通两套集控平台,存在时间尺度以及

响应速度和数据精度上的差异。电气平台通常采用毫秒级闭环反馈控制,数据精度高,时效性强;暖通集控平台则通常采用预设控制策略,数据精度根据设计进行选型,控制间隔则相对较慢,因此两套控制系统在协同上存在挑战^[40-41]。

针对上述困难,作者团队研发多能耦合能源系统零碳运行能量管理方法,首创了零碳多能源系统运行优化技术,突破了实际系统运行优化难以同时满足计算实时性和策略可行性的技术瓶颈,填补了零碳-经济双目标下能源系统能量管理方法的技术空白。该方法包括调度模型和调度方法两部分。调度模型描述了包括氢能、地热能和储水在内的季节性和日常储能设备的运行约束。该模型在描述多能混合储能协同的同时输出设备调度决策。基于该调度模型构建了一种长短期协同调度方法,其算法结构如图12所示。通过长期季节性鲁棒调度和短期经济性日前和日内调度方法,在考虑季节性储能容量约束的前提下,能够在日前层面实现季节性储能策略。长期季节性调度采用两阶段决策方式,第一阶段的决策变量包括不确定性揭示前的季节性调度,涉及季节性储能和热泵的运行模式;第二阶段的决策变量则包括随机性揭示后其他设备的运行。这种方法减少了日常调度策略与季节性调度策略之间的不一致性,同时保持了连续性和最优性。与现有的基于开环策略的调度方法相比,所提出的调度方法实现了更高的自给率,运营成本降低了43.4%以上^[42]。

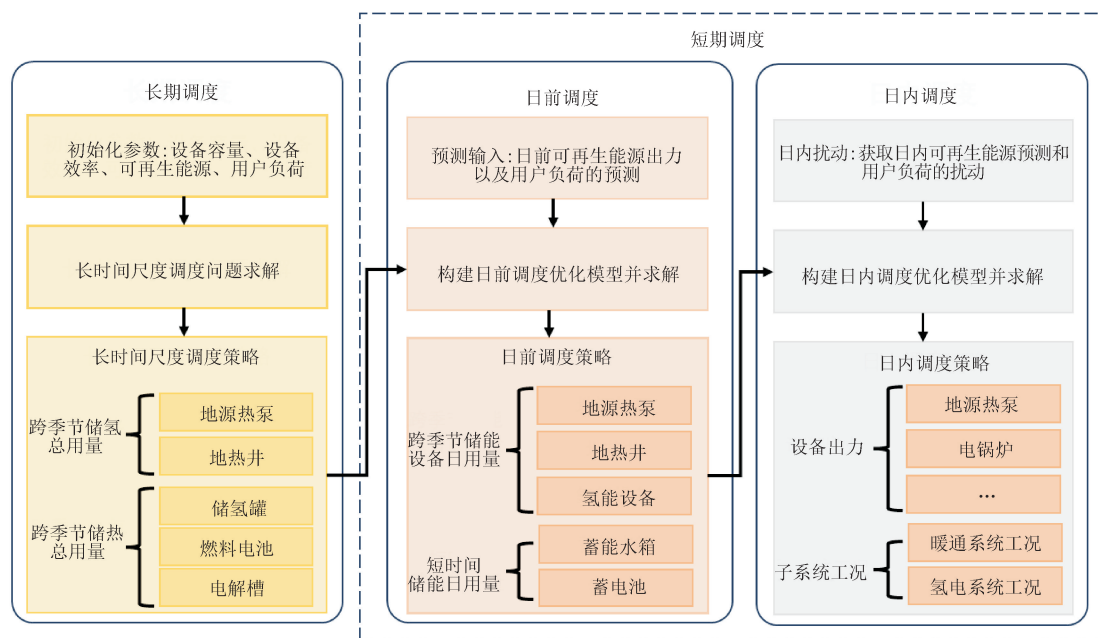


图 12 长短期协同调度方法

Fig. 12 Long and short term scheduling method

3.4 能碳管控平台典型应用案例

基于上述技术,西安交通大学管晓宏教授团队成功研制零碳能源系统能碳协同管控平台^[32],提供了面向氢、电、冷、热、可再生能源等多种能源和储能设备控制器的标准化接口,支持多能源

系统 50 余种组合工况协同控制,具有能源、能耗和储能设备运行参数智能调优等供能,极大提升了能源系统供、储、需协同运行效率,有效降低了系统运行成本。能碳管理平台功能结构如图 13 所示。



图 13 能碳管理平台功能结构

Fig. 13 Structure of the energy and carbon management platform

能碳管控平台还在建筑园区、工业园区、机场、通信基站、数据中心等多类实际场景中应用推广,新增超过 13.2 亿元的经济效益,社会经济效益显著。该项目成果突破了能源绿色低碳转型的瓶颈和短板,实现了核心技术的自主可控,推动了零碳智慧能源产业高质量发展,显著提升了国际声誉和产品竞争力,有力推进了绿色能源生产和消费革命。代表

性应用案例如图 14 所示。具体而言,该能碳平台技术应用于同方股份有限公司的北京冬奥会延庆奥运村智能人居国家示范工程,为建成具有典型示范意义和国际领先水平的奥运村智能人居系统提供了系统解决方案;应用于清安优能科技发展(榆林)有限公司的榆林科创新城零碳分布式智慧能源中心示范项目,建成并投运了全球首个规模化 and 实用化的零碳智

慧能源系统,被列入国家发改委清洁低碳氢能创新应用工程,获得中国电力企业联合会“零碳园区”认证;应用于中国联合网络通信有限公司榆林市分公司的零碳数据中心项目,建成了国内首个零碳分布式数据中心和5G通信基站,电能利用效率趋近于1。此外,该项目关键技术还应用于中国远大集团有限责任公司、西部机场集团有限公司、荏原(中国)有限公司、江苏晟能科技股份有限公司、西咸市政、西安新港分布式能源有限公司等的城市能源中心、工业园区、交通枢纽、大型公共建筑、居住建筑等多类场景,解决了绿色低碳转型过程中能源系统的设计规划、运行优化等卡脖子难题,有力推进了绿色能源生产和消费革命。

司、西部机场集团有限公司、荏原(中国)有限公司、江苏晟能科技股份有限公司、西咸市政、西安新港分布式能源有限公司等的城市能源中心、工业园区、交通枢纽、大型公共建筑、居住建筑等多类场景,解决了绿色低碳转型过程中能源系统的设计规划、运行优化等卡脖子难题,有力推进了绿色能源生产和消费革命。



图14 代表性应用案例

Fig. 14 Pilot application cases

4 结论与展望

国家“双碳”目标对能源系统的清洁性、灵活性与调控精度提出了更高要求,氢赋能零碳能源系统作为实现“双碳”目标的重要载体,其技术突破与工程落地成为推动能源行业绿色变革的关键。西安交通大学管晓宏教授团队面向国家重大需求,在零碳能源系统结构设计、面向零碳运行的优化方法、能碳协同管控技术3个核心方向取得开创性成果,解决了氢能规模化应用、多能协同优化、零碳经济运行等国家重大工程中的关键难题,促进了零碳能源系统的绿色化、智慧化发展。

面向我国能源结构深度转型需求,团队将持续推进氢赋能零碳能源系统的以下几方面技术研究。第一方面是构建氢赋能零碳能源系统的跨时间尺度、跨空间层级的精细化描述方法,提升氢赋能零碳能源系统在复杂场景下的整体优化水平与适应性,强化供需协同与不确定性条件下的灵活调控。第二方面是系统规划运行一体化与全生命周期管控的研究,建立刻画氢、电、冷、热、可再生等多能耦合的规划运行一体化模型,从能源系统全生命周期的视角出发,实现规划运行全过程的零碳排指标,构建高效、稳定的多能协同零碳经济运行机制。第三方面

是在已有工程应用的基础上,形成可复制、可推广的系统化解决方案,着力保障关键核心装备的高效运行和能源系统的安全稳定运行。未来沿着上述研究问题和发展方向,团队将不断拓展氢赋能零碳能源系统在多场景的应用,为我国能源行业绿色转型升级提供有力支撑,在实现“双碳”目标的过程中作出新的更大贡献。

参考文献:

- [1] IEA. Global energy review 2025 [EB/OL]. (2025-03-24) [2025-08-21]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.
- [2] IEA. Renewables 2024 [EB/OL]. (2024-10-09) [2025-09-12]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 可再生能源装机规模实现新突破 [EB/OL]. (2024-11-20) [2025-08-31]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6988406.htm.
- [4] CUI Gaochen, JIA Qingshan, GUAN Xiaohong. Energy management of networked microgrids with real-time pricing by reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 570-580.
- [5] HUANG Qilong, YANG Li, JIA Qingshan, et al. A simulation-based primal-dual approach for constrained

- V2G scheduling in a microgrid of building [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(3): 1851-1863.
- [6] YANG Yujie, ZHOU Yadong, WU Jiang, et al. A failure tree model for cascading failure in power grid with uncertain renewable energy generation [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 4092-4108.
- [7] YANG Yujie, ZHOU Yadong, HE Sizhe, et al. A Markov tree model for cascading failure risk assessment in power grid with uncertain renewable energy generation [J/OL]. IEEE Transactions on Circuits and Systems; I Regular Papers. (2025-09-03)[2025-09-24]. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2025.3601132>.
- [8] MA Donglai, CAO Xiaoyu, ZENG Bo, et al. Proactive robust hardening of resilient power distribution network: decision-dependent uncertainty modeling and fast solution strategy [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 14953-14966.
- [9] LAN Yu, ZHAI Qiaozhu, LIU Xiaoming, et al. Gradient accelerated stochastic dual dynamic programming for economic dispatch in microgrids with energy storages [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100(Part B): 113633.
- [10] U. S. Department of Energy. U. S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap [R]. [S. l.: s. n.], 2023.
- [11] DONG Xiangxiang, WU Jiang, XU Zhanbo, et al. Optimal coordination of hydrogen-based integrated energy systems with combination of hydrogen and water storage [J]. Applied Energy, 2022, 308: 118274.
- [12] SUN Xunhang, CAO Xiaoyu, ZENG Bo, et al. Multi-stage dynamic planning of integrated hydrogen-electrical microgrids under multiscale uncertainties [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3482-3498.
- [13] LIU Jinhui, XU Zhanbo, WU Jiang, et al. Optimal planning of distributed hydrogen-based multi-energy systems [J]. Applied Energy, 2021, 281: 116107.
- [14] LIU Kun, XU Zhanbo, GAO Feng, et al. Coordination optimization of hydrogen-based multi-energy system with multiple storages for industrial park [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2023, 17(6): 1190-1203.
- [15] YU Liang, XU Zhanbo, GUAN Xiaohong, et al. Joint optimization and learning approach for smart operation of hydrogen-based building energy systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 199-216.
- [16] WU Jiang, WU Longkun, XU Zhanbo, et al. Dynamic pricing and prices spike detection for industrial park with coupled electricity and thermal demand [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(3): 1326-1337.
- [17] LIU Jinhui, ZHAO Yanling, XU Zhanbo, et al. Coordinated integration of hydrogen-enabled multi-energy systems to achieve zero-carbon buildings [J]. Building and Environment, 2025, 284: 113433.
- [18] LIU Jinhui, XU Zhanbo, WU Jiang, et al. Optimal planning of internet data centers decarbonized by hydrogen-water-based energy systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(3): 1577-1590.
- [19] GUAN Xiaohong, XU Zhanbo, LIU Yaping, et al. Reduction in energy consumption of the 5G communication system and beyond through collaborative optimization for BS site operation: challenges, efforts and the new approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(3): 3948-3963.
- [20] YU Liang, YUE Dong, CHEN Zhiqiang, et al. On-line operation optimization for hydrogen-based building energy systems under uncertainties [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4589-4601.
- [21] WANG Tengbo, DONG Yuchen, CAO Xiaoyu, et al. Economic and resilient planning of hydrogen-enriched power distribution network with mobile hydrogen energy resources [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 144: 1001-1018.
- [22] DONG Xiangxiang, WU Jiang, XU Zhanbo, et al. Optimal coordination of hydrogen-enabled building energy systems considering thermal dynamics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(5): 7824-7834.
- [23] TIAN Zhaoming, CAO Xiaoyu, ZENG Bo, et al. Adaptive infinite-horizon control of hybrid EV/FCEV charging hubs: a large-model based deep reinforcement learning approach [J]. Applied Energy, 2025, 390: 125840.
- [24] SUN Xunhang, CAO Xiaoyu, LI Miaomiao, et al. Seasonal operation planning of hydrogen-enabled multi-energy microgrids through multistage stochastic programming [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 85: 111125.
- [25] 徐占伯, 周春翔, 吴江, 等. 基于边云协同的建筑能源系统分布式供需协同优化 [J]. 中国科学(信息科学), 2023, 53(3): 517-534.

- XU Zhanbo, ZHOU Chunxiang, WU Jiang, et al. Edge-cloud framework-based distributed optimization of a building energy system with supply-demand coordination [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2023, 53(3): 517-534.
- [26] ZHOU Yuzhou, ZHAI Qiaozhu, XU Zhanbo, et al. Multi-stage adaptive stochastic-robust scheduling method with affine decision policies for hydrogen-based multi-energy microgrid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(3): 2738-2750.
- [27] YANG Feisheng, LIU Jiaming, GUAN Xiaohong. Distributed fixed-time optimal energy management for microgrids based on a dynamic event-triggered mechanism [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(12): 2396-2407.
- [28] YANG Xuesong, GUO Wangyi, GAO Feng, et al. Dynamic real time event-triggered scheduling for hydrogen-based integrated energy system [C]//2024 China Automation Congress (CAC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 3329-3334.
- [29] WANG Bohui, XU Zhanbo, GUAN Xiaohong. Robust load frequency control for uncertain multi-area power systems with coupling of system dynamics and reconfigurable communication networks: network switching, automatic decision and gain schedule [J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems*. (2025-08-22) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2025.3601847>.
- [30] WU Zijian, JIA Qingshan, GUAN Xiaohong. Optimal control of multiroom HVAC system: an event-based approach [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(2): 662-669.
- [31] CHEN Xiaodi, ZHANG Meng, WU Zhengguang, et al. Model-free load frequency control of nonlinear power systems based on deep reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(4): 6825-6833.
- [32] WANG Xiaoyu, HUANG Jingjing, XU Zhanbo, et al. Real-world scale deployment of hydrogen-integrated microgrid: design and control [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(4): 2380-2392.
- [33] YU Liang, SUN Yi, XU Zhanbo, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for HVAC control in commercial buildings [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 407-419.
- [34] 刘家丞, 吴江, 刘鹏远, 等. 面向负荷特征分析的地理分布式协同聚类方法 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 112-120.
- LIU Jiacheng, WU Jiang, LIU Pengyuan, et al. Geodistributed collaborative clustering method for load characteristic analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 112-120.
- [35] TIAN Ying, WU Jiang, XU Zhanbo, et al. Integrated modeling and dynamic evaluation indicator system of urban energy systems towards a sustainable, low-carbon pathway [J]. *Energy*, 2025, 319: 134993.
- [36] ZHOU Yadong, SU Ying, XU Zhanbo, et al. A hybrid physics-based/data-driven model for personalized dynamic thermal comfort in ordinary office environment [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 238: 110790.
- [37] PAN Guangsheng, GU Wei, LU Yuping, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [38] XIA Qinqin, WANG Qianggang, ZOU Yao, et al. Physical model-assisted deep reinforcement learning for energy management optimization of industrial electric-hydrogen coupling system with hybrid energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 100(Part A): 113477.
- [39] GUAN Xiaohong, XU Zhanbo, JIA Qingshan, et al. Cyber-physical model for efficient and secured operation of CPES or energy Internet [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(11): 110201.
- [40] LIU Zhijian, FAN Guangyao, MENG Xiangrui, et al. Multi-time scale operation optimization for a near-zero energy community energy system combined with electricity-heat-hydrogen storage [J]. *Energy*, 2024, 291: 130397.
- [41] WANG Zhewei, DU Banghua, LI Yang, et al. Multi-time scale scheduling optimization of integrated energy systems considering seasonal hydrogen utilization and multiple demand responses [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 67: 728-749.
- [42] GUO Wangyi, XU Zhanbo, LIU Jinhui, et al. Optimal coordination of zero carbon building energy systems [J]. *National Science Open*, 2024, 3(3): 20240004.

(编辑 刘懿莹)

团队介绍:

西安交通大学网络化系统工程团队组建于 20 世纪 90 年代,主要成员有 45 人。在中国科学院院士、西安交通大学教授管晓宏的带领下,传承弘扬西迁精神,形成“创新引领,交叉融合,踔厉奋发”的团队文化,致力于能源电力系统优化与网络信息安全领域的研究,培养党和国家需要的拔尖创新人才。在网络化系统优化与安全领域取得突出成果,获得 2 个国家自然科学基金委创新群体、全国教育系统先进集体、陕西省三秦楷模团队、陕西省高校黄大年式教师团队等荣誉称号。

管晓宏,中国科学院院士,IEEE Fellow,西安交通大学电子与信息学部主任,系统工程领域知名专家,曾获“全国教育系统先进集体”荣誉称号,“三秦楷模”荣誉称号,2005 和 2018 年国家自然科学二等奖(第一完成人)、2015 年中国自动化学会自然科学一等奖(第一完成人)、1996 年美国李氏基金杰出成就奖、2019 年何梁何利基金“科学与技术进步奖”电子信息技术奖等荣誉和奖励。



团队负责人:管晓宏院士



团队合影