

储热储冷多场景应用专刊



冷库蓄冷系统配置与运行策略协同优化研究

肖楚鹏^{1,2}, 牟旭东³, 许静^{1,2}, 陈丽娜⁴, 丁胜^{1,2}, 胡文博^{1,2}

(¹国网电力科学研究院武汉能效测评有限公司, 湖北 武汉 430074; ²国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210000; ³国网甘肃省电力公司天水供电公司, 甘肃 天水 741000; ⁴国网甘肃省电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 为提升冷库在分时电价环境下的运行经济性与负荷调节能力, 本研究针对传统冷库制冷系统缺乏容量配置与运行策略协同设计的问题, 提出一种面向冷库制冷-蓄冷系统的设备配置与运行策略双层协同优化方法。以一中型冷库为研究对象, 构建包含双工况制冷主机与相变蓄冷装置的冷库制冷-蓄冷系统模型。上层优化以系统全生命周期成本最小化为目标, 采用遗传算法确定制冷主机与蓄冷装置的最优容量配置; 下层优化以典型日运行成本最小化为目标, 建立混合整数线性规划模型, 对分时电价条件下系统运行策略进行优化, 并将运行结果反馈至上层形成迭代求解机制。结果表明, 在现行分时电价条件下, 优化后系统折现运行成本较基准方案降低30%, 折现全生命周期成本为5.23万元, 动态投资回收期为8.01年。进一步分析不同峰谷电价比场景发现, 随着峰谷电价比由1.45提升至9.25, 系统全生命周期成本下降至4.03万元, 动态投资回收期缩短至3.29年, 蓄冷装置最优配置容量显著增加。研究结果可为分时电价机制下冷库蓄冷系统的容量配置与运行策略制定提供定量参考。

关键词: 冷库; 蓄冷系统; 双层优化; 全生命周期成本

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0109

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-920-13

Bi-level optimization of configuration and operation strategy for refrigerated warehouse with cold thermal energy storage under time-of-use tariffs

XIAO Chupeng^{1,2}, MOU Xudong³, XU Jing^{1,2}, CHEN Lina⁴, DING Sheng^{1,2}, HU Wenbo^{1,2}

(¹State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, Hubei, China; ²State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, Jiangsu, China; ³State Grid Tianshui Power Supply Company, Tianshui 741000, Gansu, China; ⁴State Grid Pingliang Power Supply Company, Pingliang 744000, Gansu, China)

Abstract: To enhance the operational economic performance and load flexibility of cold storage facilities under time-of-use electricity pricing, this study developed a bi-level optimization framework for the capacity configuration and operational strategy of a refrigerated warehouse cold thermal energy storage system. A medium-sized refrigerated warehouse was selected as the case study, and system models including a dual-mode chiller

收稿日期: 2026-01-30; 修改稿日期: 2026-03-04。

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目“面向分布式光伏与农业冷链的时空匹配就地消纳研究与应用”(5400-202433204A-1-1-ZN)。

第一作者: 肖楚鹏 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力需求侧管理, E-mail: 181259409@qq.com; 通信作者: 胡文博, 工程师, 研究方向为电碳协同、负荷管理, E-mail: 2698687225@qq.com。

引用本文: 肖楚鹏, 牟旭东, 许静, 等. 冷库蓄冷系统配置与运行策略协同优化研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 920-932.

Citation: XIAO Chupeng, MOU Xudong, XU Jing, et al. Bi-level optimization of configuration and operation strategy for refrigerated warehouse with cold thermal energy storage under time-of-use tariffs[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 920-932.

unit and a phase-change thermal energy storage device were established. At the upper level, lifecycle cost minimization was adopted as the optimization objective, and a genetic algorithm was employed to determine the optimal capacities of the chiller unit and thermal energy storage device. At the lower level, a mixed-integer linear programming model was developed to minimize the typical-day operating cost through optimal scheduling under time-of-use electricity pricing, and the operational results were iteratively fed back to the upper level. The results indicated that, under current electricity pricing conditions, the optimized system reduced the discounted operational cost by 30% compared with the baseline scheme, achieving a discounted lifecycle cost of 52.3 thousand CNY and a dynamic payback period of 8.01 years. Further analysis of different peak-valley electricity price ratios showed that, as the ratio increased from 1.45 to 9.25, the lifecycle cost decreased to 40.3 thousand CNY and the dynamic payback period shortened to 3.29 years, while the optimal thermal storage capacity increased significantly. These findings provide quantitative support for capacity planning and operational strategy development of cold storage refrigeration-thermal energy storage systems under time-of-use electricity pricing.

Keywords: refrigerated warehouse; cold thermal energy storage; bi-level optimization; life cycle cost

据农业农村部食物与营养发展研究所发布的《2023年中国食物与营养发展报告》^[1]，我国食物总体损耗率高达14.7%，高于世界平均水平，且食品在储存与流通环节的损耗问题依然突出。食品冷链作为保障农产品与食品质量安全、减少腐损损耗的关键基础设施，在降低食物损失、提升资源利用效率方面发挥着重要作用。其中，冷库是冷链体系中的核心节点，贯穿食品从产地预冷、储藏到流通配送的各个环节，对维持食品品质与安全具有不可替代的作用。随着居民消费水平提升以及生鲜电商和冷链物流行业的快速发展，我国冷库数量和规模持续增长，其能源消耗问题日益凸显。由于冷库需要全年连续运行以维持稳定的低温环境，其单位体积能耗显著高于一般工业与公共建筑，用电成本已成为冷库运营中的主要支出之一^[2]。同时，冷库制冷负荷在时间尺度上具有明显的集中性，在高温季节及白天时段易形成电力需求高峰，进一步加剧了电网的峰谷差与供需压力。在能源价格波动加剧及“双碳”目标约束下^[3]，探索在保障食品保鲜安全前提下兼顾用能经济性与电网友好性的冷库运行新模式，具有重要的工程价值与现实意义。

为降低冷库运行成本并提升用能灵活性，学术界与工程领域广泛关注通过储能技术实现制冷负荷时移的解决方案^[4]。其中，蓄冷技术利用低电价时

段制取并储存冷量，在高电价或高负荷时段释放冷量以满足冷库需求，是冷库削峰填谷和降低电费支出的有效途径。相较于电化学储能，蓄冷系统以水、盐溶液等相变材料作为储能介质^[5]，具有技术成熟、单位储能成本低、安全性高等优势，在建筑用冷环节已经得到了广泛应用^[6]。如 Sanaye 和 Shirazi^[7]以某栋商业建筑为研究对象加装蓄冷系统，研究发现与传统制冷系统相比，蓄冷系统年均能耗下降9%，CO₂排放量减少9.8%，且额外投资可通过分时电价政策在3.43年内实现回收。Song 等^[8]进一步针对酒店、餐厅、商场、办公楼4种典型建筑类型，探究了不同控制策略对冰蓄冷系统设计容量的影响，发现在不同控制策略下系统的经济性指标随蓄冷量先减后增，在不同控制方案下的冰蓄冷系统存在着不同的最优蓄冷量。Odufuwa 等^[9]将建筑冰蓄冷系统与光伏系统结合，通过建立优化控制算法，在医院场景下实现了33%的夏季能源成本节约，为高负荷建筑提供了兼具经济性与环保性的能源系统方案。

在冷库蓄冷领域，江燕涛^[10]提出将动态冰浆蓄冷技术应用于冷库制冷系统，利用湿冷技术提高冷库果蔬的贮藏品质，降低果蔬的冻伤发生率。孙静等^[11]采用乙二醇溶液作为蓄冷材料，对黄冠梨在乙二醇蓄冷库中的保鲜性能进行了实验测试，实验结

果表明乙二醇蓄冷库的用电费用仅为对照冷藏库的75%，可有效降低运行成本，降低电网高峰用电负荷。Zhu等^[12]针对冷库能耗高且峰谷电价差异显著的现状，分别比较了冷库蓄冷和冷库储电2种技术方案的经济可行性，结果表明2种方案都具备应用可行性且各有优势，而现有条件下采用蓄冷技术方案成本更低，投资回收期更短，更具经济性。

尽管蓄冷技术在冷库中的应用潜力已得到广泛认可，然而现有研究仍多集中于蓄冷系统容量配置优化或系统运行策略优化等单一层面的分析，未能建立设备配置与运行策略之间的协同优化关系，限制了蓄冷系统整体效益的充分发挥，容易出现蓄冷容量不足、设备冗余或运行策略受限等问题，从而削弱蓄冷系统的综合优势。因此，亟须设计一种能够在系统设计与运行策略2个层面实现同步优化的方法，以实现冷库蓄冷系统的整体经济性最优。

针对上述问题，本工作以分时电价机制下的冷库制冷-蓄冷系统为研究对象，构建面向设备配置与运行策略耦合优化的双层优化框架，以系统全生命周期成本最小化为目标函数，获得冷库蓄冷系统的最优设备配置和运行策略，并讨论不同峰谷电价场景下蓄冷系统经济性指标与容量配置的演变关系，为冷库蓄冷系统的设计和推广提供相应的参考。

1 研究方法

1.1 系统介绍

为了提高冷库制冷系统的运行经济性和用能灵活性，本研究在冷库原有基载主机供冷系统的基础上加装了双工况制冷主机和蓄冷装置。图1分别展示了基载主机供冷系统和制冷主机蓄冷系统，其中， P_1 和 P_2 代表水泵1和水泵2， V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 和 V_5 分别代表阀门1至阀门5，箭头方向表示换热介质的流动方向。基载主机供冷系统主要由换热器和基载主机组成，采用乙二醇溶液作为换热介质，经换热器换热满足室内冷负荷；相变蓄冷-供冷系统在此基础上加装了制冷主机和蓄冷装置，采用盐溶液作为相变蓄冷材料，与基载主机联合运行实现协同制冷。

冷库蓄冷系统的运行流程如下：在夜间谷电时段，制冷机组运行于蓄冷工况，对乙二醇溶液进行降温后送入蓄冷装置，并与盐溶液进行换热以实现

冷量储存；与此同时，冷库运行所需的基础冷负荷由基载主机承担，用于维持库内基本温度需求。在白天平电及峰电时段，系统转入供冷模式，乙二醇溶液经换热器后可选择由制冷机组供冷、蓄冷装置放冷或两者协同供冷，共同承担冷库运行冷负荷。通过上述“谷电蓄冷、峰电放冷”的运行策略，实现不同冷源在不同时段的功能分工：基载主机主要用于谷电阶段承担基础冷负荷并保障蓄冷运行条件，而制冷机组与蓄冷装置则在平电及峰电阶段协同承担冷库运行负荷。该运行模式能够有效利用峰谷电价差，从而降低系统运行成本，同时提升冷库制冷系统的运行灵活性与经济性。

1.2 优化方法

本研究采用双层优化(bi-level optimization)方法对蓄冷系统的容量配置方案进行协同优化。该优化框架由2个相互关联但求解过程相对独立的层级组成：上层为设备配置优化，下层为系统运行策略优化。其中，下层优化作为上层优化的重要组成部分嵌套于整体求解过程中，但上下层的求解过程相对独立，分别采用不同的优化变量与求解策略。

如图2所示，在上层优化中，以系统设备容量配置为优化变量，以系统全生命周期成本(life cycle cost, LCC)为目标函数，使用遗传算法(genetic algorithm, GA)来确定系统的最优设备配置方案。在下层优化中，以各类设备在时序上的启停状态为优化变量，以系统年运行成本为目标函数，建立混合整数线性规划问题(mixed integer linear programming, MILP)，利用数学规划求解器对给定设备配置条件下的最优运行策略进行求解。上层优化所确定的设备容量为下层优化提供可行域与约束边界，而下层优化计算得到的年运行成本则作为关键反馈信息返回上层，用于完成系统全生命周期成本的评估与更新。在综合考虑不同典型日冷库冷负荷特性以及地区分时电价(time of use, ToU)等外部影响因素的基础上，该优化方案能够在给定工况条件下实现设计-运行策略双层优化，获得蓄冷系统的最优设备配置方案。

1.3 上层设备容量配置优化

上层设计优化问题可表述为一个以设备容量配置为决策变量、以全生命周期成本最小化为目标的优化问题。系统全生命周期成本主要包括初始投资成本、运行成本和维护成本3部分。其中，运行成

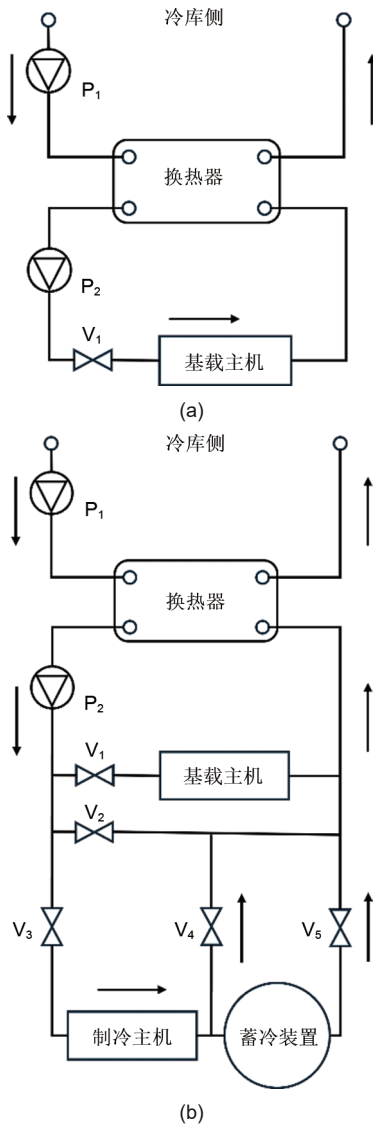


图1 基载主机供冷系统和制冷主机蓄冷系统: (a) 基载主机供冷系统; (b) 制冷主机蓄冷系统

Fig. 1 Base-load chiller system and refrigeration chiller cold storage system: (a) Base-load chiller system; (b) Refrigeration chiller cold storage system

本由下层运行优化模型计算获得, 初始投资成本和维护成本则主要与系统设备容量配置相关。因此, 本研究选取制冷主机制冷量和蓄冷装置储能容量作为上层优化的决策变量。

需要说明的是, 本工作的研究对象为既有基载主机系统基础上进行的技术改造方案。主机蓄冷-供冷系统通过加装双工况制冷主机及蓄冷装置形成, 属于增量建设模式。因此, 本工作所开展的全生命周期成本分析为增量全生命周期成本分析 (incremental LCC), 仅针对新增设备及其引起的运

行成本变化进行经济性评估, 而未纳入原有基载系统的既有资产成本。该处理方式符合工程改造决策阶段的经济性评价方法, 能够直接反映不同容量配置方案的边际经济效益。

由于主机蓄冷-供冷系统是在原有基载主机系统的基础上加装制冷主机和蓄冷装置而形成, 其初始投资成本相较基载系统有所增加, 但可通过运行阶段电费支出的降低在系统运行过程中逐步抵消。为刻画系统“前期高投入、后期低运行成本”的经济特性, 本工作采用考虑贴现率与通货膨胀因素的全生命周期成本方法进行经济性分析。在计算过程中, 分析期与设备设计寿命保持一致。鉴于制冷设备残值占初始投资比例较小, 且回收价值受市场波动影响较大, 本工作未计入残值收益, 因此所得经济性结果属于相对保守估计。在此基础上, 上层设计优化的目标函数及约束条件如下:

$$\min LCC = C_{in} + C_m + C_{op} = f_1(CL + ST) + C_{op} \quad (1)$$

$$\begin{cases} CL_{\min} \leq CL \leq CL_{\max} \\ ST_{\min} \leq ST \leq ST_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, LCC是加装主机制冷-蓄冷系统的全生命周期成本(元), C_{in} 是系统的全生命周期初始投资成本折现值(元), C_{op} 是系统的全生命周期运行成本折现值(元), C_m 是系统的全生命周期维护成本折现值(元), CL和ST分别是制冷主机的设计制冷量(kW)和蓄冷装置的储能容量(kWh), $CL_{\min}$ 和 $CL_{\max}$ 是制冷主机的设备配置容量上下限(kW), $ST_{\min}$ 和 $ST_{\max}$ 是蓄冷装置的设备配置容量上下限(kWh)。

1.3.1 初始投资成本

初始投资成本主要由设备购置费组成, 其中设备购置费包括制冷主机和蓄冷装置的采买费用, 其费用主要与设备配置容量有关, 此外还涵盖了制冷机组的控制系统安装费用^[13], 其大小与制冷机组容量大小有关。本工作采用动态投资回收期(payback period, PBP)作为蓄冷系统的初始投资成本的经济性评估指标^[14], 以上费用具有如下关系:

$$CRF = \frac{i(1+n)^n}{(1+n)^n - 1} \quad (3)$$

$$CS = 0.133 c_{in, cl} \cdot CL \quad (4)$$

$$CAPI = c_{in, cl} \cdot CL + c_{in, st} \cdot ST + CS \quad (5)$$

$$C_{in} = CAPI \cdot CRF \quad (6)$$

$$PBP = \frac{C_{in}}{C_{op, base} - C_{op, ites} - C_m} \quad (7)$$

式中, CRF为资本回收系数, i 是利率(%), n

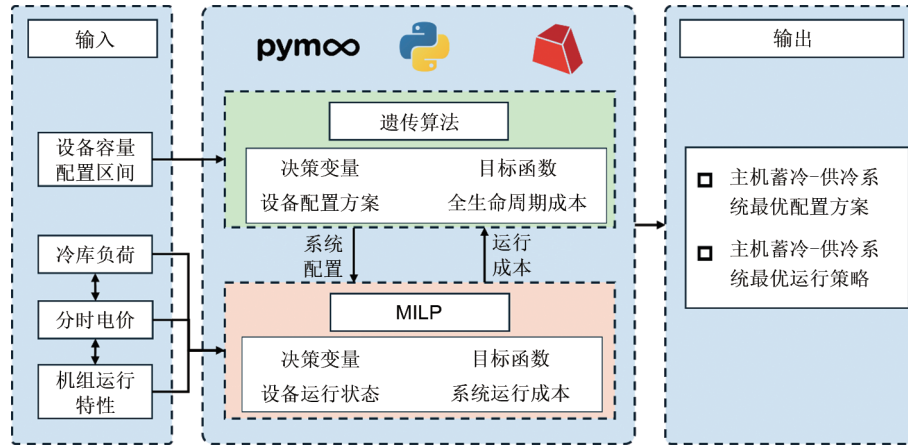


图2 冷库制冷系统双层优化框架

Fig. 2 Bi-level optimization outline of refrigerated warehouse cold storage system

是系统运行年限, CS是控制系统安装费用(元), CAPI是初始投资成本中的设备购置费(元), $c_{in,cl}$ 和 $c_{in,st}$ 分别是制冷机组和蓄冷装置的投资成本系数, PBP是系统的动态投资成本回收周期, $C_{op,base}$ 和 $C_{op,ites}$ 分别是原有基载供冷系统和蓄冷系统的折现运行成本(元)。

1.3.2 维护成本

维护成本主要由系统运行期间的维护费用组成, 假设维护成本与系统的初始投资成本呈正相关, 并具有以下关系:

$$C_m = \varphi C_{in} \cdot \frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot CRF \quad (8)$$

式中, φ 是维护成本系数。

1.3.3 运行成本

运行成本主要由系统运行期间的购电费用组成, 全年总的运行费用可通过不同典型日场景下的运行成本统计计算, 其计算方式如下:

$$k = \frac{1+r_i}{1+i} \quad (9)$$

$$C_{op} = (n_1 C_1 + n_2 C_2 + n_3 C_3 + n_4 C_4) \cdot \frac{k(1-k^n)}{1-k} \cdot CRF \quad (10)$$

式中, k 是运行成本贴现因子, r_i 是通货膨胀率(%), n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 分别是全年中场景1、场景2、场景3和场景4的天数, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 分别是场景1、场景2、场景3和场景4的运行费用(元)。

1.4 下层设备运行策略优化

下层运行优化问题可以表述为一个以不同时段设备启停状态为决策变量、以典型场景日运行成本最小化为目标的优化问题。该优化问题需要在满足冷库冷负荷需求及系统运行约束的前提下, 结合日

内不同时段的分时电价, 实现制冷主机与蓄冷装置在各时段的协同优化运行, 从而获得典型日条件下系统的最优运行策略及对应的运行成本, 将所得到的典型日运行成本进一步折算为年运行成本, 并作为上层设计优化模型中全生命周期成本计算的重要输入参数。下层运行优化的目标函数如下:

$$\min C_{tpd} = P_{grid} \cdot ToU \quad (11)$$

式中, C_{tpd} 是设计日的运行成本(元), P_{grid} 是冷库制冷系统从市政电网的购电量(kWh), ToU是该地区的分时电价(元/kWh)。

1.4.1 制冷机组模型

本工作中所提到的制冷主机为双工况机组, 可分为蓄冷工况和制冷工况, 其机组性能系数(coefficient of performance, COP)与冷凝端和蒸发端的换热介质进口温度和部分负荷率(part load ratio, PLR)有关。模型计算方法如下^[15]:

$$CF = a_1 + b_1 T_{cwl} + c_1 T_{cwl}^2 + d_1 T_{cde} + e_1 T_{cde}^2 + f_1 T_{cwl} T_{cde} \quad (12)$$

$$EIRF = a_2 + b_2 T_{cwl} + c_2 T_{cwl}^2 + d_2 T_{cde} + e_2 T_{cde}^2 + f_2 T_{cwl} T_{cde} \quad (13)$$

$$CL_{ava} = CL \cdot CF \quad (14)$$

$$P_{chl,ava} = CL_{ava} \cdot \frac{EIRF}{COP_r} \quad (15)$$

$$PLRF = a_3 + b_3 \cdot PLR + c_3 \cdot PLR^2 \quad (16)$$

$$P_{chl} = P_{chl,ava} \cdot PLRF \quad (17)$$

$$Q_{chl} = PLR \cdot CL_{ava} \quad (18)$$

式中, CF是制冷能力系数, EIRF是能耗制冷系数, T_{cwl} 是流体离开机组蒸发器的温度(°C), T_{cde} 是流体进入冷凝器的温度(°C), CL_{ava} 和CL分别是冷水机组可用容量(kW)和设计容量(kW), Q_{chl} 是冷水机组的实际冷负荷(kW), $P_{chl,ava}$ 和 P_{chl} 分别是冷水机组的实际功率(kW)和设计功率(kW), COP_r 是冷

水机组的设计性能系数, PLR是冷水机组的部分负荷率, PLRF是冷水机组的部分负荷率系数。

1.4.2 蓄冷设备模型

本研究的蓄冷装置模型基于设备实际运行过程中的储冷与放冷环节建立, 设备状态表示方法如下:

$$SOC(t) = \eta_{ch} Q_{ch} - \eta_{dch} Q_{dch} - \alpha_{self} \cdot SOC(t-1) \quad (19)$$

$$SOC_{min} \cdot ST \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \cdot ST \quad (20)$$

式中, SOC是设备蓄冷状态(%), t 是运行时间步长, Q_{ch} 和 Q_{dch} 分别是蓄冷装置的蓄冷量(kW)和释冷量(kW), η_{ch} 和 η_{dch} 分别是蓄冷效率和释冷效率, α_{self} 是蓄冷装置的能量自损失率, SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别是蓄冷装置的最大蓄冷量和最小蓄冷量。

1.4.3 运行优化模型

基于上述冷水机组模型和蓄冷设备模型可建立下述设备运行优化模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CoolingLoad}(t) = Q_{chl}(t) + Q_{dch}(t) \\ 0 \leq Q_{chl}(t) \leq CL \cdot b_{chl}(t) \\ 0 \leq Q_{ch}(t) \leq \alpha_{ch} \cdot ST \cdot b_{ch}(t) \\ 0 \leq Q_{dch}(t) \leq \alpha_{dch} \cdot ST \cdot b_{dch}(t) \quad t = 1, 2, 3 \dots 24 \quad (21) \\ 0 \leq b_{ch}(t) + b_{chl}(t) \leq 1 \\ 0 \leq b_{ch}(t) + b_{dch}(t) \leq 1 \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{array} \right.$$

式中, CoolingLoad是冷库冷负荷(kW), b_{chl} 是制冷机组直接供冷的运行模式(0~1), b_{ch} 制冷机组蓄冷的运行模式(0~1), b_{dch} 是蓄冷设备放冷的运行模式(0~1), α_{ch} 和 α_{dch} 分别是最大蓄冷系数和最大放冷系数。

2 案例说明及优化方案

2.1 冷库冷负荷

本工作以一座位于北京的中型冷库^[12]为优化研究对象, 该冷库总容积为3189 m³, 平面尺寸为40.5 m×17.5 m, 库高为4.5 m, 冷库设计运行温度设定为0℃, 内墙采用厚度为0.1 m的聚氨酯保温板, 以满足冷库的隔热需求。

在设计工况下, 冷库常规存储量为200 t, 每日的货物入库总量为45.9 t, 假设每日内的货物入库量服从正态分布以表征典型运行条件下的货物流入特性。外部环境选取建筑性能模拟软件EnergyPlus中北京地区的气候数据, 按照《冷库制冷设计手册》^[16]中的冷库负荷计算方法, 通过对围护结构传热负荷、货物冷却负荷及其他相关负荷

进行综合核算, 得到冷库全年8760 h的冷负荷, 采用K-means聚类^[17]获得冷库全年4种典型场景负荷, 如图3所示。冷库负荷计算方法详见附录A。

2.2 参数设定

本研究中的蓄冷装置采用13.6%浓度的氯化钠溶液作为蓄冷介质^[16], 该氯化钠溶液的相变温度为-9.8℃, 相变潜热为300 kJ/kg, 适宜作为冷库制冷系统中的低温蓄冷材料来使用。基载机组和制冷机组的性能模型参数参考文献[15], 其中基载机组的设计制冷量为150 kW, 机组的冷凝端换热介质温度设定为环境温度, 蒸发端换热介质温度在直接供冷工况下设定为-5℃, 蓄冷工况下设定为-10℃。具体参数可参考表1。

为了充分考虑分时电价对冷库蓄冷系统的灵活性与经济性影响, 以北京地区代理购电工商业用户电价^[21]为基础, 按1:1.45的比值生成不同峰谷比场景下的用户电价表。表2列出了6种不同场景下的具体电价, 其中峰谷电价比达到2.10时为北京地区现行分时电价。

决策变量优化范围上下限的选择依据如下: 本研究涉及的冷库蓄冷系统由原有基载主机系统改造而成, 鉴于冷库既有基载主机的制冷量可满足全日负荷需求, 因此蓄冷系统配套制冷主机的制冷量不宜超过基载主机的额定制冷量, 即上限取值为150 kW; 而蓄冷装置的容量优化上限基于典型日累计最大冷负荷估算确定, 算例中场景1的日内冷负荷水平最高, 达1177 kWh, 综合考虑蓄冷装置运行过程中的存储损失与换热损失, 最终将其容量优化上限设定为2000 kWh。相关参数如表3所示。

2.3 优化方案

本研究将基载主机供冷系统作为基准案例与优化后的冷库蓄冷系统进行对比, 首先采用现行分时电价方案作为用电成本场景(峰谷电价比为2.10), 如图4所示, 利用双层优化框架得到当前冷库蓄冷系统的最优设备配置和运行方案, 随后通过同样的优化流程建立不同峰谷电价场景下蓄冷系统经济性指标与容量配置之间的演变关系, 讨论峰谷电价差对冷库蓄冷系统的经济性影响。

本研究基于python语言建立设备模型和双层优化流程, python版本为3.10。上层优化程序利用pymoo优化算法库^[22]调用遗传算法求解, 下层优化程序采用Groubi数学规划求解器^[23]求解, 上下层优

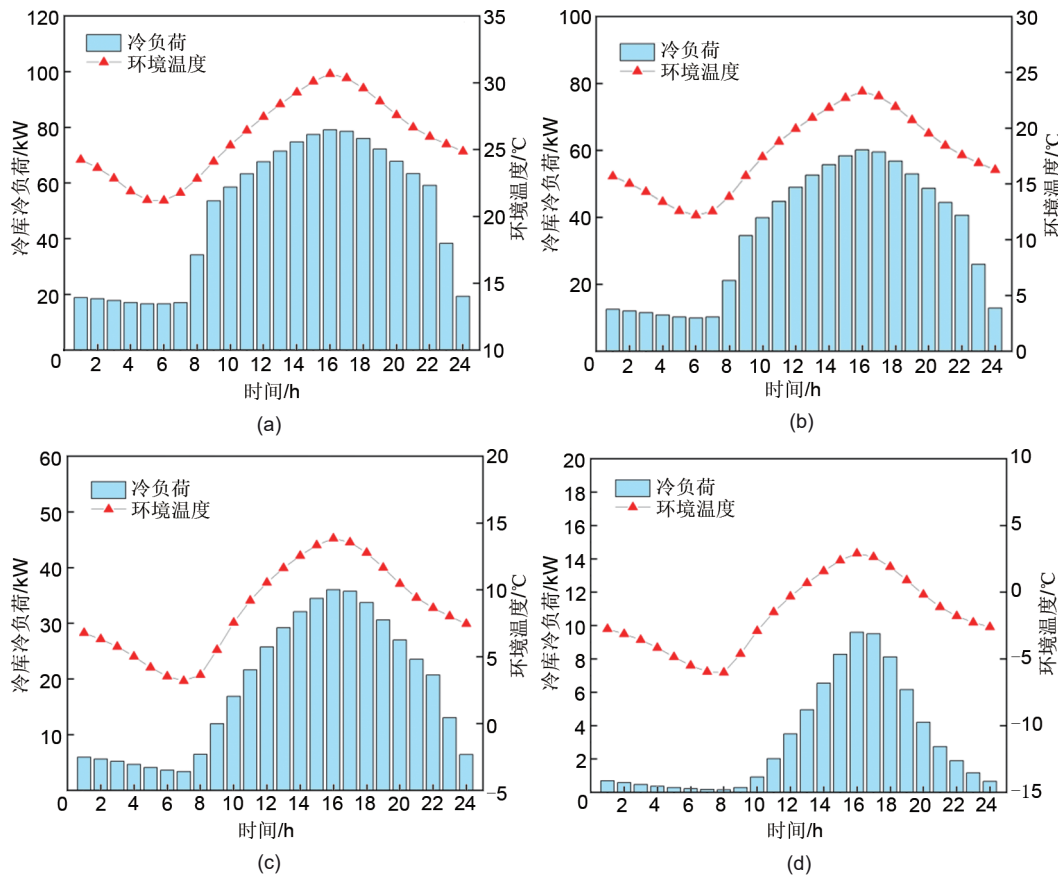


图3 冷库典型场景负荷: (a) 典型场景1; (b) 典型场景2; (c) 典型场景3; (d) 典型场景4

Fig. 3 Typical scenario cooling load of refrigerated warehouse: (a) Typical scenario 1; (b) Typical scenario 2; (c) Typical scenario 3; (d) Typical scenario 4

化参数如下所示:

(1) 上层优化参数: 种群数量 50, 子代数量 20, 交叉概率 0.9, 分布指数 20, 变异分布指数 20, 遗传代数 100。

(2) 下层优化参数: 相对容差 0.1%, 启发式搜索频率 0.05, 无求解时间限制。

3 结果与讨论

3.1 冷库蓄冷系统配置-运行策略优化结果

在北京地区现行分时电价条件下, 基于所提出的双层优化框架, 对冷库蓄冷系统的设备容量配置与运行策略进行协同优化。图5给出了上层遗传算法的优化收敛过程及目标函数和决策变量的演化结果, 单次优化求解时长为 10 min。从迭代过程可以看出, 系统全生命周期成本(LCC)在迭代初期下降较快, 随着遗传代数增加至 35 次后逐步趋于稳定, 表明所采用的优化算法具有较好的收敛性与稳定性, 能够在可接受的计算时间内获得全局近优解。

在当前电价场景下, 冷库蓄冷系统优化得到的制冷主机设计制冷量为 75.69 kW, 蓄冷装置储冷容量为 602.77 kWh。从经济性指标的角度来看, 仅采用基载主机直接供冷的制冷系统折现运行成本高达 5.52 万元, 而协同优化后的系统在保证冷库冷负荷需求与运行约束均被满足的前提下, 通过“夜间蓄冷、日间释冷”的运行模式, 显著降低了高电价时段的购电量, 从而实现了运行成本的有效削减。该方案下系统的折现运行成本为 3.87 万元, 相较于基载主机系统下降了 30%, 全生命周期成本为 5.23 万元, 动态投资回收期为 8.01 年, 显示出在现行分时电价条件下引入冷库蓄冷系统具有明确的经济可行性。

3.2 典型场景下的冷库蓄放冷运行策略

为进一步分析不同典型工况下系统运行策略的差异性, 基于 3.1 节的优化结果获得 4 个典型场景日的蓄冷系统最优运行策略。图6分别展示了 4 类典型日场景中制冷主机与蓄冷装置的时序运行结

表 1 参数设定

Table 1 Parameter setting

项目	参数名称	设定值	参考文献
制冷主机	$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$	1.0020652868, 0.0290829382, 0.0004981323, 0.0009088235, 0.0001680612, -0.0001752731	[15]
	$a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$	0.609429307, -0.0010745365, -0.0000580474, -0.0003768051, 0.0004576827, -0.0005942491	
	设计性能系数(COP _p)	2.96	
	冷凝温度(T_{cde})	环境温度	
	蓄冷蒸发温度($T_{cwl,ctes}$)	-10℃	[18]
	制冷蒸发温度($T_{cwl,cs}$)	-5℃	
	最小蓄冷量(SOC _{min})	0.2	
	最大蓄冷量(SOC _{max})	0.9	
蓄冷装置	蓄冷效率(η_{ch})	0.95	[19]
	释冷效率(η_{dch})	0.95	
	最大蓄冷系数(α_{ch})	0.2	
	最大放冷系数(α_{dch})	0.2	
	能量自损失率(α_{self})	0.99	
经济参数	蓄冷设备投资成本系数($c_{in,st}$)	174.75	[5]
	蓄冷机组投资成本系数($c_{in,cl}$)	851.87	[13]
	系统运行年限(n)	25	[15]
	维护成本系数(φ)	1%	[20]
	利率(i)	6%	[14]
	通货膨胀率(r_f)	2.9%	
	场景天数(n_1, n_2, n_3, n_4)	96, 93, 77, 99	
冷库基载供冷系统	折现运行成本	5.52 万元	

表 2 不同峰谷电价比场景

Table 2 Scenarios with different peak-valley electricity price ratios

峰谷电 价比	分时电价(元/kWh)		
	谷电价(0:00—7:00, 23:00—24:00)	平电价(7:00—10:00, 13:00—17:00, 22:00—23:00)	峰电价(10:00—13:00, 17:00—22:00)
1.45	0.68	0.83	0.98
2.10	0.55	0.83	1.15
3.04	0.45	0.83	1.36
4.40	0.36	0.83	1.60
6.38	0.30	0.83	1.89
9.25	0.24	0.83	2.22

表 3 决策变量上下限

Table 3 Upper and lower bounds of decision variables

决策变量	单位	上限	下限
制冷主机(CL)	kW	150	0
蓄冷装置(ST)	kWh	2000	0

果。其中，场景 1 和场景 2 对应全年中冷负荷水平较高的工况，其日内放冷量分别达到总制冷负荷的 38.4% 和 53.5%，而场景 3 和场景 4 则为低负荷工况，其日内放冷量均达到总制冷负荷的 100%。可以观察到，在高负荷场景下，蓄冷装置的运行策略更倾向于在日间的峰电阶段释放冷量，同时由于制

冷主机本身的制冷量有限，蓄冷装置会在平电阶段的用电高峰释冷以补充冷库所需冷量(如典型场景 1)，减少对制冷机组的制冷需求，从而进一步降低蓄冷系统的初始投资成本。这种运行方式有效抑制了峰电时段制冷主机的高功率运行，降低了峰电价下的用电成本。相比之下，在低负荷场景中，由于冷库冷负荷整体水平较低，而制冷机组的制冷功率较大，制冷机组可以通过夜间蓄冷方式满足白天所有冷负荷需求，在峰谷电价差的基础上进一步将平电价与谷电价之间的差值纳入盈利范围，因此低负荷场景下的日间冷库负荷只需通过蓄冷装置进行满足。

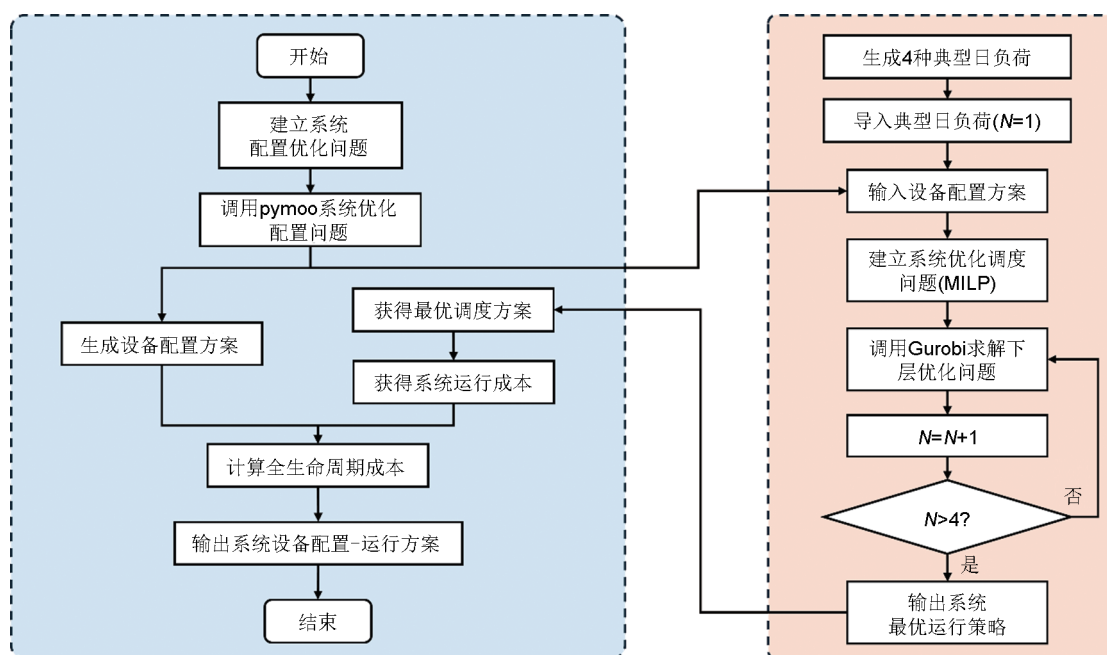


图4 双层优化流程

Fig. 4 Bi-level optimization process

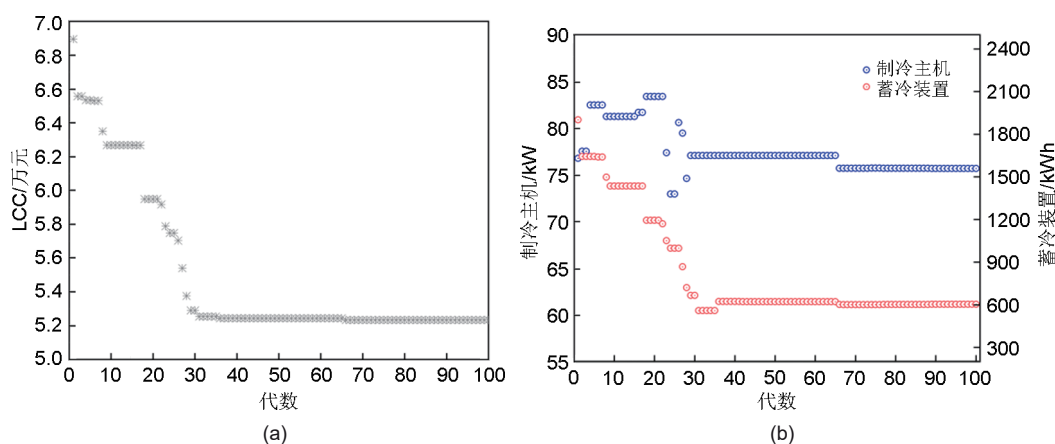


图5 双层优化收敛过程: (a) 优化目标迭代过程; (b) 决策变量迭代过程

Fig. 5 Convergence process of bi-level optimization: (a) Optimization objective iteration process; (b) Decision variable iteration process

总体来看,设计-运行策略协同优化框架不仅能够给出合理的设备容量配置方案,还能够在运行层面充分挖掘分时电价带来的负荷转移潜力,使蓄冷系统在高负荷与低负荷场景下均保持良好的经济性与运行灵活性。

3.3 峰谷电价对蓄冷系统的影响

为系统分析分时电价峰谷结构变化对冷库蓄冷系统经济性的影响,在保持冷库负荷特性和技术参数不变的前提下,分别针对表2所列的6种不同峰谷电价比场景开展了同样的双层优化计算。图7和

图8以及表4汇总了不同峰谷电价比场景下系统全生命周期成本、投资回收期以及最优设备容量配置结果。

从经济性指标的变化趋势来看,随着峰谷电价差的逐步扩大,冷库蓄冷系统的经济优势不断增强。具体而言,当峰谷电价比由1.45提高至9.25时,蓄冷系统的全生命周期成本由5.51万元下降至4.03万元,相较于现行分时电价条件下降了22.9%;同时,系统的动态投资回收期由13.73年显著缩短至3.29年。这一结果表明,分时电价差是

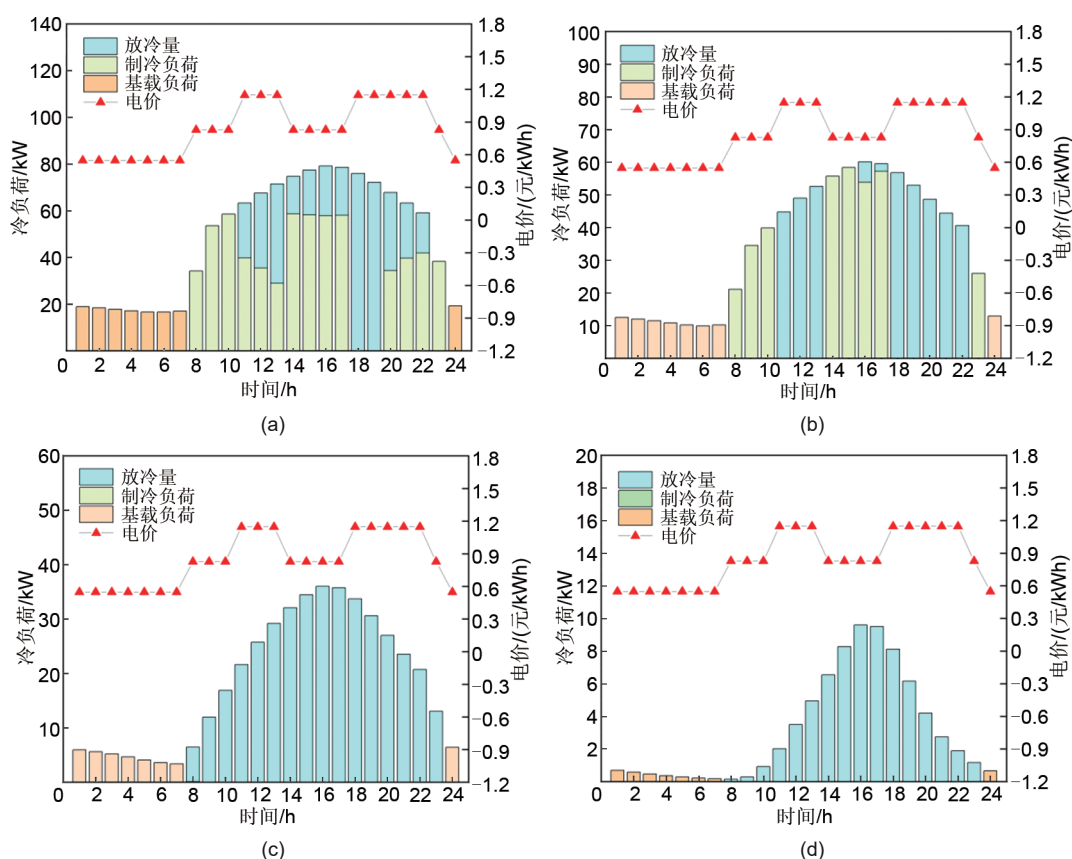


图6 不同典型场景下冷库蓄放冷运行策略: (a) 典型场景1; (b) 典型场景2; (c) 典型场景3; (d) 典型场景4
Fig. 6 Operation strategy for cold storage and release of refrigerated warehouse under different typical scenarios: (a) Typical scenario 1; (b) Typical scenario 2; (c) Typical scenario 3; (d) Typical scenario 4

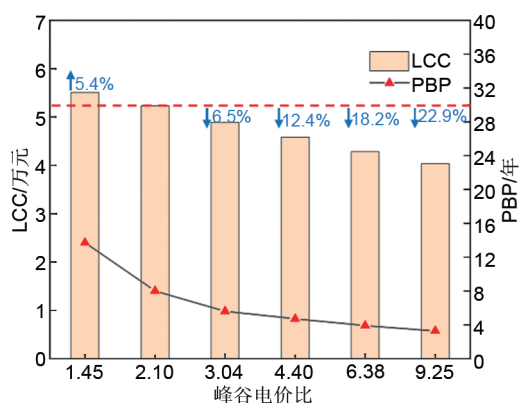


图7 不同峰谷电价比场景下的蓄冷系统全生命周期成本与动态投资回报周期

Fig. 7 Variations of system LCC and PBP as functions of different ToU scenarios

驱动冷库蓄冷系统经济性的关键外部因素, 峰谷电价差越大, 利用低价电力进行蓄冷并在高价时段释冷所带来的套利空间越大。此外还需注意的是, 随着峰谷电价差的扩大, 系统的动态投资回收周期下降趋势不断放缓, 这是因为在冷负荷总量不变的条

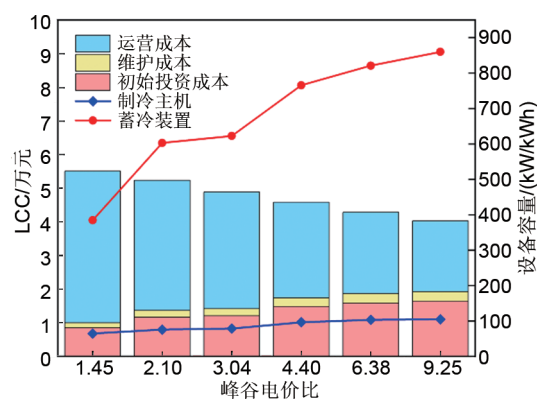


图8 不同峰谷电价比场景下的蓄冷系统成本支出与设备配置

Fig. 8 Variations of cost expenditure and equipment configuration as functions of different ToU scenarios

件下, 蓄冷系统通过峰谷电价套利的总额受到了限制, 因此蓄冷系统规模增大与动态投资回收周期下降之间并不存在线性关系。

从设备容量配置结果来看, 峰谷电价差的扩大显著影响了蓄冷装置的最优储能容量。随着峰谷电

表4 不同峰谷电价比场景下蓄冷系统的经济性指标和配置方案

Table 4 Economic indicators and equipment configuration under different peak-valley electricity price ratios scenarios

峰谷电价比	LCC/万元	PBP/年	制冷主机/kW	蓄冷装置/kWh	折现初始投资成本/万元	折现维护成本/万元	折现运行成本/万元
1.45	5.51	13.73	64.36	384.42	0.85	0.15	4.51
2.10	5.23	8.01	75.69	602.77	1.16	0.20	3.87
3.04	4.89	5.61	78.39	622.47	1.20	0.21	3.47
4.40	4.58	4.72	96.42	765.76	1.48	0.26	2.85
6.38	4.28	3.91	103.05	821.00	1.59	0.28	2.42
9.25	4.03	3.29	104.68	859.99	1.64	0.28	2.10

价比逐步增加，蓄冷装置的最优容量由384.42 kWh增加至859.99 kWh，呈现出明显的上升趋势。这表明，在峰谷电价差较小的场景下，系统更倾向于以制冷主机直接供冷为主，仅配置较小规模的蓄冷装置以满足有限的负荷转移需求；而在峰谷电价差较大的场景下，扩大蓄冷容量可以显著增强系统在时间维度上的用能调节能力，从而获得更高的经济收益。相比之下，制冷主机的最优配置容量随电价变化的趋势相对平缓，仅在高峰谷电价差场景下呈现出一定程度的增加。这说明，在本研究所设定的负荷条件下，蓄冷装置是承担负荷转移与经济性提升的主要手段，而制冷主机容量受冷库最大冷负荷约束，其对电价变化的敏感性相对较低。

进一步分析折现成本构成可以发现，随着峰谷电价差的增大，系统的折现运行成本持续下降，而折现初始投资成本与维护成本则逐步上升。这反映了系统在“以更高初始投入换取更低长期运行费用”方面的典型权衡关系。当峰谷电价差较大时，增加蓄冷容量所带来的运行成本节约足以抵消额外的投资与维护费用，从而使系统全生命周期成本达到更优水平。

综上所述，峰谷电价差不仅决定了冷库蓄冷系统的经济可行性区间，还深刻影响着系统的最优容量配置方案。在分时电价机制较为完善、峰谷电价差显著的地区，采用较大规模的蓄冷配置能够充分发挥冷库负荷的可调节潜力，为冷库节能降本及电网削峰填谷提供更大的价值空间。

4 总 结

本工作以分时电价机制下的冷库制冷-蓄冷系统为研究对象，构建了面向设备配置与运行策略协同优化的双层优化框架，并通过算例分析系统地探

讨了峰谷电价差对系统经济性与容量配置的影响，主要结论如下：

（1）在现行分时电价条件下，通过应用系统容量配置-运行策略协同优化策略，冷库制冷系统能够有效实现冷负荷的时间转移。优化结果表明，系统折现运行成本由基载主机方案的5.52万元降至3.87万元，对应的全生命周期成本为5.23万元，动态投资回收期为8.01年。

（2）冷库蓄冷系统的最优运行策略随冷负荷水平变化呈现明显差异：在高负荷工况下，蓄冷装置主要在峰电价时段释放冷量，并在平电价时段辅助供冷以降低制冷主机峰时出力；在低负荷工况下，系统倾向于通过夜间集中蓄冷满足白天全部冷负荷需求，使平电价、峰电价时段的用电需求进一步向谷电价时段转移。

（3）随着峰谷电价比由1.45提升至9.25，冷库蓄冷系统的全生命周期成本由5.51万元下降至4.03万元，动态投资回收期由13.73年缩短至3.29年；同时，蓄冷装置的最优配置容量由384.42 kWh增加至859.99k Wh，而制冷主机容量变化幅度相对较小，这表明系统经济性对蓄冷容量配置的敏感性高于制冷主机容量。

参 考 文 献

[1] 农业农村部食物与营养发展研究所. 2022年中国食物与营养发展报告[R]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2023.
Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China food and nutrition development report 2022 [R]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2023.

[2] LI Y L, DARKO A. Incentive mechanisms and decision-making behaviors in warehouse energy efficiency retrofits: A tripartite evolutionary game analysis[J]. Energy and Buildings, 2025, 349: 116578. DOI:10.1016/j.enbuild.2025.116578.

[3] 庄贵阳. 我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J]. 人民论坛, 2021(18): 50-53. DOI:10.3969/j.issn.1004-3381.2021.18.012.

- ZHUANG G Y. Challenges and countermeasures for China to achieve the goal of "double carbon"[J]. People's Tribune, 2021 (18): 50-53. DOI:10.3969/j.issn.1004-3381.2021.18.012.
- [4] 游辉, 谢晶. 低温相变蓄冷材料及其应用于冷链的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 287-293. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026944.
- YOU H, XIE J. Research progress of low temperature phase change storage materials and their applications in cold chain[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 287-293. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026944.
- [5] LI G, HWANG Y, RADERMACHER R. Review of cold storage materials for air conditioning application[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(8): 2053-2077. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003.
- [6] FARAJ K, KHALED M, FARAJ J, et al. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109579. DOI:10.1016/j.rser.2019.109579.
- [7] SANAYE S, SHIRAZI A. Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications [J]. Energy and Buildings, 2013, 60: 100-109. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.040.
- [8] SONG X, ZHU T, LIU L C, et al. Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 288-300. DOI:10.1016/j.enconman.2018.03.007.
- [9] ODUFUWA O Y, KUSAKANA K, NUMBI B P, et al. Optimal energy management of grid-connected PV for HVAC cooling with ice thermal storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109844. DOI:10.1016/j.est.2023.109844.
- [10] 江燕涛. 动态冰浆蓄冷湿冷技术在果蔬冷藏中的应用前景分析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(10): 5-9, 36.
- JIANG Y T. Analysis on application prospect of dynamic ice slurry storage humid cool refrigeration technology in fruit and vegetable storage[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2015, 15(10): 5-9, 36.
- [11] 孙静, 陈全, 王萍, 等. 乙二醇蓄冷库性能及其在黄冠梨保鲜上的应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 276-282.
- SUN J, CHEN Q, WANG P, et al. Performance of cold storage with ethylene glycol as secondary refrigerant and its application on preservation of 'Huangguan' pear[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(8): 276-282.
- [12] ZHU K, LI X Q, CAMPANA P E, et al. Techno-economic feasibility of integrating energy storage systems in refrigerated warehouses [J]. Applied Energy, 2018, 216: 348-357. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.01.079.
- [13] SHAIBANI A R, KESHTKAR M M, TALEBIZADEH SARDARI P. Thermo-economic analysis of a cold storage system in full and partial modes with two different scenarios: A case study[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 24: 100783. DOI:10.1016/j.est.2019.100783.
- [14] SHIRAZI A, TAYLOR R A, MORRISON G L, et al. A comprehensive, multi-objective optimization of solar-powered absorption chiller systems for air-conditioning applications[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 281-306. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.11.039.
- [15] HU L, LIU Y F, WANG D J, et al. Feasibility analysis and feature comparison of cold thermal energy storage for off-grid PV air-conditioned buildings in the tropics[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115176. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115176.
- [16] 商业部设计院. 冷库制冷设计手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 167-196.
- [17] 王森, 刘琛, 邢帅杰. K-means 聚类算法研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(5): 119-126.
- WANG S, LIU C, XING S J. Review on K-means clustering algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39 (5): 119-126.
- [18] YANG M X, WANG J J, ZHOU Y, et al. Optimal configuration of integrated energy system based on multiple energy storage considering source-load uncertainties under different risk tendencies[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 109: 115220. DOI:10.1016/j.est.2024.115220.
- [19] ZANG X Y, LI H X, WANG S W. Optimal design of energy-flexible distributed energy systems and the impacts of energy storage specifications under evolving time-of-use tariff in cooling-dominated regions[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108462. DOI:10.1016/j.est.2023.108462.
- [20] 周雨杰, 黄晓燕, 李博, 等. 复叠式冰浆源热泵系统多目标优化设计研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-16[2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20251231.1314.004>.
- ZHOU Y J, HUANG X Y, Li B, et al. Optimal design of a cascade ice slurry source heat pump system using a multi-objective optimization strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 1-16[2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20251231.1314.004>.
- [21] 国网北京市电力公司. 2025年1月国网北京市电力公司代理购电价格公示表[EB/OL]. (2024-12-28) [2026-01-21]. <http://www.bj.sgcc.com.cn>.
- [22] BLANK J, DEB K. Pymoo: Multi-objective optimization in Python [J]. IEEE Access, 2020, 8: 89497-89509. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2990567.
- [23] Gurobi Optimization. Gurobi optimizer reference manual[EB/OL]. (2024-01-01) [2026-01-25]. <https://www.gurobi.com>.

附录A

本工作所用到的冷库的冷负荷依据《冷库制冷设计手册》进行计算,其计算方法如下:

$$Q_q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

式中, Q_q 是冷库冷却设备负荷(W), Q_1 是围护结构传热量(W), Q_2 是货物热量(W), Q_3 是通风换气热量(W), Q_4 是电动机运转热量(W), Q_5 是操作热量(W)。

(1) 围护结构传热量

围护结构传热量由冷库室内温度与室外环境温度之间的温差所引起,具体计算方式如下:

$$Q_1 = K A a (t_w - t_n)$$

$$K = \frac{1}{1/\alpha_w + \delta_1/\lambda_1 + 1/\alpha_n}$$

式中, K 是围护结构的传热系数[W/(m²·℃)]; A 是围护结构的传热面积(m²); a 是围护结构两侧温差修正系数,取1.3; t_w 和 t_n 分别是围护结构外侧的温度(℃)和围护结构内侧的计算温度(℃); α_w 是围护结构外表面的传热系数[W/(m²·℃)],取24; α_n 是围护结构内表面的传热系数[W/(m²·℃)],取18; δ_1 是围护结构保温层的厚度(m), λ_1 是围护结构保温层的导热系数[W/(m·℃)],取0.031。

(2) 货物热量

货物热量包含货物入库所需的降温热量以及冷库储藏货物的呼吸热量,具体计算方式如下:

$$Q_2 = Q_{2a} + Q_{2b} + Q_{2c} + Q_{2d}$$

$$= \frac{1}{3.6} \left[\frac{G'(h_1 - h_2)}{T} + G'B \frac{(t_1 - t_2)c_b}{T} \right] + \frac{G'(q_1 + q_2)}{2} + (G_n - G')q_2$$

式中, Q_{2a} 是货物热量(W); Q_{2b} 是包装材料和运载工具热量(W); Q_{2c} 是货物冷却时的呼吸热量(W); Q_{2d} 是货物冷藏时的呼吸热量(W); G' 是冷间的每日进货量(kg); h_1 和 h_2 分别是货物进入冷库时的含热量(kJ/kg)和在冷库内终止降温时的含热量(kJ/kg); T 是货物冷却时间(h),取2 h; B 是货物包装材料或运载工具重量系数,取0.25; c_b 是包装材

料或运载工具的比热容[kJ/(kg·℃)],取0.42; t_1 和 t_2 分别是包装材料或运载工具进入冷库时的温度(℃)和在冷库内终止降温时的温度(℃); q_1 和 q_2 分别是货物冷却初始温度时的呼吸热量(W/kg)和货物冷却终止温度时的呼吸热量(W/kg); G_n 是冷库的已有货物储存量(kg)。

(3) 通风换气热量

通风换气热量主要由冷库的换气热量和操作人员需要的新鲜空气热量组成,具体计算方式如下:

$$Q_3 = Q_{3a} + Q_{3b}$$

$$= \frac{1}{3.6} \left[\frac{(h_w - h_n)nV\rho_n}{24} + 30n_r\rho_n(h_w - h_n) \right]$$

式中, Q_{3a} 是冷库换气热量(W); Q_{3b} 是操作人员需要的新鲜空气热量(W); h_w 是室外空气的含热量(kJ/kg); h_n 是室内空气的含热量(kJ/kg); n 是每日换气次数,取2次; V 是冷藏间内净容积(m³); ρ_n 是冷藏间内空气密度(kg/m³); n_r 是操作人员数量,取12。

(4) 电动机运转热量

电动机运转热量是冷库电动机运转时所带来的额外热量,具体计算方式如下:

$$Q_4 = 1000 \sum P \xi \rho$$

式中, P 是电动机额定功率(kW); ξ 是热转化系数,取0.75; ρ 是电动机运转时间系数,取1。

(5) 操作热量

冷库操作热量主要由照明热量、开门热量以及操作人员热量组成,具体计算方式如下:

$$Q_5 = Q_{5a} + Q_{5b} + Q_{5c}$$

$$= q_d A_d + 0.2778 \frac{V n_a (h_w - h_n) M \rho_n}{24} + \frac{3}{24} n_r q_r$$

式中, Q_{5a} 是照明热量(W); Q_{5b} 是开门热量(W); Q_{5c} 是操作人员热量(W); q_d 是每平方米地板面积照明热量(W/m²),取2; A_d 是冷间地板面积(m²); n_a 是开门换气次数,取2; M 是空气幕效率修正系数,取0.5; q_r 是操作人员产生的热量(W/个),取280。