

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260804004

响应“碳责任-价格”双重信号的冰蓄冷系统日前调度方法

张鹏勃¹ 吕石磊¹ 贾艳冰¹ 王冉¹ 吴至复²

(1 天津大学环境科学与工程学院 天津 300350; 2 国网浙江省电力有限公司 杭州 310007)

摘要 电力动态碳排放责任因子(C_r)具有显著时变特征,其与固定时段分时电价的时序错位可能导致冰蓄冷系统经济与低碳调度目标冲突。针对该问题,本文提出一种响应“碳责任-价格”双重信号的冰蓄冷系统日前调度方法。构建计及系统运行收益与碳减排量的多目标优化模型,针对4类典型 C_r 场景生成Pareto非支配方案集,并采用熵权-优劣解距离法进行方案评价与经济偏好系数优选。杭州某园区案例表明:4类 C_r 场景优选经济偏好系数分别为0.27、0.20、0.22和0.40。与低碳策略相比,多目标优选策略在保留93.9%~98.3%碳减排效益的同时,使运行收益提高12.7%~107.7%;与经济策略相比,实现了87.7%~95.8%的碳排放责任改善潜力。所提方法可适应“碳-价”的时序错位特征,实现冰蓄冷系统经济与低碳效益的协调。

关键词 冰蓄冷;电力动态碳排放责任因子;分时电价;日前调度;多目标优化

中图分类号: TB61⁺1; TU831.3

文献标识码: A

Day-Ahead Flexible Dispatch Method for Ice Thermal Storage Systems in Response to Dual Signals of Carbon and Price

Zhang Pengbo¹ Lü Shilei¹ Jia Yanbing¹ Wang Ran¹ Wu Zhifu²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract

Objective The dynamic carbon emission responsibility factor of electricity (C_r) varies considerably over time because of changes in the power generation mix, system load, and unit operational conditions. Its temporal profile might not coincide with the time-of-use electricity prices defined by fixed periods. As a result, low-price periods are not necessarily the same as low-carbon periods, which might create the conflicts between the economic and low-carbon operation of ice thermal storage systems. This study aims to develop a day-ahead dispatch method that can respond simultaneously to the carbon-responsibility and electricity-price signals. The method is designed to coordinate the operational revenue and carbon-reduction performance under different temporal relationships between the two signals.

Methods An equivalent charging and discharging power model was firstly developed to elucidate the influence of ice storage operation on the user-side electricity demand. The model considers the charging state of the ice storage tank, the operational characteristics of the dual-mode chiller, and auxiliary equipment power consumption. A linear programming model of multi-objective day-ahead mixed-integer was then established. The two objectives were the incremental electricity cost and incremental carbon emission responsibility caused by the ice storage operation. An economic preference coefficient was introduced to balance the normalized economic and low-carbon objectives. A total of 100 preference coefficients ranging from pure low-carbon strategy to pure economic strategy were evaluated for each C_r scenario. After the duplicate and dominated solutions were removed, the Pareto non-dominated solution sets were obtained. Operational revenue, carbon emission responsibility, and low-carbon matching degree were selected as the performance indicators. The entropy-weighted technique for order preference by similarity to the ideal solution (TOPSIS) was used to evaluate the Pareto solutions and

收稿日期:2026-08-04;修回日期:2026-08-11;录用日期:2026-08-21 责任编辑:王亚薇

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3807100)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2023YFC3807100).)



移动阅读

determine the preferred economic preference coefficient. A case study was conducted for an industrial park in Hangzhou using the 2024 time-of-use electricity price and four typical C_t profiles, i. e., an overall high-carbon profile, a low-carbon low-variation profile, a single-peak profile, and a double-peak profile.

Results and Discussion The entropy weights and the preferred economic preference coefficient varied markedly with the temporal characteristics of C_t . For C_{r1} , the weights of carbon emission responsibility and low-carbon matching degree are 0.40 and 0.36, respectively. Regarding C_{r3} , where high- C_t periods clearly overlap with the midday low-price period, the low-carbon matching degree receives the highest weight of 0.47. The preferred economic preference coefficients for C_{r1} – C_{r4} are 0.27, 0.20, 0.22, and 0.40, with the recommended ranges of 0.15–0.47, 0.08–0.30, 0.14–0.43, and 0.24–0.47, respectively. Dispatch results further show that the economic strategy tends to charge during the low-price but high- C_t periods in C_{r1} and C_{r3} , whereas the preferred multi-objective strategy shifts charging away from these periods. Compared with the low-carbon strategy, operational revenue are increased by 78.5%, 12.7%, 107.7%, and 14.7% for C_{r1} – C_{r4} , while 93.9%–98.3% of the carbon-reduction benefit is retained. The carbon-responsibility improvement potential relative to the economic strategy reaches 87.7%–95.8%, with the low-carbon matching degrees of –0.79 to –0.91.

Conclusions The proposed day-ahead dispatch method can effectively coordinate the economic and low-carbon operation of ice thermal storage systems under the temporally mismatched carbon and price signals. The four C_t scenarios require different economic preference coefficients, namely, 0.27, 0.20, 0.22, and 0.40, confirming that a fixed preference setting cannot adequately represent different carbon-price coupling conditions. Relative to the low-carbon strategy, the preferred multi-objective strategy retains 93.9%–98.3% of the carbon-reduction benefit while increasing the operational revenue by 12.7%–107.7%. Relative to the economic strategy, it achieves 87.7%–95.8% of the available improvement in the carbon emission responsibility. These results demonstrate that scenario-adaptive preference selection can suppress the high-carbon charging induced by low electricity prices and provide a practical basis for the coordinated carbon-energy interaction on the demand side.

Keywords ice thermal storage; dynamic carbon emission responsibility factor of electricity; time-of-use electricity price; day-ahead dispatching; multi-objective optimization

在“双碳”目标和新型电力系统建设背景下,高比例可再生能源并网加剧了电力供需在时间和空间上的不平衡,对需求侧资源的灵活调节能力提出了更高要求^[1]。建筑空调负荷具有较强的可调节潜力,可通过蓄冷等方式实现负荷时移并参与电网削峰填谷^[2]。冰蓄冷系统通过调整蓄、释冷时序实现冷量生产与使用的时间解耦,在保障供冷需求的同时,调节用户侧用电负荷,为电网调峰和可再生能源消纳提供需求侧支撑^[3-4]。

现有冰蓄冷系统运行调度主要以分时电价为响应信号,通过峰谷价差引导系统在低价时段蓄冷、高价时段释冷。相关研究已由预设蓄释冷规则^[5]发展至模型预测控制^[6-7]和强化学习^[8-9]。然而,分时电价本质上反映不同时段的电力供需状况和用电成本,不能直接表征电力供应的碳排放水平。随着电源结构及新能源出力不断变化,低电价时段并不必然对应低碳时段,单一价格驱动可能导致系统在低价但高碳时段蓄冷,使经济最优与低碳最优产生冲突^[10-11]。

为引导用户侧根据电力系统碳排放变化调整用电行为,江亿等^[12]提出电力动态碳排放责任因子(C_r),用于表征用户在不同时段单位用电应承担的碳

排放责任。与主要用于统计核算的平均碳排放因子及侧重增量排放影响的边际碳排放因子^[13-14]相比, C_r 能够随电源结构、系统负荷和机组运行状态变化,并将电力系统碳排放特征与用户分时用电行为相联系,因而更适合作为柔性负荷参与低碳调节的动态碳信号。

虽然动态碳信号已逐步被引入能源系统调度^[15],现有研究仍存在2方面不足:1)已有研究主要关注运行成本与碳排放等多目标优化结果,对动态碳信号与分时电价在日内时序上的协同或冲突关系及该时序错位如何进一步影响冰蓄冷系统蓄、释冷时段和能量分配尚缺乏系统分析。尤其是不同 C_t 场景在均值、波动幅度和峰谷时序上存在明显差异,采用单一典型碳信号难以反映不同“碳-价”耦合特征下的调度规律。2)现有经济-低碳多目标调度通常采用预设偏好参数或固定权重^[16-17],难以根据不同 C_t 场景下经济性与低碳性冲突程度的变化调整决策偏好。因此,如何面向不同“碳-价”时序关系实现调度偏好的场景化优选,并兼顾运行收益、碳减排效益及对动态碳信号的响应程度,仍有待进一步研究。

针对上述问题,本文提出一种响应电力动态碳排放责任因子与分时电价双重信号的冰蓄冷系统日

前调度方法。围绕不同 C_t 场景下“碳-价”时序关系对冰蓄冷运行的影响,构建经济-低碳多目标调度模型,并结合低碳匹配度、熵权法和优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对经济偏好系数进行场景化优选,以提高调度策略对不同碳信号工况的适应性。进一步分析双重信号协同与冲突条件下蓄释冷时序及能量分配规律,为用户侧柔性制冷负荷参与“碳-能”协同调节提供方法支撑。

1 经济-低碳多目标调度方法

1.1 冰蓄冷系统及等效充放电功率模型

冰蓄冷系统主要由双工况冷机、蓄冰槽、乙二醇泵、冷却水泵、冷却塔及常规供冷机组构成。蓄冰时,双工况冷机与辅助设备消耗电能制冰;放冷时,蓄冰槽承担部分冷负荷,从而减少常规冷机耗电。

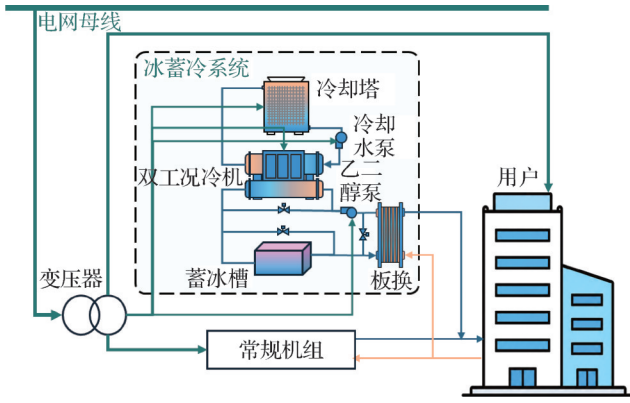


图1 冰蓄冷系统

Fig.1 Ice-storage system

由于冰层厚度随蓄冷状态变化,冰槽传热热阻及可用蓄、放冷功率均与蓄冷状态有关。将蓄冰槽等效为换热器,运行模式 $m \in \{\text{ch}, \text{dis}\}$ 下的总等效热导为^[18]:

$$G_t^m = a_0^m + a_1^m S_t^{\text{ice}} + a_2^m (S_t^{\text{ice}})^2 + a_3^m (S_t^{\text{ice}})^3 \quad (1)$$

基于效能-传热单元数法换热模型^[18],冰槽蓄放冷功率表示为:

$$Q_t^{\text{ice},m} = \dot{m}_t^m c_p (T_{\text{ice,avg}} - T_{\text{in},t}) \left[1 - \exp\left(-\frac{G_t^m}{\dot{m}_t^m c_p}\right) \right] \quad (2)$$

式中: G_t^m 为总等效热导, kW/K; S_t^{ice} 为蓄冰槽蓄冷状态; $a_0^m \sim a_3^m$ 为拟合系数, kW/K; $\dot{m}_t^m$ 为载冷剂质量流量, kg/s; c_p 为载冷剂比定压热容, kJ/(kg·K); $T_{\text{in},t}$ 为冰槽入口温度, °C; $T_{\text{ice,avg}}$ 为蓄冷介质平均温度, °C。规定蓄冰功率为正,放冷功率为负。

根据冰蓄冷系统实际运行边界和能量守恒关

系,本文建立蓄、放冷功率及蓄冷状态约束如下:

$$0 \leq Q_t^{\text{ice, ch}} \leq u_t^{\text{ice, ch}} \min[Q_{t,\max}^{\text{ice, ch}}(S_t^{\text{ice}}), Q_{\text{rated}}^{\text{ice}}] \quad (3)$$

$$u_t^{\text{ice, dis}} Q_{t,\max}^{\text{ice, dis}}(S_t^{\text{ice}}) \leq Q_t^{\text{ice, dis}} \leq 0 \quad (4)$$

$$u_t^{\text{ice, ch}} + u_t^{\text{ice, dis}} \leq 1, \quad u_t^{\text{ice, ch}}, u_t^{\text{ice, dis}} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$S_{t+1}^{\text{ice}} = S_t^{\text{ice}} + \frac{(Q_t^{\text{ice, ch}} + Q_t^{\text{ice, dis}}) \Delta t}{E^{\text{ice}}} \quad (6)$$

$$S_{\min}^{\text{ice}} \leq S_t^{\text{ice}} \leq S_{\max}^{\text{ice}}, \quad S_T^{\text{ice}} = S_0^{\text{ice}} \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{rated}}^{\text{ice}}$ 为双工况冷机制冰额定冷量, kW; E^{ice} 为冰槽额定蓄冷容量, kW·h; $u_t^{\text{ice, ch}}$ 和 $u_t^{\text{ice, dis}}$ 分别为蓄冰与放冷状态变量; Δt 为调度时间步长, h; S_0^{ice} 和 S_T^{ice} 分别为冰蓄冷调度起始时刻和结束时刻的蓄冷状态。

为表征冰蓄冷运行对用户侧用电功率的影响,本文将蓄冰过程的实际耗电功率定义为等效充电功率。双工况冷机制冰负荷率 r_t^{dc} 和制冰性能系数 K_t^{dc} ^[8] 为:

$$r_t^{\text{dc}} = Q_t^{\text{ice, ch}} / Q_{\text{rated}}^{\text{ice}} \quad (8)$$

$$K_t^{\text{dc}} = a_{\text{dc}} (r_t^{\text{dc}})^2 + b_{\text{dc}} r_t^{\text{dc}} + c_{\text{dc}} \quad (9)$$

考虑乙二醇泵、冷却水泵及冷却塔等辅助设备能耗,制冰系统综合性能系数为:

$$K_t^{\text{sys}} = (1 - \bar{k}_{\text{aux}}) K_t^{\text{dc}} \quad (10)$$

$$\bar{k}_{\text{aux}} = \frac{\sum_{t \in T_{\text{ch}}} P_t^{\text{aux}} \Delta t}{\sum_{t \in T_{\text{ch}}} (P_t^{\text{dc}} + P_t^{\text{aux}}) \Delta t} \quad (11)$$

式中: $\bar{k}_{\text{aux}}$ 为辅助设备耗电占系统总耗电比例; P_t^{aux} 为乙二醇泵、冷却水泵和冷却塔等辅助设备的总功率, kW; P_t^{dc} 为双工况冷机制冰功率, kW; T_{ch} 为蓄冰运行时段集合。

因此,冰蓄冷系统的等效充电功率为:

$$P_t^{\text{ice, ch, eq}} = Q_t^{\text{ice, ch}} / K_t^{\text{sys}} \quad (12)$$

本文将放冷过程中,冰槽承担部分冷负荷并减少常规冷机耗电功率定义为等效放电功率:

$$P_t^{\text{ice, dis, eq}} = Q_t^{\text{ice, dis}} / K_{\text{eff}} \quad (13)$$

式中: K_{eff} 为放冷替代常规供冷的净等效性能系数,此处取 5.5^[19]。

冰蓄冷系统的净等效功率为:

$$P_t^{\text{ice, eq}} = P_t^{\text{ice, ch, eq}} + P_t^{\text{ice, dis, eq}} \quad (14)$$

其中, $P_t^{\text{ice, eq}} > 0$ 表示蓄冰运行增加用户侧用电功率, $P_t^{\text{ice, eq}} < 0$ 表示放冷运行减少用户侧用电功率。

1.2 经济-低碳多目标日前调度模型

在 1.1 节冰蓄冷动态模型及等效功率模型的基础上,以冰蓄冷系统的增量购电费用和增量碳排放责任为优化目标,建立日前多目标混合整数线性规划模型。决策变量包括蓄、放冷功率,冰槽蓄冷状态及设备运行状态。

假设不同策略下用户基础负荷保持不变,经济目标仅考虑冰蓄冷等效功率引起的增量购电费用:

$$J_{\text{cost}} = \sum_{t \in T} \pi_t P_t^{\text{ice,eq}} \Delta t \quad (15)$$

低碳目标为冰蓄冷等效功率对应的增量碳排放责任:

$$J_{\text{carbon}} = \sum_{t \in T} C_{r,t} P_t^{\text{ice,eq}} \Delta t \quad (16)$$

式中: J_{cost} 为增量购电费用,元; J_{carbon} 为增量碳排放责任, kgCO_2 ; π_t 为 t 时刻的分时电价,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); $C_{r,t}$ 分别为 t 时刻的电力动态碳排放责任因子, $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。2项目标小于0时,分别表示冰蓄冷运行产生经济收益和碳减排效益。

由于2项目标量纲不同,分别采用纯经济最优解和纯低碳最优解构建收益表,并对目标函数进行归一化:

$$\tilde{J}_{\text{cost}} = \frac{J_{\text{cost}} - J_{\text{cost}}^{\min}}{J_{\text{cost}}^{\max} - J_{\text{cost}}^{\min}} \quad (17)$$

$$\tilde{J}_{\text{carbon}} = \frac{J_{\text{carbon}} - J_{\text{carbon}}^{\min}}{J_{\text{carbon}}^{\max} - J_{\text{carbon}}^{\min}} \quad (18)$$

式中:上标 min 和 max 分别表示对应指标在2种单目标极端策略中的最优值和最劣值。

引入经济-低碳偏好系数 α ,多目标函数为:

$$\min J(\alpha) = \alpha J_{\text{cost}} + (1 - \alpha) J_{\text{carbon}}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (19)$$

其中, $\alpha = 1$ 对应纯经济策略, $\alpha = 0$ 对应纯低碳策略,其他取值对应经济-低碳折中策略。除式(3)~式(7)所示运行约束外,冰槽放冷量不得超过当前用户冷负荷:

$$-Q_t^{\text{ice,dis}} \leq Q_t^{\text{load}} \quad (20)$$

式中: Q_t^{load} 为 t 时刻用户冷负荷, kW 。由于 $Q_t^{\text{ice,dis}} \leq 0$, $-Q_t^{\text{ice,dis}}$ 表示蓄冰槽实际放冷量, kW 。

式(1)~式(3)及式(9)~式(12)中包含蓄冷状态、制冰负荷率与设备性能之间的非线性关系。采用预设分段节点进行线性化,并通过特殊有序集 II 型变量实现相邻节点插值,从而将调度模型转化为混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 模型,采用 Gurobi 求解器进行求解。

在每种 C_r 场景下设置 $N=100$ 组偏好系数:

$$\alpha_i = \frac{i-1}{N-1}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

式中: α_i 为第 i 组经济偏好系数。分别求解各偏好系数对应的调度方案,剔除重复解和被支配解,获得不同 C_r 场景下的非支配解集及近似 Pareto 前沿。

1.3 调度方案综合评价指标

为评价不同偏好系数下调度方案的经济性、低碳性及碳信号响应特征,选取运行收益、碳排放责任

和低碳匹配度3项指标。

运行收益 (operating revenue, OR) 表示冰蓄冷运行产生的购电费用节省:

$$R_o = - \sum_{t \in T} \pi_t P_t^{\text{ice,eq}} \Delta t \quad (22)$$

$R_o > 0$ 表示冰蓄冷运行产生经济收益,且数值越大,经济性越好。为进一步衡量多目标优选策略相对于低碳策略的经济收益改善程度,定义第 s 个 C_r 场景的运行收益提高率为:

$$\eta_{\text{OR},s} = \frac{R_{o,s}^M - R_{o,s}^L}{R_{o,s}^L} \times 100\% \quad (23)$$

碳排放责任 (carbon emission responsibility, CER) 表示冰蓄冷运行引起的增量碳排放责任:

$$E_c = \sum_{t \in T} C_{r,t} P_t^{\text{ice,eq}} \Delta t \quad (24)$$

$E_c < 0$ 表示冰蓄冷运行具有减碳效益,且数值越小,低碳效果越好。为量化多目标优选策略的减碳效益保持程度及其相对于经济策略的碳排放责任改善程度,进一步定义碳减排效益保留率 $\eta_{\text{CER},s}$ 和碳排放责任改善潜力实现率 $\eta_{\text{CER},s}$:

$$\eta_{\text{CER},s} = \left| \frac{E_{c,s}^M}{E_{c,s}^L} \right| \times 100\% \quad (25)$$

$$\eta_{\text{CER},s} = \frac{E_{c,s}^E - E_{c,s}^M}{E_{c,s}^E - E_{c,s}^L} \times 100\% \quad (26)$$

式中:下标 s 表示第 s 个 C_r 场景;上标 L、E 和 M 分别表示低碳策略、经济策略和多目标优选策略。

为评价冰蓄冷运行对动态碳信号的时序响应程度,本文定义低碳匹配度 (low-carbon matching degree, LCMD),并采用 C_r 与冰蓄冷等效功率的 Pearson 相关系数进行表征:

$$M_{\text{lc}} = \frac{\sum_{t \in T} (C_{r,t} - \bar{C}_r)(P_t^{\text{ice,eq}} - \bar{P}^{\text{ice,eq}})}{\sqrt{\sum_{t \in T} (C_{r,t} - \bar{C}_r)^2} \sqrt{\sum_{t \in T} (P_t^{\text{ice,eq}} - \bar{P}^{\text{ice,eq}})^2}} \quad (27)$$

式中: M_{lc} 为低碳匹配度 LCMD; $\bar{C}_r$ 和 $\bar{P}^{\text{ice,eq}}$ 分别为调度周期内电力动态碳排放责任因子和等效功率的平均值。LCMD 越接近-1,表明冰蓄冷越倾向于在低碳时段蓄冰、高碳时段放冷,与电网低碳调节需求的匹配程度越高。

1.4 基于熵权—TOPSIS 的偏好参数优选方法

为从不同 C_r 场景的 Pareto 解集中筛选综合性能较优的调度方案,分别构建各场景的评价矩阵,采用熵权—TOPSIS 法进行综合评价^[20]。首先对运行收益、碳排放责任和低碳匹配度进行正负向标准化,并依据各指标在非支配方案集中的离散程度采用熵权法确定客观权重;随后构建加权评价矩阵,计算各方

案与正、负理想解的距离及综合贴近度 C_i 。

C_i 越大,方案综合性能越优。对每种 C_i 场景,取最高贴近度对应的经济偏好系数作为优选值,并将贴近度不低于最高值 95% 的偏好系数组成推荐区间:

$$\Lambda_s = \{ \alpha_i | C_{s,i} \geq 0.95 C_s^{\max} \} \quad (28)$$

式中: Λ_s 为场景 s 的经济偏好系数推荐区间。

2 案例分析

本文选取杭州某园区冰蓄冷系统为案例,其主要承担园区内企业的全天连续供冷任务。由于用户冷负荷始终高于系统的最大放冷阈值,冰蓄冷系统不独立覆盖全部冷负荷,而是作为柔性调节资源,通过动态改变蓄放冷时段来调节用户侧等效用电功率。系统相关设备参数如表 1 所示。

表 1 冰蓄冷系统主要设备参数

Tab.1 Main equipment parameters of the ice-storage system

设备	数量	额定功率/kW	容量	额定流量/(m ³ /h)
蓄冰槽	3	—	8 200 kW·h	—
双工况冷机	1	801	3 516 kW	—
乙二醇泵	1	200	—	1 200
冷却水泵	2	75	—	790
冷却塔	1	37.5	5 324 kW	—

经济性信号采用 2024 年杭州地区分时电价,其日内结构相对固定;低碳信号采用电力动态碳排放责任因子,具有明显的时变特征。本文选取 4 种典型 C_i 类型: C_{i1} 为整体高碳型,仅凌晨出现短时低谷; C_{i2} 为低碳低波动型; C_{i3} 为单峰型; C_{i4} 为双峰型。分时电价及 4 种典型 C_i 曲线如图 2 所示。

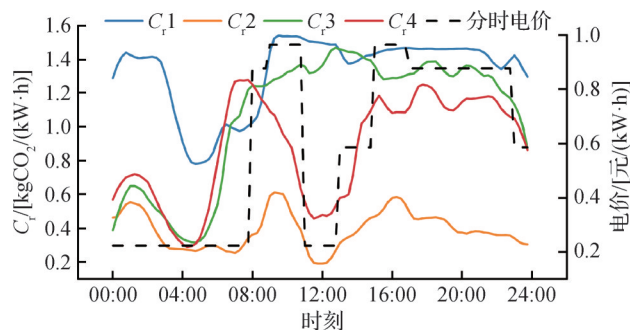
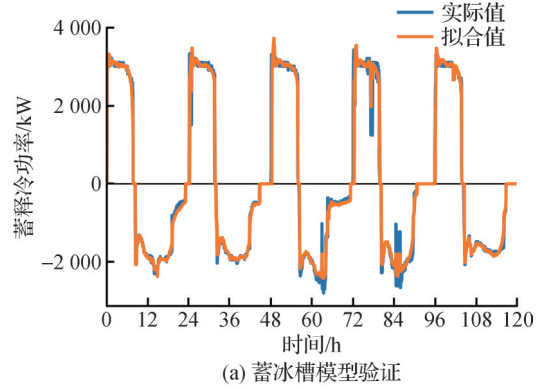


图 2 杭州地区分时电价及 4 种典型 C_i

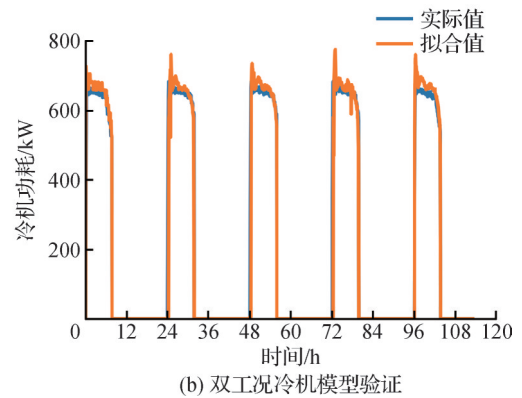
Fig.2 Time-of-use electricity price and four typical C_i profiles in Hangzhou

采用实际运行数据对蓄冰槽和双工况冷机模型进行验证,如图 3 所示。2 类模型的拟合值与实际值

变化趋势基本一致。其归一化均方根误差分别为 4.32% 和 6.63%,均低于 7%,表明模型具有较好的拟合精度,可用于后续调度计算。根据实测数据,辅助设备功耗占系统总功耗的比例稳定在 0.161 附近。



(a) 蓄冰槽模型验证



(b) 双工况冷机模型验证

图 3 冰蓄冷系统关键设备模型验证

Fig.3 Validation of key equipment models of the ice-storage system

3 结果与讨论

3.1 不同 C_i 场景下的指标权重与偏好参数优选

表 2 所示为不同 C_i 场景下运行收益、碳排放责任和低碳匹配度的熵权结果。熵权反映指标在非支配方案集中的离散程度,权重越大,说明该指标对候选方案的区分能力越强,而非预先设定的主观重要程度。由于各类 C_i 信号在均值、波动幅度及其与分时电价的时序关系上存在差异,不同偏好系数下调度方案的经济性、减碳效益及碳信号响应特征也呈现不同程度的分化,进而形成差异化的指标权重。

C_{i1} 场景下,碳排放责任和低碳匹配度权重分别为 0.40 和 0.36,主要是因为其 C_i 均值较高,调度时序变化对碳排放结果影响较为显著。 C_{i2} 的 C_i 水平及波动幅度均较小,经济目标与低碳目标冲突较弱,运行收益在不同方案间差异有限,因而其权重最低,为 0.16,而碳排放责任和低碳匹配度权重分别达到 0.44 和 0.40。 C_{i3} 的高 C_i 时段与午间低电价存在明

显错位,经济调度可能引导系统在高碳时段蓄冰,使不同方案的碳信号响应差异增大,因此低碳匹配度权重最高,为0.47。 C_r4 的双峰变化与电价峰谷总体一致,但局部时段仍存在错位,经济性与低碳性兼具协同和竞争关系,故3项指标权重分别为0.31、0.34和0.35,分布最为均衡。

表2 不同 C_r 场景下评价指标的熵权

Tab.2 Entropy weights of evaluation indicators under different C_r scenarios

碳信号类型	运行收益权重	碳排放责任权重	低碳匹配度权重
C_r1	0.24	0.40	0.36
C_r2	0.16	0.44	0.40
C_r3	0.17	0.36	0.47
C_r4	0.31	0.34	0.35

图4所示为不同 C_r 场景下的TOPSIS得分及经济偏好系数推荐区间,可知,4种 C_r 场景下TOPSIS得分均随经济偏好系数的变化呈先升高后降低的趋势,综合最优偏好系数分别为0.27、0.20、0.22和0.40,对应推荐区间分别为0.15~0.47、0.08~0.30、0.14~0.43和0.24~0.47。 C_r1 均值较高,优选系数0.27体现了以减碳为主、兼顾经济收益的调度倾向; C_r2 的 C_r 水平低且波动较小,经济性与低碳性冲突较弱,因此在较低经济偏好0.20下即可获得较优综合性能; C_r3 的高 C_r 时段与午间低电价存在错位,优选系数0.22可抑制低价信号诱导的高碳蓄冰行为; C_r4 中电价与 C_r 既存在协同又存在局部冲突,3项评价指标权重较为均衡,因而最优经济偏好提高至0.40,以实现运行收益、碳减排效益和低碳匹配度之间的协调。

进一步分析,各场景的最优偏好系数及推荐区间均存在明显差异,说明采用统一固定偏好系数难以同时适应不同“碳-价”耦合工况。同时,图4中最优解附近均存在一定宽度的高分区间,表明在推荐区间内偏好系数发生小幅变化时,综合调度性能不会明显下降,为实际运行中根据用户经济性或低碳需求进一步调整偏好参数提供了余量。

3.2 不同 C_r 场景下的调度策略与综合性能

图5对比了3类典型调度策略下的冰蓄冷运行功率,其中正功率表示蓄冷,负功率表示释冷。低碳优化对应经济偏好系数 $\alpha = 0$,调度过程完全以降低碳排放责任为目标;经济优化对应 $\alpha = 1$,以获得最大运行收益为目标;多目标优化采用3.1节确定的优选偏好系数, $C_r1 \sim C_r4$ 场景下分别为0.27、0.20、0.22和

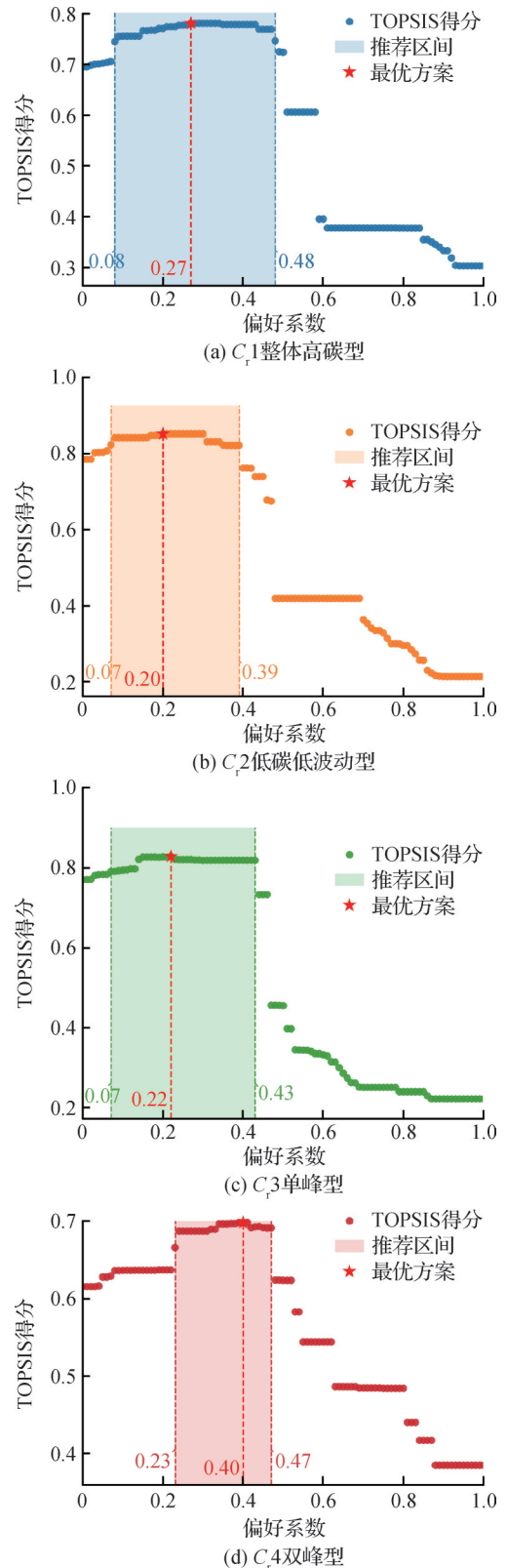


图4 不同 C_r 场景下的TOPSIS得分及经济偏好系数推荐区间

Fig.4 TOPSIS scores and recommended ranges of the economic preference coefficient under different dynamic carbon-signal scenarios

0.40,在经济性与低碳性之间进行折中。3类策略在蓄、释冷时段及功率分配上的差异,反映了分时电价

与 C_r 对冰蓄冷运行决策的共同作用。

C_{r1} 场景中,经济优化在午间低价但高 C_r 时段再次蓄冷,而多目标优化避免了该时段的高碳用电,其运行时序更接近低碳优化。 C_{r2} 的 C_r 水平和波动幅度较小,且与电价变化总体协调,因此3种策略的蓄、释冷时段差异相对较小。 C_{r3} 中午间低电价与高 C_r 明显冲突,经济优化在该时段蓄冷,而多目标优化通过调整蓄冷时段抑制了高碳用电。 C_{r4} 的 C_r 双峰与电价峰谷总体一致,3种策略的运行曲线较为接近,多目标优化主要对局部蓄、释冷时刻进行修正。因此, C_{r1} 和 C_{r3} 所代表的“碳-价”冲突场景是多目标调度发挥作用更为显著的工况,而 C_{r2} 和 C_{r4} 中2类信号的协同性较强,经济策略与低碳策略之间的运行差异相对有限。这说明冰蓄冷系统经济-低碳协调的关键并非简单增加或减少蓄冷量,而是根据动态碳信号重新分配蓄、释冷的时间位置。

表3所示为3种优化策略的绝对性能,基于表3结果计算得到的相对性能指标如表4所示。其中, C_{r3} 的协调效果最为突出。多目标策略的运行收益由低碳策略的1 071元提高至2 225元,增加1 154元,而碳排放责任仅由-3 038 kgCO₂变化至-2 985 kgCO₂,即仅减少53 kgCO₂的减碳量,碳减排效益保留率仍达到98.3%。该结果说明,在低价与高碳明显错位的场景中,通过调整蓄冷时序而非单纯降低蓄冷规模,可以获得较大的经济收益改善。 C_{r1} 同样具有明显的“碳-价”冲突,多目标策略运行收益由1 071元增至1 912元,同时碳排放责任仍保持在-1 060 kgCO₂,体现出较好的经济-低碳折中。相比之下, C_{r2} 和 C_{r4} 中经济性与低碳性的冲突相对较弱。 C_{r2} 多目标策略较低碳策略仅增加311元运行收益,但仍保留95.1%的碳减排效益; C_{r4} 运行收益增加337元,同时保留96.3%的碳减排效益。这说明当价格和碳信号总体协同时,不同优化目标对应的调度结果本身较为接近,多目标优化的主要作用由大范围调整蓄冷时段转变为局部运行时序修正。

综合上述结果,“碳-价”时序关系决定了经济目标与低碳目标之间的冲突程度,也决定了冰蓄冷柔性调度的调整空间。当低电价与高 C_r 明显重叠时,采用单一经济策略容易诱发高碳蓄冷,场景化多目标调度的改善作用更为显著;当2类信号总体协同时,仅需对局部蓄、释冷时序进行调整即可兼顾经济与低碳效益。因此,与采用统一固定偏好系数相比,根据 C_r 场景自适应选择经济偏好参数更有利于充分利用冰蓄冷的时间转移能力,实现经济收益和碳减排效益的协调。

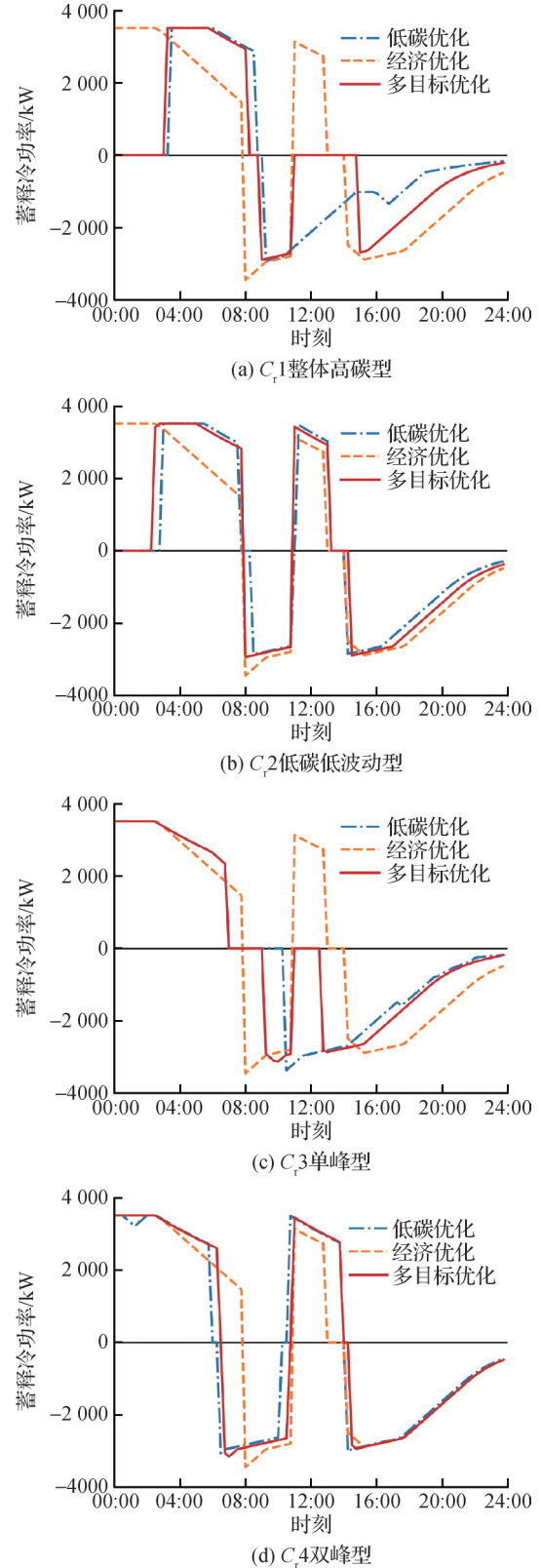


图5 不同 C_r 场景下3种优化策略的冰蓄冷功率
Fig.5 Ice-storage charging and discharging power under three optimization strategies in different C_r scenarios

4 结论

针对动态碳排放责任因子与分时电价时序错位

表3 不同 C_r 场景下3种优化策略的性能对比
Tab.3 Performance comparison of three optimization strategies under different C_r scenarios

碳信号类型	优化目标	运行收益/元	碳排放责任/(kgCO ₂)	低碳匹配度
C_{r1}	低碳	1 071	-1 129	-0.95
	经济	3 093	505	-0.40
	多目标	1 912	-1 060	-0.90
C_{r2}	低碳	2 451	-656	-0.81
	经济	3 093	-223	-0.51
	多目标	2 762	-624	-0.79
C_{r3}	低碳	1 071	-3 038	-0.93
	经济	3 093	-2 130	-0.72
	多目标	2 225	-2 985	-0.91
C_{r4}	低碳	2 288	-2 565	-0.92
	经济	3 093	-1 801	-0.75
	多目标	2 625	-2 471	-0.89

表4 多目标优选策略相对于单目标策略的相对性能
Tab.4 Relative performance of the preferred multi-objective strategy versus single-objective strategies

碳信号类型	运行收益提高率/%	碳减排效益保留率/%	改善潜力实现率/%
C_{r1}	78.5	93.9	95.8
C_{r2}	12.7	95.1	92.6
C_{r3}	107.7	98.3	94.2
C_{r4}	14.7	96.3	87.7

导致冰蓄冷系统经济性与低碳性难以协同的问题,本文提出一种响应“碳责任-价格”双重信号的日前调度方法,并基于杭州某园区为例进行验证,得到结论如下:

1)采用熵权-TOPSIS法对不同 C_r 场景下的 Pareto 非支配方案进行综合评价, C_{r1} ~ C_{r4} 场景的优选经济偏好系数分别为 0.27、0.20、0.22 和 0.40,对应推荐区间分别为 0.15~0.47、0.08~0.30、0.14~0.43 和 0.24~0.47。不同场景下优选参数存在明显差异,表明经济-低碳调度偏好需随“碳-价”时序关系进行调整。

2)构建计及冰蓄冷动态运行特性的经济-低碳多目标 MILP 日前调度模型,对低碳、经济和多目标优选策略的运行性能进行对比。相较低碳策略,多目标优选策略的运行收益提高 12.7%~107.7%,同时保留 93.9%~98.3% 的碳减排效益;相较经济策略,碳排放责任改善潜力实现率为 87.7%~95.8%。

3)对4类典型 C_r 场景的调度结果进行分析。低电价与高 C_r 时段错位越明显,经济与低碳目标冲突越突出,多目标调度的改善效果也越显著;当2类信号总体协同时,不同优化策略下的蓄释冷时序差异较小。

本文受国家电网有限公司科技项目(5211YF24000T)资助。(The project was supported by Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211YF24000T).)

符号说明

- G ——蓄冰槽等效热导,kW/K
- Q ——冷功率,包括蓄冷功率、放冷功率、额定制冰冷量及用户冷负荷等,kW
- a ——蓄冰槽等效热导模型拟合系数
- b ——冷机性能拟合系数
- c_p ——载冷剂比定压热容,kJ/(kg·K)
- S ——蓄冰槽蓄冷状态
- $\dot{m}$ ——载冷剂质量流量,kg/s
- T ——温度,℃
- u ——蓄冰或放冷运行状态变量,取0或1
- E ——蓄冷容量,kW·h
- r ——双工况冷机制冰负荷率
- K ——性能系数
- $\bar{k}$ ——辅助设备耗电占制冰系统总耗电比例
- P ——用电功率或等效用电功率,kW
- $\mathcal{T}$ ——调度周期内时段集合
- J ——优化目标函数值
- π ——分时电价,元/(kW·h)
- C_r ——电力动态碳排放责任因子,kgCO₂/(kW·h)
- C ——TOPSIS综合贴近度
- α ——经济-低碳偏好系数
- N ——经济偏好系数离散取值总数
- R ——运行收益,元
- η ——相对性能指标,%
- M ——低碳匹配度
- Λ ——经济偏好系数推荐区间
- Δt ——调度时间步长,h

上标

- m ——运行模式索引, $m \in \{\text{ch}, \text{dis}\}$
- ice——冰蓄冷系统或蓄冰槽相关量
- ch——蓄冰工况
- dis——放冷工况
- dc——双工况冷相关量
- sys——制冰系统综合量
- aux——辅助设备相关量
- eq——等效量
- L——低碳策略
- E——经济策略

M——多目标优选策略

min——最小值

max——最大值

load——用户负荷相关量

下标

t ——时刻

i ——经济偏好系数组或候选方案索引

s —— C_s 场景索引

T ——调度周期末时刻

in——入口

ice——蓄冷介质或冰蓄冷相关量

avg——平均值

min——最小值

max——最大值

rated——额定值

dc——双工况冷机相关拟合参数

cost——经济目标

carbon——低碳目标或碳排放责任

o——运行收益

c——碳排放责任

OR——运行收益提高率

CR——碳减排效益保留率

CER——碳排放责任改善潜力实现率

lc——低碳匹配度

参考文献

- [1] Tang Hong, Wang Shengwei, Li Hangxin. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: State-of-the-art and future perspective [J]. Energy, 2021, 219: 119598.
- [2] 毛宇波, 梁彩华, 汤琪. 中央空调系统的自蓄能特性与调峰潜力[J]. 制冷学报, 2024, 45(6): 135-144. (Mao Yubo, Liang Caihua, Tang Qi. Self-storage characteristics and peak shaving potential of central air conditioning systems [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(6): 135-144.)
- [3] Rahgozar S, Pourrajabian A, Dehghan M. On the role of building use and operational strategy in integrating ice storage systems: an economic perspective [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113025.
- [4] 赵柏扬, 张雪芬, 李勇, 等. 基于动态规划的光伏蓄冰空调预测控制[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 8-15. (Zhao Bai, BoYang, Zhang Xuefen, et al. Predictive control of photovoltaic ice storage air-conditioning system based on dynamic programming[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 8-15.)
- [5] Kang Xuyuan, Wang Xiao, An Jingjing, et al. A novel approach of day-ahead cooling load prediction and optimal control for ice-based thermal energy storage (TES) system in commercial buildings[J]. Energy and Buildings, 2022, 275: 112478.
- [6] Tang Hao, Yu Juan, Geng Yang, et al. Optimization of operational strategy for ice thermal energy storage in a district cooling system based on model predictive control [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106872.
- [7] Zhao Jing, Liu Dehan, Yuan Xiulian, et al. Model predictive control for the ice-storage air-conditioning system coupled with multi-objective optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 243: 122595.
- [8] Wang Xiao, Kang Xuyuan, An Jingjing, et al. Reinforcement learning approach for optimal control of ice-based thermal energy storage (TES) systems in commercial buildings[J]. Energy and Buildings, 2023, 301: 113696.
- [9] Yan Xiuying, Men Qi, Meng Qinglong, et al. Dual-stage collaborative optimal allocation of cooling source in ice storage air-conditioning systems considering daily and emergency demand response [J]. Energy and Buildings, 2025, 347: 116247.
- [10] Fleschutz M, Bohlayer M, Braun M, et al. The effect of price-based demand response on carbon emissions in European electricity markets: The importance of adequate carbon prices[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117040.
- [11] Aryai V, Goldsworthy M. Controlling electricity storage to balance electricity costs and greenhouse gas emissions in buildings[J]. Energy Informatics, 2022, 5(1): 11.
- [12] 江亿, 张吉, 张涛, 等. 电力动态碳排放责任因子[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7024-7038. (Jiang Yi, Zhang Ji, Zhang Tao, et al. Dynamic carbon emission responsibility factor of electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7024-7038.)
- [13] Koebrich S, Cofield J, McCormick G, et al. Towards objective evaluation of the accuracy of marginal emissions factors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 215: 115508.
- [14] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2235. (Liu Yuliang, Li Yaowang, Zhou Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2235.)
- [15] Elio J, Milcarek R J. Multi-objective electricity cost and indirect CO₂ emissions minimization in commercial and industrial buildings utilizing stand-alone battery energy storage systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137987.
- [16] Zhang Hanbei, Xiao Fu, Zhang Chong, et al. A multi-agent system based coordinated multi-objective optimal load scheduling strategy using marginal emission factors

- for building cluster demand response [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 281: 112765.
- [17] Yu M G, Huang Bowen, Ma Xu, et al. Multi-objective sizing and dispatch for building thermal and battery storage towards economic and environmental synergy [J]. *Applied Energy*, 2024, 372: 123819.
- [18] Guittet D, Bonnema E, Mitchell M, et al. Ice storage model-predictive control in an office building with PV: scenario, error and sensitivity analysis [J]. *Energy and Buildings*, 2025, 341: 115828.
- [19] Chen Qi, Kuang Zhonghong, Liu Xiaohua, et al. Optimal sizing and techno-economic analysis of the hybrid PV-battery-cooling storage system for commercial buildings in China[J]. *Applied Energy*, 2024, 355: 122231.
- [20] Wang Xiaoyun, Yang Hua, Yao Sheng, et al. Thermo-

economic optimization of a building system integrating envelope and energy supply equipment for the rural residence[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127386.

通信作者简介

吕石磊,男,教授,天津大学环境科学与工程学院,18602214455,E-mail:lvshilei@tju.edu.cn。研究方向:建筑热/冷能与电能储存、城市柔性能源。

About the corresponding author

Lü Shilei, male, professor, School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, 86-18602214455, E-mail: lvshilei@tju.edu.cn. Research fields: thermal/cold and electric energy storage for buildings, urban flexible energy.