

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-326-09

基于遗传算法的 高原农宅双路光伏-储电-蓄热系统配置优化研究

熊 川¹ 王志阳¹ 邓梦思^{1,2} 马荣江^{1,2} 易禹豪^{1,2}

(1. 西南交通大学 成都 610031;

2. 天府永兴实验室 成都 610213)

【摘 要】 针对青藏高原农村地区传统的用能方式存在高污染、低能效等问题, 提出一种“双路光伏-储电-蓄热”集成能源系统。该系统按供能路径划分为两个子系统: PV-A 子系统采用电直热墙体蓄热满足部分空间的连续供暖需求, PV-B 子系统与储能电池耦合满足其他负荷。研究以能源自给率最大化为目标, 以初始投资和投资回收期为约束, 采用遗传算法进行系统配置优化。案例结果表明: 最优平衡点系统配置为总光伏装机 13kW、电池容量 7kWh, 对应自给率 96.86%、初始投资 8.89 万元、回收期 6.93 年; 若实现 100%自给需电池容量增至 13kWh, 投资增至 12.65 万元。研究揭示了高自给率目标下电池容量边际成本递增规律, 为高原农村清洁供暖提供了技术参考。

【关键词】 双路光伏; 蓄热墙体; 农村住宅; 遗传算法; 配置优化; 能源自给率

中图分类号 TK519 文献标志码 A

Configuration Optimization of Dual-Branch Photovoltaic-Battery-Wall Thermal Storage System for Plateau Rural Residences Based on Genetic Algorithm

Xiong Chuan¹ Wang Zhiyang¹ Deng Mengsi^{1,2} Ma Rongjiang^{1,2} Yi Yuhao^{1,2}

(1.Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031; 2.Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu, 610213)

【Abstract】 To address the issues of high pollution and low energy efficiency associated with traditional energy consumption patterns in rural areas of the Qinghai-Tibet Plateau, this paper proposes an integrated "dual-branch photovoltaic-battery-wall thermal storage" energy system. The system is divided into two subsystems according to energy supply pathways: the PV-A subsystem employs electric direct heating with wall thermal storage to meet the continuous heating demand of designated spaces, while the PV-B subsystem is coupled with battery storage to satisfy other loads. With the objective of maximizing energy self-sufficiency rate, and subject to constraints on initial investment and payback period, a genetic algorithm is employed for system configuration optimization. Case study results demonstrate that the optimal balanced configuration comprises a total PV capacity of 13 kW and battery capacity of 7 kWh, achieving a self-sufficiency rate of 96.86% with an initial investment of 88900 CNY and a payback period of 6.93 years. To achieve 100% self-sufficiency, the battery capacity must be increased to 13 kWh with an investment of 126500 CNY. This study reveals the law of increasing marginal cost of battery capacity under high self-sufficiency rate targets, providing technical reference for clean heating in plateau rural areas.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52508140); 四川省科技计划资助项目 (2025ZNSFSC1310);
天府永兴实验室科技攻关任务重大项目 (2024KJGG26)

作者简介: 熊 川 (1999.10-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: xiongchuan@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 易禹豪 (1996.09-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yiyuhao@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-05

【Keywords】 Dual branch photovoltaic; Thermal storage wall; Rural residential building; Genetic algorithm; Configuration optimization; Energy self-sufficiency rate

0 引言

全球能源转型与双碳背景下, 光伏储能系统在分布式供能领域备受关注^[1]。中国自 2013 年起实施大规模光伏扶贫工程, 显著提高了偏远地区居民的收入和能源可及性^[2-4]。青藏高原等偏远寒冷地区传统农宅冬季多依赖燃烧柴火或牛粪取暖, 室内空气污染严重, 居民健康面临威胁^[5-7], 亟需通过综合节能与清洁能源利用手段加以改进。该地区太阳能资源极为丰富, 年均水平面太阳辐射量超过 1500kWh/m^2 , 为农宅光伏供能提供了理想条件^[8,9]。

然而, 要完全依靠光伏发电实现农村住宅全年能源自给仍面临挑战。光伏发电具有间歇性和昼夜不平衡特性, 尤其是青藏高原冬季白昼光照时间短、采暖需求高, 导致发电与用能错峰严重。然而, 完全依赖电化学储能弥补冬季长时段采暖缺口, 面临高投资、循环寿命有限及深度放电性能衰减等问题^[10], 经济性难以接受。青藏高原农宅采暖与炊事

负荷本质上是热能需求, 可采用成本更低的储热技术替代部分电化学储能。此外, 由于农村用能具有较强随机性, 系统设计应基于实测负荷数据^[11,12]。

近年来, “光伏-蓄热”耦合模式在社区能源系统与高原农宅供暖等方面均已得到验证^[13-19], 被证实是解决严寒地区清洁取暖的有效路径。

针对高原农村地区的用能需求, 本文提出“双路光伏-储电-蓄热”集成能源系统, 集成光伏发电、电化学储能与墙体蓄热, 通过“光-热”直接耦合与“光-电”灵活调度协同发挥各自优势。在既定系统调度策略基础上, 建立逐时系统仿真模型, 以经济性约束为前提, 采用遗传算法^[20]对关键容量参数进行全局寻优, 并基于最优配置分析系统运行特性。研究成果可为青藏高原及类似气候条件下农村地区的清洁供暖和能源自足提供参考。

1 系统架构及运行策略

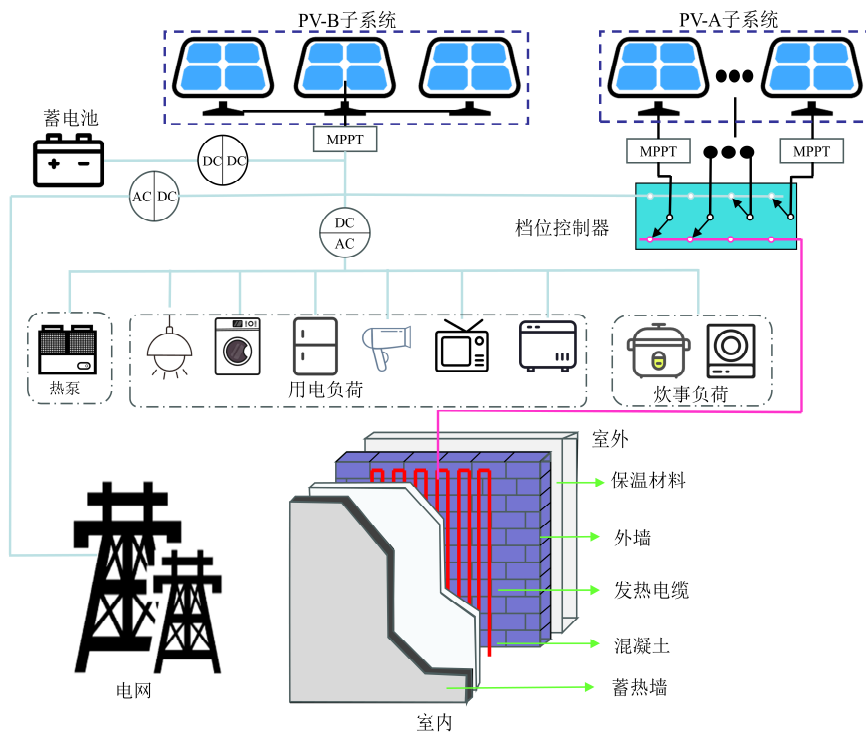


图 1 典型农宅“双路光伏-储电-蓄热”集成能源系统架构

Fig.1 Architecture of the "dual-branch photovoltaic-battery-wall thermal storage" integrated energy system for a typical rural residence

图 1 展示了本文设计的“双路光伏-储电-蓄热”集成能源系统架构图。系统由屋顶光伏组件阵

列、室内蓄电池、电直热墙体蓄热装置、空气源热泵、直流斩波器、逆变器及相应负载构成。按供能路径划分, PV-A 子系统通过电直热及墙体蓄热方式满足有连续供暖需求区域的负荷, 其蓄热墙体的构造是基于实地调研而设计的, 符合当地农宅的实际建造条件。PV-B 子系统与电池及电网耦合, 承担客厅间歇式采暖、炊事、照明及其他家电等电负荷。PV-A 在满足连续供暖需求后产生的富余电量并入 PV-B 直流母线, 与 PV-B 光伏阵列共同通过功率变换器在负荷、电池及电网之间进行能量分配, 实现两路间的灵活耦合。

该系统的运行策略如图 2 所示, 将农宅划分为

连续供暖区与间歇式用能区, 并匹配不同供能方式。对于需要全天候、尤其夜间持续供暖的连续供暖区 (典型区域为卧室), 采用 PV-A 子系统独立供能, 白天利用光伏电加热墙体蓄热, 夜间缓慢释放, 实现以“日”为时间尺度的能量平衡, 利用建筑围护结构的热惰性解决光伏发电与夜间采暖负荷的错配问题。对于间歇式采暖区 (典型区域为客厅), 采用空气源热泵按需供暖。空气源热泵能效比高, 启停灵活, 可满足日间短时供暖需求并降低 PV-B 和电池的容量压力。通过对不同热负荷采用差异化供能技术, 实现连续保温需求与可调节舒适性需求的匹配, 有利于提升系统整体能源利用效率。

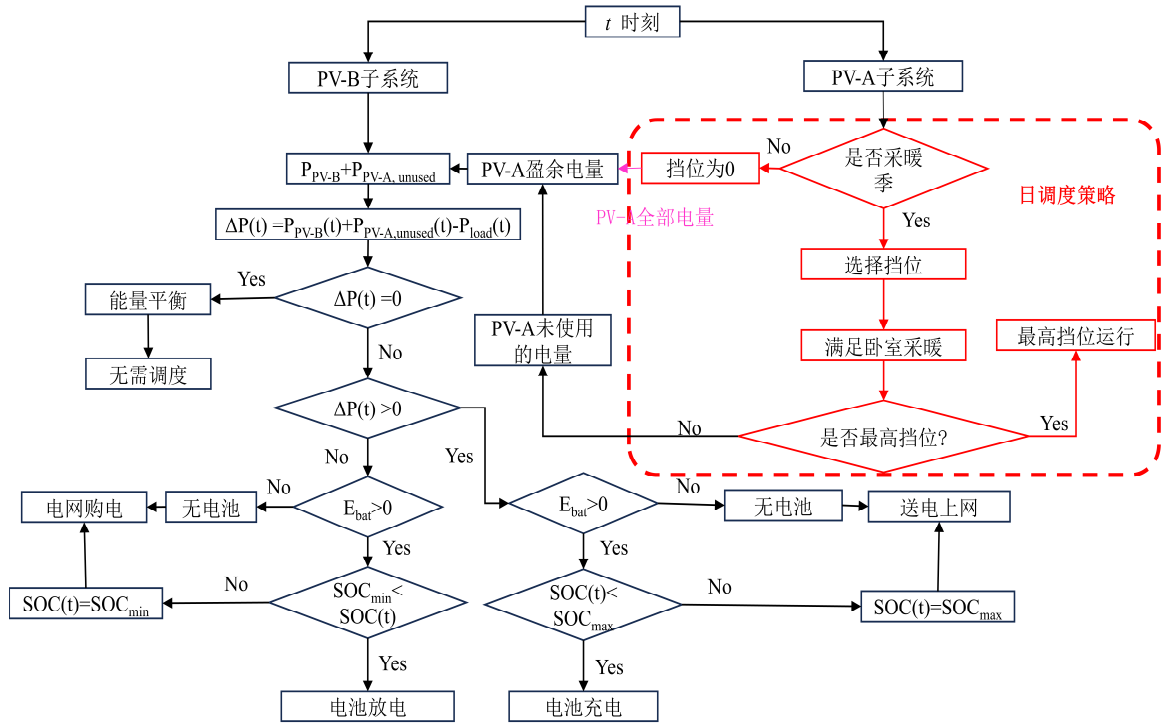


图 2 整个系统的运行策略流程图

Fig.2 Flowchart of the operational strategy of the entire system

在全面电气化情景下, 炊事及其他家用电器与空气源热泵共同由 PV-B 子系统、蓄电池、PV-A 余电及电网协同供给。能量调度遵循“光伏自用优先、余电充电、不足放电、最后购电”的原则: PV-B 发电与 PV-A 未用于供暖的余电首先满足实时负荷, 剩余电量为蓄电池充电; 当光伏发电不足时由电池放电补充; 光伏与电池均无法满足需求时从电网购电; 当光伏在满足负荷且电池充满后仍有富余时可并网售电获取收益。

2 经济性评价指标

为全面评估本研究所提出能源系统的经济可行性, 本文选取了初始投资与投资回收期作为核心经济性评价指标。

2.1 初始投资成本

系统的初始投资成本是指在项目建设初期一次性投入的全部费用。根据本系统的架构设计, 总初始投资 C_I 由以下几个部分构成:

$$C_I = C_{base} + C_{PV-A} + C_{PV-B} \quad (1)$$

式中: C_{base} 为基础设备成本, 此为系统的固定成本, 主要包含空气源热泵等与光伏和储能规模无关的核心设备费用 (元); C_{PV-A} 为 PV-A 子系统的成本, 元; C_{PV-B} 为 PV-B 子系统的成本, 元。

2.2 投资回收期

投资回收期是指项目从投产后, 以各年年收益抵偿初始投资所需的时间。定义年收益 S_A 的计算公式如式 (2) 所示。

$$S_A = S_{base} + S_{cook} + S_{heat} + I_{sell} - C_{buy} \quad (2)$$

式中: S_{base} 为基准情景下基础用电节省费用, 元; S_{cook} 为炊事燃料节省, 元; S_{heat} 为采暖燃料节省, 元; I_{sell} 为上网售电收入, 元; C_{buy} 为年购电成本, 元。

S_{cook} 和 S_{heat} 等可根据用电量、设备效率及生物质燃料单价与热值折算得到。投资回收期采用基于净现值 (NPV) 的常规方法计算, 通过折现年现金流确定投资回收年限

3 基于遗传算法的系统优化模型

为确定“双路光伏”综合能源系统的最优配置, 本文构建包含能量平衡模型、系统配置与控制策略, 以及优化算法的综合计算框架, 通过逐时仿真在满足经济性约束的前提下实现能源自给率最大化。

3.1 能量平衡与运行策略模型

本系统的能量平衡计算严格遵循第 1 节所述的“双路”运行策略。

(1) 连续供暖系统 (PV-A) 的日能量平衡

专供卧室连续供暖的 PV-A 子系统按“日”为时间尺度进行能量平衡, 通过墙体蓄热实现日内能量的时移^[17,18,21]。在一个典型的采暖日 (d), 该子系统需满足式 (3) 能量供需约束关系。

$$Q_{PV-A,supply,d} \geq Q_{Heat,bed,d} \quad (3)$$

式中: $Q_{Heat,bed,d}$ 为卧室在第 d 日的总热负荷需求, kWh。

由光伏系统提供的日有效供给热量 $Q_{PV,supply,d}$ 由式 (4) 计算。

$$Q_{PV-A,supply,d} = \left(\sum_{t=1}^{24} P_{PV-A,bed}(t) \cdot \Delta t \right) \cdot \eta_{sys,A} \quad (4)$$

式中: $P_{PV-A,bed}$ 为 PV-A 子系统在采暖日 d 的第 t 个小时内的发电功率, kW; Δt 为时间步长 (1 小

时); $\eta_{sys,A}$ 为从光伏发电到墙体有效蓄热的系统综合效率。

(2) 其他负荷的逐时能量平衡

负责农宅其他所有负荷的 PV-B 子系统和 PV-A 子系统剩余电量, 其能量流动遵循逐时平衡原则。在任意小时 t , 系统的能量守恒方程可表示为:

$$\begin{aligned} P_{PV-A, unused}(t) + P_{PV-B}(t) + P_{Bat, dis}(t) + P_{Grid, buy}(t) \\ = P_{Load, other}(t) + P_{Bat, ch}(t) + P_{Grid, sell}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $P_{PV-A, unused}(t)$ 为 PV-A 子系统在满足卧室供暖负荷后该子系统剩余的发电功率, kW; $P_{PV-B}(t)$ 为 PV-B 子系统的总发电功率, kW; $P_{Bat, dis}(t)$ 和 $P_{Bat, ch}(t)$ 分别为蓄电池的放电和充电功率, kW; $P_{Grid, buy}(t)$ 和 $P_{Grid, sell}(t)$ 分别为从电网的购电和向电网的售电功率, kW, 在本文模型中, 二者在同一时刻互斥; $P_{Load, other}(t)$ 为除卧室连续采暖外的所有家庭负荷功率, kW, 包括客厅的空气源热泵采暖、炊事、照明及其他家电负荷。

3.2 连续供暖系统 (PV-A) 配置与控制策略

PV-A 子系统及其蓄热墙体的配置与控制是本文设计的关键环节, 其方法如下:

(1) PV-A 子系统容量配置

PV-A 子系统的总装机容量是根据整个采暖季中“需求最严苛的设计日”来确定的, 该设计日对应在考虑系统效率及安全系数后, 卧室日总热负荷与单块光伏板日发电量之比最大的那天。采暖季第 d 日满足其卧室热负荷 $Q_{Heat,bed,d}$ 所需的等效电能 $E_{req,d}$ 为:

$$E_{req,d} = \frac{Q_{Heat,bed,d} \cdot k_{safe}}{\eta_{e-h} \cdot \eta_{trans}} \quad (6)$$

式中: k_{safe} 为安全系数; η_{e-h} 为电-热转换效率; η_{trans} 为墙体蓄热的有效传热效率。

通过遍历采暖季逐日计算所需光伏组件数, 取最大值作为 PV-A 子系统需要配置的组件总数 N_{PV-A} , 此容量被视为系统的固定配置, 不再参与后续优化。

(2) 动态分档控制策略

为适应全年不同日期的热负荷变化, 将 N_{PV-A} 块光伏组件被划分为若干个组形成不同挡位, 系统根据当日计算得到的 $N_{req,d}$ 选择可满足需求的最低

档位运行。未被激活档位对应的光伏发电量并入 PV-B 直流母线,用于满足其他电负荷或并网售电,从而减少弃光。

3.3 优化模型: 目标函数与约束条件

在确定了 PV-A 的固定配置后,采用遗传算法对 PV-B 子系统装机容量及电池容量进行全局寻优。

(1) 目标函数

本研究优化的核心目标是在满足经济与技术约束的前提下,最大化系统的能源自给率 (SSR), 目标函数定义为:

$$f_{objective} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{load}(t) - \sum_{t=1}^{8760} P_{grid, buy}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_{load}(t)} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: $P_{load}(t)$ 为农宅每小时的总用电量, kWh; $P_{grid, buy}(t)$ 为农宅每小时从电网的购电量, kWh。其中用电量为农户全面电气化后所有用电负荷, 包括炊事、采暖和日常用电。当自给率为 100% 时, 代表全年购电量为 0 kWh。

(2) 决策变量

本文设置的决策变量为光伏子系统 (PV-B) 的装机容量和电池容量:

$$0 \leq N_{PV-B} \leq N_{PV-B, max} \quad (8)$$

$$0 \leq E_{bat} \leq E_{bat, max} \quad (9)$$

式中: N_{PV-B} 为 PV-B 子系统的光伏组件数量, 块; $N_{PV-B, max}$ 为 PV-B 子系统可安装的光伏组件数量上限, 块; E_{bat} 为储能电池容量, kWh。

(3) 约束条件

为确保方案在农村地区的实际可推广性, 本文设置了初始投资 ($C_{initial}$) 与投资回收期 (PP) 两项关键经济性约束。投资回收期约束:

$$PP_{min} \leq PP \leq PP_{max} \quad (10)$$

初始投资约束:

$$C_{min} \leq C_{initial} \leq C_{max} \quad (11)$$

式中: PP 为系统的实际投资回收期, 年; $C_{initial}$ 为系统初始投资总成本, 元; PP_{min} , PP_{max} , C_{min} , C_{max} 分别为投资回收期上下限和初始投资上下限。

电池充放电采用逐时 SOC 模型描述。电池在 t 时刻的 SOC 更新为:

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \frac{\eta_{ch} \cdot P_{ch}(t) \cdot \Delta t \cdot \lambda}{E_{bat}} - \frac{P_{dis}(t) \cdot \Delta t \cdot (1 - \lambda)}{E_{bat} \cdot \eta_{dis}} \quad (12)$$

式中: $P_{ch}(t)$ 为每小时充电功率; $P_{dis}(t)$ 为每小时放电功率; λ 表示电池充放电状态, 当 $\lambda=1$ 时表示电池正在充电, 当 $\lambda=0$ 时表示电池正在放电; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为电池充放电效率; E_{bat} 为电池容量, kWh。SOC 受上下限约束:

$$0 \leq P_{ch}(t), P_{dis}(t) \leq 0.5 \cdot E_{bat} \quad (13)$$

$$0.05 \leq SOC(t) \leq 0.95 \quad (14)$$

3.4 遗传算法

采用遗传算法求解上述优化问题。随机初始化种群, 每个个体编码为 (N_{PV-B}, E_{bat}) , 通过全年逐时仿真计算自给率作为适应度, 并检验经济性约束。经锦标赛选择、交叉、变异及边界处理迭代至设定代数后, 取适应度最高个体作为最优配置。遗传算法计算流程如图 3 所示。

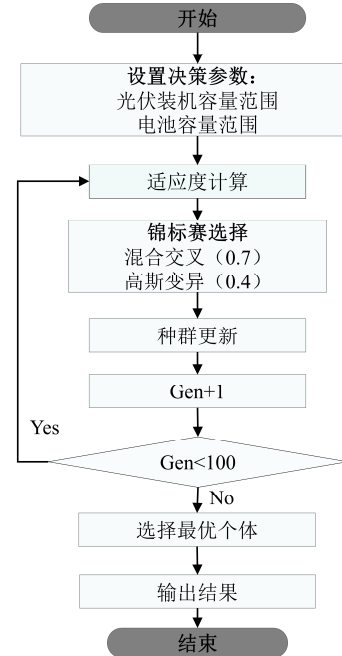


图 3 光伏储能系统配置计算的遗传算法流程图

Fig.3 Flowchart of the genetic algorithm for the configuration calculation of the photovoltaic-storage system

4 案例分析

4.1 案例介绍

本文选取位于 32.8653°N , 101.9911°E 的青藏

高原一典型农宅为研究对象, 典型农宅的物理模型如图 4 所示。该地区年平均气温约 2.5℃, 夏季最高温度为 22.9℃, 冬季最低温度可达-22℃, 采暖期长达 8 个月, 属于极寒地区。结合农户的实际居住习惯, 本文将卧室定义为连续供暖区, 采用 PV-A

子系统的“光伏-电直热墙体蓄热”满足其全年持续的、尤其是夜间的采暖需求; 客厅则定义为分时段供暖区, 其日间采暖由空气源热泵提供。该典型农宅的围护结构参数通过实地调研与测量获取, 具体如表 1 所示。

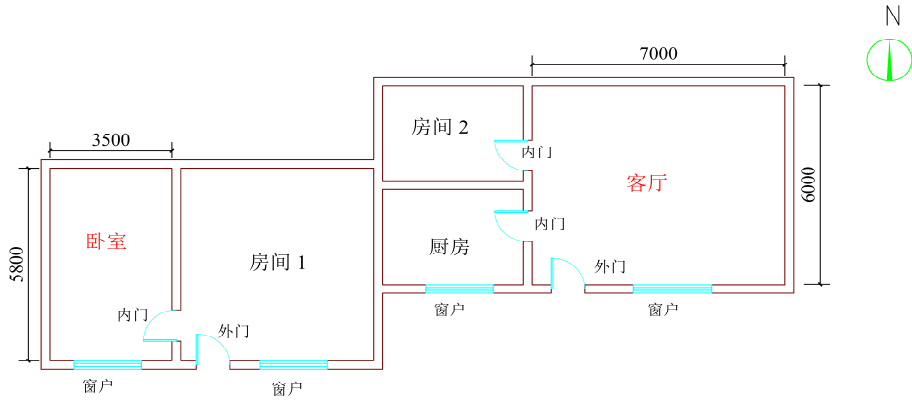


图 4 典型农宅的物理建模
Fig.4 Physical model of the typical rural residence

表 1 典型农宅围护结构参数

Table 1 Envelope parameters of the typical rural residence

围护结构	材料	厚度 /m	热导率 /[W/(m·K)]	密度 /(kg/m ³)	比热容 /[J/(kg·K)]	传热系数 <i>K</i> /[W/(m ² ·K)]	SC
外墙	酚醛保温板	0.04	0.024	20	1465	—	—
	水泥砂浆	0.02	0.93	1800	1050	—	—
	空心砖	0.19	0.274	708	897	—	—
内墙	空心砖	0.19	0.274	708	897	—	—
屋顶	黏土瓦	0.2	0.43	1320	1130	—	—
	茅草	0.05	0.047	120	2093	—	—
门	铝	0.05	220.97	2600	482	—	—
窗户	玻璃	0.006	—	—	—	5.7	0.85

4.2 负荷分析

本文通过实测与折算相结合的方式获取负荷数据, 其中基础用电负荷通过智能电表采集 2024 年 6 月至 2025 年 3 月的逐时数据, 采用 K-means 聚类提取典型日负荷曲线; 炊事用电基于标准化煮水实验测定的传统炉具热效率, 结合 90% 的电炊具效率折算^[22,23]; 供暖用电通过 DeST 软件计算热负荷, 并基于实测数据得到空气源热泵性能系数 (COP) 的数据折算为电力负荷。将上述负荷逐时叠加, 构建了全面电气化后的综合用电负荷曲线。图 5 和图 6 分别展示了该典型农宅采暖季和非采暖季典型周的逐时负荷曲线, 相较于图 5, 可以看出图 6 中的基础用电负荷更大, 而炊事等效用电负荷反而更小, 这是由当地农户的实际用能行为差异所

导致的

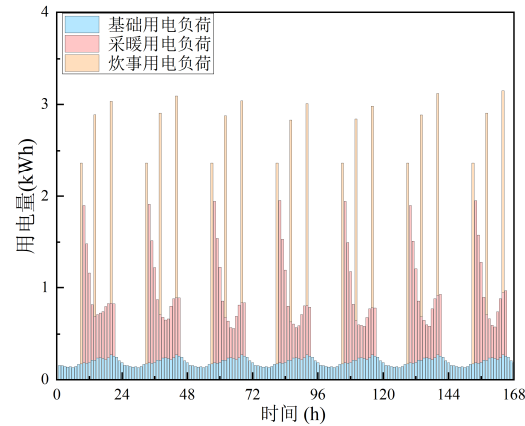


图 5 采暖季典型周逐时负荷曲线
Fig.5 Hourly load curves for a typical week in the heating season

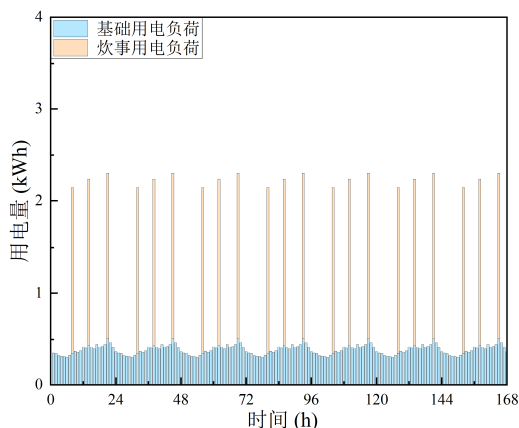


图6 非采暖季典型周逐时负荷曲线

Fig.6 Hourly load curves for a typical week in the non-heating season

5 结果

5.1 卧室连续供暖系统设计结果

根据 3.2 节所述方法, 专供卧室连续供暖的 PV-A 子系统总容量被确定为 11.7kW, 由 18 块额定功率为 650W 的单晶硅光伏组件构成。配套的蓄热墙体设计为在卧室北墙和西墙内侧增设 240mm 厚砖墙, 以提供充足的蓄热容量。为动态匹配全年变化的日热负荷需求并避免能源浪费, 将 18 块光伏组件分为 4 组 (4、4、5、5 块), 形成 0/4/8/13/18 块五个运行挡位。农户根据当日卧室日总热负荷需求选择满足需求的最低档位运行, 未激活档位对应的光伏发电量自动并入至 PV-B 子系统的直流母线, 用于其他负荷或并网售电。类似光伏驱动围护结构蓄热的技术路线已在青藏高原地区相关研究中得到验证^[17], 表明该方案具有良好可行性。

5.2 系统配置优化结果

在确定 PV-A 子系统的固定配置后, 采用遗传算法对 PV-B 子系统光伏装机容量和电池容量进行优化, 以年自给率最大化为目标函数并加以初始投资与投资回收期约束。

为探索不同经济约束下对系统性能的影响, 本文在初始投资 7 万元至 15 万元、投资回收期 6 年至 11 年范围内, 分别以 0.5 万元和 0.5 年为步长遍历组合计算。得到不同约束条件下系统可达到的最大自给率, 结果以热力图形式展现 (见图 7) 所示。总体来看, 初始投资与允许回收期越宽松, 自给率越高; 当回收期低于约 7.5 年且初始投资不超过 10.5 万元时, 自给率波动较大, 平均约为 92.9%;

当回收期超过 7.5 年后, 自给率迅速进入“平台区”, 进一步增加投资对自给率提升有限。图中灰色区域表示在对应约束下无可行最优解。

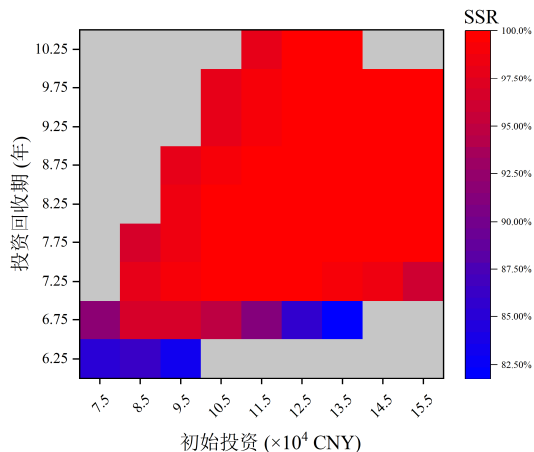


图7 不同初始投资和投资回收期对系统自给率影响的热力图

Fig.7 Heatmap of the impact of different initial investments and payback periods on the system energy self-sufficiency rate

在所有可行方案中, 进一步采用 3D-Pareto 前沿分析确定最优配置方案。图 8 展示了初始投资、回收期与自给率三者之间的权衡关系, 每个数据点代表不同投资与回收期组合下的系统性能。分析得到两类关键配置方案。

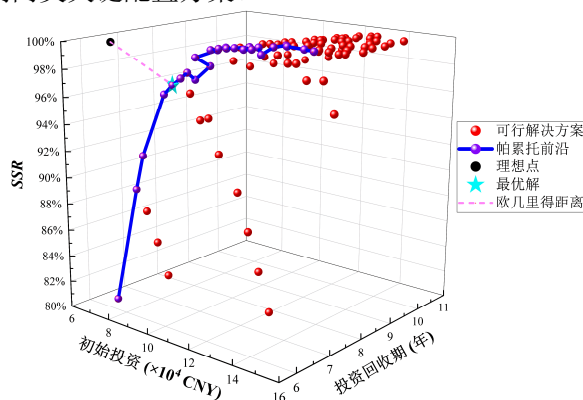


图8 可行性方案的 3D 帕累托前沿分析

Fig.8 3D Pareto front analysis of the feasible solutions

(1) 最优平衡点配置

综合考虑经济性与技术性能的最优平衡点为初始投资 8.89 万元, 回收期 6.93 年, 系统自给率 96.86%。对应配置为系统总光伏装机容量 13kW, 其中 PV-A 子系统 11.7kW, PV-B 子系统 1.3kW, 储能电池容量 7kWh。

(2) 100%自给率最优配置

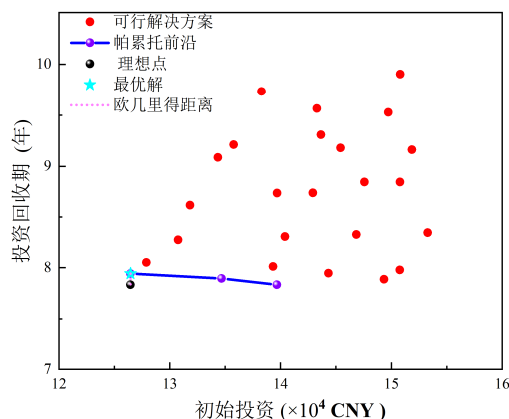
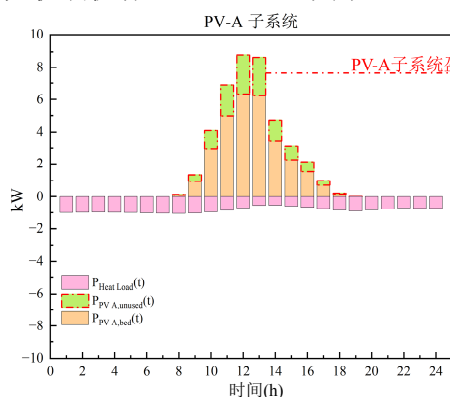


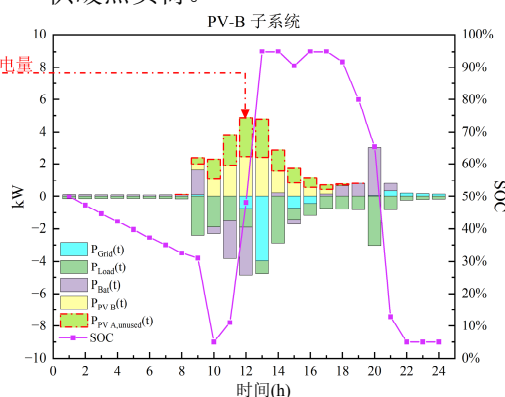
图 9 系统自给率 100%前提下的帕累托前沿分析

Fig.9 Pareto front analysis of the solutions achieving 100% system self-sufficiency rate

针对 100%自给率前提下的所有可行性方案中经 Pareto 前沿分析,如图 9 所示,得到最优投资方案为初始投资 12.65 万元,回收期 7.94 年。对应配置为系统总光伏装机容量 18.85kW,其中 PV-A 子



(a) PV-A 子系统逐时供需情况



(b) PV-B 子系统逐时供需情况

图 10 采暖季典型工况下的逐时供需情况

Fig.10 Hourly energy supply and demand under typical operating conditions in the heating season

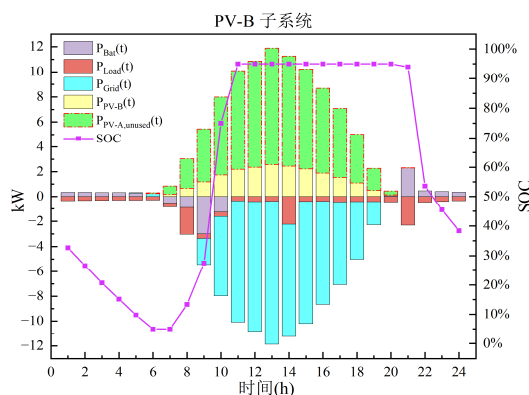


图 11 非采暖季典型工况下的逐时供需情况

Fig.11 Hourly energy supply and demand under typical operating conditions in the non-heating season

系统 11.7kW, PV-B 子系统 7.15kW, 储能电池容量 13kWh。

与最优平衡点相比,将自给率由 96.86%自给率提升至 100%自给率,需额外投资 3.76 万元,电池容量增加近 1 倍,回收期延长约 1 年。这一结果揭示了追求极高自给率时边际成本急剧上升的规律,即消除最后约 3%的电网购电需求,主要依赖增加电池容量以应对“连续阴雨天+深夜”的极端工况,而非简单扩大光伏装机。

5.3 典型工况下系统运行性能

基于 5.2 节获得的最优平衡点配置,分析系统在典型工况下的逐时能量流动特征。图 10 和图 11 分别展示了采暖季和非采暖季典型日的逐时能量流动情况,其中正 Y 轴区域表示能量输入,包括光伏发电、电池放电、电网购电,负 Y 轴区域表示能量输出,包括电力负荷、电池充电、电网馈电、供暖热负荷。

结果表明,两个季节系统运行模式类似,白天光伏发电充足,可满足实时负荷并为电池充电。然而受电池容量限制,储存电能通常在日出前耗尽,系统需在凌晨时段从电网购电以弥补负荷缺口。该特征在采暖季尤为明显,其原因在于严寒气候导致供暖和烹饪需求大幅增加,推高了整体用电量,而有限的电池容量难以完全覆盖夜间至凌晨的长时负荷需求,该现象与 5.2 节关于“提升自给率至 100%需显著增加电池容量”的结论一致。

6 结论

本文针对青藏高原典型农宅的清洁用能需求,提出了一种新型“双路光伏-储电-蓄热”集成能源

系统,构建逐时仿真与经济评价模型,并采用遗传算法对系统配置进行优化。主要结论如下:

(1) 所提出的双路光伏系统通过 PV-A 子系统驱动电直热墙体蓄热为卧室提供连续供暖, PV-B 子系统联合电池及电网满足客厅采暖及日常用电,实现供能方式与负荷特性的分路匹配,缓解了光伏发电与采暖负荷的时间错配。

(2) 在典型高原农宅算例中,结合经济性约束的全局优化结果表明存在兼顾投资与自给率的技术经济最优拐点:配置总光伏 13kW、电池 7kWh,可在初始投资 8.89 万元、投资回收期 6.93 年的条件下实现 96.86% 的能源自给率,验证了该技术路线在高原农村地区的可行性。

(3) 当系统进一步消除最后约 3% 的电网购电、实现 100% 自给时,需显著增加电池容量,初始投资增加 3.76 万元、回收期延长约 1 年,反映出高自给率下电池扩容的边际效益递减。在资源与经济约束较强的高原农村地区,光伏+储热为主、以少量电网电量兜底的供能策略更具推广价值。

参考文献:

- [1] Sutikno T, Arsadiando W, Wangsupphaphol A, et al. A review of recent advances on hybrid energy storage system for solar photovoltaics power generation[J]. IEEE Access, 2022,10:42346-42364.
- [2] Zhang H, Wu K, Qiu Y, et al. Solar photovoltaic interventions have reduced rural poverty in China[J]. Nature Communications, 2020,11:1969.
- [3] Yuan C, Ding T, Wu B. Targetedness, effectiveness, and sustainability of China's photovoltaic poverty alleviation programmes[J]. Energy, 2024,300:131515.
- [4] Li Y, Chen K, Ding R, et al. How do photovoltaic poverty alleviation projects relieve household energy poverty? Evidence from China[J]. Energy Economics, 2023,118:106514.
- [5] Li L, Zhou J. Application research of solar heating technology in rural buildings in western Sichuan plateau[J]. Energy Reports, 2022,8:295-306.
- [6] Sovacool BK. The political economy of energy poverty: A review of key challenges[J]. Energy for Sustainable Development, 2012,16:272-282.
- [7] Upadhyay AK, Singh A, Kumar K, et al. Impact of indoor air pollution from the use of solid fuels on the incidence of life threatening respiratory illnesses in children in India[J]. BMC Public Health, 2015,15:300.
- [8] Ye L, Liu M, Fu D, et al. Probabilistic site adaptation for high-accuracy solar radiation datasets in the western Sichuan plateau[J]. Remote Sensing, 2025,17:1720.
- [9] Yang H, Xu Y, Zhou K, et al. Mapping development potential and priority zones for utility-scale photovoltaic on the Qinghai-Tibet plateau[J]. Renewable Energy, 2024,237:121546.
- [10] Ahoutou Y, Ilinca A, Issa M. Electrochemical cells and storage technologies to increase renewable energy share in cold climate conditions—a critical assessment[J]. Energies, 2022,15:1579.
- [11] Gao D, Zhi Y, Rong X, et al. Mismatch analysis of rooftop photovoltaics supply and farmhouse load: data dimensionality reduction and explicable load pattern mining via hybrid deep learning[J]. Applied Energy, 2025,377:124520.
- [12] Gao D, Zhao B, Kwan TH, et al. The spatial and temporal mismatch phenomenon in solar space heating applications: status and solutions[J]. Applied Energy, 2022,321:119326.
- [13] Zhao X, Mu H, Li N, et al. Optimization research on a novel community integrated energy system based on solar energy utilization and energy storage[J]. Energies, 2025,18:1151.
- [14] Xu X, Yang L, Liu Y, et al. Dual-objective optimization of solar-driven energy system for rural households in solar-rich areas[J]. Energy, 2025,318:134745.
- [15] Xiao Z, Chen Y, Wang D, et al. Performance analysis of photovoltaic residual electricity thermal conversion and storage system in solar energy enrichment areas[J]. Solar Energy, 2024,274:112562.
- [16] Zhi Y, Sun T, Gao D, et al. Achieving net zero energy heating by integrating the building envelope as a thermal battery[J]. iScience, 2024,27:109892.
- [17] Yi Y, Xiong C, Li J, et al. Feasibility and thermodynamic analysis on rural building envelope energy storage-photovoltaic electric heating system on the Qinghai-Tibet plateau[J]. Applied Thermal Engineering, 2025,278:127323.

(下转第 437 页)