



分时电价下主被动协同降温系统性能及经济性分析

陈亿锋, 蔡 阳, 林振涛, 郑善乐, 陆彦聪
(暨南大学国际能源学院, 广东 珠海 519070)

摘要: 在全球气候治理紧迫性加剧的当下, 建筑领域作为能源转型的战略支柱, 零碳转型已成当务之急, 传统降温模式面临能效与经济性双重瓶颈。本研究针对这一问题, 提出一种融合光伏相变墙体与冰蓄冷热泵的主被动协同降温系统, 从系统建模与运行调控双维度突破传统技术局限, 通过光伏发电、相变蓄热与冰蓄冷技术的多能互补, 实现“光伏降温-相变调峰-热泵补冷”的协同运行; 基于广州夏季典型气候数据与当地分时电价政策, 运用 TRNSYS 软件构建建筑降温系统模型, 并通过实验验证确保模型可靠性, 进而探究相变温度/厚度、蓄冰罐容积及需求响应策略对系统热工性能与经济性的影响。结果表明: 28℃相变温度、0.2 m相变厚度与0.4 m³蓄冰罐的组合最优, 可最小化室内温度波动并降低能耗, 使谷电利用率提升75.31%, 分时电价下日净购电成本较传统空调系统降低61.33%; 添加全局温度重设策略可进一步实现6.37%的电费节省, 且单位冷量成本低至0.182元/kWh; 该系统静态投资回收期为5~7年, 兼具技术可行性与商业推广价值, 为亚热带地区建筑零碳设计与能源优化管理提供重要参考。

关键词: BIPV-PCM; TRNSYS; 冰蓄冷; 主被动协同降温; 分时电价

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1033

中图分类号: TM 73; TU 83

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-886-09

Optimization and economic analysis of active-passive cooperative cooling system based on time-sharing tariffs

CHEN Yifeng, CAI Yang, LIN Zhentao, ZHENG Shanle, LU Yancong
(International Energy College, Jinan University, Zhuhai 519070, Guangdong, China)

Abstract: As global climate governance grows increasingly urgent, the building sector—a strategic pillar of energy transition—faces an imperative need for zero-carbon transformation, while traditional cooling models struggle with dual bottlenecks in energy efficiency and economic viability. To address this, a hybrid active-passive cooperative cooling system integrating photovoltaic phase-change (PV-PCM) walls with ice-storage heat pumps is proposed, overcoming the limitations of conventional technologies through dual innovations in system modeling and operational control. By harnessing the multi-energy complementarity of photovoltaic power generation, phase-change thermal storage, and ice-storage technology, the system achieves coordinated operation characterized by "photovoltaic cooling, phase-change peak shaving, and heat pump supplementary cooling." Using typical summer climate

收稿日期: 2025-11-18; 修改稿日期: 2026-01-27。

基金项目: 广东省科协青年科技人才培养计划 (SKXRC2025336); 广东省普通高校重点领域专项资助项目 (2022ZDZX1005); 广东省大学生创新创业训练计划支持资助项目 (S202510559117); 暨南大学大学生创新创业训练计划支持资助项目 (CX25376)。

第一作者: 陈亿锋 (2005—), 男, 本科生, 研究方向为围护结构被动降温 and 空调主动降温, E-mail: 15728828407@163.com; 通信作者: 蔡阳, 博士, 副教授, 研究方向为可持续能源与建筑环境, E-mail: thomascail301@163.com。

引用本文: 陈亿锋, 蔡阳, 林振涛, 等. 分时电价下主被动协同降温系统性能及经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 886-894.

Citation: CHEN Yifeng, CAI Yang, LIN Zhentao, et al. Optimization and economic analysis of active-passive cooperative cooling system based on time-sharing tariffs[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 886-894.

data from Guangzhou and the local time-of-use electricity pricing policy, a building energy consumption prediction model was developed in TRNSYS, validated experimentally, and applied to investigate the effects of phase-change parameters (temperature/thickness), ice-storage tank volume, and demand response strategies on the system's thermal performance and economic efficiency. Results indicate that the optimal configuration, a phase-change temperature of 28°C, a phase-change material thickness of 0.2 m, and an ice-storage tank volume of 0.4 m³, minimizes indoor temperature fluctuations and reduces energy consumption, increasing the off-peak electricity utilization rate by 75.31%. Under time-of-use pricing, the daily net electricity purchase cost is 61.33% lower than that of conventional air-conditioning systems. Furthermore, incorporating the Global Temperature Adjustment strategy reduces electricity costs by an additional 6.37%, achieving a cooling cost coefficient as low as 0.182 CNY/kWh. With a static payback period of 5—7 years, the system demonstrates both technical feasibility and commercial potential, offering valuable insights for zero-carbon building design and energy optimization management in subtropical regions.

Keywords: BIPV-PCM; TRNSYS; ice storage cooling; active and passive cooling synergy; time-of-use electricity pricing

随着全球经济的快速发展，能源消耗的激增引发了严重的能源危机和气候挑战。我国建筑能耗占终端能源消费总量的36.3%^[1]。其中供暖、通风和空调系统消耗超过50%的建筑能耗^[2]。2023年全球制冷能耗同比增长8.3%，预计2030年将增长35%~50%，加剧能源与气候压力^[1]。亚热带地区高温高湿气候使空调能耗占比高达65%~97%^[3]。在此背景下，如何通过技术协同与机制创新突破传统降温模式的性能瓶颈，成为当前建筑碳减排研究的核心命题。

在“双碳”目标驱动下，零碳建筑技术快速发展。蔡阳等^[4]将太阳能被动通风与建筑相变蓄热技术结合，提升了太阳能利用率、降低能耗并优化室内热环境；Zhou^[5]进一步验证了光伏相变一体化建筑 (building integrated photovoltaic with phase change material, BIPV-PCM) 在亚热带气候中的适用性，指出其可减少空调能耗并提升可再生能源利用率；张路曼等^[6]开发的具有相变调温墙板的围护结构可使室内温度峰值降低5.166℃。这些技术虽显著提升了建筑节能潜力，但被动制冷仍然存在显著局限性：肖安汝^[7]指出，传统被动系统在峰电时段能耗占比高达42%，而谷电时段利用率不足15%，导致运行成本显著增加。这一矛盾在Erdemir等^[8]的研究中尤为突出——被动冰蓄冷系统的投资回收期为12.5年，而谷电驱动的主动系统回收期仅为4.5年。分时电价政策放大了被动系统在

极端气候与电力市场双重压力下的适应性缺陷，亟需通过主动技术弥补其性能短板。

尽管主动制冷系统通过基载制冷机优化与电价响应策略显著提升了能效，正如李丹^[9]通过冰蓄冷主机协同策略实现制冷季能耗降低27.3%，但其对分时电价机制的深度整合仍存在系统性缺陷。现有研究多聚焦单一技术优化，缺乏对电价波动与系统动态响应的协同机制设计。朱伟业等^[10]建立热负荷弹性与分时电价协同模型，通过采暖建筑热惯性调节电热联合系统峰谷负荷，弃风率降低21%，其协同机制仍依赖主动热泵调峰，未释放围护结构被动蓄冷潜力。葛凤华等^[11]基于TRNSYS的相变蓄冷空调模拟表明，通过谷电蓄冷策略可使运行费用减少44.24%，但其模型未耦合建筑围护结构热惰性与空调启停的动态博弈。这表明，单纯提升主动系统效率或优化电价响应策略，均无法实现建筑降温系统的全工况经济性与可靠性。

综上，现有建筑降温技术存在单一技术能效瓶颈、运行策略与电价政策适配性不足等问题。基于此，本研究聚焦主被动协同降温系统的性能研究与应用方案设计，核心创新从系统建模与运行调控双维度展开，具体体现在两方面：其一，基于TRNSYS平台创新性构建集成高效智能热泵空调与BIPV-PCM的建筑主被动降温系统动态仿真模型，探究关键运行参数动态匹配规律，揭示主被动降温

协同作用机制；其二，结合动态能量管理与分时电价策略，提出夜间蓄冰与日间需求侧响应(demand response, DR)温度调控的协同运行模式，验证系统在保障室内热舒适的同时降低能耗成本、提升经济可行性的综合优势。本研究通过 TRNSYS 仿真建模与实验验证系统优势，为夏热地区建筑节能工程应用提供理论与数据支撑。

1 基于分时电价的建筑降温系统模型

1.1 系统模型

光伏相变建筑主被动协同降温系统的整体结构如图1所示。该系统将光伏发电、相变储能与冰蓄冷技术相结合，构建了一个多能互补的智能温控体系。

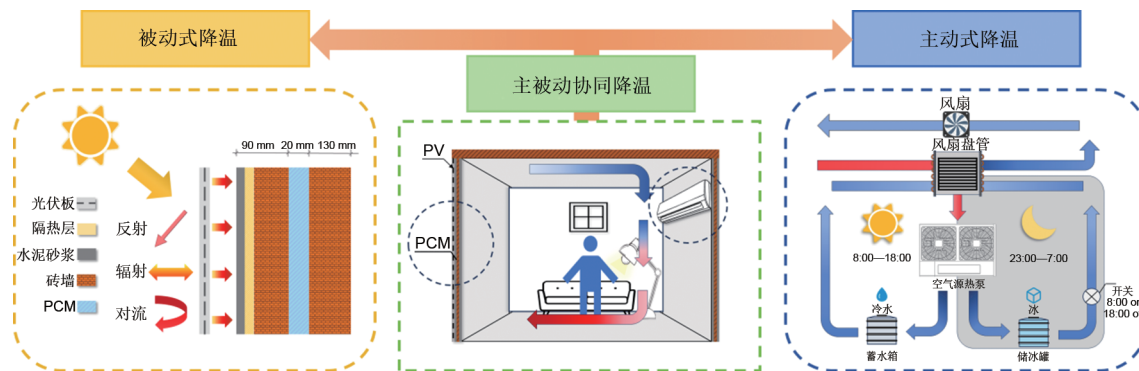


图1 主被动协同降温系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the active-passive hybrid cooling system structure

本系统以广州地区某办公楼中层南向标准房间(5 m×9 m×3 m)为研究对象，其建筑围护结构采用典型构造：南向立面集成光伏-相变复合墙体，光伏板采用高效单晶硅组件，其他三面墙体均嵌入相变材料。其中，系统运行机制体现为多时段能量协同管理：日间光伏组件在发电的同时，其背面PCM通过相变吸热，既延缓了室内温升，又通过温度控制提升了光伏组件发电效率；夜间利用低谷电价时段驱动空气源热泵进行制冰蓄冷。日间供冷时，系统优先释放蓄冰箱冷量，经板式换热器与风机盘管组成的换热系统向室内供冷，并通过PID控制器根据室内外温差、人员密度等参数实时调节送冷量，实现供冷需求与系统能耗的动态平衡。这种“光伏降温-相变调峰-热泵补冷”的协同运行模式，有效解决了传统建筑制冷系统能耗高、电网冲击大的问题。

本研究借助瞬态性能模拟软件 TRNSYS，构建主被动建筑降温系统模型。选取广州夏季某一时段天气数据(图2)开展模拟，探究不同相变温度、相变厚度、蓄冰罐容积和不同DR策略对系统在建筑热工性能及能效经济表现方面所产生的影响。室内舒适温度设定为26℃。广州的分时电价和阶梯电价详细情况如图3和表1所示。

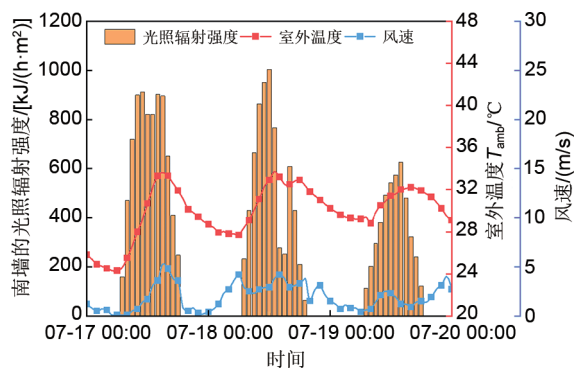


图2 广州典型年(TMY)气候数据的特征

Fig. 2 The characteristics of TMY climate data in Guangzhou

1.2 评价指标

1.2.1 室内舒适度评价指标

室内性能主要通过室内温度、负荷及室内舒适度来表征，其中，预测平均投票(predicted mean vote, PMV)模型是在评估室内舒适度时广泛应用的重要工具^[12]。

PMV是基于人体热平衡方程建立的指标，综合考虑了人体活动量、衣着情况、室内空气温度、相对湿度、空气流速以及平均辐射温度等多种因素，用于预测人群对热环境的平均热感觉。其具体计算公式如下：

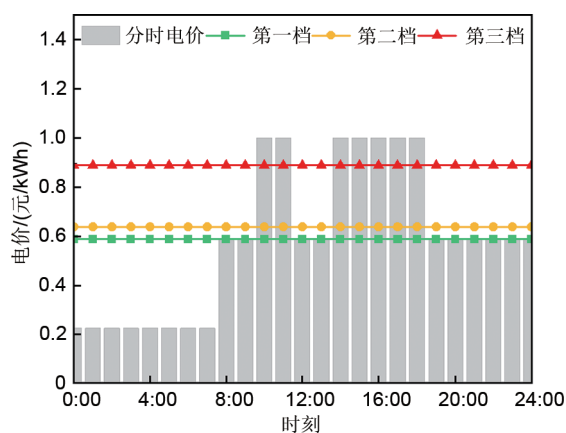


图3 广州电价

Fig. 3 The electricity price in Guangzhou

表1 广州电价详细

Table 1 Guangzhou electricity price details

分时电价	电价/(元/kWh)	阶梯电价	电价/(元/kWh)
低谷时段	0.2238	第一档(0~260 kWh)	0.589
平段时段	0.589	第二档(261~600 kWh)	0.639
高峰时段	1.0013	第三档(601 kWh 以上)	0.889

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times (L - H) \quad (1)$$

$$L = M - W - C - R - E_{res} - E_{sw} - E_{rad} \quad (2)$$

其中, M 为人体新陈代谢率, W/m^2 , 不同的人体活动强度对应不同的新陈代谢率, 如静坐时约为 $58.2 W/m^2$; W 为人体所做的机械功, W/m^2 ; C 为人体与周围环境的对流换热量, W/m^2 ; R 为人体与周围环境的辐射换热量, W/m^2 ; E_{res} 为呼吸蒸发散热量, W/m^2 ; E_{sw} 为出汗散热量, W/m^2 ; E_{rad} 为人体与周围环境的辐射换热量, W/m^2 。

1.2.2 空调用能柔性量化评价指标

空调用能柔性是指通过调控策略使空调负荷曲线偏离基准负荷的能力, 具体表现为不同工况下空调用电量相对于原始用电水平的增加或减少。通过调整不同系统参数并监测相应能耗变化, 可评估空调在特定时段内负荷转移或削减的程度^[13]。

本研究选取柔性功率作为评价指标, 该指标表征特定工况下制冷系统相较于正常运行时单位时间内减少的耗电量, 直接反映系统的实时功率调节能力。其计算公式如下:

$$F_a(\tau) = F_{base}(\tau) - F_t(\tau) \quad (3)$$

$$P_{flex}(\tau) = \frac{F_a(\tau)}{\tau} \quad (4)$$

其中, $F_a(\tau)$ 为工况改变后空调系统相对原始状态减少的柔性量, kWh; τ 为空调运行持续时间,

h ; $F_{base}(\tau)$ 为不采取任何措施时的空调用电量, kWh; $F_t(\tau)$ 为工况改变后的空调用电量, kWh; $P_{flex}(\tau)$ 为柔性功率, kW。

1.2.3 经济性评价指标

项目的经济可行性可以从不同维度来进行衡量, 本研究采用日净购电成本、单位冷量成本 (cost per cooling capacity, CCC)、静态投资回收期 (simple payback period, SPP) 等指标来简要评估该项目的经济性。

投资回收期为衡量收回初始投资所需的时间, 本研究采用静态回收期 (不考虑时间价值) 来探讨, 其具体计算公式如下:

$$SPP_{static} = \frac{\Delta T_c}{P \times n} \quad (5)$$

其中, ΔT_c 为增量投资成本, 元; P 为日节能收益, 元/天; n 为年运行天数。

2 模型验证

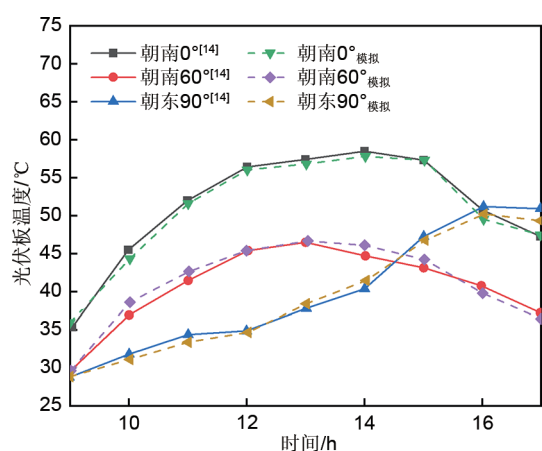
模型的验证分为三部分, 分别是光伏模型、相变模型和空气源热泵模型的验证, 结果如图4所示。

本研究通过实验验证了光伏、相变及热泵三大关键模块模型的准确性与可靠性。如图4(a)所示, 对不同方向与角度的光伏板温度, 光伏板温度模拟结果与 Ahmad 等^[14]的实测数据对比显示, 最大相对误差 4.17%, 平均误差 3.45%, 满足工程精度要求。图4(b)中相变模型在标准测试条件下 ($1000 W/m^2$, $35^\circ C$) 与 Bouzennada 等^[15]的结果吻合良好: 相变平台期最大误差 4.55%, 全过程平均误差仅 1.66%, 显著优于同类研究 5%~8% 的典型误差范围。图4(c)对比了制冷模式下空气源热泵的能效比 (coefficient of performance, COP) 与 Naldi 等人^[16]的研究结果, 二者最大相对误差为 2.29%, 平均误差为 0.91%, 完全满足工程应用的精度要求。三组验证证实了模型可靠性, 为系统仿真奠定了理论基础。

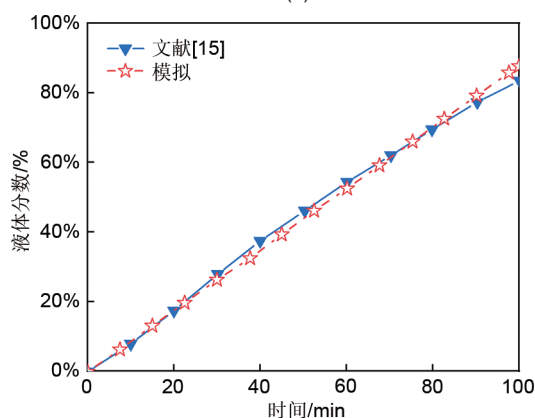
3 结果与讨论

3.1 基于分时电价的围护结构性能分析

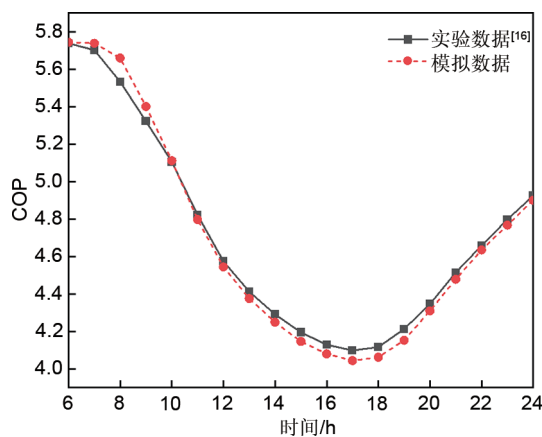
本节主要研究不同相变特征下的系统特性, 探讨墙体 PCM 不同相变温度 ($20^\circ C$ 、 $24^\circ C$ 、 $28^\circ C$ 、 $32^\circ C$) 和不同相变厚度 (0.05 m、0.10 m、0.15 m、



(a)



(b)



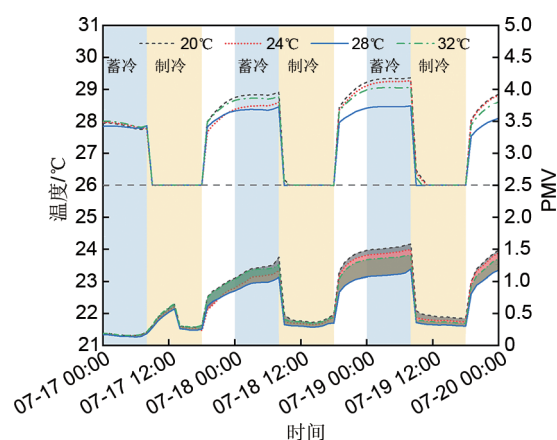
(c)

图4 光伏温度 (a)、PCM 液态分数 (b) 和热泵 COP (c) 的验证

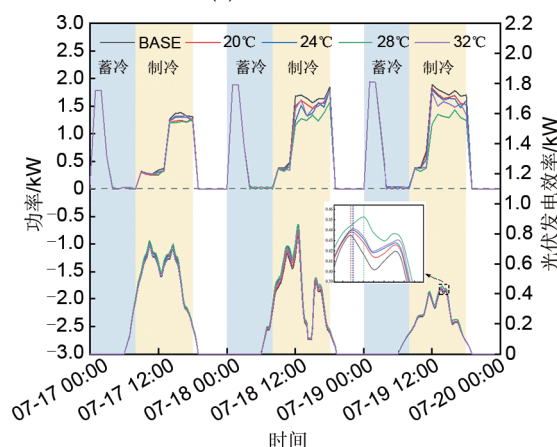
Fig. 4 Validation of photovoltaic temperature (a), PCM liquid fraction (b), and heat pump COP (c)

0.20 m、0.25 m)下的室内热舒适性、系统功率以及光伏发电效率的特性。研究结果如图5、6所示。

图5(a)展示了不同相变温度下室内温度与PMV



(a) 热舒适性对比



(b) 系统功率及光伏发电效率对比

图5 不同相变温度系统性能对比
Fig. 5 Comparison of system performance with different phase change temperatures

的变化曲线。实验结果表明, 相变温度为28℃时, 室内温度波动最小。28℃与室内舒适温度(26℃)形成2℃合理温差: 既保证广州夏季日间室外高温(35~38℃)时, PCM能及时触发熔化吸热, 通过潜热蓄存高效抑制室内温升; 又避免了温度过低(20℃、24℃)导致材料过早熔化后夜间无法完全凝固, 或过高(32℃)导致相变启动滞后、吸热不充分的问题, 实现“日间吸热调峰-夜间释热再生”的完整热力学循环。此外, 在相变温度为28℃时, PMV波动幅度最小, 平均值为0.6, 表明人体热舒适性处于最优状态。

图5(b)展示了不同相变温度对系统功率与光伏发电效率的影响。结果表明, 添加PCM可在电价高峰时段有效降低系统功率, 提升光伏发电效率, 同时使光伏发电高峰时段向后延迟。其中, 当相变

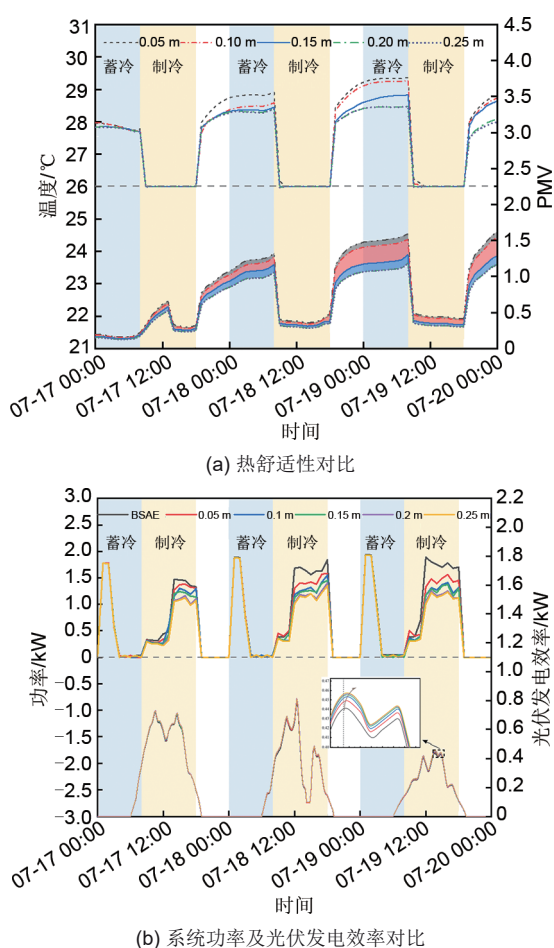


图6 不同相变厚度系统性能对比
Fig. 6 Performance comparison of systems with different phase change material thicknesses

温度设定为 28°C 时, 系统单日最多可提供 3.76 kWh 的柔性电量, 柔性比达 19.99%; 光伏发电高峰时段延迟 0.27 小时, 发电与空调负荷高峰的错峰优化率为 6.45%, 电价高峰时段的发电量占比也提高了 1.32%。

图 6(a) 展示了不同相变材料厚度下室内温度与 PMV 的变化曲线。由图可见, 随着 PCM 厚度增加, 室内温度波动趋于平缓, PMV 呈下降趋势, 室内热舒适性逐渐提升; 当厚度超过约 0.2 m 后, 室内温度降幅趋缓。这是由于 0.2 m 是热惯性与传热效率的平衡阈值: 厚度不足 ($<0.15\text{ m}$) 时, PCM 蓄热容量有限, 无法覆盖日间 6~8 小时持续高温负荷, 温度调控持续性不足; 厚度超 0.2 m 后, 热阻增大导致传热速率下降, 内层 PCM 难以参与相变循环, 形成“无效蓄热层”, 且增加建筑负荷与成本。0.2 m 厚度可确保 PCM 在日间充分熔化、

夜间完全凝固, 最大化发挥被动蓄热调温作用。

图 6(b) 展示了不同相变材料厚度对系统功率与光伏发电效率的影响。研究结果表明, 随着 PCM 厚度增加, 系统功率逐渐降低, 光伏发电效率同步提升, 且发电高峰时段出现右移。当厚度超过临界值 0.2 m 后, 系统功率与光伏发电效率的变化均趋于平稳。在此条件下, 与未添加 PCM 的工况相比, 系统单日最多可提供 4.96 kWh 的柔性电量, 柔性比达到 26.37%; 光伏发电高峰延迟 0.1 小时, 与空调负荷高峰的错峰优化率为 2.45%, 同时电价高峰时段的发电量占比提高了 0.97%。

以上结果表明, 在相变温度为 28°C 且相变材料厚度为 0.2 m 的工况下, 该系统不仅能够有效提升建筑热舒适性, 还可通过增强被动冷却能力降低对主动冷却系统的依赖, 从而减少系统总能耗。同时, 该配置提高了光伏发电效率, 并将更多发电时段转移至电价高峰区间, 进一步优化了光伏系统的运行经济性。

3.2 基于分时电价的制冷系统性能分析

本节主要研究不同蓄冰罐容量 (0.1 m^3 、 0.2 m^3 、 0.3 m^3 、 0.4 m^3) 对热泵功率及累计能耗的影响。

从图 7(a) 热泵功率变化趋势可见, 随着蓄冰罐容量增加, 热泵夜间运行时间相应延长。当蓄冰罐容量增至 0.4 m^3 时, 所制冰量可基本满足日间制冷需求。计算结果显示, 热泵性能系数 (coefficient of performance, COP) 的变化趋势与功率基本一致——随着蓄冰罐容量增大, 白天制冷时段的 COP 值逐步提高, 表明热泵制冷效率持续提升。该系统通过在低谷电价时段利用夜间电力制冰蓄冷, 并依托相变过程实现高效冷却, 在维持与传统空调系统相当甚至更优制冷性能的同时, 有效优化了负荷分配。

图 7(b) 展示了冰蓄冷系统的累计能耗特性曲线, 其关键发现表明: 随着蓄冰罐容量的增加, 系统可有效延长冰蓄冷周期, 尽管夜间低谷时段制冰过程存在阶段性高能耗, 但整体运行能耗仍显著降低。当蓄冰罐容量达到 0.4 m^3 时, 系统在分时电价政策下的电费支出达到最低值, 此时相较于传统无蓄冷空调系统, 系统能耗降幅达 12.52%, 电费成本降低 75.31%。这一结果验证了蓄冰罐容量与分时电价政策的协同优化机制——通过合理配置蓄冷容量, 可最大化利用电价差优势, 实现系统能效提

升与经济性优化的双重目标。

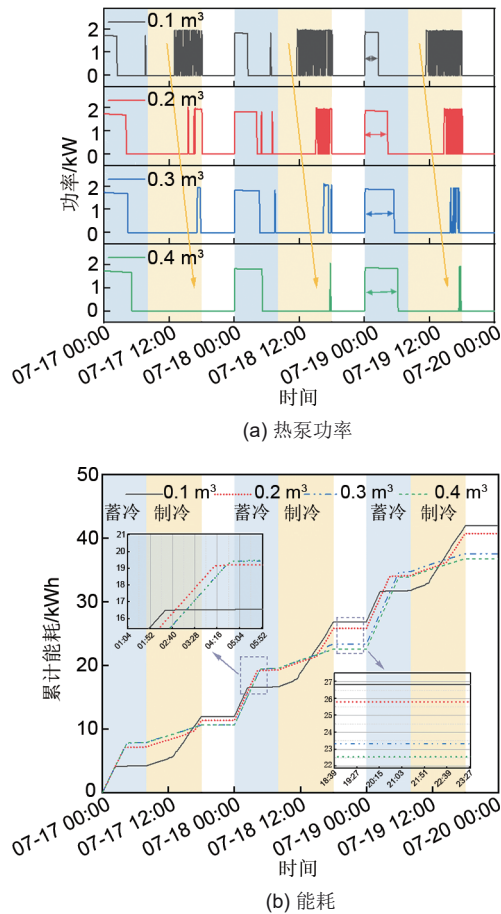


图7 不同蓄冰罐容积系统性能对比

Fig. 7 Performance comparison of systems with different ice storage tank capacities

3.3 基于分时电价的控制策略

本节主要研究不同DR策略对室内温度、柔性功率及系统能耗的影响。DR策略分为两种：全局温度重设(global temperature adjustment, GTA)策略^[17](14:00—16:00持续2个小时升温1℃)和预冷策略(12:00—14:00持续2小时预冷1℃)。两种DR策略均基于分时电价机制设计：预冷策略通过在电价低谷时段提前蓄冷，从而削减电价高峰时段的制冷负荷需求；GTA策略则通过直接在电价高峰时段调节空调运行参数来降低能耗。

由图8(a)可见，在空调启动阶段，室内温度稳定维持在26℃。在GTA时段内，室内温度上升至27℃左右；在预冷时段，温度则下降至25℃左右。这两个DR时段的温度波动均处于人体热舒适范围之内。在非DR时段，采用DR策略的室内温度与

未采用DR策略的情况相比，仅出现人体不易察觉的轻微偏高。此外，GTA策略可为系统提供0.17~0.32 kW的柔性功率，0.498~0.642 kWh的柔性量，在降低系统能耗的同时，实现了31.5%~41.8%的负荷转移率。尽管预冷策略的日均柔性功率为负值，但它成功地将电价高峰时段的负荷转移至平价时段，转移率达到6.7%~16.7%，有效降低了用电成本并提高了系统运行的经济性。

由图8(b)的系统能耗对比可以得出，GTA策略能够显著降低系统能耗，而预冷策略虽略微提高了系统能耗，但通过优化负荷配置，仍可有效降低总体用电成本。在需求响应潜力方面，GTA策略表现更为优越，能够在保障室内热舒适性的前提下，提供更大的空调柔性调节能力，从而实现更显著的节能效果。经济性分析结果表明，在分时电价机制下：相较于采用阶梯电价且未实施任何需求响应策略的基准系统，预冷策略可实现1.36%的电费节约；GTA策略则可实现6.37%的电费节约。

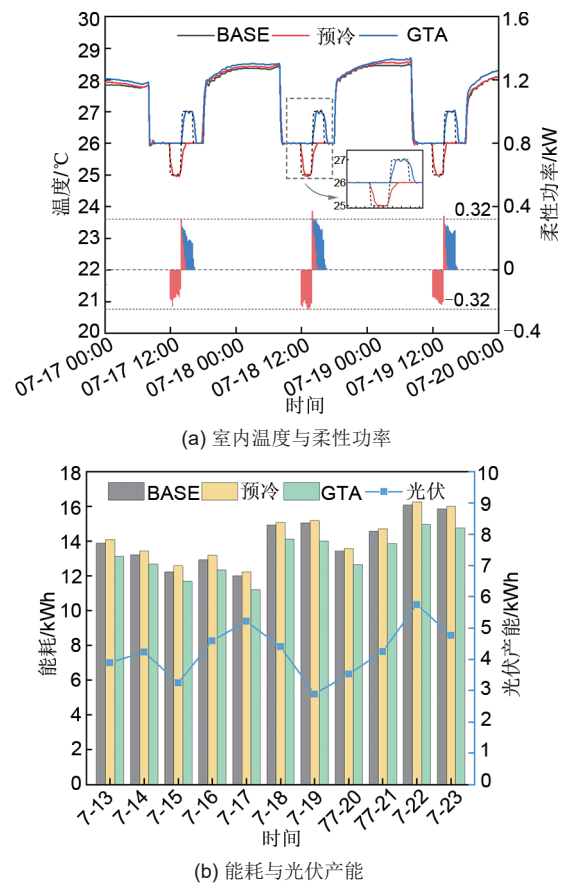


图8 不同DR策略系统性能对比

Fig. 8 Performance comparison of systems with different DR strategies

3.4 系统经济可行性分析

本节旨在对不同电价模式下的传统空调系统与主被动协同降温系统进行经济性对比分析，重点核算其在分时与阶梯电价政策下的三项关键指标：日净购电成本、CCC、SPP。

表2的经济性参数对比分析揭示了不同系统间的显著经济性差异。传统空调系统在阶梯电价政策下经济性更优，这主要因其运行模式难以灵活适应分时电价中的峰谷价差；相比之下，主被动协同降温系统在分时电价政策下表现出显著的经济优势：相较于阶梯电价下的传统空调系统，尽管其系统能耗较高，但凭借光伏发电的自主供能与冰蓄冷技术的负荷优化能力，该系统日净购电成本与CCC显著降低，日净购电成本减少4.1元，降幅达61.33%，静态投资回收期可控制在5~7年。结果表明，主被动协同降温系统通过运行策略优化，能够更好地适应分时电价机制，从而实现更优越的经济效益。

表2 经济性参数对比				
Table 2 Comparison of economic parameters				
系统参数	梯度电价		分时电价	
	传统空调系统	主被动降温系统	传统空调系统	主被动降温系统
日系统能耗/kWh	12.55	15.203	12.55	15.203
日光伏产能/kWh	—	4.055	—	4.055
日净购电成本/元	6.685	6.656	9.798	2.585
CCC/(元/kWh)	0.592	0.469	0.864	0.182
SPP/年	—	>20	—	5~7

值得注意的是，梯度电价的实施会削弱主被动协同降温系统的经济性优势：其日净购电成本相较传统空调的降幅将收窄，静态投资回收期甚至可能延长至20年以上。这是因为该系统的方案设计是基于广州夏季气候特征与分时电价政策展开的。当电价峰谷差消失时，冰蓄冷热泵的夜间蓄冷无成本优势，反而会因制冰环节的额外能耗推高运行成本。但这并不代表系统的核心价值随之弱化：优化后的相变参数与蓄冰罐配置，可独立实现平抑室内温度波动、提升热舒适性、优化制冷能效的效果，持续契合建筑节能降碳的核心目标；同时，系统对高峰时段制冷负荷的转移作用依然显著，能够有效降低电网运行压力，其削峰调谷功能仍具备重要的现实应用价值。

4 结 论

本研究建立了光伏相变建筑主被动协同降温系统的物理模型，通过瞬时性能数值模拟，基于分时电价政策对比分析了不同相变温度、相变厚度、水箱容积和不同DR策略对系统在建筑热工性能及能效经济表现方面所产生的影响。以下结论适用于与本研究PCM物性相近、气候特征及建筑负荷类似的场景：

（1）当相变温度设定为28℃、厚度取0.2 m时，系统综合性能最优——室内温度波动平抑效果最佳、能耗降至最低，同时光伏发电效率实现最大化提升。该配置在分时电价机制下可使电费成本降低7.37%，充分验证了相变围护结构在温度调节与节能增效方面的双重优势。

（2）蓄冰罐容量为0.4 m³时系统性能达到最佳，夜间储存的冰量可基本满足日间的制冷需求，系统能耗降幅达12.52%，结合分时电价政策电费降低75.31%。

（3）两种不同的DR策略均能将温度波动控制在(26±1)℃舒适区内，其中GTA策略展现出最佳需求响应潜力，可为系统提供0.17~0.32 kW的柔性功率，0.498~0.642 kWh的柔性量，能够实现31.5%~41.8%的负荷转移率，节能效果较预冷策略提升4.43%，电费节省达6.37%。

（4）主被动协同降温系统在分时电价政策下的日运行费用低至2.585元，较传统系统显著降低61.33%，单位冷量成本可控制在0.182元/kWh。尤为重要的是，其5~7年的静态投资回收期展现出优异的投资可行性，具有较高的商业建筑应用价值。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑, 2024(2): 46-59.
- [2] MAREI Y A, EMAM M, AHMED M E A E, et al. Thermal and optical investigations of various transparent wall configurations and building integrated photovoltaic for energy savings in buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117817. DOI:10.1016/j.enconman.2023.117817.
- [3] International Energy Agency. Global cooling energy demand assessment report (2023)[R]. Paris: IEA Publications, 2023.
- [4] 蔡阳, 束正羽, 何建伟, 等. 太阳能被动式通风与建筑相变蓄热耦合技术研究进展[J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(7): 3-15. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9422.2024.07.003.

- CAI Y, SHU Z Y, HE J W, et al. Research progress of solar passive ventilation and building phase change heat storage technology[J]. *Building Energy EFFICIENCY*, 2024, 52(7): 3-15. DOI:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.07.003.
- [5] ZHOU Y K. Demand response flexibility with synergies on passive PCM walls, BIPVs, and active air-conditioning system in a subtropical climate[J]. *Renewable Energy*, 2022, 199: 204-225. DOI:10.1016/j.renene.2022.08.128.
- [6] 张路曼, 侯风. 相变调温墙板热工性能试验和数值模拟研究[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(3): 866-877. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.03.008.
- ZHANG L M, HOU F. Thermal performance test and numerical simulation of phase change thermostatic wall board[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(3): 866-877. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.03.008.
- [7] 肖安汝. 谷电驱动 GSHP 耦合太阳能蓄热供暖系统模拟研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- XIAO A R. Simulation study on GSHP coupled solar energy storage and heating system driven by valley electricity[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.
- [8] ERDEMİR D, ALTUNTOP N, ÇENGEL Y A. Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 251: 111368. DOI:10.1016/j.enbuild.2021.111368.
- [9] 李丹. 基载制冷机在冰蓄冷系统中运行模式研究[J]. *暖通空调*, 2020, 50(2): 53-56. DOI:10.19991/j.hvac1971.2020.02.010.
- LI D. Operation strategy of base chiller in ice cool storage systems[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2020, 50(2): 53-56. DOI:10.19991/j.hvac1971.2020.02.010.
- [10] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 3803-3813. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2121.
- ZHU W Y, LUO Y, HU B, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering decreasing carbon emission by coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 3803-3813. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2121.
- [11] 葛风华, 蔡鸿志, 张源. 基于 TRNSYS 的主动式建筑相变蓄冷空调系统模拟[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(3): 330-336, 345. DOI:10.3969/j.issn.1671-7775.2024.03.012.
- GE F H, CAI H Z, ZHANG Y. Simulation of phase change cold storage air conditioning system for active building based on TRNSYS[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(3): 330-336, 345. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2024.03.012.
- [12] 王晏平, 吴军, 程海峰, 等. 基于 PMV-PPD 对皖南古民居室内热湿环境预测与评价[J]. *安徽建筑大学学报*, 2015, 23(6): 73-77.
- WANG Y P, WU J, CHENG H F, et al. Numerical prediction and evaluation of indoor thermal and humidity environment of south-Anhui ancient residence city based on the PMV-PPD[J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 2015, 23(6): 73-77.
- [13] LUO Z Y, PENG J Q, CAO J Y, et al. Demand flexibility of residential buildings: Definitions, flexible loads, and quantification methods[J]. *Engineering*, 2022, 16: 123-140. DOI: 10.1016/j.eng.2022.01.010.
- [14] AHMAD G E, HUSSEIN H M S, EL-GHETANY H H. Theoretical analysis and experimental verification of PV modules[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(8): 1159-1168. DOI:10.1016/S0960-1481(02)00228-8.
- [15] BOUZENNADA T, MECHIGHEL F, ISMAIL T, et al. Heat transfer and fluid flow in a PCM-filled enclosure: Effect of inclination angle and mid-separation fin[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 124: 105280. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105280.
- [16] NALDI C, ZANCHINI E. Dynamic simulation during summer of a reversible multi-function heat pump with condensation-heat recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 126-133. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.01.066.
- [17] YUAN J Q, XIAO Z W, CHEN X F, et al. A temperature & humidity setback demand response strategy for HVAC systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103393. DOI:10.1016/j.scs.2021.103393.