



多元储能驱动的太阳能冷热电联供系统能量-经济-环境协同优化研究

林建清¹, 姚春宇¹, 王刚², 石黄霞², 钟皓白², 姜铁骝¹

(¹东北电力大学, 吉林省 吉林市 132012; ²新疆工程学院, 新疆, 乌鲁木齐市 830023)

摘要: 针对低碳社区太阳能冷热电联供 (CCHP) 系统在负荷差异、多能耦合及储能协同方面存在的优化不足, 构建了一种多元储能驱动的双层协同优化方法。基于 TRNSYS 平台建立全年 8760h 动态仿真模型, 面向办公、商业、住宅与医院四类差异化建筑负荷特性, 建立了设备容量配置与运行调度优化的双层框架, 明确蓄热水箱、相变储热罐与蓄冰槽在不同季节与能流中的功能分工及调度优先级。在此基础上, 引入归一化能量-经济-环境综合目标函数, 实现多目标协同优化, 并通过基准方案对比及电价敏感性分析验证方法有效性。与系统优化前相比, 经双层协同优化后, 光伏上网率由 44% 提升至 46%, 市政购电量降低 2.4%; 设备容量显著减小, 其中采暖相变储热罐与蓄冰槽体积分别减小 16.1% 和 28.7%; 系统初投资降低 19.8%, 费用年值下降 14.6%, 碳排放降低 3.0%。在统一储能配置条件下, 相较于单层优化方案, 双层协同优化使市政购电量、费用年值和碳排放进一步分别降低 4.8%、2.1% 和 6.8%, 综合目标函数值下降 3.7%。电价敏感性分析表明, 当峰谷价差扩大 20% 时系统经济性进一步提升, 而在价差缩小 10% 条件下性能仅小幅波动, 表明所提方法具有良好的鲁棒性与适应性。研究证实, 多元储能系统与建筑差异化负荷的精准耦合的可有效削减系统冗余容量、提升能源利用效率, 双层协同优化机制能够在不显著改变外部能源输入的前提下, 实现系统经济性与环境性的协同提升, 为社区级太阳能 CCHP 系统的优化设计与工程应用提供了坚实的理论支撑与技术参考。

关键词: 低碳社区; 太阳能冷热电联供; 多元储能; 双层优化; 协同优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0247

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-15

Research on the Energy-Economy-Environment Synergistic Optimization of Solar Combined Cooling, Heating and Power System Driven by Multi-Energy Storage

Lin Jianqing¹, Yao Chunyu¹, Wang Gang², Shi Huangxia², Zhong Haobai², Jiang Tielu¹

(¹School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, 132012, China; ²School of Energy Engineering Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xinjiang, China)

Abstract: To address the limitations of solar combined cooling, heating and power (CCHP) systems in low-carbon communities, particularly regarding load heterogeneity adaptation, multi-energy coupling coordination, and energy storage system scheduling optimization, a bi-level collaborative optimization method driven by multi-energy storage is proposed. An annual 8760-hour dynamic simulation model is established using the TRNSYS platform. Considering

收稿日期: 2026-03-27; 修改稿日期: 2026-05-06。

基金项目: 耦合储热的光伏/光热复合系统开发与热电联供 (20250203008SF)。

第一作者: 林建清 (1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 纳米流体光谱分频、光伏/光热利用技术、相变储热等。E-mail: 20162674@neepu.edu.cn; 通信作者: 王刚, 博士, 教授, 研究方向: 储热技术与清洁能源高效利用, 聚焦相变储热技术与大规模太阳能区域供热技术。E-mail: 18515831495@163.com。

引用本文: 林建清, 姚春宇, 王刚, 等. 多元储能驱动的太阳能冷热电联供系统能量-经济-环境协同优化研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.

Citation: Lin Jianqing, Yao Chunyu, Wang Gang, et al. Research on the Energy-Economy-Environment Synergistic Optimization of Solar Combined Cooling, Heating and Power System Driven by Multi-Energy Storage[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

the differentiated load characteristics of four typical building types (office, commercial, residential, and hospital), a bi-level framework integrating equipment capacity configuration and operational scheduling optimization is constructed. The functional division and scheduling priority of hot water storage tanks, phase-change thermal storage tanks, and ice storage tanks are clarified under different seasons and energy flow scenarios. On this basis, a normalized energy-economy-environment comprehensive objective function is introduced to achieve multi-objective collaborative optimization, and the effectiveness and feasibility of the proposed optimization method are verified through baseline scheme comparison and electricity price sensitivity analysis. Compared with the system before optimization, the bi-level collaborative optimization increased the photovoltaic grid feed-in rate from 44% to 46% and reduced the municipal electricity purchase by 2.4%. The equipment capacities were significantly reduced: the volumes of the heating phase-change thermal storage tank and the ice storage tank decreased by 16.1% and 28.7%, respectively. The initial system investment was reduced by 19.8%, the annualized cost decreased by 14.6%, and the carbon emission was lowered by 3.0%. Under the same energy storage configuration, compared with the single-layer optimization scheme, the bi-level collaborative optimization further reduced the municipal electricity purchase, the annualized cost, and the carbon emission by 4.8%, 2.1%, and 6.8%, respectively, and the comprehensive objective function value decreased by 3.7%. Electricity price sensitivity analysis indicates that the system exhibits strong robustness under electricity price fluctuations: when the peak-valley price difference increases by 20%, the system's economic performance is further improved; when the peak-valley price difference decreases by 10%, only slight fluctuations occur in various system performance indicators, demonstrating good environmental adaptability of the proposed method. The research confirms that the precise coupling of multi-energy storage systems with the differentiated building loads can effectively reduce the redundant system capacity and improve energy utilization efficiency. The bi-level collaborative optimization mechanism can realize the coordinated improvement of economic and environmental performance without significantly changing the external energy input, providing a solid theoretical support and technical reference for the optimal design and engineering application of community-scale solar CCHP systems.

Keywords: Low-carbon community; Solar combined cooling, heating and power (CCHP); Multi-energy storage; Two-layer optimization; Collaborative optimization

0 引言

清洁能源高效利用, 作为应对气候变化的关键技术路径, 已成为世界推动能源转型的核心方向之一。在第七十五届联合国大会上, 中国明确提出“双碳”目标^[1], 彰显了推动绿色低碳发展的坚定决心。在众多清洁能源形式中, 太阳能凭借其资源丰富、应用方式灵活等优势, 成为最具代表性的清洁能源之一。

根据国家能源局于 2025 年 10 月 26 日发布的《2025 年 1-9 月份全国电力工业统计数据》^[2], 截至 2025 年 9 月底, 全国累计发电装机容量 37.2 亿千瓦, 同比增长 17.5%。其中, 太阳能发电装机容量 11.3 亿千瓦, 同比增长 45.7%, 展现出极为强劲的增长势头。这一数据充分表明, 我国太阳能利用正处于快速发展阶段, 正持续为电力与热力系统提供清洁、低碳的解决方案。

然而, 太阳能固有的间歇性与波动性严重制约

了其高效利用。综合现有的研究方案，多能互补可有效平抑可再生能源间歇性，不稳定性，提升系统综合性能。Fang等^[3]提出的PV/T-干重整-CCHP系统能量转换效率达61.34%，一次能源节约率81.78%。Su等^[4]将太阳能集成于燃煤电厂，使能效提升5.8%、脱硫能力提高10550 kg/h。Medrano等^[5]开发的太阳能-天然气三联供系统能效从10.2%跃升至58.0%。Yang等^[6]设计的太阳能驱动生物质热化学系统能量效率42.01%，年净收益243.07万美元。K.Lepiksaar等^[7]在区域供能中集成太阳能与热储能，太阳能利用率超过98.5%，天然气消耗减少9%。Toker^[8]和Li^[9]实现太阳能与地热能深度耦合，多能联产系统效率达52.69%，支持双能源切换。研究表明，多能互补可有效提升系统综合性能，丰富清洁能源低碳供能的技术路径。

此外，储能协同配置是解决可再生能源供需匹配的关键。Huang等^[10]针对太阳能CCHP系统自给率与经济性能低的特点，引入7种储能配置，对比后发现，电池+热存储+热能存储（BAT+HS+TES）混合配置在满自给率下年化总成本最低，较单一电池配置低39.5%。Li等^[11]针对高能耗商业建筑太阳能CCHP自给率低现象，采用氢能与TES混合储能，使系统能源效率达85.4%，年CO₂减排33.61吨。Jiang等^[12]针对办公楼变负荷下系统适应性差现象，通过压缩空气储能（CAES）与TES协同，提升系统一次能源率13.6%。Ye等^[13]针对高比例可再生能源接入系统灵活性不足现象，采用电-氢混合储能，较传统CCHP系统年节约成本169.8万元，碳减排17.96吨。研究表明，混合储能可有效降低系统成本并提升能源利用效率。

可再生能源系统的运行策略优化亦可提升其综合性能。Wang等^[14]证实跟随电负荷策略污染物减排率达74.86%，优于跟随热负荷策略。Li^[15]结合遗传算法与广义储能，使电负荷波动下降54%。Liu等^[16]、Zeng等^[17]采用双层多目标优化，分别实现生命周期成本降低3.0%、运行成本降至2947.2元。Zhou等^[18]、Yuan等^[19]通过动态定价与需求侧管理，分别降低运营商成本289.6元、用户成本1423.5元，提升系统效率1.8%，减少碳排放3.2%。Wang等^[20]通过协同优化设备配置与运行策略，优化光伏储能系统，总成本降低13.56%，光伏消纳率达98.37%。Wang等^[21]构建了兼顾经济、能源与

环境性能的PV/T-CCHP双层协同优化模型，结果表明相较于传统分产系统，年总成本节约5.82%、一次能源节约22.63%、碳排放降低37.51%，且对比研究进一步证实该双层优化方案较固定规则单层优化在办公楼、市场及餐厅场景中的综合性能提升幅度最高可达47.37%。研究表明，双层优化模型，兼顾设备与运行策略协同优化能够进一步挖掘系统节能潜力，提升系统经济性与环保性。

针对现有研究多聚焦于单一建筑类型或单层优化配置，尚未充分揭示差异化建筑负荷与多元储能协同作用机制的问题，本工作的创新点与主要贡献体现在以下方面：本研究构建了集成蓄热水箱、相变储热及蓄冰槽的多元储能驱动太阳能冷热电联供（CCHP）系统，揭示了四类典型建筑差异化负荷的时序互补性对储能降容与设备选型优化的驱动机制；采用容量配置与运行调度深度耦合的方式，建立了基于TRNSYS平台全年8760h动态仿定的双层协同优化框架；通过设计多能流三级递阶优先调度策略并引入基于约束屏蔽思想的惩罚函数，实现了系统在复杂多变负荷下的动态最优匹配与热舒适性边界安全；并构建了以经济性与环境性为导向的综合目标函数，在实现费用年值与碳排放协同优化的同时获得了系统的能效增益，结合电价敏感性分析，系统论证了该双层优化方法在不同政策环境下的适应性与鲁棒性。

1 系统描述与建模

1.1 系统运行控制策略

本研究提出一种以多元储能为核心、耦合太阳能辅助热泵的协同运行策略。通过对电、热、冷、生活热水等多能流的协同调度，完成能量的跨时空转移与品位适配，有效平抑负荷波动。

系统以吉林省分时电价政策为经济调度信号，通过利用峰谷价差引导储能充放与模式切换，优化运行成本。如图1所示根据《吉林省发展改革委关于进一步完善分时电价政策有关事项的通知》确定电价。

系统控制遵循三项核心原则：

(1)热能梯级利用，将PV/T产生的高、中、低品位热量分别用于驱动溴化锂制冷、供应生活热水和作为热泵低温热源；

(2)分季多模式运行，根据负荷特征在夏季、

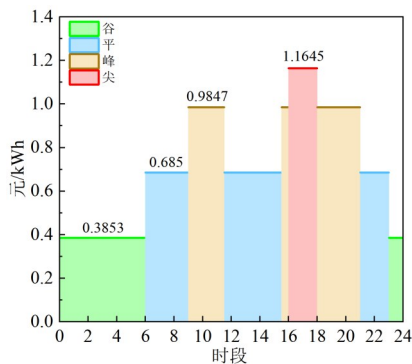


图1 分时电价

Fig. 1 Time-of-Use pricing

冬季和过渡季间切换;

(3)动态优先级控制,以保障生活热水供应为最高优先级,实时响应冷热负荷需求。

1.2 系统运行模式

系统根据季节切换至三种全局运行模式。共同逻辑是优先利用太阳能直供,并以多元储能(相变储热罐、蓄冰槽)为核心,在分时电价引导下进行谷电蓄能、峰电释能的优化调度。空气源热泵作为各模式的备用与补充能源。

系统多元储能单元包括蓄热水箱、采暖相变储热罐、生活热水相变储热罐与蓄冰槽,四者在品位、时间与电价维度上协同运行。蓄热水箱用于PV/T热能的短时缓冲与直接供热;相变储热罐用于谷电蓄热与峰电释热,保障供暖与生活热水的稳定性;蓄冰槽用于制冷季的冷负荷削峰填谷。

为实现多能流耦合条件下的负荷精准匹配与系统综合能效提升,储能调度策略采用三级递阶优先控制架构:第一优先级为保障生活热水刚性需求;第二优先级为最大化太阳能热/电的满足系统实时负荷需求;第三优先级为依据分时电价信号进行谷蓄峰释。

采暖季以供暖为首要目标,优先利用太阳能蓄热水箱直接供热。系统通过相变储热罐实施谷电蓄

热、峰电放热的优化调度。

制冷季以制冷为首要目标,优先利用太阳能高温热量驱动溴化锂吸收式制冷,配置冰蓄冷装置实现移峰填谷。

过渡季以保障生活热水为核心,优先利用太阳能直接加热生活热水。

1.3 系统架构

本文基于TRNSYS平台搭建了包含光热、光伏、热泵、制冷及控制模块的全年动态仿真模型。系统主要包括光热系统、光伏系统、空气源热泵系统、冷水机组系统、社区负荷末端、控制系统和仿真结果输出系统。系统整体结构示意图2所示。

系统主要设备包括低温空气源热泵、热水型溴化锂吸收式冷水机组、冷却塔等。储能设备包括蓄热水箱、生活热水系统相变储热罐、采暖相变储热罐、蓄冰槽等。以多元储能协同运行策略为核心的优化配置方法可通过储能实现能量在时间与空间尺度上的平移,并配合其品位调节能力,从而有效降低热泵、制冷机等主要设备的峰值容量需求,并促使设备运行处于高效工况区间,实现整体运行能效的提升。动态仿真如图3所示。

1.4 建筑负荷特性

本研究以吉林市某典型社区为对象,构建了包含办公(29%)、商业(27%)、住宅(23%)及医院(21%)四类建筑的复合能源系统,总建筑面积为100000 m²。根据《公共建筑节能设计标准》^[22]各类建筑的设计冷热负荷指标如表1所示。

表1表明,固定比例下的负荷特性反映了四类建筑协同运行的基本特征,社区整体供热需求占主导(热指标106.84 W/m²高于冷指标62.94 W/m²)。商业建筑负荷强度最高;办公与医院建筑呈明显的热主导型用能特征;住宅建筑负荷强度最低但日内波动剧烈。

基于TRNSYS的全年逐时模拟结果(图1),社区负荷融合了四类建筑的差异化用能模式:办公

表1 四种类型建筑负荷

Table 1 Four types of building loads

区域类型	设计热负荷/kW	设计冷负荷/kW	采暖面积/m ²	热指标/W/m ²	冷指标/W/m ²
设计冷热负荷-合计	10684.32	6293.71	100000.00	106.84	62.94
办公建筑设计冷热负荷	4024.37	1988.01	29000.00	138.77	68.55
住宅建筑设计冷热负荷	947.74	790.45	23000.00	41.21	34.37
商业建筑设计冷热负荷	4005.95	3043.81	27000.00	148.37	112.73
医院建筑设计冷热负荷	2675.78	1501.37	21000.00	127.42	71.49

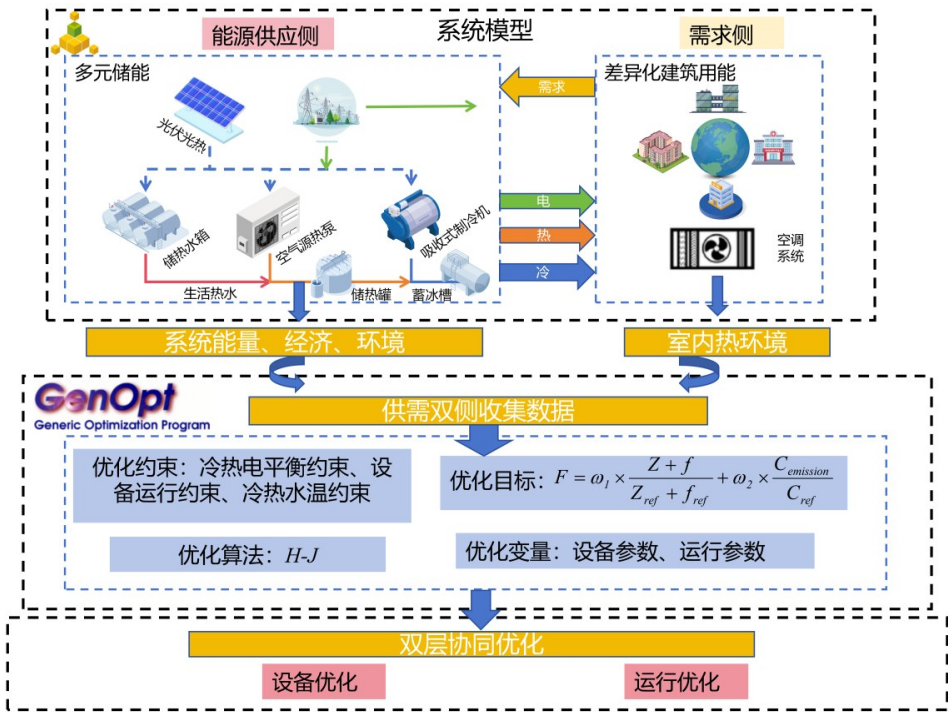


图2 系统整体结构示意图
Fig. 2 System Schematic Diagram

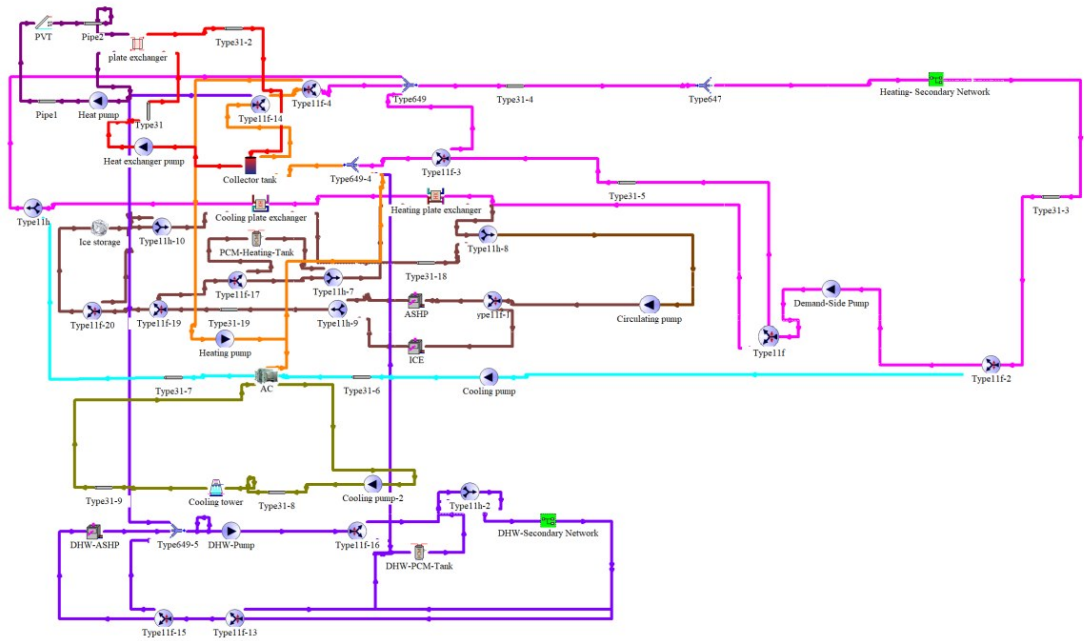


图3 TRNSYS 动态仿真图
Fig. 3 TRNSYS Simulation Schematic Diagram

建筑的时段集中性、商业建筑的强波动性、医院建筑的持续稳定性、住宅建筑的全天候间歇性。生活热水负荷呈冬高夏低季节性特征。多元储能的精准调度为上述多类型负荷的耦合创造了有利条件，构

成了时间尺度上的互补，办公与商业的日间负荷可与光伏发电匹配，住宅夜间负荷可由储能系统在谷电时段蓄能后释放，医院的基础负荷则为储能提供了稳定的充放电窗口。

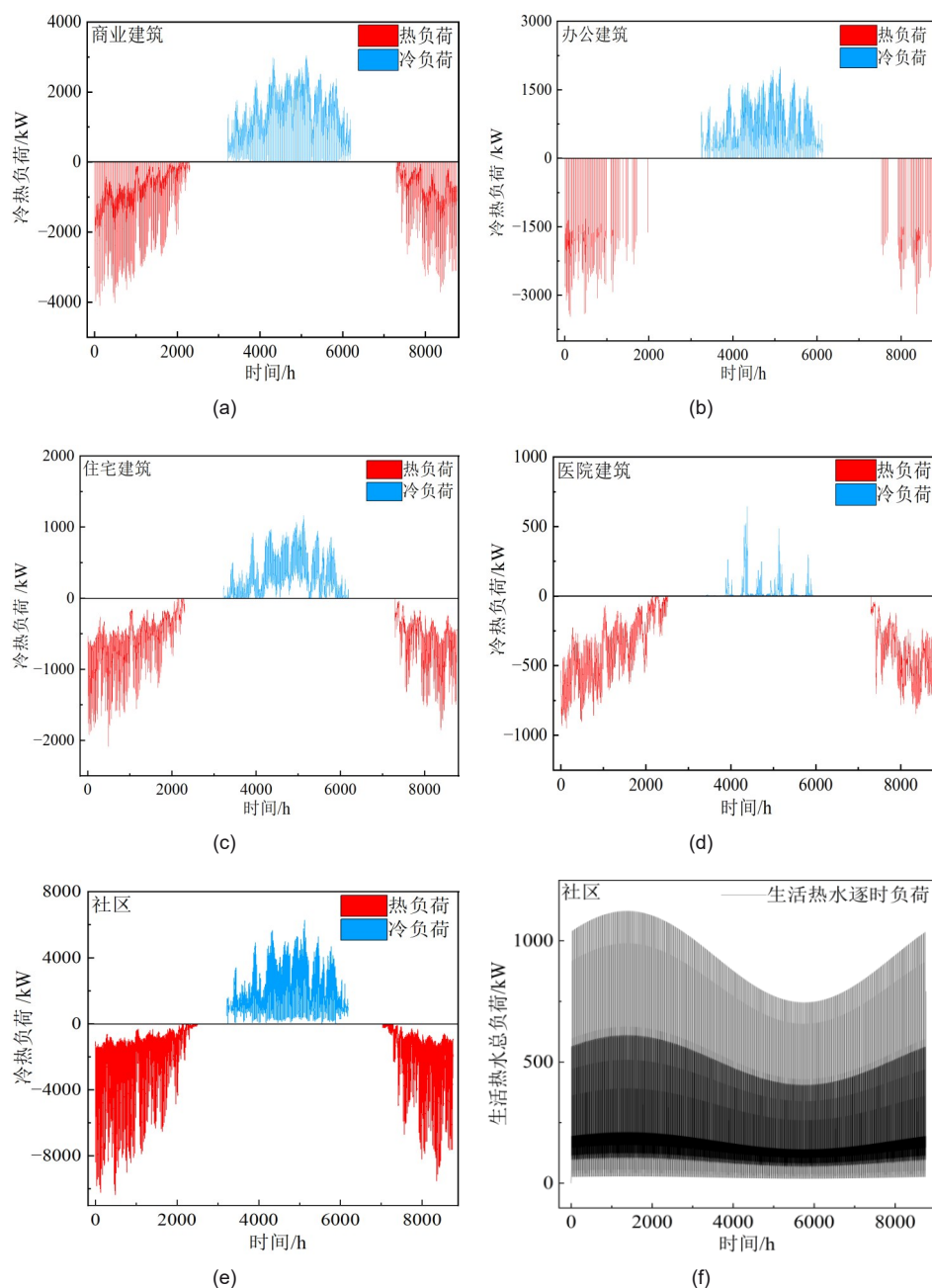


图4 差异化建筑负荷特性: (a)~(d)分建筑冷热电负荷(d)~(f)社区冷热电、生活热水负荷

Fig. 4 Differentiated building load characteristics (a)~(d) cooling, heating, and power loads of individual buildings (d)~(f) cooling, heating, power, and domestic hot water loads of the community

2 研究方法与数学模型

2.1 双层优化模型

本研究构建的双层优化框架通过上层容量配置与下层运行调度的迭代寻优,实现系统全生命周期性能最优。双层优化模型如图5。

为实现系统在能量、经济与环境效益上的协同优化,上层配置优化模型以系统经济性和碳排放为

主要目标函数,基于TRNOPT模块,采用Hooke-Jeeves直接搜索算法生成一组决策变量(包括PVT面积、储热罐容积、蓄冰槽容积等)。该组变量作为下层运行模型的输入约束边界。

下层运行优化模型为固定策略优化,在TRNSYS18平台上建立仿真模型,接收上层传递的设备容量参数,依据预设的分时电价驱动型多元

储能调度策略，执行全年 8760 小时动态模拟。模拟结束后，提取关键状态变量反馈至上层。（包括全年市政购电量、设备逐时运行效率、温度越限惩罚系数等）。

最后进行迭代收敛与评估，上层优化器根据下

层反馈的市政购电量计算年运行成本和碳排放代入式（3-1）目标函数 F 。若 F 较上一轮迭代下降且满足收敛容差，则更新当前最优解；否则调整决策变量方向，重复步骤 1-2，直至达到最大迭代次数或满足收敛判据。

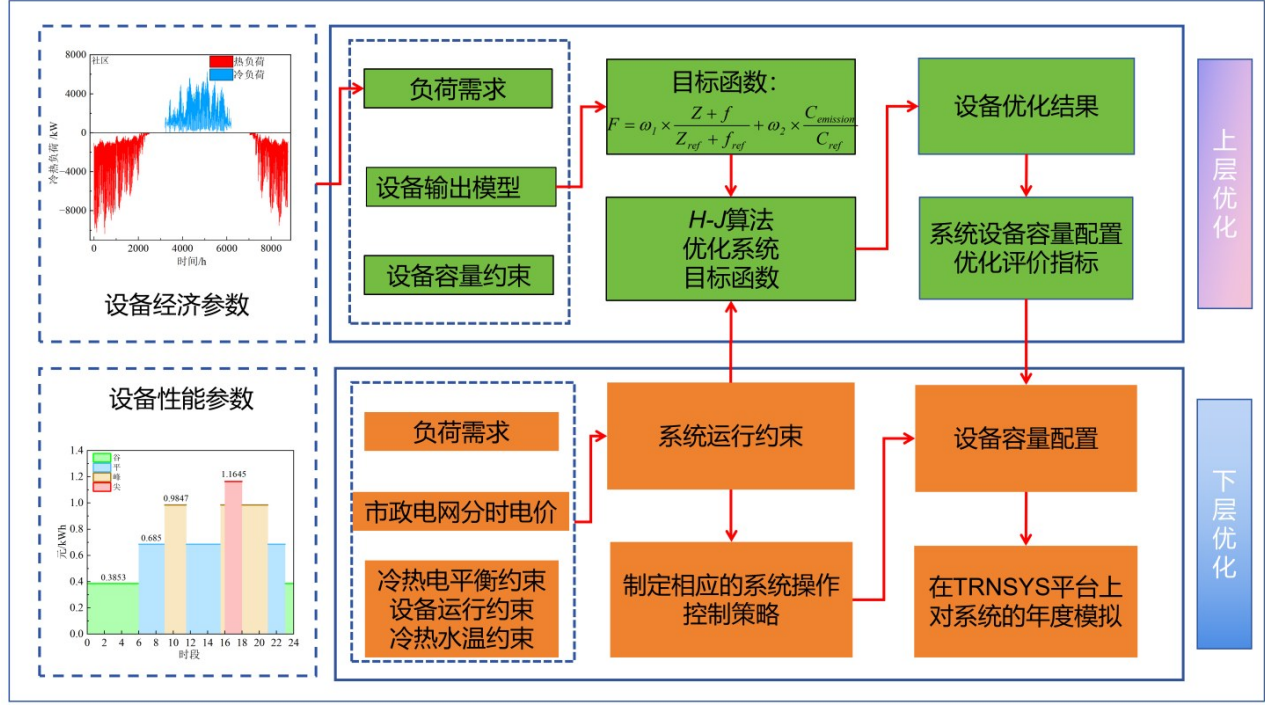


图5 双层优化模型

Fig. 5 Bi-level optimization model

2.2 数学模型

太阳能冷热电联供系统的双层优化数学模型通过协同决策设备配置与运行策略，以系统最小化综合费用和最小化碳排放为优化目标，以能源效率、碳减排强度为评价指标。实现系统的综合效益最大化。该模型由优化变量、目标函数、约束条件与优化方法四部分^[23]核心要素构成。

(1)优化变量：设备参数包括集热器面积、蓄能装置容量、发电机组功率等硬件参数；运行参数包括冷热电负荷分配比例、设备启停优先级等控制逻辑。

(2)目标函数：

$$F = \omega_1 \times \frac{Z + f}{Z_{ref} + f_{ref}} + \omega_2 \times \frac{C_{emission}}{C_{ref}} \quad (3-1)$$

式中：经济性子目标定义为优化方案费用年值与温度惩罚成本之和相对于基准方案对应值的归一

化比值，即 $\frac{Z + f}{Z_{ref} + f_{ref}}$ ；环境性子目标定义为优化方案年净碳排放量相对于基准方案对应值的归一化比值，即 $\frac{C_{emission}}{C_{ref}}$ 。经归一化处理后，目标函数各子项均为无量纲量，从而避免了经济指标与环境指标量纲不一致的问题。最终综合目标函数 F 值越小，系统在经济性与环境性上的综合表现越优。 ω_1 、 ω_2 为经济性与环境性目标的权重系数，本研究中分别取 0.7 与 0.3。注：关于权重系数的取值，本研究确定 $\omega_1=0.7$ 、 $\omega_2=0.3$ 主要基于以下两方面考量：

文献参照方面，同类研究中，Liu 等^[16]采用 0.65/0.35 权重，Gao 等^[23]设定经济性权重为 0.7，本文结合吉林地区阶段性发展特征，经专家评议调整确定；

工程效率方面，面对全年 8760h 动态仿真与双层优化带来的高计算成本，权重系数的取值综合参

考了相关文献中的常用设定,并结合低碳社区项目在示范阶段对投资回收性和减排效益的综合诉求进行确定。(3)约束条件:冷热电负荷的供需平衡约束、系统设备的设计容量约束、运行功率约束和运行负荷率约束^[24]。

冷能平衡约束条件如式(3-2)所示。

$$C_{AC,i} + C_{HP,i} + C_{dis,i} = C_i + C_{cha,i} \quad (3-2)$$

式中: $C_{AC,i}$ 为冷水机组在 i 时段的供冷量, kW h; $C_{HP,i}$ 为空气源热泵在 i 时段的供冷量, kW h; $C_{dis,i}$ 为蓄能设备在 i 时段的放冷量, kW h; C_i 为社区在 i 时段的冷负荷, kW h; $C_{cha,i}$ 为蓄能设备在时段的蓄冷量, kW h。

热能平衡约束条件如式(3-3)所示。

$$H_{HP,i} + H_{dis,i} = H_i + H_{cha,i} \quad (3-3)$$

式中: $H_{HP,i}$ 为空气源热泵在 i 时段的供热量, kW h; $H_{dis,i}$ 为蓄能设备在 i 时段的放热量, kW h; H_i 为社区在 i 时段的热负荷, kW h; $H_{cha,i}$ 为蓄能设备在 i 时段的蓄热量, kW h。

电能平衡约束条件如式(3-4)所示。

$$E_{pv,i} + E_{g,i} = E_i + E_{cchp,i} \quad (3-4)$$

式中: $E_{pv,i}$ 为光伏组件在时段的供电量, kW h; $E_{g,i}$ 为 i 时段的市政电网购电量, kW h; E_i 为社区在 i 时段的建筑电负荷, kW h; $E_{cchp,i}$ 为系统设备在 i 时段的总耗电量, kW h。

设计容量约束如式(3-5)所示。

$$0 \leq C_k \leq C_{k,max} \quad (3-5)$$

式中: $C_{k,max}$ 为按照社区设计冷热电负荷确定的第 k 种设备的设计容量上限值, kW; 其他参数含义同前。

设备功率输出约束如式(3-6)所示。

$$P_{j,min} \leq P_{ij} \leq P_{j,max} \quad (3-6)$$

其中 $P_{j,min}$ 和 $P_{j,max}$ 分别表示第 j 个设备的最小和最大运行功率, kW。

通过描述的系统运行策略对优化变量进行约束,得到最优运行路径下的最优解 PV/T 板发电优先满足系统设备的能耗和用户的用电负荷。当发电量不足时,电网弥补电量。

(4)优化方法:基于 TRNSYS 仿真平台及其 TrnOpt 优化模块,采用 Hooke-Jeeves 直接搜索算法对上述模型进行求解^[25]。

2.3 经济性与环境性模型

经济成本是评估能源系统投资可行性的关键依

据,环境性是评估系统低碳性能的关键依据。为全面评估系统的综合效益,本研究构建了一个协同经济与环境性能的目标优化框架。为目标函数提供计算基础。其表达式如(3-1)所示。

式中: Z 为经济性指标,费用年值; f 为温度惩罚成本; $C_{emission}$ 为环境性指标,年净碳排放量。

费用年值 Z 作为核心评价指标,在系统全生命周期经济性评估中,费用年值是将设备初投资 L_0 、运行成本 C 及设备系统寿命等额年度支出的关键指标。其计算表达式为:

$$Z = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times L_0 + C \quad (3-7)$$

式中: Z 为费用年值,元/年; i 为存款利率,%,吉林省目前为 5.5%; n 为系统寿命,年,本文取 20 年; L_0 为系统初投资,元; C 为年运行费用,元/年,本文的年运行费用包括年燃料费用和年系统维修及其他设备耗电费用(取系统初投资的 1%)。

该指标包括系统初投资与年度运行成本,系统初投资 L_0 主要包括以下三部分:

(1)设备费 C_e : 系统主要设备的投资; 系统设备的经济参数如下表 2;

(2)安装费 C_i : 按占设备费的百分比计算: 安装费=设备费×相对百分比;

(3)设备运行费 C_o : 维持系统持续运转的年度动态支出。

为保障用户用能舒适度与系统运行安全,本模

表 2 系统设备的经济参数

Table 2 Economic parameters of system equipment

设备	造价
PVT	1500 元/m ²
蓄热水箱	1000 元/m ³
蓄冰槽	1500 元/m ³
粗石蜡	8 元/kg
相变蓄热罐	1500 元/m ³
低温空气源热泵	1200 元/kW
板式换热器	350 元/m ²
溴化锂机组	1400 元/kW
水泵	500 元/kW
生命周期	20
贷款利率	5%
安装费用	15%

注:设备成本参数主要依据《机电产品报价手册》^[26]、隆众资讯^[27]以及《建设项目经济评价方法与参数》^[28]相关标准确定,并结合当前市场平均波动水平进行了修正。

型引入了温度惩罚成本 f 。根据不同建筑类型的功能与使用时段设定了室内环境温全天的采暖与制冷温度舒适区间（19℃~27℃），为确保供能品质与设备安全，对生活热水供水温度（≥45℃）、供暖水温（≥47℃）及冷冻水供水温度（≤5℃）设定了下限或上限，若超出范围则触发惩罚。

$$\text{总惩罚金额 } f = (\text{所有惩罚信号数量之和}) \times 1000000 \text{ 元/小时} \quad (3-8)$$

惩罚项 f 的作用并非刻画热舒适偏离的真实经济损失，而是通过足够大的惩罚系数将违反约束的解排斥在可行域之外。这种基于“大数原则”的参数设定，其核心目的在于保障优化计算的稳健性，并不涉及对舒适度损失的精确经济核算^[29]。本文最终报告的最优解均满足温度约束，因此惩罚项在最优解中取0。换言之，该惩罚系数仅影响搜索过程中的不可行解筛选，不参与可行解之间的经济性比较，故不会扭曲最终最优解的相对优劣。

环境性模型的核心指标为年净碳排放量 C_{emission} ，其计算基于外购电网电力的间接排放与光伏发电的减排效益之差，具体计算方法与涉及因子如下述公式所示。指标参考于《2021年全国电力平均二氧化碳排放因子》^[30]。

净能耗如式（3-9）所示。

$$E_{\text{net}} = E_{\text{total}} - E_{\text{PV}} \quad (3-9)$$

式中： E_{net} 为净能耗，kW h； E_{total} 为系统总耗电量，kW h； E_{PV} 为光伏发电量，kW h。正值表示需市政补电，负值表示富余电量上网。

市政补电占比如式（3-10）所示。

$$R_{\text{grid}} = \frac{E_{\text{net}}}{E_{\text{total}}} \quad (3-10)$$

式中： R_{grid} 为市政补电占比，反映对外部电网的依赖程度。

光伏减排量如式（3-11）所示。

$$Q_{\text{PV}} = E_{\text{PV}} \times \lambda \quad (3-11)$$

式中： Q_{PV} 为光伏减排量，kgCO₂； λ 为碳排放因子，取0.5876 kgCO₂/kW h，基于燃煤发电替代的碳排放减少量。

净碳排放量如式（3-12）所示。

$$C_{\text{emission}} = E_{\text{net}} \times \lambda - Q_{\text{PV}} \quad (3-12)$$

式中： C_{emission} 为净碳排放量，kgCO₂，该值综合反映系统低碳性能。

3 多元储能协同优化效果分析

3.1 设备配置优化

优化前方案是基于1.4节建筑负荷特性中各类型建筑峰值负荷的“静态保守配置”，而优化方案是基于各类型建筑动态负荷特性的“精准容量匹配”。多元储能的引入推动了系统能源转换设备的容量配置由传统的“峰值负荷导向”到“动态负荷匹配导向”的转变。优化前后关键参数对比如表3所示。

优化后，采暖相变罐体积由480.53 m³降至403.03 m³（降幅16.1%），生活热水相变罐由86.23 m³降至81.48 m³（降幅5.5%），蓄冰槽体积由261.14 m³降至186.14 m³（降幅28.7%）。分析表明通过精细化建模与运行策略协同，储能单元不再按极端工况简单放大，而是根据典型日负荷曲线及分时电价动态确定其经济容量，在确保供能可靠性的基础上，提升了储能调度效率，降低了容量配置冗余。

优化后，空气源热泵制热量降低约28%，溴化锂机组制冷量降低80%，分析表明通过多元储能可以达到“削峰填谷”的特性。以制冷为例，原系统需按夏季最高冷负荷（约6300 kW）配置溴冷机及热泵，引入冰蓄冷后，尖峰冷负荷可由蓄冰槽在白天电价高峰时释放满足，溴冷机只需承担基础冷负荷（夜间或平谷时段蓄冷），因此其容量可大幅缩减至原值的20%。

优化后，PVT集热面积减少2.9%，但供热保证率反而提升，单位集热面积对应的水箱体积从0.1 m³降至0.06 m³，分析表明储能水箱不再被动匹配集热面积，而是通过相变储热的高密度蓄热特性，用更小的体积实现了相同的热缓冲能力，优化后的倾角（53.5°）更有利于冬季集热，与供热主导的负荷特征相契合。

3.2 能效提升优化

系统在运行层面通过动态调节供回水温度，实现了设备间的能效协同。供暖工况下，根据室外温度（-28℃~14℃）线性调节采暖供水温度，优化后供水温度由50℃~40℃调整为50℃~37℃（图6a）。基于热力学原理，降低热泵冷凝温度可减小压缩机制压比，从而提升制热性能系数。优化后采暖热泵COP从1.71提升至1.76，增幅2.9%。

表 3 设备优化指标对比

Table 3 Economic parameters of system equipment

设备	参数	优化前值	优化后值
PVT	TYPE-50b		
	倾角/°	50	53.5
	PVT 面积/m ²	11261.45	10936.45
	单位 PVT 面积对应的水箱体积/m ³	0.1	0.06
	供热保证率/%	49.58	50.09
ASHP	TYPE-206		
	空气源热泵单台制热量/kW	1319.05	951.55
	生活热水空气源热泵额定制热/kW	1129.84	951.09
AC (吸收式制冷机组)	TYPE-909		
	溴化锂额定制冷/kW	925	185
TANK-V1(采暖用相变蓄热罐)	TYPE-1334-v1		
	采暖用相变蓄热罐体积/m ³	480.53	403.03
TANK-ICE(蓄冰槽)	TYPE-1334-v2		
	蓄冰槽体积/m ³	261.14	186.14
TANK-DHW(生活热水用相变蓄热罐)	TYPE-1334-v3		
	生活热水用相变蓄热罐体积/m ³	86.23	81.48

制冷工况下，系统根据室外温度（26℃~34℃）线性调节冷冻水供水温度，由8℃~5℃调整为11℃~6℃（图6b）。虽然空气源热泵制冷COP由3.03略降至2.95（降幅2.6%），但热水型溴化锂机组的驱动热源品位得以匹配，较高的冷冻水温度降低了蒸发器的温差需求，使溴冷机COP从0.44显著提升至0.63（增幅43%）。通过系统的能效权衡，牺牲热泵的微小效率损失，换取溴冷机的大幅增效，最终实现制冷季综合COP的稳定提升（图7中COP全年均值从2.51升至2.54）。这种动态寻优策略在保证末端舒适度的前提下（室内温度始终控制在19℃~27℃），使不同制冷设备均运行于高效区间。

在系统年度能量平衡方面，优化后光伏发电量由219.93万kWh减至209.98万kWh（图8中降幅4.5%），市政购电量下降2.4%。分析表明，原系统中部分光伏出力因与建筑负荷时序不匹配而大量上网（上网电量96.91万kWh），实际经济价值较低；优化后通过多元储能系统的协同调度，在光伏发电高峰时段，利用热泵将富余电力转化为冷/热能储存于蓄冰槽和储热罐中，在用电高峰时释放以替代电力消耗，光伏余电上网率由优化前的44%提升至46%，实现了光伏电力的高效上网。结果表明在多元储能协同运行策略下，系统的优化目标从“追求最大发电量”转向“追求最高效上网率”，实现

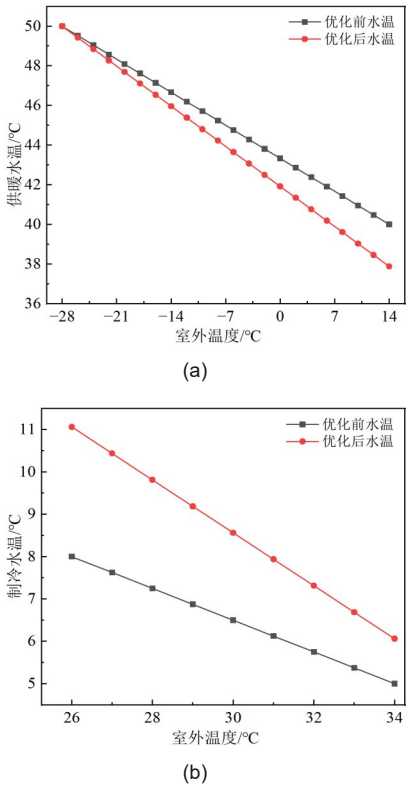


图6 系统优化前后水温：(a) 供暖水温 (b) 制冷水温

Fig. 6 Heating and cooling water temperatures before and after system optimization

了光伏资源的价值最大化。

3.3 经济环境协同优化

本研究通过对多元储能设备与运行策略的综合

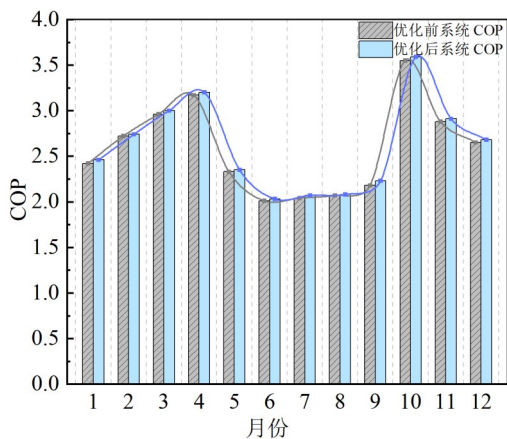


图7 系统年度COP变化

Fig. 7 Annual COP variation of the system

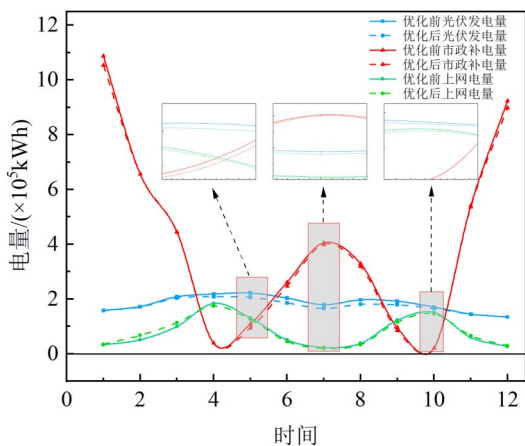


图8 系统年度能量平衡

Fig. 8 Annual System Energy Balance

优化，使系统归一化综合目标函数从优化前基准值为1.00降至0.89降幅达10.1%，表明在兼顾经济性与环境性的综合评价下，系统性能实现显著提升。关键指标对比如表4所示。

表4 运行优化指标对比

Table 4 Comparison of operational optimization indicators

指标	优化前	优化后	变化幅度
光伏发电量/kWh	2199334.72	2099832.75	4.5%
上网电量/kWh	969143.42	968579.71	0.06%
光伏上网率/%	44%	46%	4.5%
市政补电量 (kWh)	4911404.45	4792287.94	2.4%
购电费用/元	2610092.70	2561015.91	1.8%
系统初投资/元	59620564.81	47837703.48	19.8%
年碳排放/kgCO ₂	2316472.58	2246810.96	3.0%
费用年值/元	7628819.31	6516636.95	14.6%
归一化综合目标函数	1.00	0.89	10.1%

图9和图10分别展示了优化前后的经济平衡与碳排放对比。图中可见，优化后的系统购电费用和碳排放均呈下降趋势。

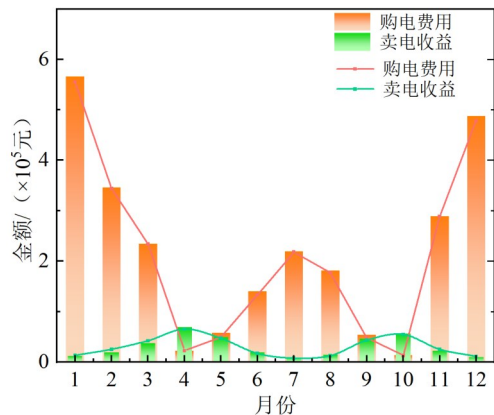


图9 经济效益

Fig. 9 Economic benefits

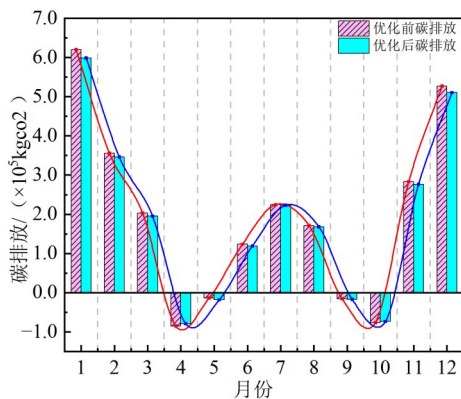


图10 环境效益

Fig. 10 Environmental benefits

系统初投资由5962.06万元降至4783.77万元，降幅19.8%。主要得益于设备容量的降级（见表3），溴冷机和热泵的容量缩减，节省了设备购置费用。储能设备虽然增加了投资，但其单位蓄能成本远低于发电、制冷设备，且通过容量优化避免了过度配置。购电费用由261.00万元减少至256.10万元（降幅1.8%），叠加维修等费用，费用年值从762.88万元进一步降至651.66万元，总年运行成本整体降幅达14.6%。

系统碳排放由231.64万kg降至224.68万kg，降幅为3.0%，主要得益于市政购电量的降低（-2.4%）。由于东北电网以火电为主，每节约1kWh市电可减少约0.5876 kg CO₂排放。分析表明初投资下降并未牺牲环境效益，反而以更经济的系

统实现了更低的碳排放，储能系统可有效提升光伏上网率、削减市电依赖，同时减小设备容量，实现经济效益与环境效益的协同优化。

4 基准方案对比与敏感性分析

4.1 基准方案定义与优化效果对比

为保证对比分析的工程合理性，本文构建的基准方案采用工程中广泛应用的“峰值负荷导向设计方法”。该方案中空气源热泵及溴化锂机组等核心设备的容量按照全年最大冷、热负荷确定，并引入(1.1 - 1.2)的安全系数以满足极端工况下的供能可靠性要求。储能单元则依据典型日负荷波动及峰谷负荷差进行经验性选型。基准方案设备选型规则与依据^[31]见下表。

表 5 基准方案设备选型规则
Table 5 Equipment sizing criteria for the baseline scenario

设备类型	选型依据	安全系数	设计原则
空气源热泵	最大采暖负荷	1.1 - 1.2	峰值负荷导向
溴化锂机组	最大冷负荷	1.1 - 1.2	峰值负荷导向
PVT 面积	供热需求反推	—	能量匹配
蓄热水箱	典型日热负荷波动	—	短时缓冲
相变储热罐	峰谷负荷差	—	谷电蓄热
蓄冰槽	峰谷冷负荷差	—	削峰填谷

该基准方案本质上属于“静态容量匹配”设计方法，其未考虑负荷时序特性与储能调度能力，因此可用于衡量本文所提“动态协同优化方法”在削减冗余容量与提升系统经济性方面的增益效果。具体而言，本文通过多元储能的协同调度，核心设备的装机容量得以大幅削减，初投资相应降低 19.8%，但受外部气象条件与市政能源结构等物理边界的制约，市政购电量及碳排放指标的改善幅度相对有限，分别为 2.4% 与 3.0%，充分表明，优化算法的核心价值在于有效消除系统内不必要的冗余配置，从而在保障供能可靠性的前提下提升经济性。

4.2 双层协同优化方法优势验证

为进一步验证本文所提双层协同优化框架的相对优势，在统一引入多元储能的前提下，构建两类对比方案：(1) 仅进行设备容量优化的方案；(2) 同时考虑设备配置与运行调度的双层协同优化方案。前者用于表征静态容量匹配条件下系统的配置

结果，后者用于评估在此基础上进一步引入运行策略优化后系统综合性能的提升效果。

需要指出的是，本文研究重点在于验证多元储能系统中不同优化层级所带来的性能差异，因此基准对比方案并非设置为无储能系统，而是选取已配置多元储能、但未计及运行优化的单层容量配置方案作为参照基准。该设置旨在剥离储能配置容量本身带来的固有增益，从而更直接地揭示本文所提双层协同方法在运行调度维度上的额外贡献，有效规避了配置效应与优化效应的混淆。

表 6 进一步对比了两种方案在能量、经济与环境维度下的主要性能指标。为突出运行调度优化带来的额外增益，表 6 中的“设备优化”与“双层优化”采用相同设备容量配置，仅比较是否引入下层运行优化所造成的性能差异，因此两者初投资保持一致。

表 6 优化指标对比
Table 6 Comparison of optimization indicators

指标	设备优化	双层优化	变化幅度
光伏上网率/%	45%	46%	2.2%
市政补电量/kWh	5033258.94	4792287.94	4.8%
系统初投资/元	47837703.48	47837703.48	0
费用年值/元	6658768.13	6516636.95	2.1%
年碳排放/kgCO ₂	2410512.60	2246810.96	6.8%
综合目标函数 F	0.92	0.89	3.7%

由表 6 可见，尽管单层容量优化方案已通过设备选型与容量配置降低了系统冗余，但由于该方案缺乏面向分时电价与动态负荷波动的精细化运行调度机制，储能系统的时移调节潜力尚未得到充分释放。相比之下，双层协同优化方案在容量配置基础上进一步引入了运行策略的迭代寻优，使得系统能够依据负荷需求、光伏出力及峰谷电价信号动态调整储能充放能行为。因此，双层方案在初投资保持不变的前提下，提升光伏上网率 2.2%、降低市政补电量 4.8%、削减费用年值 2.1% 及减少碳排放 6.8% 等方面均表现出显著更优的性能。

上述结果表明，本文所提出的双层协同优化方法并非仅依赖于储能设备配置本身，而是通过“容量配置与运行调度”闭环优化机制，进一步释放了多元储能系统的综合调节价值，体现出相对于传统单层设备优化方案的明显优势。

4.3 能源价格敏感性分析

前述分析已从容量配置与运行调度协同层面，验证了双层优化框架相较于单层方案的性能优势。然而，上述结论均基于既定分时电价体系得出。考虑到多元储能的经济收益对峰谷价差这一外部参数高度敏感，有必要进一步探究电价政策变动对系统综合性能的影响。为此，本节在双层优化所得最优配置基础上，针对电价波动开展敏感性分析，以评估所提方法在不同市场环境下的适应性与稳健性。

多元储能的核心价值在于“削峰填谷”，而峰谷电价差则是决定其经济收益的关键因素。为评估电价政策波动对系统经济性的影响，本节基于双层协同优化所得全年逐时购电功率时序数据，采用静态逻辑推演方法，通过改变电价向量进行重新核算，从而将计算过程与全年动态仿真解耦，大幅提升了敏感性分析的效率。

电价情景设定以吉林省现行分时电价体系作为基准情景（记为 β ），该情景下峰谷价差 ΔP 为0.5994元/kWh（各时段电价详见表7）。在此基础上，进一步设置两种对比情景：情景 β_1 将峰谷价差在基准值上扩大20%，用以模拟价差进一步拉大的政策激励环境；情景 β_2 则将峰谷价差缩小10%，用以模拟价差收窄的不利市场环境。

以平时段电价 P_{flat} 为基准(取0.6850元/kWh)。

三种情景下的各时段电价计算公式分别如式（4-1）至（4-3）所示。

$$P_{peak} = P_{flat} + (P_{peak,base} - P_{flat}) \times \beta \quad (4-1)$$

$$P_{valley} = P_{flat} - (P_{flat} - P_{valley,base}) \times \beta \quad (4-2)$$

$$P_{sharp} = P_{peak} \times 1.2 \quad (4-3)$$

本文基于TRNSYS仿真平台输出的各时段累计市政购电量与余电上网电量数据，开展电价政策敏感性分析。首先根据双层优化方案的全年总购电量及各分时段购电占比，将总购电量分解为低谷、平段、高峰和尖峰四部分；随后在保持设备配置和运行轨迹不变的前提下，以不同电价情景对各分时段购电量重新计费，获得新的年运行费用；最后将其代入费用年值与综合目标函数，完成不同电价场景下的经济性评价（经济性与综合性能对比见表8）。

表7 不同电价情景下各时段电价明细

Table 7 Electricity prices under different tariff scenarios

时段	基准情景 β (元/kWh)	情景 β_1 (元/kWh)	情景 β_2 (元/kWh)
平时段	0.6850	0.6850	0.6850
高峰时段	0.9847	1.0446	0.9547
低谷时段	0.3853	0.3254	0.4153
尖峰时段	1.1645	1.2535	1.1456

表8 不同电价情景下系统经济性与综合性能对比

Table 8 Comparison of economic and comprehensive performance under different tariff scenarios

方案	峰谷价差 (元/kWh)	费用年值 Z (元)	归一化综合目标函数 F	经济优势评价
β_1	0.7193	6405997.40	0.879	优势增强
β 基准情况	0.5994	6516636.95	0.889	基准
β_2	0.5395	6575740.24	0.894	优势略减但仍稳定

结果表明，当峰谷价差扩大20%时，系统低谷购电的经济优势进一步增强。由于优化方案中谷时段购电占比达55%，较高的谷电消纳比例使系统能够更充分地利用低价电能驱动蓄热、蓄冷及储能调节。从而将费用年值由651.66万元降低至640.60万元；综合目标函数 F 由0.889降至0.879。

当峰谷价差缩小10%时，谷电激励减弱，费用年值升至657.57万元； F 值小幅回增至0.894。尽管价差收窄对经济性产生一定影响，但各项指标恶化幅度有限，综合目标函数仍保持在较低水平。上述结果表明，本文所提优化方案的经济优势并非依赖于单一电价参数设定，对峰谷价差波动具有良

好的稳健性与适应性。

需要说明的是，本文重点在于验证多元储能双层协同优化框架的有效性，权重系数主要用于表征当前低碳社区建设阶段“经济优先、低碳兼顾”的决策偏好。关于不同权重组合对最优配置结果的影响，将在后续研究中结合多情景决策进一步展开。

5 结 论

本文围绕低碳社区中太阳能冷热电联供系统在负荷差异性与多元储能协同利用方面的优化问题，构建了基于TRNSYS的双层协同优化模型，并开展了系统性分析，主要结论如下：

(1) 在能量协同机制方面, 多元储能通过时间转移和能级匹配实现多能流耦合调度, 使系统运行由传统的峰值负荷驱动转变为动态负荷匹配驱动。优化后系统综合 COP 稳定在 2.54, 光伏电力利用模式由“发电最大化”转向“余电上网率最优”, 光伏上网率提升至 46%, 同时市政购电量降低 2.4%。

(2) 在容量配置与经济性方面, 双层优化通过削弱极端负荷对设备选型的主导作用, 有效降低了系统冗余配置程度。采暖相变储热罐与蓄冰槽体积分别降低 16.1% 和 28.7%, 空气源热泵及溴化锂机组容量显著缩减, 从而使系统初投资下降 19.8%, 费用年值降低 13.2%。结果表明, 系统经济性的显著改善主要来源于内部容量优化, 而非外部能耗大幅变化。

(3) 在优化方法优势方面, 相较于仅进行设备容量优化的单层方案, 双层协同优化通过引入运行调度层, 实现了储能系统潜力的进一步释放。在相同设备配置条件下, 市政购电量进一步降低 4.8%, 费用年值下降 2.1%, 碳排放降低 6.8%, 综合目标函数下降 3.7%, 验证了配置与运行优化机制的有效性。

(4) 在外部不确定性适应方面, 电价敏感性分析表明, 多元储能系统对峰谷价差变化具有良好的适应能力。当峰谷价差扩大时, 系统经济性显著提升; 当价差缩小时, 各项性能指标仅小幅波动, 表明所提方法具有较强的鲁棒性与工程适用性。

综上, 本文提出的多元储能驱动双层协同优化方法, 能够在不显著改变系统外部能源输入边界的条件下, 通过差异化负荷耦合与储能调度优化, 实现系统能效、经济性与环境效益的协同提升。研究成果可为社区级太阳能冷热电联供系统的工程设计与运行优化提供理论支撑。未来研究可进一步考虑需求响应、及碳交易机制等因素对系统优化结果的影响。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. 2021.
- [2] 国家能源局. 2025 年 1-9 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. 北京: 国家能源局, [2025-10-26]. https://www.nea.gov.cn/2025-10/26/c_1310721365.htm.
- [3] Fang J, Yang M, Fan Y, et al. Thermodynamic evaluation of a combined cooling, heating, hydrogen, and power multi-generation system for full-spectrum solar energy utilization[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 300: 118019.
- [4] Su Z, Yang L, Wang H, et al. Solar-assisted combined cooling and power system integrating energy storage and desulfurization for coal-fired power plants[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 45: 102110.
- [5] Alharthi M A, Khaliq A, Alqaed S, et al. Investigation of new combined cooling, heating and power system based on solar thermal power and single-double-effect refrigeration cycle[J]. Energy Reports, 2023, 9: 289-309.
- [6] Yang X, Zhong D, Zeng K, et al. Performance analysis of a novel biomass thermochemical conversion cascade utilization system driven by concentrated solar energy[J]. Energy, 2025, 323: 135803.
- [7] Lepiksaar K, Kajandi G M, Sukumaran S, et al. Optimizing solar energy integration in Tallinn's district heating and cooling systems [J]. Smart Energy, 2025, 17: 100166.
- [8] Toker S C. A Comprehensive Thermodynamic Assessment of an Innovative Solar-Geothermal Driven Multigeneration System for Sustainable Production of Energy, Hydrogen, Freshwater, Heating and Cooling[J]. Renewable Energy, 2025: 123571.
- [9] Li T, Qin H, Wang J, et al. Energetic and exergetic performance of a novel polygeneration energy system driven by geothermal energy and solar energy for power, hydrogen and domestic hot water[J]. Renewable Energy, 2021, 175: 318-336.
- [10] Huang Z F, Chen W D, Wan Y D, et al. Techno-economic comparison of different energy storage configurations for renewable energy combined cooling heating and power system [J]. Applied Energy, 2024, 356: 122340.
- [11] Li M, Li H, Zhai X, et al. Study of a solar-wind-hydrogen-gas-grid multi-energy system with CCHP distributed cooperative operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128562.
- [12] Jiang R, Yang X. Performance analysis and application of a novel combined cooling, heating and power system integrated with multi-energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86: 111276.
- [13] Ye J, Dong Q, Yang G, et al. Multi-objective optimal configuration of CCHP system containing hybrid electric-hydrogen energy storage system[J]. Energy Informatics, 2024, 7(1): 111.
- [14] Wang Z, Cai W, Tao H, et al. Research on capacity and strategy optimization of combined cooling, heating and power systems with solar photovoltaic and multiple energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 115965.
- [15] Li Y, Wang J, Zhou Y, et al. Multi-dimension day-ahead scheduling optimization of a community-scale solar-driven CCHP system with demand-side management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 185: 113654.

- [16] Liu C, Wang H, Liu Z, et al. Research on a Bi-Level Collaborative Optimization Method for Planning and Operation of Multi-Energy Complementary Systems[J]. *Energies*, 2021, 14(23): 7930.
- [17] Zeng S, Zhang H, Wang F, et al. Two-Stage Optimization Scheduling of Integrated Energy Systems Considering Demand Side Response[J]. *Energies*, 2024, 17(20): 5060.
- [18] Zhou J, Zhang L, Zhang G. Two-Level Optimization Model of Integrated Energy System Based on Dynamic Pricing Mechanism [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(1): 1048-1057.
- [19] Yuan J, Gang W, Xiao F, et al. Two-level collaborative demand-side management for regional distributed energy system considering carbon emission quotas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140095.
- [20] Wang Z, GAO Y. Optimization of Distributed Photovoltaic Energy Storage System Double-Layer Planning in Low-Carbon Parks Considering Variable Operating Conditions and Complementary Synergy of Energy Storage Devices[J]. *Energies*, 2025, 18(8): 1881.
- [21] Wang J D, Chen B Y, Chen YB, et al. Bi-level sizing optimization of a distributed solar hybrid CCHP system considering economic, energy, and environmental objectives[J]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, 2023, Vol. 145: 108684.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [23] Gao Y, Deng Y, Yao W, et al. Optimization of combined cooling, heating, and power systems for rural scenario based on a two-layer optimization model[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 60: 105217.
- [24] 禹丽爽, 曾渊, 李南帆, 等. 低碳社区清洁能源冷热电联供系统优化研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(6): 197-205.
Yu L S, Zeng Y, Li N F, et al. Optimal Design of an Integrated Clean Energy CCHP System for Low-Carbon Community Energy Supply[Z]. *Building Science*, 2023, 06 - 0197 - 09
- [25] Moser I. Hooke-Jeeves revisited[C] //2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Trondheim, Norway: IEEE, 2009: 2670 - 2676[2025 - 10 - 30].
- [26] 机械工业信息研究院编. 2016 机电产品报价手册 通用设备分册 上 [M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
MACHINERY INDUSTRY INFORMATION INSTITUTE OF CHINA. 2016 mechanical and electrical products quotation handbook: General equipment volume, Part 1[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [27] 隆众资讯. 国内石蜡挂牌价格一览表 [EB/OL]. 上海: 隆众石化网 [2023版]. <https://www.oilchem.net>.
LONGZHONG INFORMATION. List of domestic paraffin wax listed prices[EB/OL]. Shanghai: Oilchem.net, [2023]. <https://www.oilchem.net>.
- [28] 国家发展改革委, 建设部发布. 建设项目经济评价方法与参数 第3版[M]. 北京:中国计划出版社, 2021.
NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION, MINISTRY OF CONSTRUCTION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Methods and parameters for economic evaluation of construction projects[M]. 3rd ed. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [29] 李智勇, 黄滔, 陈少森, 等. 约束优化进化算法综述[J]. *软件学报*, 2017, 28(6): 1529-1546.
LI Z Y, HUANG T, CHEN S M, et al. A review of constrained optimization evolutionary algorithms[J]. *Journal of Software*, 2017, 28(6): 1529-1546.
- [30] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局. 2021年电力二氧化碳排放因子[DS]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2024.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, & National Bureau of Statistics. (2024). 2021 Electricity Carbon Dioxide Emission Factors[Data set]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.
- [31] Pedram H, Javad E, Pouria A, et al. Evaluation and sizing of a CCHP system for a commercial and office buildings[J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 5: 67-78.