

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-696-08

夏热冬冷地区居住建筑 空气源热泵与太阳能光伏复合系统性能研究

何 燕 王 亮

(西南科技大学 绵阳 621010)

【摘 要】 为应对建筑领域碳减排挑战, 研究针对夏热冬冷地区气候特点, 提出空气源热泵与太阳能光伏复合的供暖制冷系统, 以降低传统空气源热泵对市政电网的依赖并提升系统能效。以成都市典型居住建筑为例, 通过 Dest 和 TRNSYS 软件模拟建筑动态负荷及系统运行特性, 构建空气源热泵与太阳能光伏复合系统模型, 分析其能耗、能效及碳足迹。结果表明: 太阳能光伏发电可为空气源热泵提供 14.87% 的年用电量补充, 系统年平均能效比提升至 3.11 (较纯空气源热泵系统提高 23.15%); 在 50 年建筑寿命周期内, 太阳能光伏系统贡献减碳量 1614tCO_{2e}, 复合系统总碳排放较传统系统降低 28.73%。研究验证了太阳能光伏与空气源热泵互补技术在夏热冬冷地区的适用性, 为建筑低碳化改造提供了兼具节能与舒适性的解决方案。

【关键词】 空气源热泵; 太阳能光伏; 碳足迹; 能效比; 夏热冬冷地区; 复合系统

中图分类号 TU111.4 文献标志码 A

Research on the Performance of Air-Source Heat Pump and Solar Photovoltaic Composite System in Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Areas

He Yan Wang Liang

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 To address the carbon reduction challenges in the construction sector, this study proposes a combined heating and cooling system of air-source heat pumps and solar photovoltaic panels for the hot summer and cold winter regions, aiming to reduce the reliance of traditional air-source heat pumps on the municipal power grid and enhance system efficiency. Taking a typical residential building in Chengdu as an example, the dynamic building load and system operation characteristics were simulated using the Dest and TRNSYS software, and a model of the combined air-source heat pump and solar photovoltaic system was constructed to analyze its energy consumption, efficiency, and carbon footprint. The results show that solar photovoltaic power generation can provide 14.87% of the annual electricity consumption for air-source heat pumps, and the average annual energy efficiency ratio of the system increases to 3.11 (a 23.15% improvement over the pure air-source heat pump system). Over a 50-year building life cycle, the solar photovoltaic system contributes to a reduction of 1,614 tons of CO_{2e}, and the total carbon emissions of the combined system are reduced by 28.73% compared to the traditional system. The study verifies the applicability of the complementary technology of solar photovoltaic and air-source heat pumps in hot summer and cold winter regions, providing a solution that is both energy-efficient and comfortable for the low-carbon transformation of buildings.

【Keywords】 Air source heat pump; Solar photovoltaic; Carbon footprint; EER; Hot-summer and cold-winter zone; Combined system

作者简介: 何 燕 (2000.11-), 女, 硕士研究生, E-mail: 1101375471@qq.com

通讯作者: 王 亮 (1983.12-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: wangliangmy83@swust.edu.cn

收稿日期: 2025-06-17

0 引言

在全球气候变化与能源转型的双重压力下, 建筑领域作为全球碳排放的主要来源之一, 其供暖与制冷系统的低碳化改造已成为实现“双碳”目标的关键路径^[1]。传统燃煤/燃气供暖系统因高碳排放、低能效等问题难以满足可持续发展需求, 而空气源热泵作为一种高效电能驱动技术, 其效率显著, 近年来在建筑空调系统领域得到广泛应用。但空气源热泵机组设备等因其电力驱动特性仍依赖于传统电网供电, 间接依赖化石能源, 难以完全实现低碳化目标。光伏发电具有分布广泛、零碳排放的优势, 可通过“自发自用, 余电上网”模式直接为热泵提供电力, 降低系统对传统电网的依赖, 同时减少运行成本, 达到节能减排的效果^[2]。太阳能光伏发电、空气能作为可再生能源, 在国内外受到广泛的研究^[3]。尽管国内外学术界对空气源热泵系统的研究已形成较为丰富的成果, 但其研究方向多集中于系统能效提升、低温适应性优化等, 而针对分布式屋顶光伏发电辅助空气源热泵系统进行制冷、供暖的研究较少。ZQ Liu 等人^[4]运用 Ecotect 软件模拟了北京某住宅光伏屋顶, 对比分析了不同安装倾角对光伏组件月发电量及屋顶总发电量的影响。研究表明, 优化光伏组件的设计和选型可有效补偿建筑的供暖与制冷能耗。Madessa 等人^[5]以挪威奥斯陆一栋 100 平方米的平屋顶住宅为对象, 利用 PVsyst 软件模拟其并网光伏系统性能。结果表明: 采用单晶硅光伏组件, 系统在 30 年生命周期内可实现 69gCO₂/kWh 的减碳效益, 且能源回报时间仅为 3.9 年。EMMI G 等人^[6]的研究指出, 相较于普通空气源热泵系统, 多能源系统的能效可提升 16%~25%。徐政等人^[7]设计的结合太阳能与空气源热泵的污泥干化方案, 应用结果表明, 两种方案均能显著降低能耗, 并实现良好的干化效果。

综上所述, 太阳能供暖或空气源热泵供暖的研究主要集中在性能的使用方面, 在空气源热泵系统对市政电网的完全依赖性问题方面鲜有研究。本文根据夏热冬冷地区的气候条件以及能源资源情况, 提出了光伏发电系统辅助空气源热泵系统进行制冷、供暖, 以达到太阳能资源的最大化利用, 资源的优化利用, 使系统的运行更加的稳定, 保障居民的生活活动和室内热舒适性。通过建筑运行阶段的空调系统碳足迹分析, 核算碳排放量对建筑节能性

进行全面评价。得出建筑空调系统节能潜力。

1 夏热冬冷地区建筑负荷模拟及结果分析

1.1 建立计算模型

以夏热冬冷地区成都市多层典型居住建筑为研究对象, 建筑楼层 6 层, 建筑层高 3.3m, 总建筑面积 2039.11m², 体形系数 0.321。按照《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2010), 建筑物的具体设计参数如表 1 所示。

表 1 建筑热工性能及节能参数

Table 1 Building thermal performance and energy-saving parameters

	传热系数/[W/(m ² ·K)]	外窗朝向	窗墙比
屋顶	0.72	东	0.30
外墙	0.89	南	0.45
外窗	2.60	西	0.30
		北	0.25

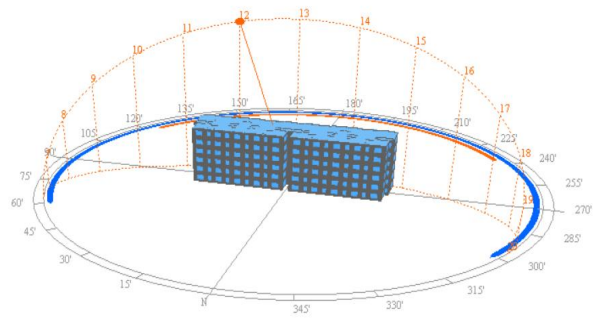


图 1 建筑模型

Fig.1 Building model

采用 DeST 软件计算全年冷热负荷, 建立的冷热负荷分析计算模型如图 1 所示。在模型构建过程中, 还考虑了人员活动规律、设备使用情况等多种因素。在照明功率密度设置上, 严格依据《建筑照明设计标准》(GB/T 50034-2024) 中居住建筑限值要求, 设为 5W/m²。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012) 中的规定, 主要房间的室内新风量按不小于 30m³/(h·人) 进行设置, 内部人员密度设置为 0.05 人/m²。电器设备功率密度设为 15W/m²。室内设定的最高温度为 26℃, 最低温度为 18℃; 容忍上限温度为 28℃, 容忍下限温度为 16℃。卧室的供暖空调运行时间周一至周五为 22:00 至次日 07:00, 周末为全天;

起居室的供暖空调运行时间周一至周五为 17:00–22:00, 周末为 08:00–23:00。

1.2 建筑负荷动态模拟分析

以成都市典型年气象参数为依据, 对该建筑进行了全年的建筑负荷动态模拟。模拟结果如图 2 所示, 其中, 全年最大热负荷为 106.79kW, 累计热负荷为 32465.11kWh; 全年最大冷负荷为 189.98kW, 累计冷负荷为 39076.82kWh。全年最大热负荷指标达到了 $52.37\text{W}/\text{m}^2$, 全年累计热负荷指标为 $15.92\text{kWh}/\text{m}^2$; 最大冷负荷指标为 $93.17\text{W}/\text{m}^2$, 全年累计冷负荷指标为 $19.16\text{kWh}/\text{m}^2$ 。

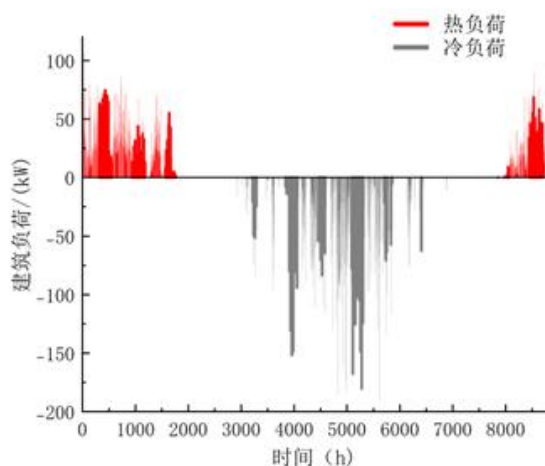


图 2 全年逐时建筑负荷

Fig.2 Hourly building load throughout the year

从结果也能发现, 成都地区全年的冷热负荷需求量较大, 导致全年空调系统的运行能耗大幅增加, 所需的电费增加, 造成能源的浪费设备使用的寿命缩短, 舒适度也会有所下降。

1.3 典型气象年气象参数

在建筑动态能耗模拟中, 气象参数的精度是影响负荷与能耗计算结果准确性的关键变量。为可靠评估成都地区建筑的能耗表现并优化其设计, 本文采用 Meteonorm 8.0 生成的典型气象年 (TMY) 数据作为模拟输入, 以确保气象条件的典型性与数据可靠性。

1.3.1 室外温度

从图 3 可以发现成都地区全年温度在 $0\sim 40^\circ\text{C}$ 之间, 波动的范围较大。供暖季平均室外温度为 $5\sim 8^\circ\text{C}$, 最低温度为 0.05°C , 冬季供暖需求量大。制冷季最高温度为 37°C 。近年来, 成都地区夏季极端高温天数不断增加, 夏季制冷需求越来越大。

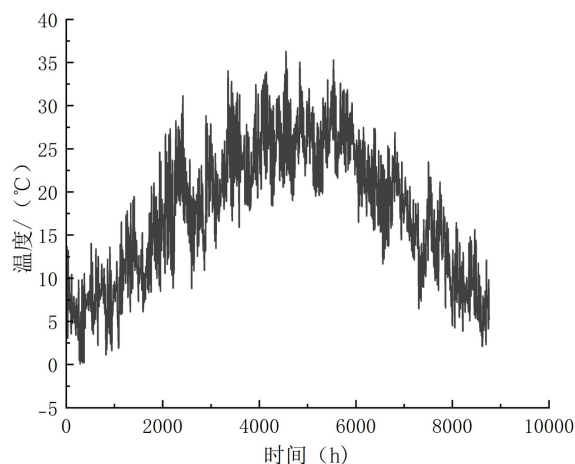


图 3 成都地区全年逐时室外温度

Fig.3 The hourly outdoor temperature throughout the year in the Chengdu area

1.3.2 太阳辐射强度

中国的太阳能资源通常按年太阳辐射总量划分为四类, 成都地区属于四类地区, 年太阳辐射总量约在 $3000\sim 4000\text{MJ}/\text{m}^2$ [8], 图 4 为成都地区全年逐月太阳辐射强度。

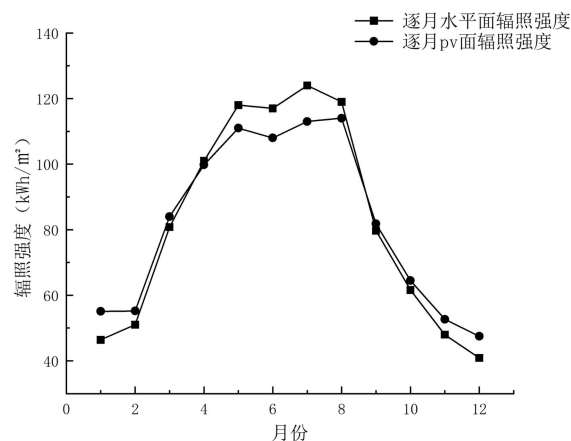


图 4 成都地区全年逐月太阳辐射强度

Fig.4 The monthly solar radiation intensity throughout the year in the Chengdu area

从图 4 可以看出七月份水平面辐射强度最大达到 $124\text{kWh}/\text{m}^2$, 8 月份 pv 面辐射强度最大达到 $114\text{kWh}/\text{m}^2$ 。成都地区太阳能资源较为贫乏, 若以太阳能资源为主进行供暖制冷会造成系统不稳定, 效率低下, 投资成本高回报率低等问题。故结合成都地区气候特点及空调需求, 提出空气源热泵与太阳能光伏复合的供暖制冷方案, 使空气能与太阳能结合进行互补, 在满足当地需求的情况下实现可再生能源的有效利用, 达到节能与舒适的并举。

2 空气源热泵与太阳能光伏复合系统构建

2.1 系统的构成

根据成都地区的太阳能资源特点,将太阳能光伏发电系统与空气源热泵系统相结合,前端采用太阳能光伏系统与电网电力智能调配的混合供电模式,后端则运用空气源热泵技术满足冬季供暖与夏季制冷需求。该系统主要由光伏组件、蓄电池、逆变器、空气源热泵、蓄热水箱、水泵、控制系统和末端装置组成。图5展示了空气源热泵与太阳能光伏复合系统的基本结构简化示意图。

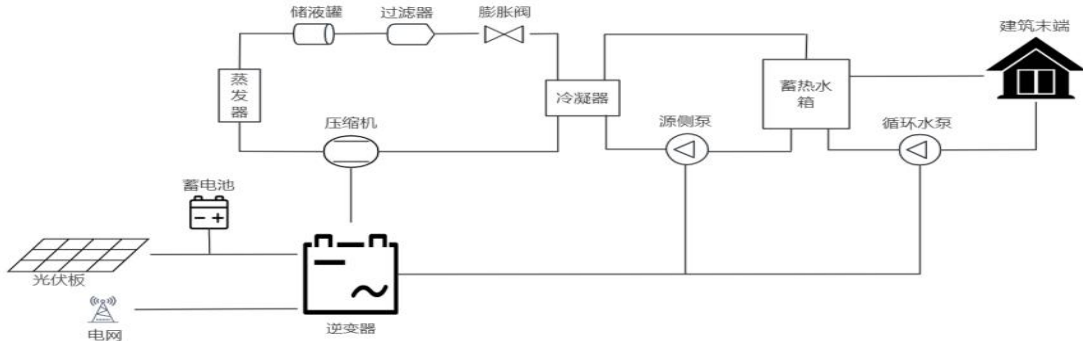


图5 空气源热泵与太阳能光伏复合系统结构

Fig.5 The structure of the photovoltaic - air source heat pump system

2.2 系统重要部件数学模型

2.2.1 光伏组件数学模型

光伏阵列的能量守恒关系可表述为:

$$E_{in} = E_e + E_{loss} \quad (1)$$

其中,

$$E_{in} = \tau \cdot G \cdot S_c \quad (2)$$

$$E_e = \eta_t \cdot G \cdot S_c \quad (3)$$

$$E_{loss} = (\tau - \eta_t) \cdot G \cdot S_c \quad (4)$$

式中: E_{in} 为入射到光伏组件的总太阳能, W; τ 为光伏玻璃表面对太阳光的综合透射吸收系数; G 为光伏板表面接收的太阳辐照度, W/m^2 ; S_c 为光伏组件总面积, m^2 ; E_e 为光伏阵列实际输出的电功率, W; η_t 为光伏电池的光电转换率; E_{loss} 为系统能量损失(光谱反射损失、材料吸收耗散、半导体非理想特性损耗、温度效应导致的效率衰减等), W。

光伏电池的光电转换效率(η_t)表示其将入射太阳光能量转化为电能的能力,是衡量电池性能的核心指标。其计算公式如式(5)所示。

$$\eta_t = \frac{P_{\max}}{G \cdot A} \times 100\% = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{G \cdot A} \times 100\% \quad (5)$$

伏复合系统的基本结构简化示意图。

本研究提出的空气源热泵与太阳能光伏复合系统采用以下的运行模式,系统的光伏组件将太阳能转换成直流电能,通过逆变器将光伏板收集到的直流电转换为与电网及系统兼容的交流电^[9],然后对复合系统内部(热泵机组、水泵等)进行供电,若有多余的电量通过并网方式输入到电力系统,当光伏发电的功率低到无法保证系统设备正常运行时,将开启市电动态补偿不足的功率。

式中: $P_{\max}$ 为输出最大功率, W; A 为电池的有效受光面积, m^2 ; V_{oc} 为开路电压, V; I_{sc} 为短路电流, A; FF 为填充因子。

2.2.2 空气源热泵机组数学模型

(1) 制热模式

制热模式下空气源热泵 COP 可表述如式(6)所示。

$$COP_h = \frac{Q_h}{P_h} \quad (6)$$

式中: COP_h 为制热模式下热泵性能系数; Q_h 为制热模式下热泵制热量, kW; P_h 为制热模式下热泵功率, kW。

空气源热泵制热工况下源侧吸收的能量可表述如式(7)所示。

$$Q_A = Q_h - P_h \quad (7)$$

式中: Q_A 为空气源热泵制热工况下源侧吸热量, kW。

制热模式下冷凝器、蒸发器出口流体温度如式(8)、式(9)所示。

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{Q_h}{m_{cf} C_f} \quad (8)$$

$$T_{eo} = T_{ei} + \frac{Q_A}{m_{ef} C_f} \quad (9)$$

式中: T_{co} 、 T_{ci} 分别为冷凝器出、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; m_{cf} 为冷凝器流体的质量流量, kg/s ; C_f 为流体比热量, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; T_{eo} 、 T_{ei} 分别为蒸发器出、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; m_{ef} 为蒸发器流体的质量流量, kg/s 。

(2) 制冷模式

制冷模式下空气源热泵 COP 可表述如式 (10) 所示。

$$COP_c = \frac{Q_c}{P_c} \quad (10)$$

式中: COP_c 为制冷模式下热泵性能系数; Q_c 为制冷模式下热泵制冷量, kW ; P_c 为制冷模式下热泵功率, kW 。

空气源热泵制冷工况下源侧释放的能量可表述如式 (11) 所示。

$$Q_R = Q_c + P_c \quad (11)$$

式中: Q_R 为空气源热泵制冷工况下源侧释放的能量, kW 。

制冷模式下冷凝器、蒸发器出口流体温度如式 (12)、式 (13) 所示。

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{Q_R}{m_{cf} C_f} \quad (12)$$

$$T_{eo} = T_{ei} + \frac{Q_C}{m_{ef} C_f} \quad (13)$$

式中: T_{co} 、 T_{ci} 分别为冷凝器出、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; m_{cf} 为冷凝器流体的质量流量, kg/s ; C_f 为流体比热量, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; T_{eo} 、 T_{ei} 分别为蒸发器出、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; m_{ef} 为蒸发器流体的质量流量, kg/s 。

3 系统运行模拟及结果分析

3.1 空气源热泵与太阳能光伏复合系统仿真模拟

空气源热泵作为一种新型的多功能一体化的空调系统,在夏热冬冷地区得到了推广运用。为分析空气源热泵与太阳能光伏系统对成都地区建筑能耗的影响,利用 TRNSYS 仿真软件搭建复合系统仿真模型。通过动态负荷模拟计算获得逐时冷热负荷曲线,据此进行设备容量匹配计算,最终选型的空气源热泵系统主要设备技术参数如表 2 所示。

表 2 系统设备参数

Table 2 System equipment parameters

设备名称	参数
空气源 热泵	额定制冷量: 161.25kW;
	额定制冷功率: 54.48kW
	额定制热量: 179.17kW;
	额定制热功率: 85.32kW
蓄热水箱	体积: 6.59m ³
循环水泵	额定流量: 30.79m ³ /h; 额定功率: 1.8kW

在太阳能光伏发电系统中,常见的太阳能电池板有单晶硅、多晶硅、非晶硅、薄膜技术^[10]。从技术成熟度与能效综合考量,本文选用单晶硅发电板。将光伏板装置在建筑物屋顶,可用面积为 425m²,按照《光伏电站设计规范》(GB 50797-2012)中的规定进行安装,倾斜角取 30°,光伏组件具体结构参数如表 3 所示。

表 3 光伏板组件的基本参数

Table 3 Basic parameters of photovoltaic panel modules

参数	数值
标准组件工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	42 $\pm$ 2
峰值功率温度系数/ $^{\circ}\text{C}$	-0.36%
最佳工作电压/V	42.05
最佳工作电流/A	13.08
开路电压/V	49.88
短路电流/A	14.01

3.2 模拟运行结果分析

本文基于设备运行参数与系统耦合特性,采用 TRNSYS 动态仿真平台构建了相关空调系统模型,以成都市某多层居住建筑为例进行空调系统的全年运行特性。通过集成 TRNSYS 内置的 Meteonorm 7 气象数据库,提取成都市典型气象年数据作为边界环境参数。

基于建筑基本概况并根据建筑负荷等设置系统相关参数,对空气源热泵与太阳能光伏复合系统进行模拟并分析其光伏发电量、逐月能耗、系统能效比等。

3.2.1 能耗分析

空气源热泵系统的能耗主要集中于水泵和空气源热泵机组,本文主要是以光伏发电来抵扣水泵以及空气源热泵机组所耗的电量,空气源热泵系统主要机组能耗、光伏发电量如图 6、7 所示。

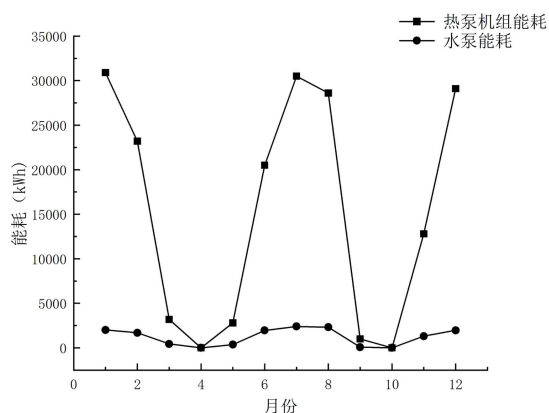


图 6 空气源热泵及水泵逐月能耗

Fig.6 Monthly energy consumption of air source heat pumps and water pumps

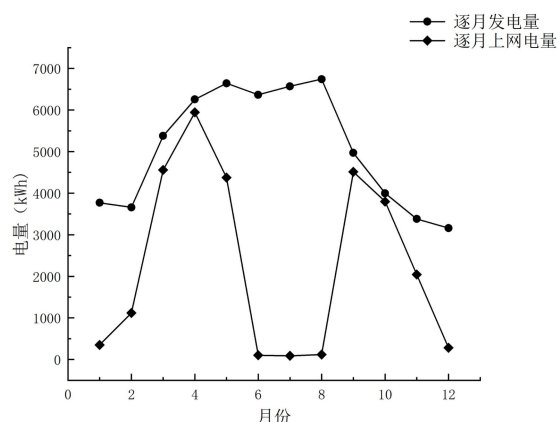


图 7 太阳能光伏逐月发电量及逐月余电上网量

Fig.7 The monthly power generation of photovoltaic power and the monthly surplus power fed to the grid

受工作原理、运行条件等的影响,从图 6 可以看出空气源热泵的总能耗远高于水泵总能耗,空气源热泵的总能耗量为 182578kWh,水泵的总能耗为 14544kWh。受室外温度和季节的影响,各月份的系统能耗相差较大。空气源热泵系统供暖季各月份的总能耗集中在 14095kWh-32889kWh 之间(3 月份所需的供暖天数较少),制冷季各月份的总能耗集中于 22460kWh-32924kWh 之间(5 月份和 9 月份所需的制冷天数较少)。图 7 为太阳能光伏的逐月发电量及逐月余电上网量,受日照时长、太阳高度角等的影响,夏季的光伏发电量较其他季节高,8 月份时发电量达到最高 6741kWh,总发电量为 60891kWh。年总余电上网量为 27289kWh,4 月份由于辐射量较大且系统运行天数较少,所以该

月余电上网量达到最大为 5943kWh。

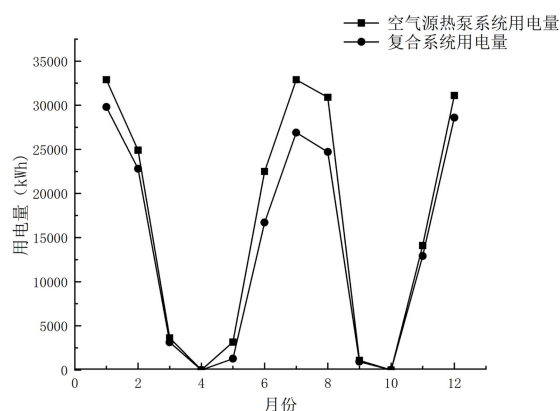


图 8 两种系统逐月用电量

Fig.8 Monthly electricity consumption of the two systems

图 8 为空气源热泵系统与复合系统年用电量的对比图,由图 8 可以看出系统在制冷季和供暖季所需的用电量较大(其他月份供暖、制冷天数较少或不进行供暖、制冷)。空气源热泵系统的年总用电量为 197122kWh。复合系统的年总用电量为 167790kWh。相比较之下,复合系统比空气源热泵系统每年可以节约 14.87% 的用电量。

3.2.2 系统能效比分析

空调系统的能效比是衡量其制冷或制热效率的核心指标,也是评估系统节能性和经济性的主要指标,表示为系统输出的有效热量(或冷量)与输入的电功率之比。经过计算可以得出空气源热泵系统以及复合系统的逐月能效比,如图 9 所示。

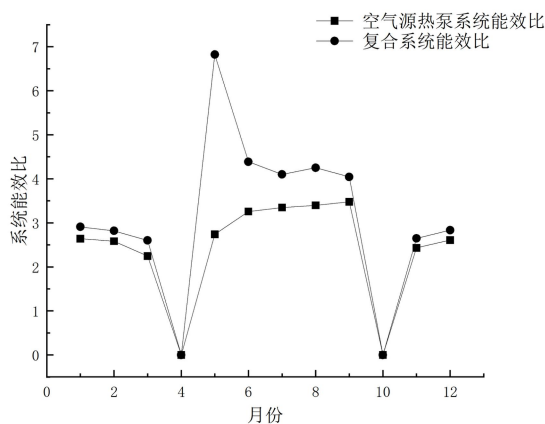


图 9 两种系统逐月能效比

Fig.9 Monthly energy efficiency ratios of the two systems

从图 9 可以看出复合系统每月的能效比均高于纯空气源热泵系统能效比,复合系统年平均能效

比为 3.11, 纯空气源热泵系统年平均能效比为 2.39。5 月份时复合系统能效比较高, 原因是 5 月份时太阳能辐射量大, 系统需要运行的天数较少, 光伏发电对设备供电较充足, 市政补电量少, 系统的耗能低, 所以能效比较高。

4 建筑运行阶段碳足迹分析

采用基于过程的计算方法, 建筑运行阶段碳排放量应为建筑水电系统、业主的其他用能活动, 以及维修维护、加固改造的碳排放量之和, 并扣除可再生能源系统的能源替代减碳量与建筑碳汇系统的固碳量^[11]。其中, 建筑运行阶段的计算公式如式 (14) 所示。

$$E^{ope} = E^{hvac} + E^{hwt} + E^{lae} - E^{ren} - E^{sink} \quad (14)$$

式中: E^{hvac} 为暖通空调系统的碳排放量, tCO_2e ; E^{hwt} 为生活热水系统的碳排放量, tCO_2e ; E^{lae} 为照明与电梯系统的碳排放量, tCO_2e ; E^{ren} 为可再生能源替代的减碳量, tCO_2e ; E^{sink} 为建筑碳汇系统的固碳量, tCO_2e 。

在本文中主要对暖通空调系统碳排放量和可再生能源替代的减碳量进行计算。

4.1 系统碳足迹分析方法

空调系统碳足迹是指系统在运行过程中直接或间接产生的温室气体排放总量, 通常以二氧化碳当量 (CO_2) 为单位来衡量。

首先要设定系统核算边界然后确认边界内系统的温室气体排放源。温室气体的排放分为三个范围, 在 HVAC 系统中范围一是直接排放, 是指在边界内系统运行直接产生的燃烧化石燃料产生的温室气体排放, 范围二是指因系统使用外购的电力、热力或蒸汽而产生的排放, 范围三是指组成系统的设备、构件、管道等其他材料从生产到运输、使用再到报废回收使用全生命周期所产生的温室气体排放。其中范围二、三是间接排放, 通常, 范围三的计算难度较大, 可选择计算。为确保碳足迹分析的完整性需明确各个范围的界定, 相互比较的空调系统的碳足迹分析必须涵盖相同的范围遵循一致性的原则^[12]。在本文中的系统主要考虑范围二中的电力因素产生的碳排放。

4.2 系统碳排放核算

空调系统碳排放量计算公式如式 (15) 所示。

$$E^{hvac} = \sum_j q_j^{hvac,e'} EF_j^{e'} T^{ope} \quad (15)$$

式中: $q_j^{hvac,e'}$ 为以热值计量的暖通空调系统对能源 j 的年均消耗量, kWh; $EF_j^{e'}$ 为单位热值能源 j 的碳排放因子, kg/kWh; T^{ope} 为建筑使用寿命, 年。

根据根据碳排放计算规则及相关要求, 华中区域电网排放因子取 $0.5703kg/kWh$, 按《民用建筑设计通则》(GB 50352) 建筑使用寿命取 50 年。

根据式 (15) 可求出纯空气源热泵系统在建筑使用寿命周期内的碳排放量为 $5621tCO_2e$, 光伏-空气源热泵系统的碳排放量为 $4785tCO_2e$ 。由于复合系统包括光伏发电系统, 在建筑运行阶段还应考虑其余电上网所产生的减碳量, 根据计算可得出在建筑使用寿命周期内的总减碳量为 $778tCO_2e$ 。系统在建筑运行阶段碳总排放量如图 10 所示。

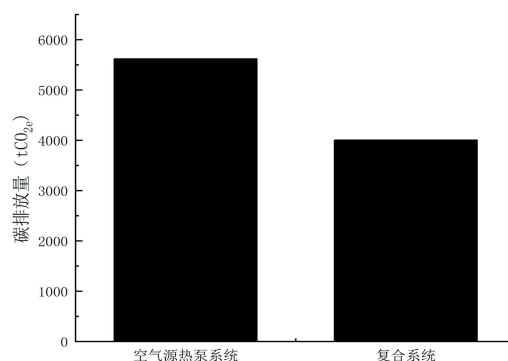


图 10 建筑运行阶段暖通系统总碳排放量对比

Fig.10 Comparison of the total carbon emissions of the HVAC system during the building operation stage

由图 10 可以看出在建筑运行阶段复合系统碳排放量较空气源热泵系统碳排放量降低了 28.73%, 这一结果表明光伏-空气源热泵系统的节能减排效果显著。

5 结论

(1) 在太阳能光伏辅助下, 空气源热泵与水泵等机组得以部分利用光伏电力, 使得复合系统的年能耗相较于单一空气源热泵系统降低了 14.87%。

(2) 复合系统的年平均能效比达到 3.11, 较单一空气源热泵系统提升了 23.15%, 表明其在实际运行中具备更优的能源利用效率与适用性。

(3) 该复合系统实现了可再生能源的高效整

合利用。在建筑运行阶段,太阳能光伏系统贡献的减碳量为1614tCO_{2e},使复合系统相较于单一空气源热泵系统碳排放减少28.73%,凸显出显著的碳减排效益。

参考文献:

- [1] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等.双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
- [2] 张思亮,祁麟童,曲浩维,等.光伏发电辅助空气源热泵供暖系统研究[J].综合智慧能源,2023,45(12):10-19.
- [3] BADIEI A, GOLIZADEH AKHLAGHI Y, ZHAO X, et al. A chronological review of advances in solar assisted heat pump technology in 21st century[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020,132:110132.
- [4] Liu Z Q, Bao Y W. Design Issues and Contribution to Building Energy of Photovoltaic Roof[J].Advanced Materials Research, 2011,250:3035.
- [5] Madessa, Habtamu B. Performance Analysis of Roof-mounted Photovoltaic Systems-The Case of aNorwegian Residential Building[J]. Energy Procedia, 2015,83:474-483.
- [6] EMMI G, ZARRELLA A, DE CARLI M. A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151:386-399.
- [7] 徐政,王哲,李光明.光伏-热泵型与集热型太阳能污泥干化对比研究[J].太阳能学报,2020,41(8):185-191.
- [8] 牛晓娜.基于多元统计分析的绿色电力系统及其协调优化研究[D].济南:山东大学,2011.
- [9] 王凯.太阳能光伏发电电网技术探究[J].低碳世界, 2018,(12):72-73.
- [10] 伍品,王智超,杨英霞,等.长江流域居住建筑空气源热泵结合太阳能屋顶的应用研究[J].暖通空调,2020, 50(5):10-13.
- [11] 张孝存,王凤来.建筑工程碳排放计量[M].北京:机械工业出版社,2022:98-99.
- [12] 樊瑛,龙惟定.HVAC系统的碳足迹分析及环境评价指标[J].暖通空调,2009,39(12):53-56.
- (上接第669页)
- [10] Chen H, Zhang H, Li M, et al. Experimental investigation of a novel LCPV/T system with micro-channel heat pipe array[J]. Renewable Energy, 2018,115:773-782.
- [11] Zhang T, Yan Z W, Xiao L, et al. Experimental, study and design sensitivity analysis of a heat pipe photovoltaic/thermal system[J]. Applied Thermal Engineering, 2019,162:114318.
- [12] Yu M, Diallo T M O, Zhao X, et al. Analytical study of impact of the wick's fractal parameters on the heat transfer capacity of a novel micro-channel loop heat pipe[J]. Energy, 2018,158:746-759.
- [13] Emam M, Soliman A M A, Abdelrahman M A, et al. Performance improvement of single-junction photovoltaic systems using a new design of a heat pipe-based heat sink: Experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2023,219:119653.
- [14] Shahveredian M H, Sohani A, Sayyaadi H. Water-energy nexus performance investigation of water flow cooling as a clean way to enhance the productivity of solar photovoltaic modules[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,312:127641.
- [15] Ibrahim A, Othman M Y, Ruslan M H, et al. Performance of Photovoltaic Thermal Collector (PVT) With Different Absorbers Design[J]. WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT, 2009,5(3): 321-330
- [16] Fudholi A, Sopian K, Yazdi M H, et al. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78:641-651.
- [17] 袁朝阳,陶乐仁,虞中旸.初始水温对空气源热泵热水器系统性能的影响[J].制冷学报,2017,38(6):73-79.
- [18] 杨旭东,刘孝敏,刘叶瑞,等.PV/T耦合双源热泵供暖系统运行控制策略与示范应用[J].农业工程学报,2025, 41(11):243-255.
- [19] 褚磊驰,赵善国,高远志,等.光伏直驱PV/T双源热泵热水系统性能研究[J].太阳能学报,2023,44(5):188-194.
- [20] Cui Y, Tian S, Zhu J. Experimental study of liquid optical filtration PV/T modules with different working fluids[J]. Renewable Energy, 2025,246:122893.