

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-403-13

基于正交试验的低碳建筑能源系统集成优化分析

何芳¹ 淳良¹ 万溧² 胥海伦¹

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621000;

2. 西藏自治区能源研究示范中心 拉萨 850000)

【摘要】 在全球能源转型与“双碳”目标背景下, 研究构建了包含光伏发电、储能系统和燃气轮机冷热电三联供的低碳能源系统集成优化模型。基于全生命周期成本最小化目标, 结合能量平衡约束条件, 采用正交试验方法分析了光伏板面积、燃气轮机容量等关键参数对系统经济性和环境效益的影响, 并对比了广州、武汉等六个典型城市的区域适应性差异。研究结果表明: 光伏板面积是影响经济性与碳减排的关键因素, 而其他参数的影响则具有显著的地域特征。重庆和广州具有显著的电价峰谷差, 燃气轮机供电成本在高峰时段更经济的优势; 系统设备容量配置存在最优区间, 光伏板面积、燃气轮机容量和蓄电池容量分别为1000m² (广州) 或1500m² (重庆)、300kWh、45kW的经济性最好, 设备容量超过最优值后, 碳排放量不再进一步降低; 系统采用小时级优化策略相比按年优化, 可降低动态投资回收期约5.2%和3.2%, 广州地区该系统的动态投资回收期较重庆地区降低15%以上。

【关键词】 低碳能源集成系统; CCHP; 正交试验; 多时间尺度优化; 投资回收期; 碳排放

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

Optimization Analysis of Low-Carbon Building Energy System Integration Based on Orthogonal Experiment

He Fang¹ Chun Liang¹ Wan Li² Xu Hailun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621000;

2. Energy Research and Demonstration Center of Tibet Autonomous Region, Lasa, 850000)

【Abstract】 Against the backdrop of global energy transition and the "dual-carbon" goals, this study constructs an optimization model for a low-carbon energy integration system incorporating photovoltaic power generation, energy storage systems, and gas turbine-based combined cooling, heating, and power (CCHP) systems. With the objective of minimizing the life-cycle cost and considering energy balance constraints, the orthogonal experiment method is employed to analyze the impacts of key parameters-such as photovoltaic panel area and gas turbine capacity-on the system's economic efficiency and environmental benefits. Additionally, regional adaptability differences among six typical cities (including Guangzhou and Wuhan) are compared. The results indicate that: Photovoltaic panel area is a critical factor affecting both economic efficiency and carbon emission reduction, while the impacts of other parameters on economy and carbon reduction exhibit regional characteristics. Chongqing and Guangzhou show significant peak-valley differences in electricity prices, where the power supply cost of gas turbines is more

基金项目: 西藏自治区自然科学基金 (XZ202501ZR0067); 四川省自然科学基金 (2024NSFSC0918);
国家自然科学基金 (52408135)

作者简介: 何芳 (1998-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 2452760531@qq.com

通讯作者: 淳良 (1993-), 男, 博士, 特聘副教授, 研究方向为建筑能源系统, E-mail: chunliang@swust.edu.cn

收稿日期: 2025-11-27

economical during peak hours. There exists an optimal range for system equipment capacity configuration: the most economical configurations are 1,000 m² (Guangzhou) or 1,500 m² (Chongqing) for photovoltaic panel area, 300 kWh for battery capacity, and 45 kW for gas turbine capacity; excessively large equipment capacity does not further reduce carbon emissions. Compared with annual optimization, the system's hourly optimization strategy reduces the dynamic payback period by approximately 5.2% and 3.2%, and the dynamic payback period in Guangzhou is over 15% shorter than that in Chongqing.

【Keywords】 Low-carbon energy integration system; CCHP; Orthogonal experiment; Multi-time-scale optimization; Payback period; Carbon emissions

0 介绍

随着全球能源转型加速和“双碳”目标的推进,构建高效、低碳的综合能源系统成为应对气候变化和能源安全挑战的关键路径。传统能源系统因能效低下、碳排放高的问题,已难以满足可持续发展需求^[1],而集成光伏、储能、燃气轮机等多能设备的低碳能源系统,通过协同优化能量流和信息流,可显著提升能源综合利用率。这样的集成策略不仅能优化整体能源组合的综合表现,也有助于构建更具可持续性、与经济性的能源格局^[2]。

为了提高系统经济性和用能效率,许多研究者将热电联产系统与其他系统集成,构建新型复合系统。Jiang 等^[3]提出了一种与除湿系统集成的热电联产系统,以进一步利用热电联产余热,并将其实际应用于广东省东莞市的某工业园区。在该新型系统中,烟气和高于 81℃ 的缸套水的热量用于驱动吸收式制冷机,而低于 81℃ 的夹套水的热量则用于驱动吸收式除湿机。建立了热力学模型,并使用系统的测试结果来验证该模型。研究表明:当内燃机输出功率为 1200kW 时,该系统的一次能源利用率可高达 84.0%,一次节能率达到 32.77%。Su 等^[4]提出了一种基于沼气和太阳能综合利用的新型热电联产系统,沼气首先在太阳能的辅助下通过沼气重整反应转化为合成气,然后供应给高效的三联产系统。通过遗传算法研究了该系统在拉萨地区综合运行性能。研究表明:将沼气驱动的 CCHP 系统和太阳能斯特林发电系统作为参考系统,混合 CCHP 系统天然气和电力的节省率分别达到 3.3% 和 77.8%。光伏发电技术虽然已广泛应用,但其出力受天气影响具有间歇性和波动性。因此,将燃气三联供系统与光伏系统结合,可有效克服光伏供能不稳定的问题,同时减少对化石能源的消耗。Wang 等^[5]建立了光伏-三联供协同的混合整数

非线性规划(MINLP)模型,解决了工业园区的多能流动态匹配问题,克服了光伏发电的波动性问题,同时满足了热电联产系统的解耦需求。研究表明:动态调度优化方法相比传统分步优化算法,光伏消纳率提高了 22%,系统年总成本降低 15.3%。

对于关键参数对系统经济性与环境效益的影响研究,不同地域条件下的特性分析已涌现出部分成果。Hason 等^[6]构建数学模型分析温度、辐射对光伏系统效率的影响,并评估伊朗 5 座不同气候城市的光伏性能,结果显示亚兹德市表现最优:年发电量 8184.59kWh、年均效率 18.24%、性能比 0.887,其次为伊斯法罕、阿巴斯港、大不里士、德黑兰。在制冷配置方面,Berrill 等^[7]从热经济和环境角度评估了一个以沼气为燃料的三联供系统,该系统由沼气净化、熔融碳燃料电池、联合循环和吸收式制冷系统四个子系统组成,研究表明:生命周期评估显示沼气净化对环境影响最大,且吸收式制冷等子系统配置影响整体效益;方案对比中,“电网电力+建筑独立冷暖”减碳 30%，“热能存储+电动热回收制冷联产”减碳 45%。而在储能配置方面,Li 等^[8]定量评估了可再生能源和储能在以煤电为主的电力系统中的协同效应,表明储能可有效降低电力系统运营成本和碳排放,且可再生能源的引入将增强这种作用效果。在分析关键参数影响中,马令勇等^[9]研究表明附加阳光间可有效降低建筑采暖能耗,以安达市某农宅为例,采用正交试验和熵值法对优化方案进行比选,发现阳光间玻璃类型和窗墙比是影响优化的关键因素,比例分别为 44.35% 和 44.21%。最优方案使建筑采暖能耗显著降低,费效比和碳减排量权重分别为 22.7% 和 20.34%。尽管已有大量文献聚焦关键参数对系统经济性与环境效益的影响并取得了丰富成果,但从完

善研究体系的角度而言,仍存在两方面可补充的方向,对作用于系统经济性与低碳性的关键因素进行明确的影响权重排序,并对其影响效应随地域特征差异演变规律的深入挖掘。

针对多时间尺度优化策略及设备最优配置区间的研究,已有文献取得了一定进展。在针对多时间尺度优化策略方面,Li等^[10]提出了一种最优的园区综合能源系统调度框架,构建了3个不同时间尺度下的运行模型,包括日前、日内和实时。根据不同时间尺度下的需求响应特征和成本构成,需求响应也分为三个层次。算例分析表明,多时间尺度协同可降低日运行成本22.01%,并提升风光消纳率。Zhang^[11]提出了一种多时间尺度的协同运行方案。该方案考虑了负荷的优化分配,以降低工业多能系统的运行成本。在研究设备最优配置区间方面,周王斌等^[12]针对天然气基冷热电三联供融合可再生能源的多能协同系统,采用超结构方法与多目标优化理论,构建5种典型系统的全年逐时优化配置模型,经虎克捷夫-粒子群混合算法求解得最佳容量配比,并以北京办公商业建筑为例,给出不同耦合系统的设备参数与运行策略。Liu等人^[13]提出了包含电气、热能和气体子系统的综合能源系统的最佳运行策略。通过优化耦合约束和调度策略,研究提升了能源效率,促进了峰值剃须和谷地填充,降低成本,并最大限度地减少了碳排放。Sanaye等^[14]针对冷热电联供系统,以最大化年收益为目标函数构建设计优化模型,通过遗传算法求解,得到系统设备容量的最优配置值。Wang等^[15]针对集成太阳能热化学过程的CCHP系统,提出了一种基于运行策略的主动控制方法,引入有价值一次能源效率(VPEE)作为新的评价指标,结果表明在主动控制策略下系统平均VPEE可达89.07%。刘吉臻^[16]提出分层容量配置方法论,通过时域-频域联合特征提取与改进聚类算法,将海量工况压缩为319个典型场景,构建“设备选型(日尺度)-运行优化(小时尺度)”双层框架,在德国多气候区应用表明,系统适应性较单尺度优化提升37%。虽然这些研究成果为该领域发展提供了重要参考,但目前针对不同地域特征,结合多座典型城市进行系统对比分析的研究较少,导致难以针对不同地域的气候条件、能源资源分布等差异,给出精准的设备最优配

置区间与多时间尺度优化策略指导。

综上所述,学界围绕综合能源系统的集成与优化展开了广泛研究,在多能互补技术耦合、单场景参数优化等方面积累了丰富成果,现有研究尚未通过量化方法对影响系统经济性与低碳性的关键因素进行明确的影响权重排序,难以判断各参数的优先级;缺乏对关键因素影响效应随地域特征演变规律的深入挖掘,无法为不同地域提供针对性参数优化方向。现有研究多以单一城市或同类气候区为研究对象,结合多座典型气候、资源特征差异显著城市开展系统对比分析的成果较少,未能明确不同地域“设备最优配置区间”的量化差异,也缺乏针对地域特性的多时间尺度优化策略指导,导致研究成果难以直接支撑不同地域综合能源系统的精准设计与高效运行。

本研究针对关键参数影响机制量化分析与地域差异化优化策略方面两大核心问题展开探索。首先通过正交试验方法解析光伏板面积、燃气轮机参数、储能容量等关键参数的影响机制,揭示其普适性与地域性特征;其次结合广州、重庆等六座典型城市的气候与能源差异,探究多时间尺度优化策略的作用规律,明确不同地域的设备最优配置区间。最终为差异化的建筑能源系统设计与运行优化提供针对性参考,推动低碳建筑能源系统的高效落地与应用。

1 物理模型

图1所示为低碳能源集成系统的结构图,涵盖光伏、电站(外部电网)、蓄电池、天然气、燃气轮机、余热回收锅炉、燃气锅炉、板式换热器、电制冷机组、溴化锂制冷机组及建筑负荷端。光伏电力可直供、存储或并网,燃气轮机发电并通过余热回收锅炉、板式换热器参与供热,燃气锅炉补充供热,电制冷与溴化锂制冷机组协同供冷,蓄电池与电网平衡电力供需,实现冷热电多能互补、高效低碳供应。该低碳能源集成系统通过多设备协同实现冷、热、电多能流闭环。光伏将太阳能转化为电能,直接供给建筑用电与电制冷机组,富余电力存入蓄电池或并入电网;燃气轮机燃烧天然气发电,其高温排烟经余热回收锅炉回收热量,一部分用于驱动溴化锂制冷机组供冷,另一部分通过板式换热器满

足供热需求,若热量仍有缺口,则由燃气锅炉补充。电制冷与溴化锂制冷机组协同产出冷量,经管网输送至建筑;蓄电池与外部电网动态调节电力供需。通过上述低碳能源集成系统可形成光伏优先供电、燃气轮机热电联产、余热梯级利用、多能协同供能的高效低碳能源网络。

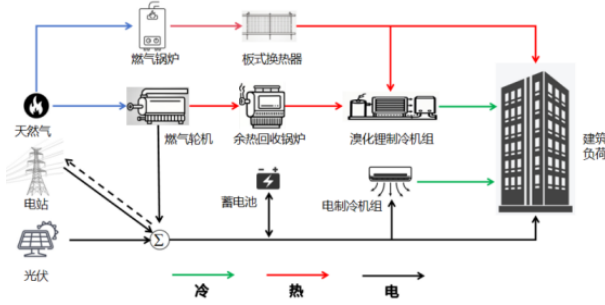


图1 低碳能源集成系统结构图

Fig.1 Structure diagram of low-carbon energy integration system

2 系统建模与优化方法

为方便研究对系统做出以下假设:

(1) 系统中各设备设计确保其能在额定容量范围内任意工况点正常运行,且能够在不同运行工况之间实现连续切换,保证了系统运行的稳定性和灵活性。

(2) 考虑到实际运行中热损失的影响,燃气轮机在不同负荷比下的效率已经得到了相应的优化和调整,以确保系统整体能效。

(3) 系统具备高度的实时响应能力,各设备的运行工况能够根据末端用能需求的变化而实时调整,不存在设备响应滞后的情况。

2.1 光伏发电数学模型

为了模拟光伏发电量,可以采用一个简化的模型来计算。这个模型会考虑光伏阵列的发电效率、当地的辐照强度、光伏阵列的安装面积等因素。虽然实际的光伏系统综合发电效率受到很多实时环境因素的影响,具有不确定性,并且其精确模型非常复杂,为了方便计算,光伏发电量通过式(1)

(2) 计算^[17]。

$$P_{pv} = E_{rad} \times A_{pv} \times \eta_{pv} [1 + k \times (T_{cell} - T_{ref})] \quad (1)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + 0.0256 \times E_{rad} \quad (2)$$

式中: E_{rad} 为太阳辐照, kW/m^2 ; A_{pv} 为光伏阵

列总面积, m^2 ; η_{pv} 为光伏的综合发电效率, 设为 0.104; k 为 -3.7×10^{-3} ; T_{cell} 为光伏电池温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{ref} 为参考条件下电池温度, $^{\circ}\text{C}$, 设为 25°C 。光伏电池温度 T_{cell} 可由公式(2)计算得到, 其中 T_{amb} 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 电池退化数学模型

在探讨电池储能系统(BESS)的寿命和退化问题时, 主要关注两个关键指标: 日历时间寿命(L_{cal})和循环周期(L_{cyc})。这两个指标共同定义了 BESS 达到其寿命结束的条件, 通常当电池容量下降至原始容量的 80% 时, 即认为电池寿命结束。若假设 BESS 外壳能持续维持近乎恒定的温度, 则可推导出日历老化导致的 BESS 容量每小时衰减的线性化模型:

$$\beta_{cal,1h} = 6.6148 \times 10^{-6} \times soc[n] + 4.6404 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: soc 为电池储能系统(BESS)在特定时间步长下的荷电状态变量。BESS 的容量会因日历老化而逐渐衰减(用 $\beta_{cal,[n]}$ 表示), 其在任意时间步长(n)的衰减量可计算为:

$$\beta_{cal}[n] = \sum_{\tau=1}^n \beta_{cal,h}[\tau] \quad (4)$$

此外, 循环老化也会导致容量损失(用 $\beta_{cyc,[n]}$ 表示), 这一损失与电荷吞吐量相关, 其在任意时间步长的公式为^[18]:

$$\beta_{cyc}[n] = 0.5 \times \frac{\sum_{\tau=1}^n |P_b[\tau]| \times \Delta t}{L_{cyc} \times E_b} \quad (5)$$

式中: E_b 为原始电池容量, kWh 。在任何时间步长中, $P_{b,[n]}$ 都可以作为电池的充电或放电功率。如参考文献中所述^[19], 总体老化可通过叠加规则计算, 即日历老化与循环老化的叠加, 公式为:

$$\beta_{total}[n] = \beta_{cal}[n] + \beta_{cyc}[n] \quad (6)$$

BESS 的健康状况(SOH)指标, 是衡量电池当前性能相对于初始状态衰减程度的核心参数, 主要用于评估电池的剩余寿命和实际可用能力, 其定义为:

$$SOH[n] = 1 - 0.2 \times \beta_{total}[n] \quad (7)$$

许多研究表明, 与其他类型电池相比, 磷酸铁锂电池往往具有更好的经济效益^[20]。因此本文研究选用锂电池储能, 表1为电池的特性参数。

表 1 特定的磷酸铁锂电池特性参数

Table 1 Specific characteristic parameters of LiFePO₄

battery		
特性参数	单位	数值
电池往返效率 (η_b)	%	0.98
充放电效率 ($\eta_c=\eta_d$)	%	0.95
日历寿命 (L_{cal})	年	15
循环寿命 (L_{cyc})	次	10000
最小 SOC (soc_{mn})	%	0.1
最大 SOC (soc_{mx})	%	0.95

2.3 燃气轮机数学模型

燃气轮机发电功率数学表达式为:

$$P_{GT} = \frac{B_{GT} \eta_{e,GT} Q_L}{\Delta t} \quad (8)$$

式中: $\eta_{e,GT}$ 为燃气轮机逐时发电效率; B_{GT} 为燃气轮机逐时天然气用量; Δt 为时间步长。

燃气轮机排烟热量计算数学公式为:

$$Q_{GT} = \frac{P_{GT}(1 - \eta_{e,GT} - \eta_{L,GT})}{\eta_{e,GT}} \quad (9)$$

式中: Q_{GT} 为燃气轮机排烟热量, kW; $\eta_{L,GT}$ 为燃气轮机热损失率, %, 取 7.5%。

2.4 制冷机组数学模型

溴化锂吸收式制冷机的数学模型为:

$$Q_{AC} = COP_{AC} Q_B \quad (10)$$

式中: Q_{AC} 为溴化锂吸收式制冷机组的制冷量, kW; COP_{AC} 为吸收式制冷机组的制冷系数; Q_B 为输入到溴化锂吸收式制冷机组的热量。

电制冷机的数学模型为:

$$Q_{EC} = COP_{EC} Q_E \quad (11)$$

式中: Q_{EC} 为电制冷机组的制冷量, kW; COP_{EC} 为电制冷机组的制冷系数; Q_E 为输入到电制冷机组的电量, kW。

2.5 性能指数

构建的目标函数以系统全生命周期总成本最小化为核心, 该成本涵盖经济成本与环保成本两个维度。

在经济成本的分析中, 其通常被定义为运行成本与初始投资之和。这是因为, 在评估一个系统或项目的经济性时, 不仅要考虑其日常运行过程中的成本, 还要考虑其建设或启动时的初始投资。运行成本是指在系统正常运行过程中产生的各种费用,

如能源消耗费、设备维护费、人工费等。这些费用是系统持续运行所必需的, 因此在进行经济性评估时必须予以考虑。初始投资是指为了建设或启动系统而进行的投资, 如设备购置费、安装费、土地购置费等。初始投资是一次性的, 但在评估系统的整体经济性时, 需要将其分摊到系统的整个生命周期内。

$$C_{total} = C_{ini} + C_{ope} \quad (12)$$

式中: C_{ini} 为系统的初始投资成本; C_{ope} 为系统的运行成本。

环保成本在多能互补系统中是一个重要考量, 主要涉及碳排放的量化与减排策略的实施。在多能互补系统的优化设计中, 环保成本通常通过碳排放量来衡量, 并将其作为优化目标之一。系统 CO₂ 年排放量的计算公式如式 (13) 所示。

$$C_{CO_2} = \theta_{CO_2} \sum_{i=1}^n (\lambda_e P_{grid}(n) + \lambda_f P_f(n)) \quad (13)$$

式中: θ_{CO_2} 为 CO₂ 排放单价, 取 18.3 元/吨; P_{grid} 为系统向电网购电功率, kWh; P_f 为系统的天然气消耗量, m³; λ_e 为电的碳排放因子, 取 0.5703; λ_f 为天然气的碳排放因子, 取 2.0621。

系统规划设计使用年限为 15 年, 且每年用能情况相同但运行费用逐渐降低的系统的公共电网总运行费用, 需要一个具体的数学模型或公式来描述运行费用如何逐年降低, 因此 15 年系统的公共电网总运行费用通过式 (14) (15) 计算。

$$CP_e = \sum_{i=1}^{15} C_{ei} \quad (14)$$

$$C_{ei} = C_e / (1 + ir)^{i-1} \quad (15)$$

式中: i 为第 i 年; ir 为折扣率; 5%。

相对于传统分供式系统, 相对回收期 RT 计算如式 (16) 所示。

$$RT = C_{ini} / (CP_{e1} - CP_{e2}) \quad (16)$$

相对投资回收期越小, 则使用对应系统在技术经济上更有利。

2.6 约束条件

在优化过程中, 难免会遇到设备容量或运行时间的上下限束缚, 这是多能互补系统逻辑约束的重要组成部分。这些约束条件主要包括能量平衡约束与能量转换约束, 需在优化过程中严格遵守。

(1) 系统电功率平衡

系统运行时, 必须保证任意时刻系统内各发电

单元所发电量满足系统用户所需电量, 即:

$$P_E(n) + P_c(n) = P_{pv2L}(n) + P_{GT}(n) + P_{b2L}(n) + P_{g2L}(n) \quad (17)$$

式中: P_c 为电制冷需要的电功率, kW; P_{pv2L} 为光伏为用户提供的电功率, kW; P_{GT} 为燃气轮机发电量, kW; P_{b2L} 为电池为用户提供的电功率, kW; P_{g2L} 为电网为用户提供的电功率, kW。

(2) 系统冷功率平衡

$$Q_C(n) = Q_{AC}(n) + Q_{EC}(n) \quad (18)$$

式中: Q_C 为建筑总冷负荷, kW; Q_{AC} 为吸收式溴化锂制冷机提供的冷量, kW; Q_{EC} 为电制冷机

提供的冷量, kW。

(3) 系统热功率平衡

$$Q_H(n) = Q_b(n) + Q_{RE}(n) \quad (19)$$

式中: Q_H 为建筑总热负荷, kW; Q_b 为燃气锅炉提供热量, kW; Q_{RE} 为余热锅炉提供的热量, kW。

(4) 蓄电池约束

由于频繁地充放电会影响到蓄电池的使用寿命, 因此需对蓄电池的运行状态进行约束, 即:

$$SOC_{mn} \leq SOC(n) \leq SOC_{mx} \quad (20)$$

2.7 优化控制策略

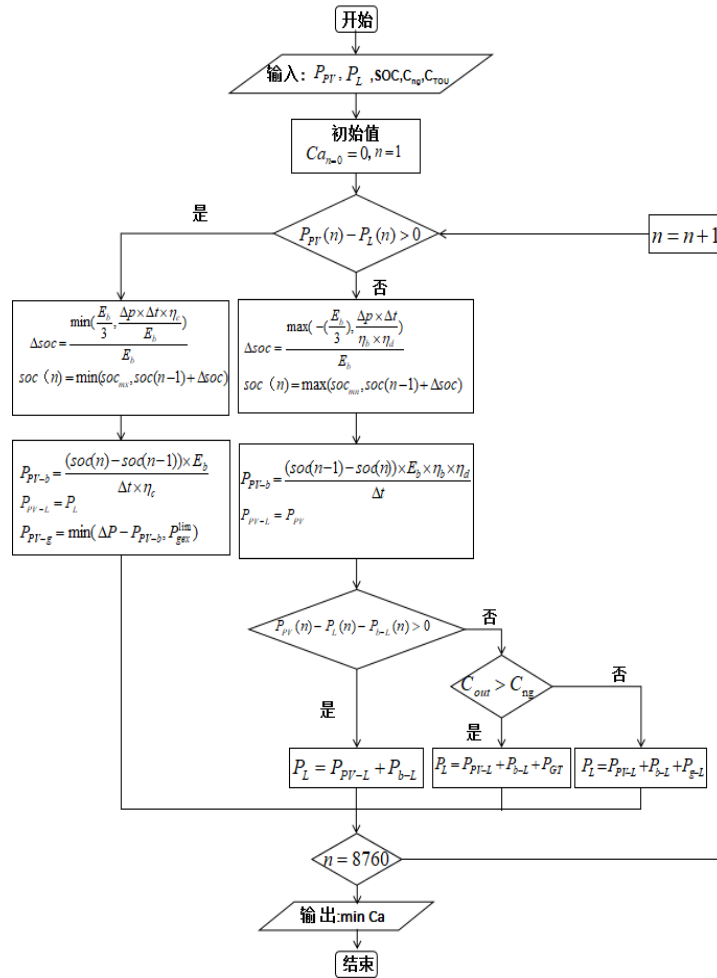


图2 优化控制策略流程图

Fig.2 Flowchart of the optimal control strategy

图2所示为低碳能源集成系统的优化控制策略流程, 该流程围绕系统能量调度控制逻辑构建。输入与初始分配环节, 会输入光伏实时发电功率、蓄电池荷电状态、负荷需求功率、电网购电单价以及燃气轮机供电成本等参数。同时, 确立光伏优先

直接供给负荷的基本原则。该流程包含光伏过剩和光伏不足两个分支逻辑。

在光伏过剩分支逻辑中, 当光伏发电量超过负荷需求时, 会对多余光伏电力进行处理, 具体分为两种情况: 若蓄电池处于可充电状态, 会先计算光

伏剩余功率, 遵循优先用光伏给电池充电且不超过电池最大充电功率的规则; 若光伏仍有剩余且超出电池充电能力, 那么这部分多余的电量将被弃掉; 若蓄电池处于满充状态, 即光伏过剩且电池无法充电时, 需弃光处理。

在光伏不足分支逻辑中, 当光伏发电量无法满足负荷需求时, 需通过蓄电池放电、燃气轮机发电或电网购电进行补能, 其核心是依据燃气轮机供电成本和电网购电单价选择最经济的补充方式, 例如当电网购电价格较低时选择购电, 当燃气轮机发电更具经济性时则启动燃气轮机。

总体而言, 该流程图所呈现光伏优先-电池储能调节-燃气轮机/电网分层控制策略, 旨在实现三大目标: 一是低碳化, 通过最大化光伏消纳, 减少对燃气和电网的依赖; 二是提升经济性, 依据天然气发电成本和电价选择最划算的补能方式, 降低系统运行成本; 三是保障稳定性, 借助蓄电池平抑光伏波动, 确保负荷持续供电。该策略可视为一种适应低碳能源系统多能互补需求的光储协同与成本

触发型能源调度规则。

2.8 研究对象选择依据

本研究所选取的六座典型城市, 其选择依据紧密围绕气候条件、能源资源禀赋与用能结构特征, 旨在覆盖我国差异化的地域类型, 为低碳能源系统优化模型提供多维验证场景。哈尔滨代表北方严寒地区, 供暖周期长、光伏效率受限; 武汉作为中部四季分明城市, 制冷与供暖负荷并存; 广州则典型于南方炎热地区, 制冷需求主导、光伏资源丰富且电价峰谷差显著。

此外, 拉萨作为太阳能资源富集区, 光伏发电效率极高, 系统调节能力有限; 重庆依托丰富的天然气资源, 具备发展燃气三联供的天然优势, 是研究气-光-储协同调度及峰谷电价策略适配性的典型样本; 上海则体现高负荷密度、多能流耦合导向。六座城市在气候、能源、用能结构及系统运行策略上形成鲜明对比, 确保了研究结论既具普适性, 又具备显著的区域适应性价值。

表 2 六座典型城市的地域特征与研究定位

Table 2 Geographical characteristics and research positioning of six typical cities

城市	气候典型性	能源资源典型性	用能结构
哈尔滨	严寒地区	煤电主导、低碳转型	供暖主导
武汉	四季分明	电网依赖、光伏中等	制冷+供暖复合
广州	炎热地区	光伏丰富、电价峰谷差大	制冷主导
拉萨	高原强辐照	光伏极优、水电为主	清洁电力主导
重庆	夏热冬冷	天然气富集、气价低	制冷+供暖复合
上海	复杂气候	能源多元、政策先进	多能耦合

3 结果和讨论

3.1 系统调控参数敏感性分析

为保证研究结论的普适性与代表性, 所选城市覆盖了我国不同气候分区、不同能源资源的地区。

(1) 不同城市的关键因素对投资回收期的影响

在多能源系统的优化设计中, 不同城市的气候条件、能源价格及负荷需求会影响各因素的敏感性。基于正交试验与方差分析, 研究了光伏板面积 (A_{PV})、燃气轮机容量 (E_{GT})、蓄电池容量 (E_b)、溴化锂/电制冷比值 (x_1)、燃气轮机/电网供电比值 (x_2) 对投资回收期 (DPP) 的影响, 并对比了广州、武汉、大庆、银川、上海、重庆六城市的显

著性排序规律, 为区域化能源系统优化提供决策依据。

图 3 揭示了影响动态回收期 (DPP) 的关键因素存在显著的区域差异性。一方面, A_{PV} 作为普适性影响因素, 在所有城市均表现出显著性 ($p < 0.05$), 尤其在光照资源丰富的武汉、大庆等城市成为首要影响因素; 另一方面, 其他参数的影响则呈现出明显的地域特征: x_1 在高制冷需求城市 (如广州、上海) 影响突出, E_{GT} 在供暖主导城市 (如大庆) 更显著, x_2 在能源价格敏感地区 (银川、上海) 作用显著, E_b 主要体现于电价差大、负荷波动显著的区域。这一结果说明, 优化能源系统经济性需因地制宜, 在保证光伏优先的基础上, 根据当

地气候特征、能源需求和市场政策选择差异化的设备配置方案。

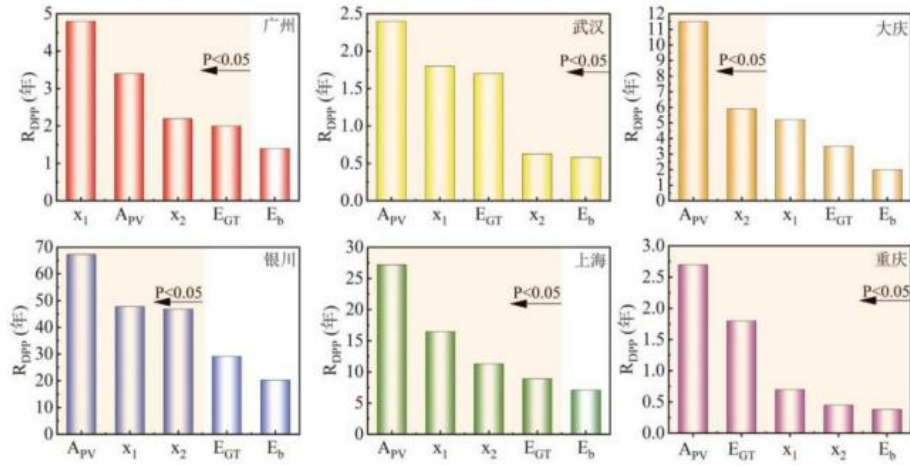


图3 不同城市的关键因素对投资回收期的影响

Fig.3 Impact of key factors on the payback period in different cities

(2) 不同城市的关键因素对碳排放的影响

在全球碳中和背景下,优化多能源系统的碳排放至关重要。基于正交试验与方差分析,研究了

A_{PV} 、 E_{GT} 、 E_b 、 x_1 、 x_2 的影响,并对比广州、武汉、大庆、银川、上海、重庆六城市的显著性排序,以揭示不同城市低碳能源系统的优化方向。

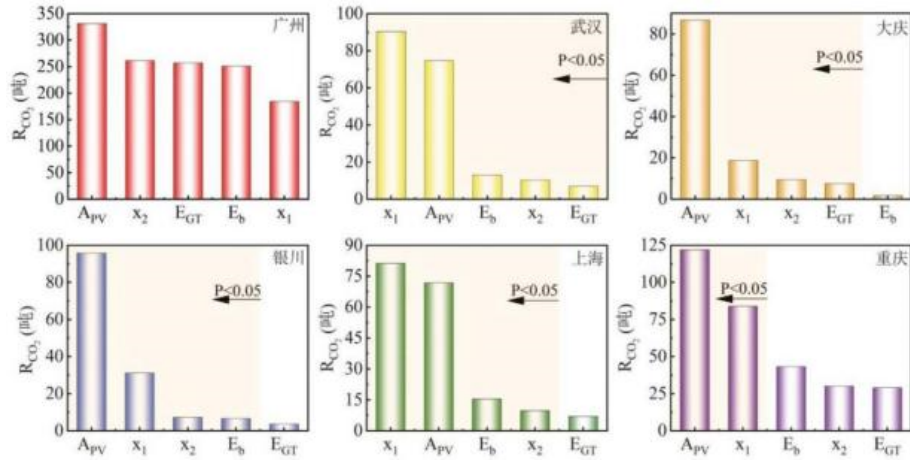


图4 不同城市的关键因素对碳排放的影响

Fig.4 Impact of key factors on carbon emissions in different cities

从图4可见,不同城市关键因素对碳排放的影响存在差异,除广州外,所有城市的 A_{PV} 均表现出显著性($p < 0.05$),且武汉、大庆、银川、重庆的 A_{PV} 影响排名第一,这表明光伏发电是降低 CO_2 排放的最关键因素。 x_1 在5个城市(武汉、大庆、银川、上海、重庆)中显著,其中武汉、上海排名第一,表明余热制冷对减排贡献显著,尤其在制冷需求高的地区。 E_{GT} 仅在武汉、大庆地区显著。 x_2 在大庆、银川、武汉地区显著,表明在这些城市,调整燃气轮机与电网的协同运行可有效减排。 E_b 在武汉、银川、上海地区显著,因光伏波动大时(如武

汉),储能可减少燃气轮机补电,降低 CO_2 。 A_{PV} 是降低 CO_2 排放的最关键性因素,尤其在光照资源丰富地区。 x_1 在高制冷需求城市(武汉、上海)减排效果显著。燃气轮机相关因素(E_{GT} 、 x_2)在供暖主导城市(大庆、武汉)影响较大。各因素的减排效应呈现明显的区域差异: A_{PV} 是跨区域的核心减排因素, x_1 在高制冷需求城市作用突出,燃气轮机相关因素(E_{GT} 、 x_2)在供暖主导城市影响更大,而 E_b 的价值主要体现在光伏波动显著的地区。

综上,为保证研究的普适性与代表性,所选案例城市覆盖了我国不同气候分区及能源资源类型

的典型地区。研究表明,不同城市的关键因素对多能源系统投资回收期 and 碳排放的影响均表现出显著的区域差异。在经济性方面, A_{PV} 为普适性显著因素,尤其在光照资源丰富地区; x_1 在高制冷需求城市影响突出, E_{GT} 在供热主导型城市更为关键, x_2 在电价敏感地区作用显著,而 E_b 则适用于电价峰谷差大、负荷波动显著的区域。在碳排放方面, A_{PV} 同样是跨区域的减排核心因素, x_1 在高制冷需求城市减排效果显著, E_{GT} 与 x_2 在供暖需求高的城市影响更大, E_b 则对光伏波动大的地区具有重要减排价值。因此,区域化能源系统优化应在优先发展光伏的基础上,结合当地气候条件、负荷需求与能源政策,采取差异化配置策略,以实现经济性与环保性的协同优化。

3.2 正交最优工况系统综合性能分析

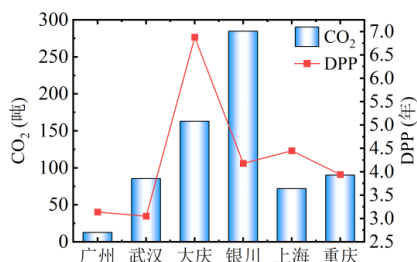


图5 不同城市多能互补系统的 CO₂ 排放量与动态投资回收期 (DPP)

Fig.5 Analysis of CO₂ emissions and Dynamic Payback Period (DPP) for the multi-energy complementary system across various cities

图5显示,该能源系统的投资回收期 and CO₂ 排放量存在显著地域差异,投资回收期依次为武汉<广州<重庆<银川<上海<大庆,CO₂ 排放量依次为广州<上海<武汉<重庆<大庆<银川,这与气候区能源需求结构和当地能源价格密切相关。

南方制冷主导的武汉、广州,夏季漫长且气温高,制冷需求旺盛,而冬季寒冷时间短、供暖需求极低。这种能源需求结构使得系统能充分利用丰富的太阳能资源,光伏发电量大且能高效驱动制冷设备,光伏适配性极高。同时,当地光伏的高利用率减少了对其他高成本能源的依赖,运行成本大幅降低,因此投资回收期最短。光伏属于清洁能源,大量使用光伏电力替代燃气等化石能源,使得这两个城市的 CO₂ 排放量也较少。

重庆属夏热冬冷气候区,冬季存在基础供暖需求,形成制冷为主、供暖为辅的复合能源结构,其

太阳辐射资源仍较丰富,光伏系统利用率保持较高水平。较高的光伏发电量在满足部分能源需求的同时,降低了对燃气的消耗,所以投资回收期仍较短,CO₂ 排放量也相对较少。

寒冷地区的银川,冬季寒冷且时间长,供暖需求大。受气候影响,当地光伏发电效率相对较低,难以满足大量的供暖需求,系统不得不高度依赖燃气锅炉供暖,这不仅推高了燃气的使用量,增加了运行成本,使投资回收期延长,天然气燃烧会产生大量 CO₂,导致银川的 CO₂ 排放量大。

大庆作为严寒区,面临着超长的供暖季(长达6个月)和极低的气温(冬季常低至-20℃左右)。极低温环境不仅会严重降低光伏组件的发电效率,减少光伏电力产出;这类地区夏季短暂导致制冷需求极低,进一步压缩了光伏电力的消纳空间。为了满足漫长冬季的供暖需求,系统只能长期高负荷运行燃气锅炉,大量消耗天然气,这既大幅增加了运行成本,导致投资回收期最长,也因燃气的大量燃烧产生了较多的 CO₂。

总体而言,气候越寒冷、供暖需求越大,光伏的利用效率越低,对燃气等化石能源的依赖就越强,从而使得投资回收期越长,CO₂ 排放量也呈现出相应的变化趋势。这一规律为不同气候区能源系统的规划提供了重要的决策依据,在实际规划中,应根据当地气候特点和能源需求结构,合理配置光伏、燃气等能源设备,以实现经济性和环保性的平衡。

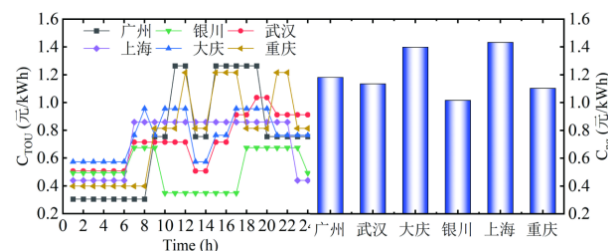


图6 多能互补系统关键经济参数对比:电价曲线;天然气发电成本分析

Fig.6 Comparison of key economic parameters for the multi-energy complementary system: electricity price curve; natural gas power generation cost analysis

图6基于分时电价与燃气轮机发电成本的耦合分析,筛选出重庆和广州作为燃气轮机调峰经济性研究的典型城市。两地具备两大共性特征,一是电价峰谷差显著,高峰时段电价分别达1.216

元/kWh 和 1.264 元/kWh; 二是高峰电价与燃气轮机发电成本形成有效价差。相比之下, 其他城市因峰谷差不足和天然气成本过高, 导致燃气轮机调峰经济性欠佳。这一选择标准为区域差异化能源调度策略提供了量化依据, 后续将重点研究两地光伏-储能-燃气轮机的协同优化模式。在重庆^[22]等一些工业园区, 已经开始尝试利用峰谷电价差, 在低谷时段储存电能, 高峰时段利用燃气轮机调峰, 取得了一定的经济效益, 但在光伏、储能、燃气轮机的

协同控制上, 仍有优化空间, 可参考本文研究构建多时间尺度与多性能指标耦合的优化模型进一步完善。广州的商业综合体也在探索类似模式, 通过合理调度能源, 降低用电成本, 提高能源利用效率, 未来结合本文提出的优化策略, 有望实现更精准的能源调度与成本控制。

3.3 运行调控频率对系统性能影响

(1) 设备容量对动态回收期的影响机制: 小时级优化与年度优化策略对比分析

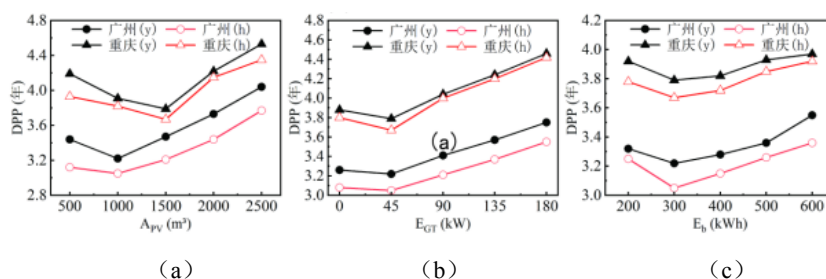


图 7 不同时间尺度优化策略对动态投资回收期的影响

Fig.7 Impact of optimization strategies with different time scales on the Dynamic Payback Period (DPP)

图 7 揭示了不同时间尺度优化策略对动态投资回收期的影响。图 7 (a) 显示, 在广州和重庆系统中, 随着光伏板面积的增大, 无论采用按年优化还是按小时优化策略, 动态投资回收期均呈现先下降后上升的趋势。其中, 广州系统的最优光伏板面积为 1000m², 重庆系统为 1500m²; 低于此规模时, 当地光照资源未能充分利用, 限制了效益提升; 超过此规模后, 受电网消纳能力限制, 光伏弃光率增加, 导致经济效益下降, 从而延长了动态投资回收期。图 7 (b) 表明, 受控制策略优化空间和相对较高的天然气发电成本限制, 广州和重庆系统均适宜采用 45kW 容量的燃气轮机配置, 以实现最佳的动态回收期表现。图 7 (c) 则显示, 蓄电池容量在 200kWh 至 300kWh 区间内, 动态投资回收期呈下降趋势; 超过 300kWh 后, 回收期转为上升。这是因为蓄电池主要用于存储光伏产生的小时级

多余电量, 而系统光伏的最大小时余电量并未超过 300kWh; 超过该容量后, 蓄电池初始投资成本显著增加, 但其增加的储能能力因缺乏足够的余电而无法有效利用, 导致经济性下降, 回收期延长, 故推荐配置 300kWh 的蓄电池储能系统。综上图 7 表明在广州和重庆系统中, 采用小时级优化策略相比按年优化, 可降低动态投资回收期约 5.2% 和 3.2%。在广州和重庆构建此类系统时, 为获得最佳经济性, 不仅需结合当地光照强度和电网条件优化关键设备容量, 更重要的是需采用小时级优化调度策略, 其相比按年优化策略, 可缩短动态投资回收期, 凸显了精细化时间尺度优化对提升系统整体经济效益的关键作用。

(2) 设备容量对碳排放的影响机制: 小时级优化与年度优化策略对比分析

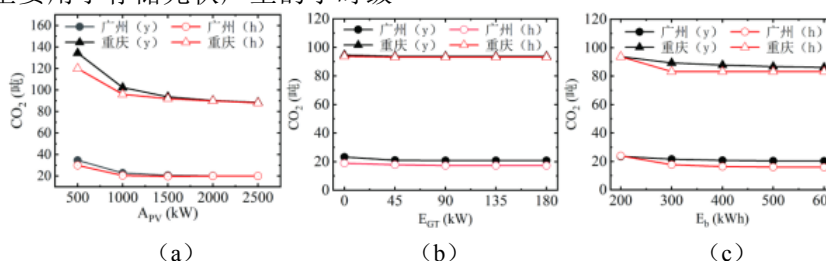


图 8 不同时间尺度优化策略对碳排放的影响

Fig.8 Impact of optimization strategies with different time scales on carbon emissions

图8展示了不同时间尺度优化策略对碳排放的影响。从图8中可见,无论采用何种时间尺度策略,随着设备容量的增大,碳排放量均呈现先下降后趋于稳定的趋势。这是因为当设备容量低于其最优值时,增大容量能够有效提升系统效率和资源利

用率,从而实现显著的碳减排;然而,一旦设备容量超过该最优值,新增的容量将无法被系统充分利用,因此无法带来进一步的减排效果,此时额外的容量投入不仅无助于减排,反而只会增加系统的初始投资成本。

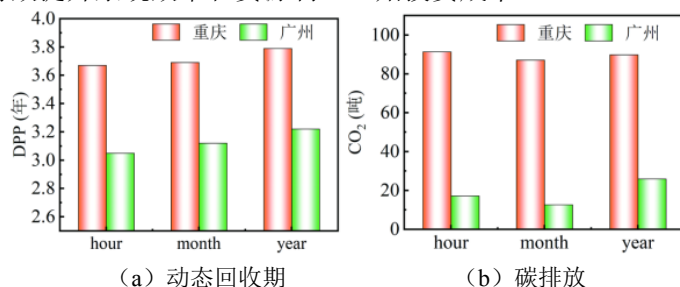


图9 基于不同时间尺度优化策略的比较

Fig.9 Comparison of optimization strategies based on different time scales

图9对比分析了重庆与广州在小时、月、年三种时间尺度优化策略下,动态投资回收期(DPP)与碳排放(CO₂)的表现差异。图9(a)显示重庆各时间尺度下DPP均维持在约3.6年,显著高于广州,广州DPP随时间尺度延长从3.05年左右微升至3.22年,整体经济性更优,其动态回收期较重庆降低15%以上。图9(b)显示重庆各时间尺度CO₂排放量稳定在90t上下,远高于广州,广州CO₂排放量17.2t至26t左右,低碳优势明显。可见,广州在能源系统经济性与低碳性上均优于重庆,不同时间尺度优化策略对两地影响不同。两地不同时间尺度优化在整体效益和环境影响的差异则相对有限,均不足10%。

4 实际案例剖析

为对本文提出的优化策略提供实证支撑,本节基于公开文献与行业报告,对六个典型城市中与本研究系统类似的工程实践或规划案例进行调研分析。通过将案例层面论证本文提出运行策略的可行性。

4.1 上海世博B片区能源中心项目^[22]

(1) 案例现状与本策略的符合度分析

项目以“天然气冷热电三联供”为核心,耦合电制冷、燃气锅炉、蓄能水箱,符合“多能互补+能源梯级利用”,综合能源利用率85%;执行“以热定电”原则,根据终端冷热负荷需求反向调节发电量,避免能源生产与需求错配,同时通过6700t冷水罐、1000t冷热同罐“削峰填谷”。

(2) 应用本策略可带来的进一步优化与提升
利用园区建筑屋顶资源加装光伏系统,构建“气-电-光”耦合系统。白天日照高峰与用电高峰重叠时,光伏电力优先驱动电制冷机组,减少燃气发电的燃料消耗,推动区域供能向近零碳转型。

在现有“以热定电”“削峰填谷”基础上,将电网分时电价深度融入优化模型。电网高峰时段先用光伏、蓄能供能,减少网电采购;低谷时段增加电制冷机组运行,与三联供系统协同储冷,年购电成本可再下降。现有冷热蓄能与新增蓄电池联动,平抑光伏波动,提高能源自给率。

4.2 岳西县医院综合能源项目^[23]

该案例虽未完全使用本文模型中的所有技术组合,但其核心优化逻辑与本文策略高度契合,并从工程实践角度证明了本文关键结论的正确性。

(1) 案例现状与本策略的符合度分析

该项目采用“空气源热泵+电蓄热锅炉+能效管理系统”技术路线,虽未引入光伏与燃气轮机,但构建了“电网-蓄热装置-高效热泵”的多能互补架构。其中,热泵承担基础冷热负荷,电蓄热锅炉作为调峰补充,符合本文“依据设备能效与能源品位组合供能”的核心思想。夜间低谷电蓄热、高峰放热,契合“依据电价选最优补能方式”;能效管理系统实现“小时级优化”。

(2) 应用本策略可带来的进一步优化与提升
在医院屋顶加装光伏系统,可进一步替代昂贵的峰时网电,将能源成本降至更低。引入光伏发电,可进一步降低对电网中化石能源电力的依赖,使系

统的碳排放趋近于零, 远超当前仅通过“气改电”实现的减排效果。配置蓄电池, 与现有电蓄热系统形成“电-热”双重储能, 不仅能实现更精细的峰谷套利, 还能平抑光伏出力波动, 提升能源自给率。在本文小时级策略优化下, 系统将优先消纳光伏电力, 最大化清洁能源的使用比例。

4.3 上海市市北高新技术服务业园区天然气分布式供能项目^[23]

该项目在“燃气三联供”基础上, 创新性地融合了“冰蓄冷”技术, 并明确提出了支撑电网“削峰填谷”与“柔性友好互动”的目标, 其系统构架与运行逻辑与本文策略深度契合, 为区域智慧能源系统建设提供了成功的范本。

(1) 案例现状与本策略的符合度分析

项目服务于园区内酒店、办公、商业等多种业态, 建筑面积共计约 26.8 万 m^2 。“燃气三联供+冰蓄冷+主辅站互联”, 符合“多能互补”, 构建区域能源网络。夜间低谷电制冰、白天释冷, 契合“依据能源品位与价格优化调度”, 实现电网削峰填谷。

(2) 应用本策略可带来的进一步优化与提升

配置蓄电池, 强化绿色电力占比, 构建“气-电-储”协同体系。在园区广阔的屋顶资源上部署分布式光伏系统在现有智慧平台基础上, 嵌入本文的优化算法, 实现更精细的源-网-荷-储协同。例如, 在光伏出力旺盛的午间, 可优先利用光伏电力制冰或直接供冷, 并动态调整三联供系统的发电与余热利用策略; 在电价峰值时段, 则可综合评估冰蓄冷释冷、三联供余热制冷与网购电制冷的成本, 选择全局最优的运行组合, 实现成本与能效的极致优化。

5 结论

本研究针对现有综合能源系统研究中, 多参数交互机制不明、地域适配性不足、时间尺度优化粗放的核心短板, 构建了集成光伏发电、储能系统与燃气轮机冷热电三联供的低碳建筑能源系统优化模型, 创新采用正交试验方法解析关键参数耦合影响, 并结合广州、重庆等六座典型气候、能源特征城市开展验证, 主要结论及研究创新点、实际问题解决价值如下:

(1) 本研究在创新揭示关键参数耦合影响规律方面, 通过正交试验量化发现: 光伏板面积是影

响系统经济性与低碳性的普适核心因素, 而溴化锂与电制冷的比值、燃气轮机参数等其他关键参数的影响则具有显著地域差异。这一发现有效解决了传统研究中“普适结论套用所有地域”的问题, 不同地域的参数选型之前应明确优先级。

(2) 在明确地域差异化系统性能与最优配置方面, 研究针对“不同地域设备最优区间不明”的问题展开深入分析, 量化得出气候与能源特征对系统性能具有决定性作用的结论。其中, 南方制冷主导城市因光伏适配性高, 系统投资回收期最短、碳排放最低; 严寒地区因对燃气供暖的依赖性强, 回收期最长、碳排放也最高。同时, 研究明确了广州光伏板面积 1000m^2 、重庆光伏板面积 1500m^2 , 且两地均适配 45kW 燃气轮机与 300kWh 蓄电池的最优配置方案, 该方案能够有效避免设备闲置或投资浪费。

(3) 创新多时间尺度优化策略在提升系统效益上, 突破了传统“单时间尺度优化”的局限, 成功构建起“小时-月-年”三级优化模型。实践验证结果显示, 小时级优化相比年度优化, 可使广州、重庆两地系统的投资回收期分别降低 5.2%、3.2%, 且能更精准地匹配光伏出力与负荷波动; 同时, 研究还明确了广州地区系统投资回收期较重庆降低 15% 以上的地域优势, 为精细化能源调度提供了切实可行的操作路径。

(4) 实证案例表明, 本研究的优化策略不仅能指导新建项目的规划设计, 也能为现有系统的升级改造提供明确路径, 具有显著的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Zhu X, Zuo Z, Wang W, et al. Parameter interaction analysis and comprehensive performance optimization of a thermoelectric generator system integrating a wide temperature range of thermoelectric modules[J]. Energy Conversion and Management, 2025, 342: 120027-120027.
- [2] Chen L, Wu J, Tang H, et al. A Q-learning based optimization method of energy management for peak load control of residential areas with CCHP systems[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214(PB).
- [3] Jiang R, Han W, Qin F G F, et al. Thermodynamic model development, experimental validation and performance analysis of a MW CCHP system integrated with

- dehumidification system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,158:176-185.
- [4] Su B, Han W, Chen Y, et al. Performance optimization of a solar assisted CCHP based on biogas reforming[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018,171:604-617.
- [5] Wang X, Xu Y, Fu Z, et al. A dynamic interactive optimization model of CCHP system involving demand-side and supply-side impacts of climate change, Part II: Application to a hospital in Shanghai, China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252:115139.
- [6] Ghodusejad M H, Ghodrati A, Zahedi R, et al. Multi-criteria modeling and assessment of PV system performance in different climate areas of Iran[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022,53:102520.
- [7] Berrill P, Hertwich E G. Ground truthing the environmental benefits of a polygeneration system: When to combine heat and power?[J]. *Energy and Buildings*, 2018,173:221-238.
- [8] Li M, Shan R, Virguez E, et al. Energy Storage Reduces Costs and Emissions Even Without Large Penetration of Renewable Energy: The Case of China Southern Power Grid[J]. *Energy Policy*, 2022,161:112711.
- [9] 马令勇,胡颢,李清等.采用正交试验和熵值法的严寒地区农宅附加阳光间优化方案比选[J].*建筑节能(中英文)*,2022,50(8):118-124.
- [10] Li P, Zhang F, Ma X, et al. Multi-time scale economic optimization dispatch of the park integrated energy system[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021,9:743619.
- [11] Zhang C, Xu Y, Dong Z, et al. Multitimescale coordinated adaptive robust operation for industrial multienergy microgrids with load allocation[J]. *IEEE Access*, 2020,8:3061-3063.
- [12] 周王斌.多能协同冷热电三联供系统优化配置及不确定性运行研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [13] Manfeng L, Kaiyang Z, Yiji L, et al. Technical and economic analysis of multi-energy complementary systems for net-zero energy consumption combining wind, solar, hydrogen, geothermal, and storage energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023,295.
- [14] Sanaye S, Khakgay N. Simultaneous use of MRM (maximum rectangle method) and optimization methods in determining nominal capacity of gas engines in CCHP (combined cooling, heating and power) systems[J]. *Energy*, 2014,72:145-158.
- [15] Wang Q, Duan L, Liu L, et al. Active control method based on operation strategy for a novel combined cooling, heating and power system integrated with solar thermochemical process[J]. *Renewable Energy*, 2025, 247:123001-123001.
- [16] Liu J Z, et al. Hierarchical capacity configuration method for integrated energy system[J]. *Applied Energy*, 2026,389:126154.
- [17] Li H, Wang S. Model-based multi-objective predictive scheduling and real-time optimal control of energy systems in zero/low energy buildings using a game theory approach[J]. *Automation in Construction*, 2020, 113:103139.
- [18] Martins R, Musilek P, Hesse H C, et al. Linear battery aging model for industrial peak shaving applications[C]. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Palermo, Italy: IEEE, 2018:1-6.
- [19] Hesse H C, Martins R, Musilek P, et al. Economic optimization of component sizing for residential battery storage systems[J]. *Energies*, 2017,10(7):835.
- [20] Mulleriyawage U G K, Shen W, Hu C. Battery system selection in DC microgrids for residential applications: An Australian case study[C]. *Proceedings of 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an, China: IEEE, 2019:1926-1931.
- [21] Yu S, Zhou S, Chen N. Multi-objective optimization of capacity and technology selection for provincial energy storage in China: The effects of peak-shifting and valley-filling[J]. *Applied Energy*, 2024,355:122289.
- [22] 《综合能源服务百家实践案例集》编委会.综合能源服务百家实践案例集(2023年版)[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [23] 《综合能源服务百家实践案例集》编委会.综合能源服务百家实践案例集(2024年版)[M].北京:中国电力出版社,2024.