

面向园区微电网的多能互补优化 调度策略探索与实践

冯晓明

(俊郎电气有限公司, 浙江 乐清 325604)

摘要: 针对传统园区微电网普遍存在的可再生能源消纳率低、多能源协同性差、运行成本偏高等痛点, 结合上海某科创园区微电网的实操经验, 构建源网荷储一体化多能互补系统, 形成预测、优化、执行、修正闭环调度体系。通过采用日内滚动优化与实时修正两阶段调度策略, 结合层次分析法-熵权法确定多目标权重的研究, 得出光伏自发自用电量占比从 41.2% 提升至 73.5%, 年运行成本降低 34.6%, 碳排放减少 45.2% 的结论。文章梳理 A 科创园区微电网项目实施中的关键技术节点、问题解决路径及实操经验, 为同类园区微电网优化调度提供可复制的实践方案。

关键词: 园区微电网; 多能互补; 优化调度; 源网荷储

中图分类号: TM764

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2602F026

CSTR: 32400.14.ncdqh.2602F026

Exploration and Practice of Multi-energy Complementation Optimal Dispatch for Park Microgrid

FENG Xiaoming

(Junlang Electric Co., Ltd., Zhejiang Leqing 325604, China)

Abstract: To address the common problems of traditional park microgrids, including low renewable energy consumption, poor multi-energy coordination, and high operating costs, this study draws on the practical experience of a science and technology park microgrid in Shanghai. It constructs an integrated source-network-load-storage multi-energy complementation system and establishes a closed-loop scheduling framework covering forecasting, optimization, execution, and correction. This study adopts a two-stage scheduling strategy that combines intraday rolling optimization with real-time correction. It also uses the analytic hierarchy process and entropy weight method to determine multi-objective weights. The results show that the proportion of self-generated and self-consumed photovoltaic electricity increases from 41.2% to 73.5%, annual operating cost decreases by 34.6%, and carbon emissions decrease by 45.2%. This paper reviews the key technical stages, problem-solving paths, and practical experience in the implementation of the microgrid project in Science and Technology Park A. It provides a replicable practical solution for the optimal scheduling of similar park microgrids.

Keywords: park micro-grid; multi-energy complementation; optimal dispatch; source network load storage

在“双碳”目标推动下, 园区作为能源消费核心场景, 微电网建设已成为提升可再生能源利用效率的关键抓手。传统园区微电网调度存在 3 大痛点: 1) 可再生能源消纳难题, 夏季光伏出力高峰时弃光率高, 而傍晚负荷高峰却需全额外购市电; 2) 多能源各自为战, 燃气三联供 (CCHP) 系统与电网独立运行, 余热利用率较低, 能源梯级利用效率低下^[1]; 3) 调度策略僵化, 采用定出力和全额上网模

收稿日期: 2026-02-28

式, 未结合峰谷电价差开展套利, 年运行成本较理论最优值较高。A 科创园区微电网项目明确以解决实操痛点为核心目标, 摒弃单纯追求技术先进性的设计思路, 聚焦可落地、可复制、效益明确的原则。

1 项目概括

A 科创园区占地 8 万 m², 涵盖 6 栋研发办公楼、4 个生产车间及 2 个配套生活区, 总建筑面积

32 万 m^2 ，入驻企业以电子信息、精密制造为主，能源需求呈现高波动、多类型、强刚性特征。经连续 3 个月实地监测（每 15 min 采样 1 次），核心能源数据如表 1 所示，其中用电负荷方面，工作日早峰（09:00—11:00）达 2.8 MW，午峰（14:00—16:00）达 2.6 MW，晚峰（19:00—21:00）达 2.4 MW，生产车间的精密设备为刚性负荷（占比 42%），空调、水泵为可调节负荷（占比 38%）；冷负荷方面，夏季（6—9 月）午峰（13:00—15:00）达 3.2 MW，主要来自研发楼中央空调；热负荷方面，冬季（12—2 月）早峰（08:00—10:00）达 2.9 MW，涵盖采暖与生活热水需求。

表1 A 科创园区用电负荷 单位: MW

类别	时段	数据
工作日峰谷分布	早峰 (09:00—11:00)	2.8
	午峰 (14:00—16:00)	2.6
	晚峰 (19:00—21:00)	2.4

数据来源：连续3个月的实地监测。

可再生能源资源方面，园区屋顶可利用面积 4.8 万 m^2 ，停车场顶棚 1.2 万 m^2 ，具备光伏安装条件；北侧空地常年风速 3.5~4.5 m/s，适合布置小型风电。基于上述条件，项目最终确定了光伏 + 风电 + CCHP + 储能 + 柔性负荷的多能互补架构，核心目标是光伏自发自用电量占比提升至 70% 以上，年运行成本降低 30% 以上，碳排放减少 40% 以上。

2 多能互补系统架构设计与硬件落地

2.1 架构设计核心原则

结合项目经验，多能互补系统架构设计应坚守 3 个匹配原则：1) 能源供给与负荷特性匹配，针对园区早中晚三峰负荷特征，采用光伏 + 风电覆盖白天基荷，CCHP 系统补充高峰缺口，储能平抑波动^[2]；2) 设备容量与效益平衡，避免盲目追求大容量、高配置，通过成本回收期测算确定设备规模；3) 控制接口与现有系统兼容，充分利用园区原有配电、暖通系统，减少改造投入，降低施工难度^[3]。

2.2 核心设备选型与参数确定

基于上述原则，项目核心设备选型及参数如下：

所有选型均经过实地测试与性价比对比。

光伏系统：选用单晶硅组件功率 550 W/块，转换效率 23.5%。采用组串式逆变器，额定功率 50 kW，最大转换效率 98.6%，分 12 个阵列布置于屋顶及停车场顶棚，总容量 3.2 MW，经 BIM 软件模拟 30°倾角安装，年发电量可达 360 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

风电系统：考虑园区空间限制，选用 3 台 200 kW 水平轴小型风力发电机（切入风速 3 m/s，额定风速 12 m/s），布置于北侧空地，年发电量约 180 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，弥补光伏夜间出力空白。

CCHP 系统：配置 2 台 800 kW 燃气内燃机发电机组，热效率 41%，发电效率 38%，配套 2 台 1.5 t/h 余热锅炉及 2 台 1.2 MW 吸收式制冷机组，实现“电-热-冷”三联供。机组选用低氮燃烧机型（氮氧化物排放 $\leq 30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ），满足上海市环保要求，天然气耗量约 $0.28 \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，低于行业平均 $0.32 \text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的水平。

储能系统：采用容量 1.2 MW/2.4 $\text{MW}\cdot\text{h}$ 、充放电效率 92% 的磷酸铁锂电池，选用集装箱式布置，便于后期扩容。结合峰谷电价差，设定谷段（22:00—06:00）充电、峰段（08:00—11:00、18:00—22:00）放电，兼顾调峰与套利双重功能。

柔性负荷管控：对园区 42% 的可调节负荷进行改造，空调系统采用变频控制，水泵加装智能控制器，充电桩设置峰谷充放模式，通过能源管理系统（EMS）实现远程调度。

2.3 硬件落地关键问题解决

光伏阵列与屋顶承重冲突。研发楼屋顶原设计承重为 $0.3 \text{ kN}/\text{m}^2$ ，而光伏组件（含支架）重量达 $0.35 \text{ kN}/\text{m}^2$ ，直接安装存在安全风险。针对这个问题，采用轻量化铝制支架，对屋顶承重薄弱区域进行局部加固，新增钢筋混凝土梁，并通过第三方检测机构验证，确保承重安全。

多设备电压波动耦合干扰。调试阶段发现，光伏、风电与 CCHP 系统同时并网时，低压侧电压波动幅度达 $\pm 5\%$ ，超出国标要求（ $\pm 2\%$ ）。因此，在各电源接入点安装 SVG 静止无功发生器（容量 500 kvar），实时补偿无功功率；优化并网顺序，先 CCHP 系统、后光伏、再风电，避免冲击电流叠加，最终将电压波动控制在 $\pm 1.8\%$ 以内。

CCHP 系统余热利用不充分。初期运行时，余

热锅炉蒸汽仅用于采暖，夏季余热排空，热利用率仅 65%。通过新增 2 台板式换热器，夏季将余热用于预热生活热水，冬季兼顾采暖与热水供应；优化机组运行策略，根据热负荷需求调整发电量，使余热利用率提升。

3 闭环优化调度体系构建与实操迭代

3.1 闭环调度体系总体设计

传统调度模式的核心缺陷是预测与执行脱节、缺乏动态修正，因此，A 科创园在借鉴之前的运维经验的基础上，按照预测、优化、执行、修正四环节闭环调度体系，各环节功能与衔接逻辑见图 1。

预测环节采用基础预测和误差修正双模型，预测未来 24 h 光伏/风电出力、电/热/冷负荷及天然气价格。光伏出力预测基于近 3 年同期历史数据（含晴、阴、雨不同天气工况）与实时气象数据（光照强度、温度），采用长短期记忆网络（LSTM）模型，预测精度达 85%；负荷预测结合企业生产计划与历史负荷数据，采用梯度提升树（XGBoost）模型，刚性负荷预测精度达 90%，可调节负荷预测精度达 82%。

优化环节是基于预测数据构建多目标优化模型，目标函数为最小化运行成本 + 最大化光伏自发自用电量 + 最小化碳排放量，约束条件包括设备出力

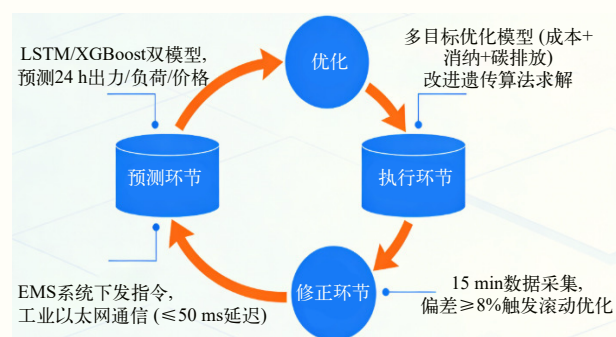


图1 闭环调度体系结构

上限、储能 SOC（荷电状态）范围在 20%~80%、热/冷负荷供需平衡等。采用改进遗传算法求解，每小时更新 1 次调度计划，输出 96 个时段的各设备出力值。

执行环节是通过 EMS 系统，如图 2 所示，选用施耐德 EcoStruxure 平台下发调度指令，采用工业以太网传输延迟≤50 ms 实现与光伏逆变器、CCHP 控制器、储能 PCS 的通信^[4]。为避免指令执行偏差，在关键设备加装反馈模块，实时上传运行状态。

修正环节是每 15 min 采集 1 次实际运行数据，计算与预测值的偏差。若偏差≥8%，触发滚动优化，基于最新数据调整下一时段调度计划。例如，夏季突发暴雨时，光伏出力从预测的 1.8 MW 骤降至 0.6 MW，偏差达 66.7%，系统立即触发修正，调度



图2 施耐德 EcoStruxure 平台

储能放电 1.0 MW、CCHP 系统提升至满负荷运行，弥补出力缺口。

3.2 两阶段调度策略实操设计

为平衡调度精度与计算效率，项目采用日内滚动优化和实时修正两阶段策略，经验证后形成标准化流程。

第一阶段（日内滚动优化，周期 1 h）：以当日 00:00 预测数据为基础，结合前 1 h 实际运行偏差，优化未来 24 h 调度计划。例如，某工作日 08:00 优化时，发现 07:00 光伏实际出力较预测值高 12%，则调整 08:00—09:00 调度计划：减少 CCHP 系统出力 200 kW，增加可调节负荷用电 100 kW，剩余 100 kW 电能充电储能，既提升光伏消纳，又降低燃气消耗。

第二阶段（实时修正，周期 15 min）：聚焦短时间尺度的波动平抑，采用模型预测控制（MPC）方法微调调度计划，重点调整储能与柔性负荷。小试阶段发现，单纯依赖储能调峰易导致 SOC 过低，因此增加柔性负荷优先调节规则：当光伏出力突增时，先提升空调、水泵运行功率，再充电储能；当出力突降时，先降低可调节负荷功率，再放电储能。该规则实施后，储能充放电次数减少 35%，延长了电池寿命。

3.3 多目标权重确定与实操适配

多目标优化的核心是权重分配，需兼顾园区降本为主、环保为辅的实际诉求。项目采用层次分析法（AHP）与熵权法耦合模型，具体数据见表 2。

在层次分析法确定主观权重时，邀请 5 名专家（含 2 名园区运维负责人、2 名微电网设计工程师、1 名高校教授）构建判断矩阵，从项目实际需求出发，将运行成本权重设为 0.45，光伏消纳为 0.35，碳排放为 0.20，这符合园区效益优先的定位。

熵权法确定客观权重，选取小规模试验阶段 3 个月的运行数据，计算各目标的信息熵。运行成本

的熵权为 0.42，光伏消纳为 0.38，碳排放为 0.20，与主观权重基本一致，验证了合理性。

在耦合权重计算中采用线性加权法，主观与客观权重系数均取 0.5，最终确定综合权重：运行成本 0.435，光伏消纳 0.365，碳排放 0.200。在实操中，针对不同季节调整权重：冬季热负荷高，CCHP 系统运行时间长，将碳排放权重临时提升至 0.25，倒逼系统优先利用光伏/风电，减少燃气消耗。

4 工程落地全流程问题与解决路径

A 科创园区项目从设计到投运历时 14 个月，经历基础调研、方案设计、硬件安装、系统调试、小规模试验迭代、全域推广 6 个阶段，每个阶段均面临实操难题，但是通过不断的努力，形成可复制的落地经验。

4.1 基础调研阶段：负荷特性精准识别难题

基础调研的核心是掌握真实负荷特性，若数据失真会导致后续方案全盘皆错。由于初期采用人工抄表方式，数据采样间隔 2 h，无法捕捉负荷波动细节。因此，之后在园区 12 个关键负荷节点，如研发楼配电箱、生产车间进线柜、空调主机等，安装智能监测终端，连续采集 3 个月数据，覆盖工作日、周末、节假日及不同季节。通过数据挖掘发现精密制造车间存在“15 min 短时冲击负荷”（峰值达 0.8 MW），若未考虑此特性，储能容量不足会导致电压骤降。最终将储能容量从 1.0 MW/2.0 MW·h 调整为 1.2 MW/2.4 MW·h，解决了冲击负荷问题。

4.2 系统调试阶段：多设备协同控制冲突

系统调试阶段最突出的问题是多设备协同冲突：CCHP 系统与储能同时启停时，会产生 2~3 倍额定电流的冲击，导致配电开关跳闸。经不断地检查分析，原因是各设备控制策略独立，未设置协同逻辑。因此，选择在 EMS 系统中新增协同控制模块，设定优先级规则，启停顺序采用先启高优先级、后启低优先级，先停低优先级、后停高优先级；在设备启

表2 多目标优化权重分配

决策阶段	方法	运行成本权重	光伏消纳权重	碳排放权重	合计
主观赋权	层次分析法（AHP）	0.45	0.35	0.20	1.00
客观赋权	熵权法	0.42	0.38	0.20	1.00
综合赋权	线性加权耦合	0.435	0.365	0.200	1.00
动态调整	冬季实操权重（示例）	0.430	0.320	↑ 0.250	1.00

停时加入软启动逻辑，将电流冲击控制在 1.5 倍以内。经测试，调整后未再发生跳闸现象，系统稳定性显著提升。

4.3 小试推广阶段：用户接受度与负荷响应难题

小试阶段（选取 2 栋研发楼、1 个生产车间）发现，可调节负荷调度面临用户不配合，空调温度调整、水泵启停影响办公与生产体验，部分企业擅自关闭智能控制器。选择的解决办法如下：1) 建立激励机制，对配合负荷调度的企业，给予电费 0.05 元/(kW·h) 的补贴，每月结算一次；2) 优化调度策略，避免工作时间（09:00—17:00）大幅调整空调温度（波动控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内），水泵采用轮值启停模式，不影响生产用水；3) 开展培训宣讲，向企业负责人说明调度的必要性与收益。

4.4 运维阶段：预测精度与设备损耗平衡难题

投运后发现，为提升预测精度，频繁调整设备出力会增加损耗。CCHP 系统每日启停 3 次以上时，维护成本较每日 1 次增加 40%。解决方案：优化预测模型，加入设备运行状态约束，如 CCHP 系统单次运行时间不低于 4 h，避免频繁启停；调整修正阈值，非峰时段（负荷波动小）将偏差阈值从 8% 放宽至 12%，减少不必要的修正。优化后，CCHP 系统日均启停次数从 3.2 次降至 1.5 次，年维护成本降

低 28 万元，而预测精度仅下降 2%，实现精度与损耗的平衡。

5 实施效果情况

A 科创园区项目于 2023 年 6 月全园区投运，选取 2022 年 6 月—2023 年 5 月（实施前）与 2023 年 6 月—2024 年 5 月（实施后）的同期数据对比，核心指标改善效果明显，见表 3，完全达到预期目标。

根据表 2 可知，可再生能源消纳效果实施前光伏自发自用电量占比 41.2%，弃光率 18.5%；实施后占比提升至 73.5%，弃光率降至 3.2%。夏季光照充足时，自发自用电量占比达 82.1%，冬季因光照减弱仍达 65.3%，表明调度策略对不同季节的适配性良好。风电与光伏协同后，可再生能源总发电量占园区用电量的比例从 18.3% 提升至 35.7%；经济性效果实施前年运行成本为 980 万元；实施后年运行成本降至 640 万元，降低 34.6%。成本降低的核心原因：1) 光伏自发自用电量增加，减少购电支出 310 万元；2) 储能峰谷套利年收益约 58 万元；3) CCHP 系统余热利用率提升，虽然燃气消耗增加 15%，但满足了全部热/冷负荷需求；4) 环保效果实施前年碳排放量为 3 200 t；实施后降至 1 750 t，

表3 A 科创园区多能互补优化调度项目核心指标对比

对比维度	具体指标	实施前	实施后	效果
可再生能源消纳效果	光伏自发自用电量占比/%	41.2	73.5	提升32.3个百分点
	光伏弃光率/%	18.5	3.2	降低15.3个百分点
	夏季自发自用占比/%	未提供	82.1	调度策略对高辐照季节适配性优秀
	冬季自发自用占比/%	未提供	65.3	调度策略对低辐照季节仍保持高效
	可再生能源发电量渗透率	18.3	35.7	提升17.4个百分点
经济性效果	年度运行总成本/万元	980	640	降低34.6%
	其中：电费支出/万元	520	210	减少310万元（核心贡献）
	其中：燃气费支出/万元	400	360	仅增加15%，但满足了全部热/冷需求
	其中：维护费支出/万元	60	70	因新增设备管理，略有上升
	储能峰谷套利年收益/万元	未实现	58	新增收益来源
环保效果	年度CO ₂ 排放总量/t	3 200	1 750	减少45.2%
	其中：燃气机组排放/t	1 800	1 600	效率提升，排放略有下降
	其中：电网购电间接排放/t	1 400	150	大幅降低89.3%
	碳排放强度/kg·(kW·h) ⁻¹	0.68	0.37	降低45.6%

减少 45.2%。碳排放强度从 0.68 kg/(kW·h) 降至 0.37 kg/(kW·h)，助力园区成功获评国家级绿色园区。

为了进一步验证，选取 2024 年 7 月 15 日（夏季典型日，最高气温 38℃，光伏出力峰值 3.0 MW，冷负荷峰值 3.2 MW）分析，调度策略执行效果如下：08:00—10:00 光伏出力从 1.0 MW 升至 2.8 MW，冷负荷从 2.0 MW 升至 3.0 MW，系统调度光伏出力全量供给冷负荷，盈余 0.8 MW 充电储能，电网购电 0.2 MW 补充缺口，光伏自发自用电量占比 93.3%；12:00—14:00 光伏出力达峰值 3.0 MW，冷负荷达峰值 3.2 MW，系统调度光伏出力供给 2.8 MW 冷负荷，储能放电 0.4 MW，CCHP 系统启动供电 0.8 MW 并利用余热供冷，电网购电 0，光伏自发自用电量占比 87.5%；18:00—20:00 光伏出力降至 0.5 MW，冷负荷维持 2.8 MW，系统调度光伏出力供给 0.5 MW，储能放电 1.2 MW，CCHP 系统满负荷运行 1.1 MW，实现负荷平衡。

6 结束语

本文以上海 A 科创园区微电网项目为载体，

结合全程实操经验，构建了光伏 + 风电 + CCHP + 储能 + 柔性负荷多能互补系统，创新提出预测、优化、执行、修正闭环调度体系与两阶段调度策略，通过层次分析法和熵权法平衡多目标权重，有效解决了传统园区微电网的痛点问题。实施后光伏自发自用电量占比提升至 73.5%，年运行成本降低 34.6%，碳排放减少 45.2%，验证了方案的技术经济性。

参考文献

- [1] 陈希章. 建立基于多能互补的化工园区能源供应体系浅析(二)[J]. 化学工业, 2019, 37(3):42-51.
- [2] 王宇, 吴源昊, 侯院军. 多能互补直流微电网在综合体园区中的策划初探[J]. 现代建筑电气, 2020, 11(9):27-30, 34.
- [3] 田由甲, 徐硕, 韩永悦, 等. 一种微电网控制方法: 20251057863 2[P]. 2026-04-13.
- [4] 左涛, 刘建涛, 李敏, 等. 面向碳中和的园区多能互补微电网研究[J]. 电气时代, 2023(8):36-43.

作者简介

冯晓明（1998—），男，本科，工程师，从事电力机械设计制造及其自动化，E-mail: 363955731@qq.com。

（责任编辑：张峰亮）

（上接第 15 页）

- [2] 张森林. 以市场化机制引导新型储能产业可持续健康发展的思考[J]. 中国电力企业管理, 2021(28):50-53.
- [3] 方军. 市场条件下抽水蓄能电站动态效益的定量评价研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2006.
- [4] 成邹. 大数据驱动的虚拟电厂需求响应与能效优化研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025(24):35-37.
- [5] 方逸飞, 刘东, 陈静, 等. 考虑中长期市场因素的净现货竞价空间驱动的日前出清电价预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(2):506-519.
- [6] 弓自强, 高翔宇, 王迟. 基于Transformer的变压器温升预测[J]. 电器工业, 2025(10):82-84, 88.
- [7] 王景宇. 基于注意力机制的可解释性时序模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
- [8] 刘永胜, 沈军宏, 李达, 等. 基于HTS-TRG模型的双护盾TBM掘进速度预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54(1):114-118.
- [9] 杨渊文, 黄翌, 王欣, 等. 优化变分模态分解下NRBO-LSTM-Attention修正预测风速的风电功率短期预测[J]. 太阳能学报, 2026, 47(1):441-449.
- [10] 袁希, 许伟, 刘传斌, 等. “结构-内容”框架下融合时空特征的技术预测模型[J]. 自动化学报, 2025, 51(12):2621-2632.
- [11] 龚小容, 余先豫, 周康渠. 融合改进猎犬猎物优化算法与LSTM的电驱动总成腔体密封质量预测[J]. 制造业自动化, 2024, 46(4):16-22.

- [12] 蒋晨, 曹琦. 基于CNN-注意力机制的水轮发电机组故障诊断及预测研究[J]. 吉林水利, 2025(10):45-49.
- [13] 刘科, 王玲霞, 苗伊, 等. 基于CNN-TPA-GRU的电价预测模型研究与应用[J]. 现代信息科技, 2024, 8(1):165-169, 174.
- [14] 杨超, 冉启武, 罗德虎, 等. 基于注意力机制的CNN-BIGRU短期电价预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(3):22-29.
- [15] 赵欣. 基于注意力机制的CNN-BiLSTM日前电价预测[J]. 电工技术, 2024(12):135-138, 142.
- [16] 许亚斌, 武晓冬, 王江超. 基于数据分解和组合神经网络的短期电价预测[J]. 山西电力, 2025(3):7-13.
- [17] 郭雪丽, 华大鹏, 包鹏宇, 等. 一种基于改进VMD-PSO-CNN-LSTM的短期电价预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2):35-43.
- [18] 马泽亮, 李欣, 张晓恒, 等. 基于BiTCN-Self-attention-BiLSTM的光伏阵列故障诊断[J/OL]. 中国测试, 1-9[2025-10-10]. https://link.cnki.net/urlid/51.1714.tb.20250922.1905.006.
- [19] 张语珊. 基于贝叶斯优化的BiLSTM-Adaboost热电厂热负荷预测研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(20):1-6.

作者简介

闫高程（1977—），男，博士研究生，副教授，研究方向为能源储能，E-mail: 2903095070@qq.com。

张中华（2001—），男，硕士在读，研究方向为电力系统市场调度，E-mail: 18135423285@163.com。

（责任编辑：张峰亮）