

园区级电氢耦合能源系统优化调度虚拟仿真实验平台

邢 强, 高 辉, 徐俊俊, 陈 璐, 邹花蕾

南京邮电大学自动化学院 江苏南京

【摘要】为解决高比例新能源接入下的园区能源协同管控难题并丰富教学手段,提升园区运行效率与可靠性及产教融合水平,本文设计并开发了一种园区级电氢耦合能源系统虚拟仿真实验教学平台。该平台基于浏览器/服务器架构,集成了电解槽、氢燃料电池、电-氢混合储能等模型,支持学生自主搭建拓扑、配置算法参数,并开展资源配置、日前计划与日内动态校正、运行效益评估等实验。案例仿真结果表明,在夏季大风日场景下,采用电氢能量共享与深度强化学习联控策略后,系统综合运行成本可降低约 12.5%,碳排放可下降约 18.4%。该平台建成后有望缓解电氢耦合系统实体实验成本高、安全风险大的教学瓶颈,并提升学生的综合分析与工程实践能力。

【关键词】虚拟仿真; 实验教学平台; 电氢耦合系统; 优化调度; 深度强化学习

【基金项目】南京邮电大学教学改革研究项目(JG00525JX28); 江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20240652)

【收稿日期】2026 年 5 月 15 日

【出刊日期】2026 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20260014

Virtual simulation experimental platform for optimal scheduling of park-level electric-hydrogen coupled energy systems

Qiang Xing, Hui Gao, Junjun Xu, Lu Chen, Hualei Zou

Nanjing University of Posts and Telecommunications College of Automation, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】To address the challenges of collaborative energy management in industrial parks with high renewable energy penetration and to enrich experimental teaching, this paper develops a virtual simulation teaching platform for park-level electric-hydrogen coupled energy systems. Based on a browser/server architecture, the platform integrates models of electrolyzers, hydrogen fuel cells, and electric-hydrogen hybrid energy storage, enabling students to build system topologies, configure algorithm parameters, and conduct experiments on resource configuration, day-ahead scheduling, intra-day correction, and benefit evaluation. Case simulation results show that, under a summer windy-day scenario, the proposed electric-hydrogen energy sharing and deep reinforcement learning-based coordinated control strategy can reduce the system operation cost by about 12.5% and carbon emissions by about 18.4%. Once completed, the platform is expected to alleviate the high cost and safety risks of physical experiments, while improving students' analytical and engineering practice abilities.

【Keywords】Virtual simulation; Experimental teaching platform; Electric-hydrogen coupled system; Optimal scheduling; Deep reinforcement learning

引言

在新型电力系统转型背景下,大规模新能源并网带来的功率波动与消纳难题亟需有效的调节手段^[1]。文献[2]通过引入电解槽等核心转换设备,能够实现电能与氢能的深度双向互动,有效提升了系统的能量管理水平与调节灵活性。通过建立电氢多能流共享机制并优化储能配置模型,可进一步实现园区内资源的深度消纳与经济运行^[3-4]。针对不断演进的仿真需求,新型

电力系统软件的开发理念也在向高效化与智能化方向发展^[5]。

目前,国内外学者已针对综合能源系统、新型配电网以及工业园区开发了多类虚拟仿真实验平台^[6-8]。然而,由于电氢耦合核心设备价格昂贵且存在氢气泄漏等显著安全隐患,相关物理实体实验的开展面临巨大瓶颈^[9-11]。通过构建高保真虚拟仿真平台,将源荷储协同策略与实际工程案例相结合,已成为推动电气专业

教学改革、提升学生解决复杂工程问题能力的关键手段^[12-13]。本文旨在设计并实现园区级电氢耦合能源系统 (Park-Level Electric-Hydrogen Coupled Energy Systems, PLHECS) 优化调度虚拟仿真平台, 通过多模块交互引导引导学生深度掌握电氢协同的底层机理与智能寻优方法。

与现有直接应用深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 的综合能源调度研究相比, 本文在模型与算法架构上的实质性改进主要在于:

(1) 构建了“日前非合作博弈-日内多智能体强化学习”的两阶段分布式协同架构, 通过正则化方法迭代求解多微网间的共享定价, 有效突破了集中式调度的隐私与高维求解瓶颈;

(2) 定制了针对电氢耦合高频波动的动作空间与更新机制, 智能体以日前计划为基准输出离散化的价格与功率校正量, 并引入基于奖励降序验证的多决策更新策略, 有效缩小了探索维度, 显著提升了算法在复杂工况下的收敛速度与全局寻优稳定性。

1 PLHECS 结构及实验平台架构

随着高比例可再生能源的大规模接入, 风电、光伏

固有的强波动性与间歇性, 使得传统单一能源系统已无法满足现代工业与科技园区对能源低碳化、高效化和运行灵活性的核心需求。

园区级电氢耦合能源系统通过引入氢能作为跨时空的灵活能量载体, 实现了电能与化学能的深度双向互动, 有效缓解了可再生能源消纳问题, 显著提升了系统的综合调节能力。

但电氢耦合系统涉及多能流耦合、多设备协同与多目标优化, 物理机理复杂且运行工况多变, 传统实体实验存在操作安全风险高、极端工况难以复现等诸多局限。为帮助学生直观理解该复杂系统的运行机理, 并在无安全风险的虚拟环境中开展优化调度算法的设计与验证, 本研究开发了一套园区级电氢耦合能源系统优化调度虚拟仿真实验平台。

1.1 PLHECS 结构

PLHECS 的物理架构涵盖了“源-网-荷-储-用”全环节, 其实质是一个多能流交织、多设备协同的复杂微网系统, 主要由三部分构成。系统的具体物理拓扑结构如图 1 所示。

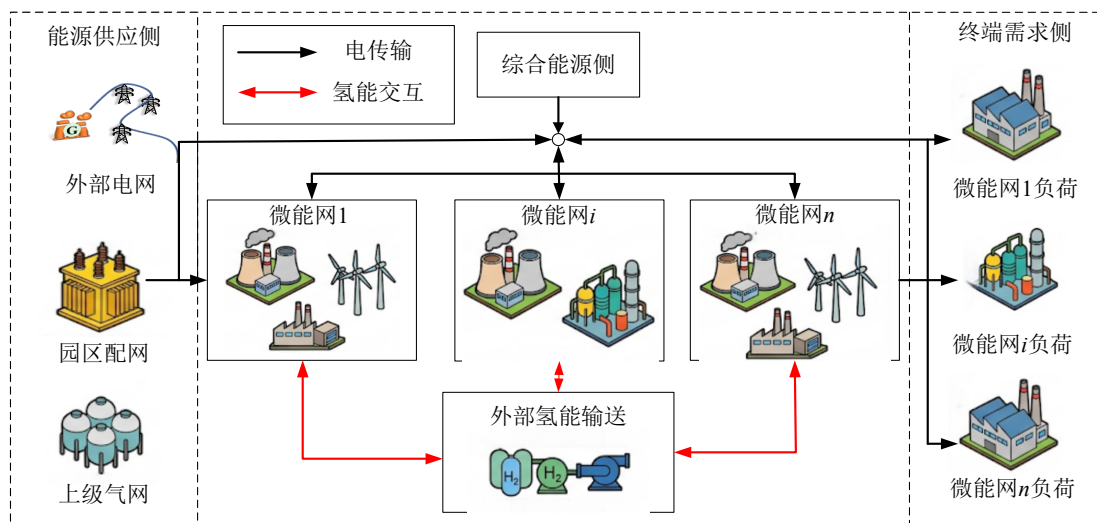


图 1 园区级电氢耦合能源系统物理拓扑结构图

在能源供应与交互方面, 系统不仅集成了光伏阵列与风力发电机组等分布式可再生能源单元作为核心一次能源来源, 还与外部配电网建立了双向灵活调节的功率交互通道。这种源网协同的设计架构, 既能最大化就地消纳波动性强的清洁能源出力, 有效避免弃风弃光现象, 从源头降低园区的碳排放强度与化石能源依赖度; 又能在风光出力骤降、极端天气扰动或系统主动切换至孤岛运行模式时, 通过与大电网的双向功率交互补充功率缺口或消纳富余电能, 可保障园区供电

安全, 维持系统功率平衡与电压频率稳定, 确保关键负荷不间断供电。

在能量转换与耦合环节, 电解槽 (Power-to-Gas, P2G 设备) 和氢燃料电池 (Gas-to-Power, G2P 设备) 构成了电氢双向能量流动的核心枢纽。当可再生能源大发且本地负荷无法完全消纳、存在弃风弃光风险时, 系统调度电解槽启动, 将富余电能转化为氢能存储; 而在电网负荷高峰时段或分时电价处于高位时, 氢燃料电池则将储存的氢能转化为电能回馈电网, 同时回收

发电过程中产生的余热用于园区供热, 实现热电联产, 显著提升能源综合利用效率。

在储能与负荷侧, 系统配置了由电池储能与高压储氢罐协同构成的电-氢混合储能。电池储能具有极快的响应速度, 主要用于平抑短时间尺度内的功率波动; 高压储氢罐则充分发挥其跨日乃至跨季的大容量长周期储能优势, 二者在时间尺度上形成了完美的互补关系。同时, 园区的多元负荷不仅涵盖常规的电、热基础负荷, 还广泛接入了具备车网互动 (Vehicle-to-Grid, V2G) 潜力的电动汽车充电站 (如支持场站对车辆放电及电网解耦运行的先进充电桩) 和氢燃料汽车加氢站。

这些可调控的多元负荷在合理的调度策略引导下, 能够从单纯的能源消费者转变为柔性调节资源, 深度参与系统的双向功率响应与运行调节。

1.2 虚拟仿真实验平台架构

为实现上述园区级电氢耦合复杂物理系统的高保真数字建模与沉浸式交互式教学, 本虚拟仿真实验平台采用模块化分层解耦的设计理念, 基于成熟的浏览器/服务器架构进行开发, 能够有效满足多终端跨平台访问与高并发场景下的实验教学需求。平台的总体软件架构设计如图 2 所示。

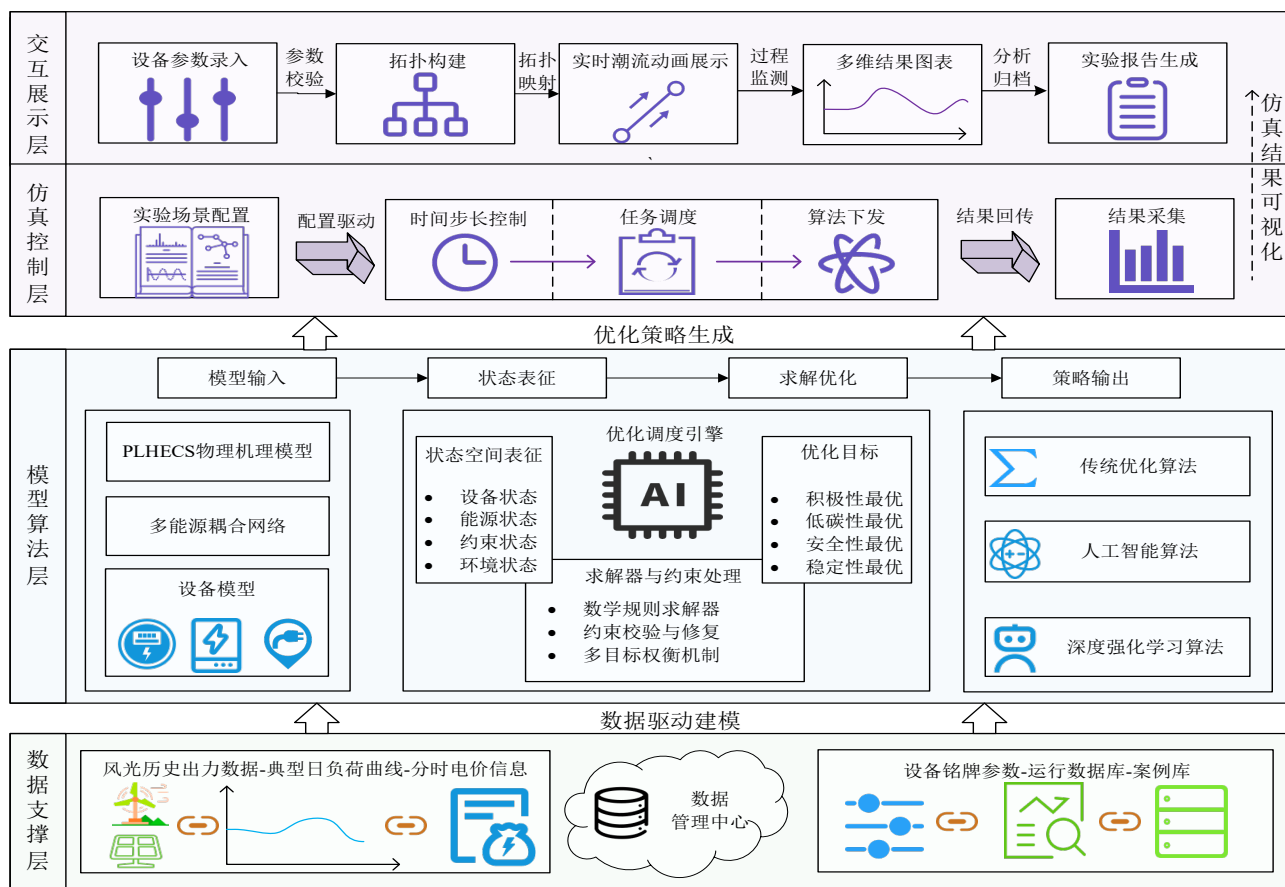


图 2 虚拟仿真实验平台架构图

平台架构自下而上可划分为数据支撑层、模型算法层、仿真控制层和交互展示层：

(1) 数据支撑层：作为整个虚拟仿真实验平台的底层核心基础, 主要负责系统内各类多源异构数据的统一汇集、标准化存储与高效管理。其涵盖风光发电历史出力数据、园区典型日负荷曲线、电网分时电价信息、各类设备铭牌参数、系统运行约束库以及典型实验案例库等核心数据资源, 并通过统一的数据管理中心实

现所有数据的集中化存储与标准化调用, 为平台的建模、控制与可视化展示模块提供稳定可靠的数据支撑。

(2) 模型算法层：这是平台的核心驱动力。该层首先对 PLHECS 物理机理模型、多能源耦合网络以及设备模型进行统一封装, 并在此基础上构建状态空间、动作空间和环境状态等强化学习要素; 同时集成优化调度引擎, 支持传统优化算法、人工智能算法和深度强化学习算法等多种求解方法, 为平台实现复杂调度问

题求解提供模型与算法基础。

(3) 仿真控制层: 负责实验流程的逻辑控制与任务调度。其主要功能包括实验场景配置、时间步长控制、任务调度、算法下发以及结果采集等, 并通过与模型算法层的实时通信, 动态完成系统运行过程的推演与控制。

(4) 交互展示层: 直接面向终端用户, 负责实验过程与结果的可视化呈现。该层包括设备参数录入、拓扑构建、实时潮流动画展示、多维结果图标分析以及实验报告生成等功能, 能够帮助学生直观理解平台运行过程与优化调度效果, 提高实验教学的交互性与可视化水平。

2 基于人工智能驱动的 PLHECS 优化调度的理论基础

在虚拟仿真实验平台的整体架构中, 底层数学模型是决定系统仿真推演逼真度与实验教学有效性的核心基础。本平台针对 PLHECS 多能流强耦合、运行机理复杂的特性, 建立了一套逻辑严密的多目标最优化调度数学模型, 并引入 DRL 算法进行高效求解, 为平台的高保真动态运行提供核心算法支撑。图 3 详细给出了本平台所采用的 PLHECS 优化调度算法理论框架。该框架以园区级电氢耦合能源系统产生的多源异构运行数据为输入, 在全面综合考虑电力侧、氢能侧及负荷侧多维度耦合约束关系的基础上, 借助深度强化学习这一人工智能算法, 实现对系统实时运行状态的精准动态识别与最优调度策略的自适应生成, 进而高效完成对系统多目标优化调度问题的求解。

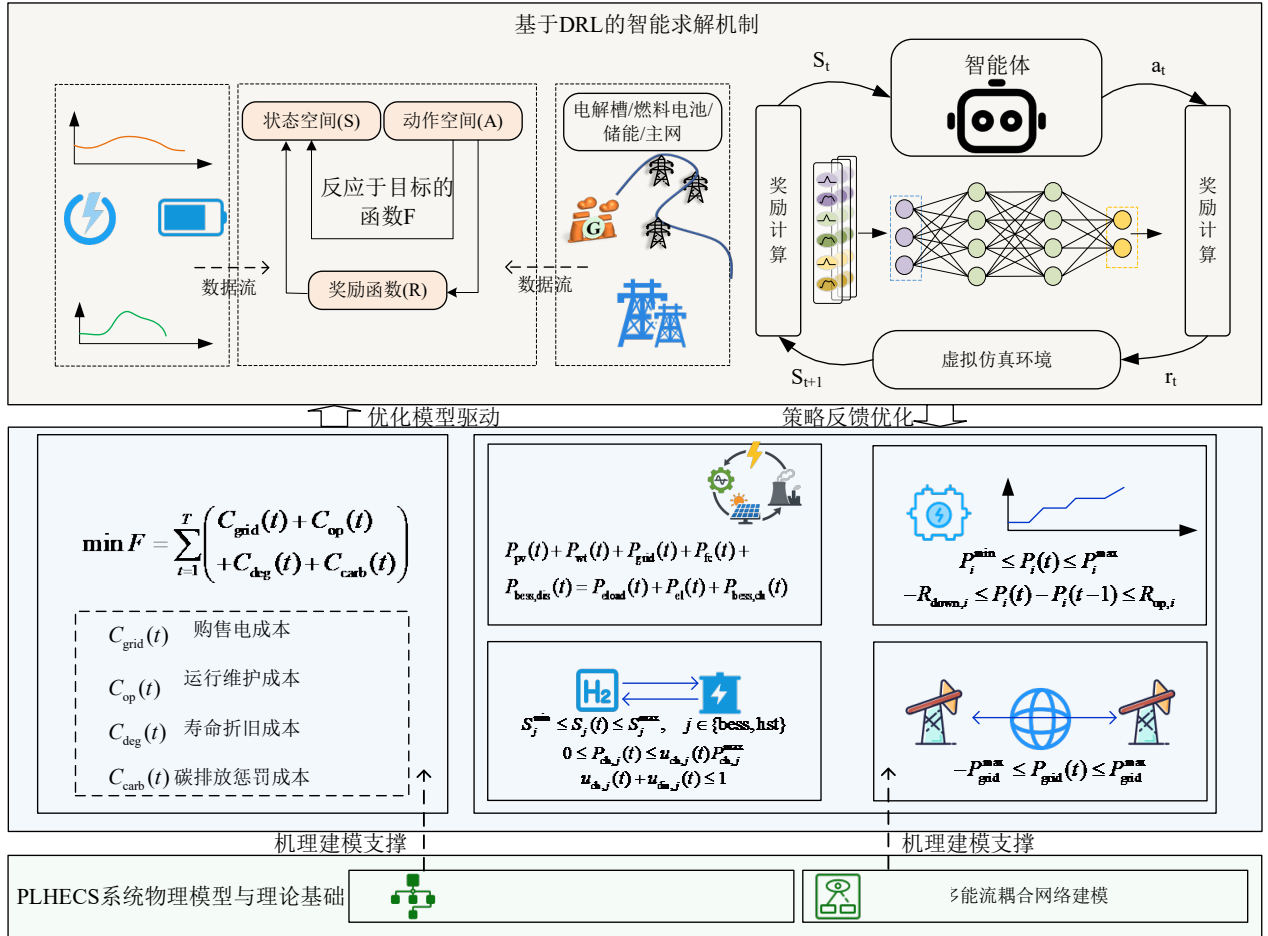


图 3 基于深度强化学习的电氢耦合系统优化调度算法理论架构图

2.1 优化调度目标函数构建

PLHECS 的优化调度旨在满足各类物理约束的前提下, 寻求经济性与环保性的最优平衡。平台将系统的综合运行成本最小化作为目标函数, 具体数学表达式如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{grid}}(t) + C_{\text{op}}(t) + C_{\text{deg}}(t) + C_{\text{carb}}(t) \right) \quad (1)$$

式中, \$F\$ 为系统综合优化目标函数, \$T\$ 为整个调度周期; \$C_{\text{grid}}(t)\$ 为园区与主网交互的购售电成本; \$C_{\text{op}}(t)\$

为 P2G 与 G2P 等转换设备的运行维护成本; $C_{deg}(t)$ 为电-氢混合储能系统的寿命折旧成本; $C_{carb}(t)$ 为碳排放惩罚成本。可调节上述各项的权重系数, 直观对比不同调度偏好对系统运行轨迹的影响。

2.2 核心运行等式与不等式约束

为确保虚拟平台中能量流动的物理可行性, 模型严格定义了系统运行必须遵循的等式与不等式边界条件。

(1) 功率平衡等式约束

电母线与氢母线在任意时段 t 内必须保持供需平衡:

$$\begin{aligned} & P_{pv}(t) + P_{wt}(t) + P_{grid}(t) + P_{fc}(t) + P_{bess,dis}(t) \\ &= P_{load}(t) + P_{el}(t) + P_{bess,ch}(t) + P_{aux,t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & M_{el}(t) + M_{hst,dis}(t) = \\ & M_{fc}(t) + M_{hst,ch}(t) + M_{hload}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, P_{pv} 、 P_{wt} 分别为光伏与风电出力; $P_{aux,t}$ 为 t 时刻系统内涉氢辅助设备 (包括氢气压缩机、纯化装置及冷却循环系统等) 的寄生总电耗; P_{grid} 为主网交互功率; P_{fc} 与 P_{el} 分别为燃料电池发电与电解槽耗电功率; $P_{bess,dis}$ 与 $P_{bess,ch}$ 为电池放/充电功率; P_{load} 为常规电负荷; M_{el} 表示电解槽产生的氢气量; $M_{hst,dis}$ 表示储氢装置释放的氢气量; M_{fc} 指氢燃料电池消耗的氢气量; $M_{hst,ch}$ 表示储氢装置吸收的氢气量; M_{hload} 表示氢负荷消耗的氢气量。

(2) 设备出力与爬坡不等式约束

系统内各能量转换设备的实时出力指令及其变化率需严格受限:

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (4)$$

$$-R_{down,i} \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq R_{up,i} \quad (5)$$

式中, $P_i(t)$ 为设备 i 在 t 时刻的功率; $P_i^{\min}$ 与 $P_i^{\max}$ 为出力下限与上限; $R_{up,i}$ 与 $R_{down,i}$ 分别为设备 i 允许的最大向上和向下爬坡速率。

(3) 电-氢混合储能运行约束

为延长储能资产寿命, 电池储能系统 (Battery Energy Storage System, BESS) 与高压储氢罐需控制其荷电/储氢状态, 且不能同时处于充放能状态:

$$S_j^{\min} \leq S_j(t) \leq S_j^{\max}, \quad j \in \{bess, hst\} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{ch,j}(t) \leq u_{ch,j}(t) P_{ch,j}^{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{dis,j}(t) \leq u_{dis,j}(t) P_{dis,j}^{\max} \quad (8)$$

$$u_{ch,j}(t) + u_{dis,j}(t) \leq 1 \quad (9)$$

式中, $S_j(t)$ 为储能设备 j 的实时剩余电量百分比; $u_{ch,j}(t)$ 与 $u_{dis,j}(t)$ 为 0-1 布尔变量, 作为状态互斥位约束。 $P_{ch,j}(t)$ 和 $P_{dis,j}(t)$ 分别为 t 时刻第 j 个储能单元的充电功率和放电功率; $u_{ch,j}(t)$ 和 $u_{dis,j}(t)$ 分别为对应的充电、放电状态变量。

(4) 联络线交互约束

为防止微网对上级配电网造成过大冲击, 联络线功率需满足:

$$-P_{grid}^{\max} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max} \quad (10)$$

式中, $P_{grid}^{\max}$ 为园区与大电网交互的最大功率容量。

2.3 面向马尔可夫决策过程智能求解机制建模

面对上述含离散非线性特征的复杂混合整数规划模型, 平台引入 DRL 技术, 将物理模型重构为马尔可夫决策过程。

状态空间 S :

$$\begin{aligned} S_t = \{ & \lambda_{grid,t}, \lambda_{e,t}^{\text{base}}, \lambda_{H,t}^{\text{base}}, P_{WT,t}, \\ & P_{PV,t}, P_{L,t}, M_{L,t}, SOC_{B,t}, SOH_{H,t} \} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\lambda_{grid,t}$ 为外部大电网的时序分时电价信号 (元/kWh); $\lambda_{e,t}^{\text{base}}$ 和 $\lambda_{H,t}^{\text{base}}$ 分别为多微网日前制定的内部基础电价 (元/kWh) 与基础氢价 (元/kg); $P_{WT,t}$ 和 $P_{PV,t}$ 为各子微能网的风电与光伏预测出力 (kW); $P_{L,t}$ 和 $M_{L,t}$ 分别为园区的综合电负荷 (kW) 与氢负荷需求 (kg/h); $SOC_{B,t}$ 为电池储能系统的实时荷电状态; $SOH_{H,t}$ 为高压储氢罐的实时储氢状态。整个状态空间重构为 12 维连续向量。为消除不同物理量纲对神经网络训练带来的梯度倾斜影响, 所有状态特征在输入网络前均通过分布式最大最小归一化平滑映射至 [0,1] 区间。

此外, 智能体在每个调度时步下发的动作指令, 均需严格满足前述公式 (3) 所界定的氢功率平衡约束。系统通过该平衡等式实时计算高压储氢罐的净充放气量, 并将其更新为下一时步的实时储氢状态参量, 从而实现底层物理环境与高层马尔可夫决策过程在状态空间上的闭环交互。

动作空间 A :

为提高算法的控制稳定性, 智能体的动作输出并非直接控制设备的绝对运行功率, 而是定义为日内滚动对日前计划的偏差修正量:

$$A_t = \{\Delta\lambda_{e,t}, \Delta\lambda_{H,t}, \Delta P_{ex,t}, \Delta P_{P2G,t}, \Delta P_{G2P,t}\} \quad (12)$$

式中, $\Delta\lambda_{e,t}$ 和 $\Delta\lambda_{h,t}$ 分别为内部电、氢交易价格的日内动态修正量 (元/kWh, 元/kg); $\Delta P_{ex,t}$ 为微网间公共联络线交互功率的调整量 (kW); $\Delta P_{P2G,t}$ 和 $\Delta P_{G2P,t}$ 分别为电解槽耗电功率与氢燃料电池发电功率的日内微调校正量 (kW)。动作空间总维度为 6 维, 各动作输出通过激活函数映射至 $[-1,1]$ 连续区间, 并在下发至仿真层前, 乘以设备的最大爬坡速率及联络线容量上限进行物理截断, 确保指令绝对不越限。

奖励函数 R 与目标函数 F 深度绑定, 并引入极大的惩罚系数 γ 以限制越限行为:

$$r_t = - \left(\begin{matrix} C_{grid}(t) + C_{op}(t) \\ + C_{deg}(t) + C_{carb}(t) \end{matrix} \right) - \gamma \sum \Psi(t) \quad (13)$$

式中, r_t 为 t 时刻的即时奖励值; γ 为惩罚系数; $\Psi(t)$ 为 t 时刻触发的越限惩罚函数。在虚拟训练推演中, 底层人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 智能体通过不断最大化累积期望奖励, 最终学习到在严格物理边界下逼近全局最优解的调度策略。

在算法底层超参数与网络架构配置方面, 本文构建的近端策略优化智能体采用策略-评价者 (Actor-Critic) 分层架构, 其神经网络均基于多层感知机搭建。Actor 与 Critic 网络均包含 3 个隐藏层, 神经元节点数依次配置为 256、128 和 64, 隐藏层激活函数统一选用 ReLU。在输出层设计上, Actor 网络采用 Tanh 函数以输出归一化连续动作, Critic 网络则采用线性输出以精准拟合状态价值。在核心训练超参数方面, Actor 与 Critic 网络的学习率分别设定为 0.0003 与 0.0010; 折扣因子取 0.99, 广义优势估计参数取 0.95; 此外, 训练

批量大小设为 128, 经验回放检查点设定为 2048 步, 策略裁剪系数设定为 0.2 以约束策略更新幅度, 确保训练过程的平稳收敛。

3 PLHECS 虚拟实验平台设计

3.1 资源配置模块

资源配置是开展电-氢耦合能源网能量共享与调度策略研究的准备环节。该模块旨在帮助学生认知系统组成, 并构建仿真的底层物理与算法环境。其配置结果将作为日前调度等后续实验模块的基础输入。

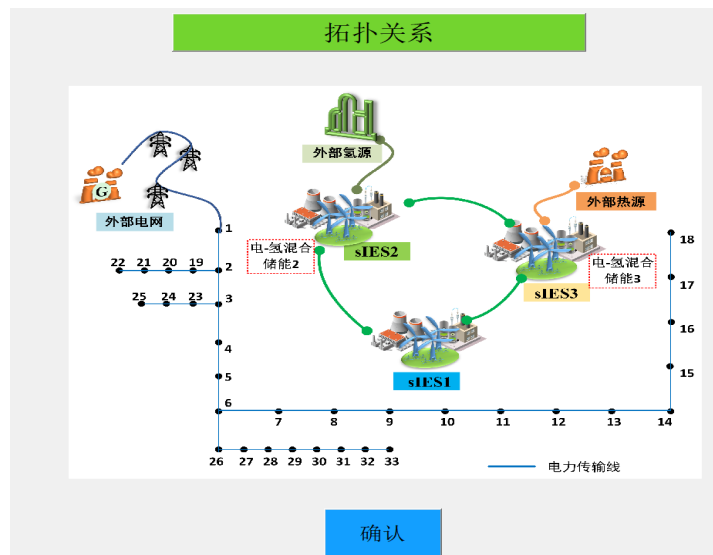
本模块的核心功能包括:

拓扑关系设置: 学生可在可视化界面中拖拽光伏、风电、电解槽、燃料电池及电-氢混合储能等设备图元, 自由搭建单微网或多微网互联的物理拓扑, 并录入设备的容量、转换效率等铭牌参数。平台支持单微网独立运行与多微网互联共享两种物理拓扑模式。本文第 4 节案例采用三微网互联的改进 IEEE 33 节点扩展结构, 各微网间通过公共联络线交换功率, 并遵循统一的内部定价机制进行能量交互。

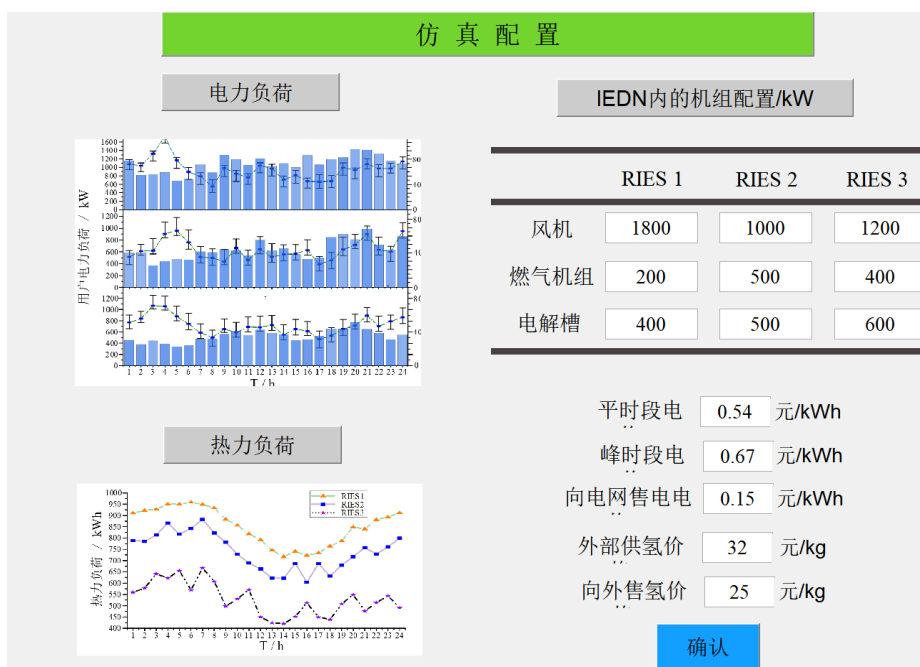
仿真环境配置: 支持学生导入典型日的风光出力预测曲线与多元负荷曲线, 设定仿真时间步长与外部主网的峰谷平电价区间。

训练机制配置: 针对底层的 DRL 引擎, 学生可自主配置智能体的超参数, 包括学习率、折扣因子、经验回放池大小以及探索噪声等, 为后续的 AI 模型训练奠定基础。

为清晰展示资源配置模块中设备拓扑搭建、运行环境设定及训练机制配置等功能界面, 其典型操作页面如图 4 所示。



(a) 拓扑关系设置



(b) 仿真环境配置

图4 资源配置模块用户界面

3.2 日前调度实验模块

日前调度模块主要模拟能源系统在日前市场中的规划行为,重点考察学生对日前风光负荷预测数据的分析能力以及对基础能量分配法则的理解。

本模块的核心功能包括:

制定电/氢交互计划:平台基于输入的日前预测数据,运行常规优化算法,生成园区内部设备的基础出力基准线,并制定各微网之间、以及园区与上级电网/氢网的日前电量交互计划与氢气交互计划。

明确交易价格信号:平台根据供需关系曲线,模拟生成次日的电量与氢气内部交易价格。学生可以通过该模块直观观察到,在风光大发时段,系统如何通过降低氢气价格来刺激电解槽的产氢消纳;在负荷高峰期,又如何通过高电价引导燃料电池发电,从而理解价格信号对园区电氢日前交易调度的指导作用。

3.3 日内调度实验模块

受限于可再生能源的高随机性,日前预测往往存在误差,日内调度模块则是展示平台核心 AI 算法能力的关键模块。该模块利用 DRL 应对源荷实时波动。

本模块的核心功能包括:

DRL 动态优化与校正:面向日内高频的功率波动,学生可启动预训练的 DRL 智能体。智能体根据实时感知到的系统状态,快速下发动作。

生成能量交互校正计划:平台实时展示智能体如

何调整电解槽、燃料电池的瞬时功率,动态优化日内电-氢混合储能的充放电交互量,从而对日前交互计划产生偏差的部分进行精准的功率校正。

综合奖励机制分析:平台开放了 DRL 的内部视窗,学生可实时观测智能体在处理能量不平衡或设备越限时,综合奖励机制对其行为的引导过程,直观理解人工智能决策机制。

3.4 运行效益评估模块

实验的最终环节是运行效益评估模块,承担着实验数据回收与教学评价闭环的作用。通过多维度的指标量化,帮助学生认识电-氢混合储能管理的价值。

本模块的核心功能包括:

算法性能评估:平台自动输出 DRL 算法的收敛奖励值与训练回合数,评估不同训练机制配置下的 AI 算法寻优效率。

经济效益量化:平台对全天的运行数据进行经济核算,详细计算并生成系统总运行成本、设备运维成本、主网购能成本以及售能效益的对比柱状图。

运行稳定性监测:回顾监测日内校正功率的时序分布,评估系统对波动的平抑效果。最终生成一键式实验报告,全面量化系统在提升能源利用率、降低碳排放等方面的综合表现。

最终的综合运行效益评估如图 5 所示。

4 案例分析

为验证本虚拟仿真实验平台在处理复杂电氢调度问题上的有效性, 本节以典型工业园区背景下的电-氢耦合能源网为对象开展仿真实验。实验过程模拟了从

参数配置、算法训练到结果分析的完整教学环节, 相关数据与图表均由平台仿真程序计算生成。



图 5 综合运行效益评估

4.1 仿真设置与场景配置

本节不采用真实物理园区实测运行数据, 而是基于公开标准微电网测试集、典型气象特征及设备参数构造案例场景。相关数据与图表均由平台仿真程序计算生成, 主要用于展示平台的实验组织流程、调度策略对比和教学分析功能。

本文采用改进的 IEEE 33 节点系统等效表征“大型多区域综合能源园区”的内部骨干网拓扑。尽管传统 33 节点系统常用于区域级配电网, 但考虑到现代大型零碳园区(如多片区融合的工业/科技园)通常涵盖地理位置分散的多个子微网系统, 直接采用该标准拓扑能够更真实地模拟子微网间能量互济时的物理电气距离与联络线网损约束。在具体的物理节点映射上, 本系统将三个微网(sIES1、sIES2、sIES3)作为独立的能量枢纽, 分别整体等效接入该拓扑的特定节点(如节点 18、22、33); 同时, 将微网内部典型的园区级设备(如配置的 400~600 kW 电解槽与兆瓦级风机等)总容量进行严格校验, 确保其峰值交互功率处于所在节点与支路潮流的安全承载范围内, 从而实现了宏观骨干网络与微观设备规模的合理折算与逻辑统一。

在实验初期, 学生需在平台的资源配置模块中完成系统参数的初始化。仿真系统采用了改进的 IEEE 33

节点配电网结构, 接入了三个包含不同风光渗透率的综合能源微网。在多微网能量交互与交易机制方面, 三个微网在区域配电网内实施分布式协同调度。各微网代理商基于非合作博弈理念, 开展点对点的电量与氢气交易。在物理层面上, 微网间的能量流转严格遵循联络线功率约束与节点能量平衡约束; 在交易层面上, 内部共享价格通过正则化函数法迭代协商产生, 在保障各微网基本收益的同时, 准确反映区域内的能源供需关系。核心设备参数设定为: 电解槽额定功率为 500kW, 氢燃料电池额定功率为 300kW, 电-氢混合储能系统配比根据园区典型峰值负荷进行 1: 1.2 的冗余配置。在算法配置方面, DRL 智能体采用近端策略优化架构, 设定学习率为 0.0003, 折扣因子为 0.99, 单次实验训练回合数设定为 1000 次。仿真场景选取了园区典型的夏季大风日, 以考察系统在极端源荷波动下的协同平抑能力。

对比实验设计:

为准确评估所提电氢共享机制的经济与低碳效益, 本仿真平台在前端配置模块中设计了多模式切换功能。本文在第 4.3 节中具体设置了两种对比运行模式:(1) 无电氢耦合模式(对照组): 在该模式下, 强制设定各微网内电解槽与氢燃料电池的交互功率为 0, 切断跨微

网的氢能互济传输, 系统仅保留常规电池储能及与外部主网的电力交互; (2) 具备电氢共享机制模式(实验组): 全面激活电-氢转换设备及多微网联络线, 智能体可自主调度电解槽与燃料电池, 并基于 P2P 交易网络实现多微网间的电、氢双向协同共享。

核心参数配置:

在具体物理边界与价格参数上: 三个微网(sIES1、sIES2、sIES3)的风机额定装机容量分别设定为1800kW、1000kW和1200kW, 电解槽配置分别为400kW、500kW和600kW。系统与外部主网的交互采用典型的分时电价机制: 平时段(23:00-次日6:00)购电价格为0.54元/kWh, 峰时段购电价格为0.67元/kWh, 余电上网售电价格统一为0.15元/kWh; 此外, 外部供氢价格设定为32元/kg, 向外售氢价格为25元/kg, 碳排放价格为0.08元/kg。这些明确的边界条件为后续调度算法的经济寻优提供了标准的计算基准。

4.2 实验结果与算法性能分析

学生完成配置后启动仿真引擎, 可观测算法的训练收敛过程。平台输出的收敛曲线显示: 智能体训练初期通过海量试错, 奖励值剧烈波动; 随着训练轮数增加, 智能体逐渐掌握避开设备运行越限、利用电氢耦合平抑波动的最优策略, 奖励函数在约600个Epoch后趋于稳定并实现高位收敛, 展示了DRL智能体在训练过程中奖励值从波动到收敛的典型学习曲线。图6为DRL的综合奖励收敛情况。

在具体的调度执行层面, 图7展示了平台生成了精细的日前与日内能量交互计划, 在日前阶段, 系统根据预测的峰谷电价信号, 引导电解槽在凌晨电价低谷期将富余风电转化为氢能储存; 在午后光伏出力高峰, 进一步利用多余电能提升储氢水平。

日内实时运行中, 平台可针对风光出力突发偏离输出精准功率校正, 能量交互校正功率时序图如图8所示。智能体通过电-氢混合储能快速响应, 将日前计划与实测偏差控制在5%以内, 有效提升园区运行可靠性。

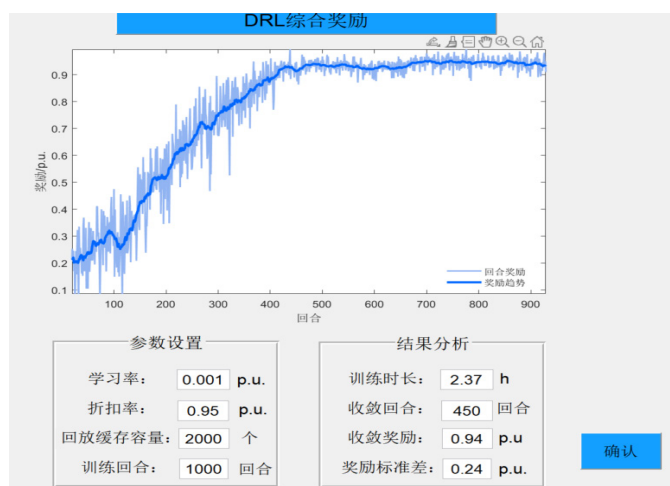


图6 DRL 综合奖励收敛曲线图

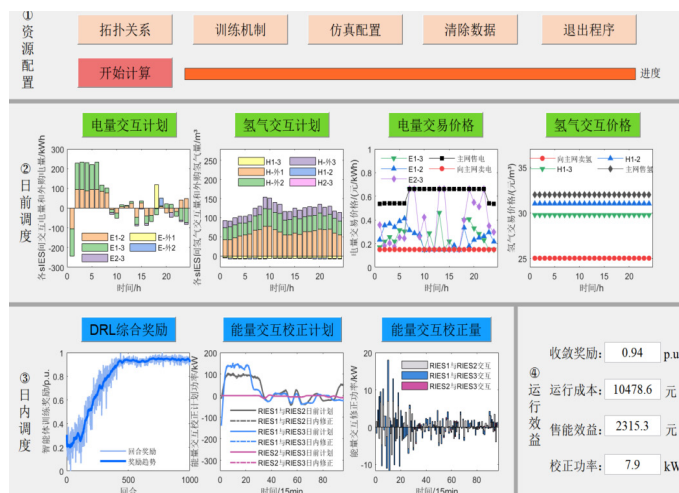


图7 园区电氢耦合系统运行仿真结果

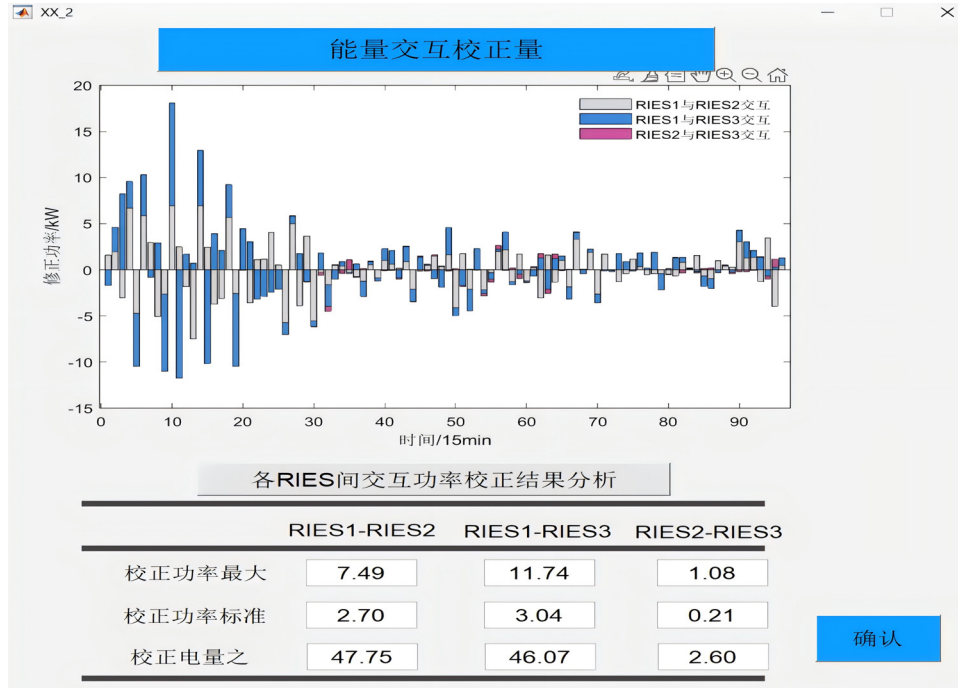


图8 能量交互校正功率时序图

4.3 运行效益评估实验

实验的最后阶段, 学生可通过运行效益评估模块对不同运行模式下系统的经济性、低碳性及运行可行性指标进行对比分析。需要说明的是, 本节结果为基于典型场景参数和平台仿真程序生成的案例仿真结果, 并非真实物理园区实测运行数据。为展示平台在运行效益评估方面的教学支撑功能, 本文在“夏季大风高可再生能源

出力日”场景基础上, 进一步设置“冬季弱风高负荷日”和“春秋源荷相对平衡日”两类典型工况, 并分别对比无电氢耦合模式与电氢共享模式下的仿真结果, 如表1所示。由表1可见, 在所构造的三类典型运行场景下, 电氢共享模式相较于无电氢耦合模式均表现出降低系统综合运行成本与碳排放水平的趋势, 但其改善幅度受新能源出力水平和负荷需求特征影响较为明显。

表1 不同场景下的仿真结果

	夏季大风日	冬季弱风日	春秋平衡日
无电氢耦合成本/元	11975.54	15688.63	10821.48
电氢共享模式成本/元	10478.61	14664.19	9788.67
成本降低率/%	12.50	6.53	9.54
碳排放降低率/%	18.42	8.91	13.33

其中, 在夏季大风高可再生能源出力日场景下, 风电富余电量较多, 电解槽能够较充分地利用低成本清洁电能制氢, 并通过储氢及跨微网能量共享提升新能源消纳能力。在该仿真场景下, 系统综合运行成本降低12.50%, 碳排放降低18.42%。在冬季弱风高负荷日场景下, 由于新能源出力不足, 电氢共享模式的优化幅度相对有限, 但仍表现出一定的负荷高峰支撑和购能成本削减潜力。在春秋源荷相对平衡日场景下, 新能源出力与园区负荷需求匹配程度较高, 系统整体运行状态

较为平稳, 系统综合运行成本降低9.54%, 碳排放降低13.33%。

4.4 关键参数敏感性分析

为分析碳排放惩罚变化对电氢耦合能源系统优化调度结果的影响, 本文选取碳排放价格作为关键敏感性参数开展仿真实验, 图9展示了各参数条件下50次独立仿真的系统综合成本结果。由图9可见, 系统综合成本随碳排放价格提高而持续增加, 但其增长速率逐步减缓。碳排放价格每增长0.02元/kg, 系统综合成

本均值增加 234.92 元。随着碳排放价格进一步提高, DRL 智能体逐渐增加风光新能源就地消纳、电解制氢储能及多微网电氢能量共享的调度优先级, 从而主动降低系统碳排放水平, 部分抵消了碳排放价格升高对

综合成本的影响。该结果表明, 平台能够通过该敏感性实验帮助学生直观认识碳排放约束强度变化对园区综合能源系统运行策略及经济性指标的影响, 并理解经济调度目标与低碳运行目标之间的权衡关系。

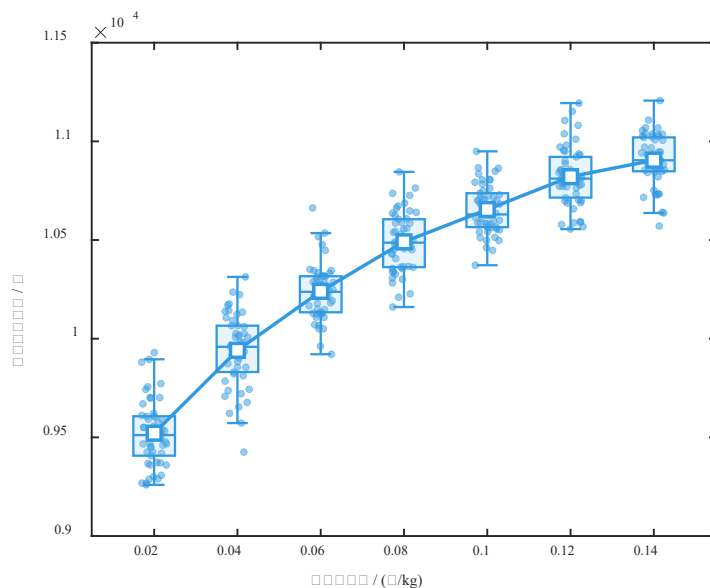


图9 不同碳排放价格下系统综合成本敏感性分析结果

5 结语

本文针对高比例可再生能源接入下的园区能源协同管控难题, 设计并开发了园区级电氢耦合能源系统虚拟仿真实验教学平台。该平台将 DRL 等前沿人工智能算法与电氢耦合物理机理深度融合, 构建了涵盖资源配置、日前计划、日内动态校正及效益评估的综合优化调度实验案例。仿真结果表明, 引入电-氢混合储能与能量共享机制, 能够显著提升园区的经济效益与低碳运行水平。

在教学实践层面, 该虚拟仿真平台的应用有效打破了传统电气工程实验高成本、高风险的壁垒, 将抽象复杂的底层算法与多能耦合网络转化为可视化、交互式的教学资源。这不仅极大地增强了学生对新型能源系统综合分析为解决复杂工程问题的能力, 也为高校进一步探索“科教反哺、产教融合”的新型拔尖人才培养模式提供了参考与示范。

尽管本平台有效验证了调度策略, 但底层物理模型存在一定简化。其一, 模型虽已计及压缩机等辅机电耗以保障能量守恒, 但忽略了氢管网的储气效应与传输延迟。考虑到本文聚焦空间跨度较小的园区级微网, 且调度尺度为 15 分钟/小时级, 忽略该瞬态过程不会导致宏观策略失效, 保障了模型简化的有效性。其二, 假

定核心设备转换效率恒定, 未计及频繁启停的动态衰减, 这在应对高频剧烈波动时可能略微高估系统收益。未来迭代中将重点引入氢管网动态能量流与非线性衰减模型, 以进一步提升仿真保真度。

数据可用性与算法声明

数据可用性与算法声明: 本文案例仿真所用的典型日风光出力与综合负荷时序数据, 系依据公开的标准微电网测试集结合典型气象特征合成, 未直接调用任何真实物理园区的商业涉密数据, 不存在数据使用的合规与授权风险。此外, 本平台底层的多智能体深度强化学习算法及其神经网络架构, 均基于 PyTorch 开源深度学习框架自主编写实现, 确保了核心调度算法的自主可控与研究的可复现性。

参考文献

- [1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(09): 171-191.
- [2] 高宇歌, 任洲洋, 程欢, 等. 考虑电解槽动态效率特性的电-氢混合储能优化运行方法[J]. 电网技术, 2025, 49(02): 533-541.
- [3] Tao Y, Qiu J, Lai S, et al. Integrated Electricity and Hydrogen

- Energy Sharing in Coupled Energy Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1149-1162.
- [4] Pu Y, Li Q, Huo S, et al. Optimal configuration for shared electric-hydrogen energy storage for multiple integrated energy systems with mobile hydrogen transportation[J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121828.
- [5] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 1-10.
- [6] 刘洋, 祝安, 邢作霞, 等. 基于园区综合能源系统优化案例的虚拟仿真实验教学平台[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(04).
- [7] 冀浩然, 宋关羽, 于浩, 等. 含高比例分布式能源的新型配电系统虚拟仿真实验平台[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(01): 66-83.
- [8] 于浩, 董博, 宋关羽, 等. 工业园区综合能源系统虚拟仿真实验平台[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(09).
- [9] 陈继明, 朱劲男, 孟庆伟, 等. 面向孤岛微电网的混合储能实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(09): 63-67.
- [10] 宋关羽, 王智颖, 李鹏, 等. 智能微电网虚拟仿真实验平台设计与实现[J]. 电气电子教学学报, 2020, 42(03): 125-128.
- [11] 张亚超, 朱蜀, 林俊杰, 等. 基于源荷储灵活资源协同的电热综合能源系统实验平台[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(07): 69-75.
- [12] 杨继森, 杨奕, 张静. 虚拟实验平台在嵌入式系统教学改革中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(02): 51-54.
- [13] 李志杰, 李媛, 史桂梅, 等. 大学理科综合实验平台建设[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(12): 21-23.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS