

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-179-11

西藏地区太阳能-双源热泵复合系统供热性能仿真

王晓谦¹ 高 伟² 周世玉¹

(1. 山东建筑大学 济南 250101;

2. 厦门合立道工程设计集团股份有限公司 厦门 361000)

【摘 要】 随着能源消耗的持续增加和环境问题的日益严重, 开发和利用可再生能源成为了当今世界的一项重要议题。太阳能作为一种清洁、可再生的能源, 其在供暖和制冷系统中的应用受到了广泛关注。呈现一种太阳能-空气源热泵辅助水源热泵的复合供热系统, 以应对系统性能下降的问题。利用 TRNSYS 软件建立太阳能-空气源辅助水源热泵的复合系统和传统的太阳能-空气源热泵系统, 模拟这两种系统在供暖季的运行情况。结果表明: 在 12 月 25 日复合系统比传统系统日平均 COP 高 19.88%, 耗电量减少 278.08kWh, 并且复合系统全年运行中太阳能集热器供热量占总供热量的 51.8%, 所有热泵供热量占 48.2%。此外, 对系统能效比 (COP_{sys})、逐月耗电量进行对比分析, 与太阳能-空气源热泵传统系统相比, 该复合系统的能效比提高了 25.78%, 电耗降低了 22.61%。整体而言, 该复合系统节能效果显著, 这一研究为西藏地区太阳能热泵系统的设计和运行提供了理论依据和技术支持。

【关键词】 TRNSYS; 太阳能; 空气源热泵; 水源热泵; COP; 能耗
中图分类号 TU833 文献标志码 A

Simulation of the Heating Performance of a Solar-Dual Source Heat Pump Composite System in the Tibetan Region

Wang Xiaoqian¹ Gao Wei² Zhou Shiyu¹

(1.Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101;

2.Xiamen Helidao Engineering Design Group Co., Ltd, Xiamen, 361000)

【Abstract】 With the continuous increase in energy consumption and the escalating severity of environmental issues, developing and utilizing renewable energy has become an important global issue. Solar energy, as a clean and renewable form of energy, has received widespread attention for its applications in heating and cooling systems. This study presents a solar-assisted air source heat pump coupled with water source heat pump composite heating system to address the problem of system performance decline. Using TRNSYS software, models were built for both the solar-air source assisted water source heat pump composite system and the traditional solar-air source heat pump system to simulate their operation during the heating season. The results show that on 25 December the composite system had a 19.88% higher average daily COP than the conventional system and consumed 278.08kWh less electricity, and that the composite system operated throughout the year with solar collectors supplying 51.8% of the total heat and all the heat pumps supplying 48.2% of the total heat. In addition, comparisons were made between the two systems' coefficient of performance (COP_{sys}) and monthly electricity consumption. The results indicated that compared to the traditional solar-air source heat pump system, the COP of the composite system improved by 25.78% while electricity consumption decreased by

作者简介: 王晓谦 (2000.09-), 男, 硕士研究生, 主要从事可再生能源建筑应用研究, E-mail: 17660107818@163.com

通讯作者: 高 伟 (1987.06-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: 330376202@qq.com

收稿日期: 2024-06-24

22.61%。Overall, this composite system demonstrated significant energy savings, providing theoretical support and technical assistance for the design and operation of solar thermal pump systems in Tibet.

【Keywords】 TRNSYS; Solar energy; Air source heat pump; Water source heat pump; COP; Energy consumption

0 引言

当今世界,能源问题和节能减排问题是关系到人类生存与发展的全球性热点问题^[1]。近年来,我国在进行传统能源保供的同时,也在积极加大清洁能源的转型发展^[2-4]。随着我国城市化的不断深入,能源问题也随之出现,消费水平与 CO₂ 的排放量都在持续地发生变动。《中国建筑能耗与碳排放研究报告》(2023 年)^[5]所提供的数据呈现出,在 2021 年,中国的房屋建筑在其整个生命周期中的能源消耗达到了 19.1 亿吨标准煤(tce), 占国家能源总消费量的 36.3%,同时,与能源消耗相关的碳排放总量中,房屋建筑行业在整个生命周期内产生的二氧化碳排放量高达 40.7 亿吨,占据了全国总排放量的 38.2%。

空气作为一种永不枯竭的天然可再生能源,其空气源热泵采用空气作为再生能源,并与电能相结合,确保在运行过程中不会对用户造成污染。因此,它被视为国家大力推广的一种绿色环保的可再生能源设备。同时,该技术的能量转换效率较高,能够在消耗较少能源的前提下,实现热能转换工作。因此,空气源热泵得到了世界各地的推崇,并被认为是推动可持续发展战略的关键途径之一。

水源热泵是一种高效的能源转换技术,它利用水体稳定的温度特性,通过热泵机组将水体中的低品位热能提升至高位,进而实现供暖或制冷的目的。相较于传统的空气源热泵,水源热泵具有更高的运行效率和经济性,因为它不受季节和气候的影响,全年都能保持稳定的运行状态。此外,水源热泵的运行过程中不会产生任何污染物,是一种非常环保的技术。

西藏地区是我国海拔最高的高原地区。青藏高原昼夜温差大,受太阳光辐射时间长,是太阳能光资源丰富的地方^[6,7]。在西藏地区,当地居民的建筑能够最大限度地利用当地丰富的太阳能储备,以实现冬季的供暖需求。这一措施不仅有效地解决了供暖所需的能源问题,同时也有助于生态环境的保护和改善,从而提升了人们的生活品质。同时,利用太阳能进行供暖不仅可以减少建筑的供暖费用,

还能降低碳排放量,并在实现碳达峰和碳中和过程中起到关键作用^[8,9]。鉴于当地高污染、高能耗的供暖系统无法满足实际需求,因此利用空气源热泵辅助太阳能供暖系统显得尤为重要。祝彩霞^[10]对川西藏区的太阳能与空气源热泵供暖系统的运行优化进行了深入地研究,将供暖季节总能耗最小化作为优化的目标,将热泵的启动停止信号作为优化的关键变量。经过优化后,相较于传统的温差控制方式,节能率提升了 8.8%,平均每天能节省 1.9kWh 的电量。宋航^[11]在对太阳能-空气源热泵双联供热系统在拉萨地区的应用进行研究时,发现该系统在提升住宅建筑供热效率方面表现出色。通过 TRNSYS 软件模拟,系统在整个供暖季节的平均制热性能系数(COP_{sys})达到 4.21,此项研究的成果证实了太阳能空气源热泵双联供热系统在高海拔寒冷地区的可行性。杨方德^[12]研究西藏地区的民宅建筑在冬季使用太阳能和空气源热泵系统进行供暖的情况,研究内容包括系统能耗、全生命周期内的投资运行单价以及碳排放情况。以西藏某典型地区为例,对比太阳能和热泵组合供暖系统的节能效果和经济性。研究结果表明,太阳能与空气源热泵供暖系统具有低运行能耗、较低运行成本以及减少碳排放的优势。

目前研究多集中于在高原地区利用太阳能和空气源热泵进行研究,对太阳能-空气源辅助水源热泵系统的研究较少。本文以西藏自治区日喀则市某养老院建筑为例,采用 TRNSYS18 模拟仿真,建立“太阳能-空气源辅助水源热泵复合供热模型”。为给高原高寒地区的供热系统设计提供宝贵的经验,深入研究系统的不同月份电耗以及系统平均能效比(COP)参数。通过对这些关键指标的分析,为该地区的供热解决方案提供借鉴。

1 工程概况

1.1 建筑信息

本文选取日喀则市某养老院中的某老年公寓建筑为模拟对象。日喀则地处青藏高原,全年晴多雨少,日照充足。日照持续时间受地理纬度的制约,

并且季节性地变化,由冬至夏增加,其中夏至太阳持续时间最长,由夏至至冬至减少,冬至最短。在一年时间内,阳光照射 3399 小时,占据 73%的时间百分比。同时,太阳也释放出总计为 7029MJ/m² 的辐射能量,表明太阳辐射较强。

日喀则市属于严寒地区(B),不同季节的室外温度区间比较大。年平均气温 7.6℃,年极端最低气温 -20℃,最高气温 29.8℃,1 月平均气温

-1.3℃,7 月平均气温 15.4℃。该地区冬季寒冷且持续时间较长,冬季供暖期为 10 月 15 日~次年 3 月 31 日。夏季持续时间短,供冷需求时间较少。此居住建筑总共有三个楼层,第一层的层高为 3.2 米,而二三层则是 3.1 米。建筑面积约为 1561.41 平方米。围护结构的构造和维护结构热工参数取值,参考表 1 和表 2。

表 1 建筑物围护结构

Table 1 Building envelope

建筑物	结构
外墙	10mm 水泥砂浆, 300mm 混凝土实心砌块, 10mm 水泥砂浆
内墙	20mm 水泥砂浆, 200mm 混凝土实心砌块, 20mm 水泥砂浆
屋面	20mm 水泥砂浆, 120mm 钢筋混凝土, 10mm 水泥砂浆
楼板	20mm 水泥砂浆, 120mm 钢筋混凝土, 10mm 水泥砂浆
外窗	铝合金单框双玻节能窗

表 2 维护结构热工参数

Table 2 Thermal parameters of the maintenance structure

材料	导热系数λ/(W/m ² ·K)	修正系数α	修正后的导热系数λ/(W/m ² ·K)	热阻 R(K·m ² /K)
水泥砂浆	0.93	1	0.93	0.02
混凝土实心砌块	1.45	1	1.45	0.34
钢筋混凝土	1.74	1	1.74	0.07

1.2 逐时负荷计算

为了对所研究的建筑物进行负荷计算,本研究选用 DeST 软件。通过 DeST 软件进行建筑的模拟,得出建筑立面图如图 1 所示。经过计算,得到空调逐时负荷变化图表,如图 2 所示。

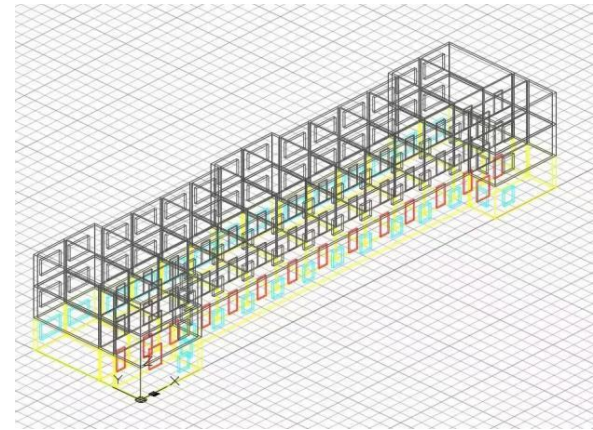


图 1 DeST 软件建筑三维立面图

Fig.1 3D elevation of the building with DeST software

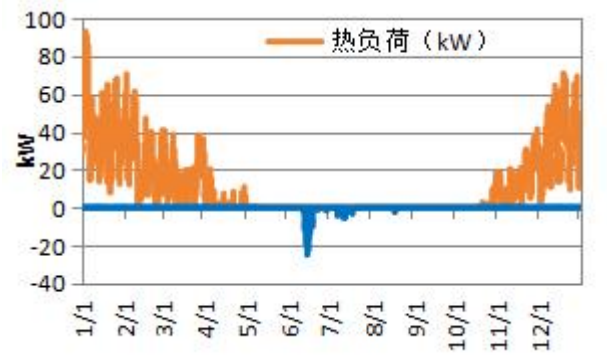


图 2 建筑全年空调负荷分布图

Fig.2 Distribution of air-conditioning loads in the building throughout the year

经过 DeST 软件计算,得出的空调全年逐时负荷分布情况如图 2 所示,其中负值为夏季冷负荷,正值为冬季热负荷。由于夏季负荷较小,供冷需求时间短,故不考虑建筑用冷需求:计算得到冬季最大热负荷为 93.06kW,全年累计热负荷为 44595.03kWh。

2 系统模型

2.1 系统设计

本文案例为日喀则市某养老院中的某一栋公寓建筑,共3层,每层14间房间,每间2人。太阳能-空气源辅助水源热泵复合供暖系统既能对建筑房间供暖,也能提供生活热水,满足居民日常生活所需的生活热水供应。确定室内设计温度为18℃,供暖温度为45℃。

在太阳辐射强度充足的情况下,太阳能集热系统独自发挥作用。当太阳辐射强度不足时,太阳能集热系统将与空气源热泵一起工作。如果遇到恶劣天气或其他极端情况,空气源热泵也可以单独投入使用。夜间运行时,太阳能集热器会停止工作,并随着温度下降,空气源热泵的效率也会下降。因此,出于室内供暖需求的增加,增添一台利用低温水的水源热泵联合空气源热泵一起提供室内供暖和生活热水。

太阳能集热器放置在建筑物屋顶,根据《太阳能供热采暖工程技术标准(GB 50495-2019)》^[13]中的规定模块安装。为了确定太阳能集热器的最佳面积,进行了详细的动态模拟计算。通过计算得出,太阳能集热器总集热面积应设置为420m²。具体的计算公式见式(1)。

$$A_c = \frac{86400 Q_j f}{J_T \eta_{cd} (1 - \eta_L)} \quad (1)$$

式中: A_c 为系统的集热器总面积, m²; Q_j 为太阳能集热系统设计负荷, W; f 为太阳能保证率, %; J_T 为当地集热器采光面上的12月平均日太阳辐照量, J/(m²·d); η_{cd} 为基于总面积的集热器年平均集热效率, %; η_L 为贮热装置和管路的热损失率, %。

集热器倾角的取值范围应为当地纬度加减10°^[14]。而日喀则市位于北纬29°~30°之间,因此集热器倾角的合理取值范围大约在20°~40°。综合考虑后,系统中太阳能集热器的倾角被确定为20°。

根据《建筑给水排水设计标准(GB 50015-2019)》^[15],该公寓全日集中热水供应系统的设计小时耗热量可以通过公式(2)来计算,而每人每日的生活热水使用量设定为55L。

$$Q_h = K_h \frac{m q_r C (t_r - t_l) \rho_r}{T} C_r$$

式中: Q_h 为设计小时耗热量, kJ/h; K_h 为小时变化系数,参考标准值取3.2~4.8; m 为用水人数; q_r 为热水用水定额, L/(人·d); C 为水的比热, kJ/(kg·℃),取4.187kJ/(kg·℃); t_r 为设计热水的温度,℃,取60℃; t_l 为当地冷水温度,℃,地下水5℃; ρ_r 为热水密度, kg/L; T 为每日热水的使用时间, h; C_r 为热水供应系统的热损失系数,取1.10~1.15。

根据《民用建筑太阳能热水系统应用技术标准(GB 50364-2018)》^[16],每日所需热量按公式(3)计算。

$$Q_w = q_r m b_1 \quad (3)$$

式中: q_r 为热水用水定额, L/(人·d); m 为计算用水人数; b_1 为同日使用率。

本案例规定热水使用时间为每日的07:00~24:00。热水使用多集中在晚20:00~22:00,供水温度为60℃。某典型日的逐时热水用水比例分布如图3所示。

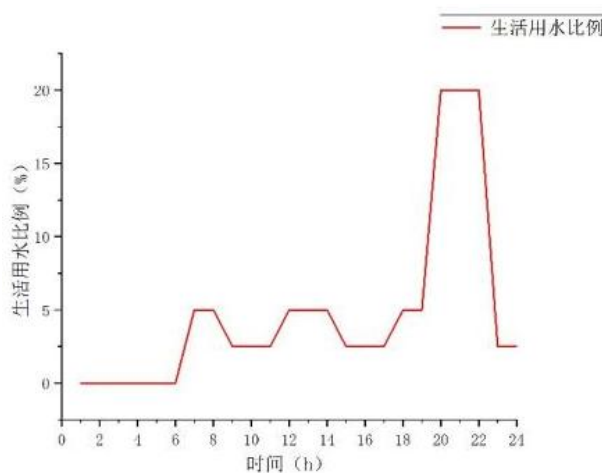


图3 逐时热水用水比例分布图

Fig.3 Distribution of the proportion of water used for hot water on an hourly basis

注:该生活用水比例指的是每小时用水量占全天总用水量的比例。例如,早上7:00~8:00这一小时段的用水量占全天用水量的5%。

该系统选择蓄热水箱的大小应以匹配空气源热泵机组为准,并根据《太阳能供热采暖应用技术手册》对蓄热水箱容积进行校核。通过合理选择蓄热水箱规格参数,可以提高系统的效率和性能,实现可靠的供暖。

根据动态负荷模拟结果, 选取相匹配的供热系统设备, 设备性能参数如表 3 所示。

表 3 供热系统主要设备参数

Table 3 Parameters of the main equipment of the heating system

设备	性能参数	数量
空气源热泵机组 1	额定制热量: 36kW	1 台
	额定制热功率: 10.8kW	
空气源热泵机组 2	额定制热量: 142kW	1 台
	额定制热功率: 40.4kW	
集热水箱	容积: 42m ³	1 个
缓冲水箱	容积: 25m ³	1 台
水源热泵	额定制热量: 57kW	1 台

2.2 仿真模型

根据供热系统原理图及相应的参数设置, 利用 TRNSYS 仿真软件模拟建立一个结合太阳能、空气源以及水源热泵的复合供暖系统模型。

为了使系统能够根据天气状况和蓄热水箱的温度自动切换工作模式, 需要设计并集成一个控制系统。这个系统包含多个模块, 包括太阳能集热器、水泵、蓄热水箱、热泵、计算器、气象模块、控制器和显示器等。首先, 获取日喀则市的气象数据, 并利用 Type15-2 模块将这些数据导入到系统模型中。系统的控制逻辑由 Type2b 控制器模块来实现, 温差控制器根据接收到的气象信息和蓄热水箱的温度, 通过发送简单的二进制信号 (“0” 表示关闭, “1” 表示开启) 来控制各个设备的启动和停止。同时, 将 DeST 软件计算得出的建筑负荷数据导入到 TRNSYS 软件中的 Type9e 数据读取模块中, 根据这些数据进行精确的运行模拟。

运用系统设计、操作模式和控制逻辑, 将所有的模块进行连接, 建立太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统和太阳能-空气源热泵传统系统的仿真模型。

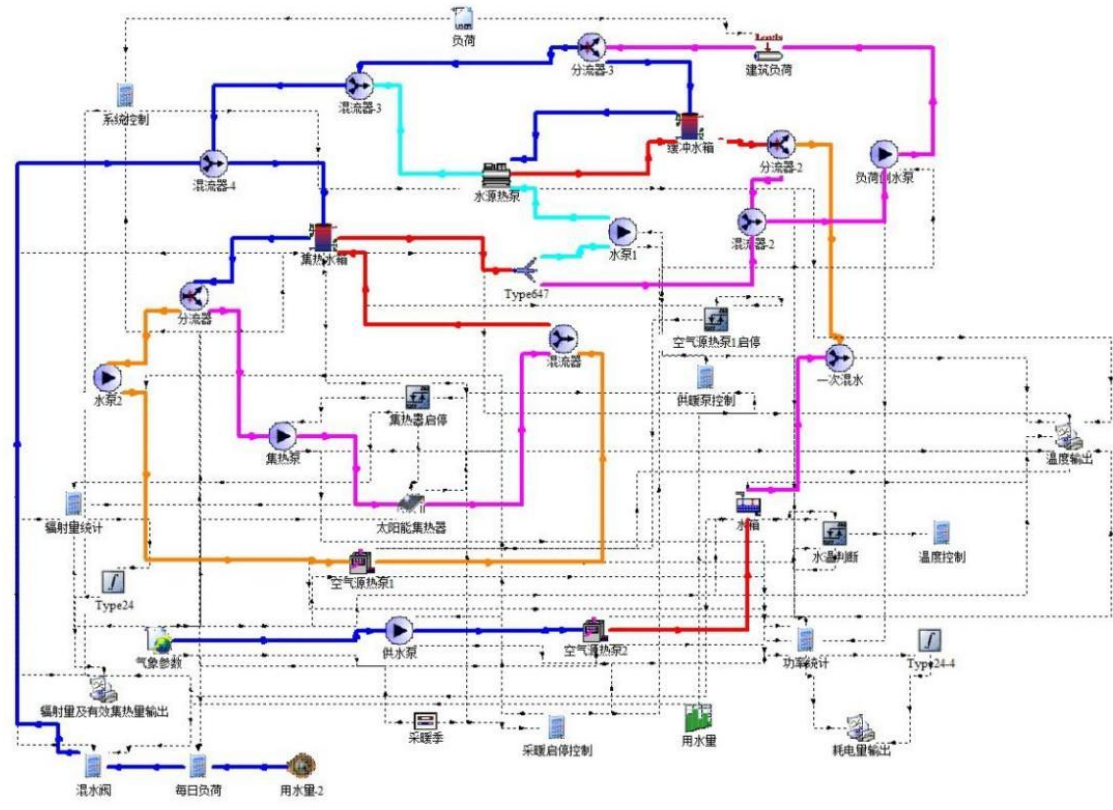


图 4 太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统

Fig.4 Solar-air source heat pump assisted water source heat pump composite system

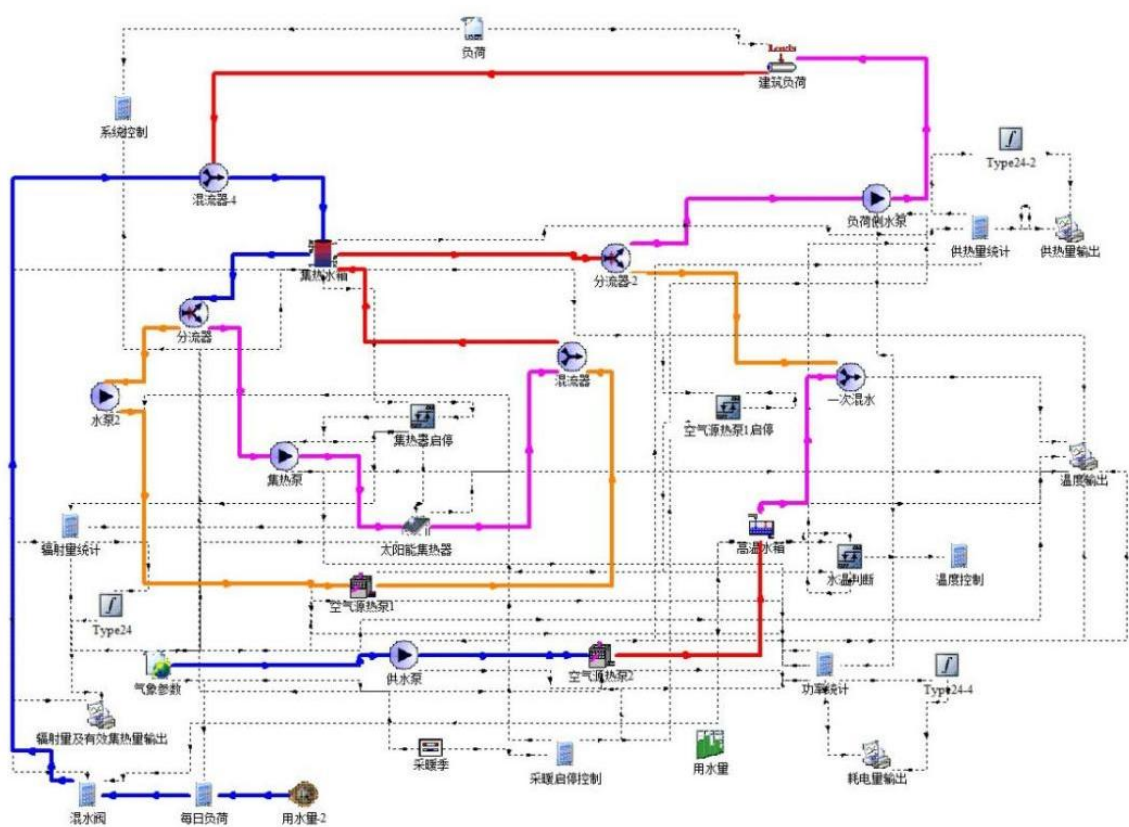


图 5 太阳能-空气源热泵传统系统

Fig.5 Solar-air source heat pump conventional system

在上述模型中，设定运行策略如下：

供热系统有三种工作模式可选择：独立太阳能集热器提供制热模式（模式 1）、太阳能与空气源热泵联合供热模式（模式 2）以及水源热泵与集热水箱联合供热模式（模式 3）。在第 3 种运行模式中，系统的运行时间是从晚上 6 点开始，一直持续到次日上午 8:00，此时关闭空气源热泵 1，开启水源热泵，水源热泵从集热水箱提取热量供应系统。在 8:00-18:00 时间段内，开启模式 1 和模式 2。模

式 3 结束后，模式 2 开始运行。当太阳辐射增强时，太阳能集热器会开始工作。此时，太阳能集热器的出水温度与集热水箱出水温度之间的温差超过了 8℃。尽管太阳能集热器开始发挥作用，但由于热量不足，集热水箱供水温度仍然低于 50℃。因此，需要借助空气源热泵作为辅助热源来维持整个系统的正常运行。在集热水箱供水温度超过 55℃时，模式 1 运行，此时系统所需的热量完全由集热器收集的太阳辐射能量提供。

表 4 各控制策略

Table 4 Each control strategy

运行策略	控制策略
集热器循环控制器 (type2b)	当太阳能集热器的出口温度和集热水箱出口温度之间的温差超过 8℃时，系统启动集热泵
水箱水温判断控制器 (type2b)	当高温水箱中的水温超过 65℃时，则水温判断控制器向空气源热泵机组 2 发送关闭信号；反之，若高温水箱内的水温低于 23℃时，则控制空气源热泵机组 2 启动
空气源热泵机组 1 控制器 (type2b)	在传统系统中，若集热水箱的供水温度不高于 50℃时，启动空气源热泵 1；而供水温度超过 55℃时，则关闭空气源热泵 1
系统补水策略	集热水箱和高温水箱的补水通过补水阀流入的自来水来实现

在空气源热泵机组 1 控制器控制策略中，白天空气源热泵 1 正常运行，到了夜晚，由于气温降低，

空气源热泵效率下降，因此，系统会选择关闭空气源热泵 1，以避免低效运行导致的能源浪费。

水源热泵 (type225) 运行策略:

在冬季晴朗的白天下, 太阳能集热器能够有效吸收太阳辐射, 加热储存在集热水箱中的水, 同时, 由于白天外界气温相对较高, 空气源热泵能够从外界空气中获取足够的热能用于建筑供暖和生活热水的供应。但到了夜晚, 外界温度下降, 空气源热泵 1 和空气源热泵 2 的效率随之降低, 此时空气源热泵 1 关闭, 水源热泵便发挥作用。水源热泵从集热水箱中提取热量, 单独进行供暖, 以保持室内温度; 同时与空气源热泵 2 联合, 共同提供生活热水。当第二天太阳升起, 气温回升, 水源热泵便停止工作, 太阳能集热器和空气源热泵 1 重新开始工作, 继续加热集热水箱中的水, 形成一个连续的供热循环, 保证了整个供暖季节的供热需求。

3 供热系统主要性能分析

为了准确评估太阳能-空气源热泵结合水源热泵系统在冬季的运行效能, 有必要制定一套综合评价体系, 涵盖系统的运行效率、能源效率和居住舒适性^[17]。这套评价体系旨在量化系统在实际操作中的表现, 并为高原地区制定相关技术规范提供实证基础。通过对这些关键性能指标的分析, 可以全面理解系统如何在不同环境条件下运作, 并据此优化系统设计, 确保其在提供稳定供热的同时, 也能保持高效和经济。

COP_{sys} 表示整个系统的性能, 计算为系统总供热量与总功耗的比率^[18], 如式 (4) 所示。

$$COP_{sys} = \frac{\sum Q}{\sum W} \quad (4)$$

式中: $\sum Q$ 为总供热量, kWh; $\sum W$ 为总功率, kWh。

总供热量为热泵的加热能力和生活热水产量的总和, 如式 (5) 所示。

$$\sum Q = Q_{hp} + Q_{DHW} \quad (5)$$

式中: Q_{hp} 为热泵的供热量, kWh; Q_{DHW} 为热水热量, kWh。

总功率消耗计算为空气源热泵、水泵和水源热泵的功率消耗之和, 如式 (6) 所示。

$$\sum W = W_{ashp} + W_{pump} + W_{wshp} \quad (6)$$

式中: W_{ashp} 为空气源热泵功率消耗, kWh; W_{pump} 为水泵功率消耗, kWh; W_{wshp} 为水源热泵功

率消耗, kWh。

4 系统运行分析

4.1 典型日下不同系统的 COP 与耗电量的模拟结果及对比分析

以 12 月 25 日作为典型日, 首先对该日的室外干球温度进行分析, 然后对不同系统在该典型日的 COP 与耗电量对比分析。

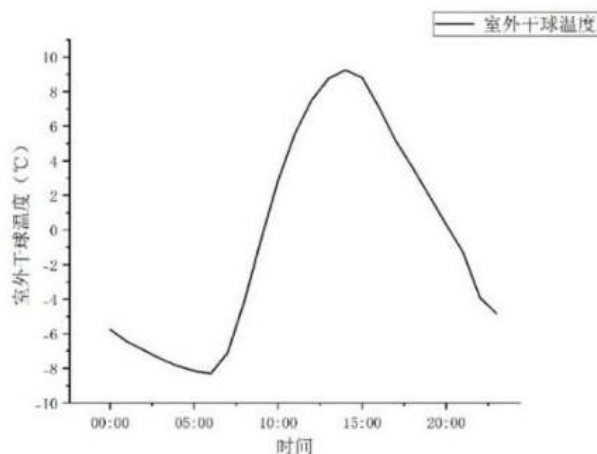


图6 12月25日室外温度

Fig.6 Outdoor temperature on 25 December

由图 6 可知, 12 月 25 日室外最高温度出现在下午 3:00 左右, 最高温度为 9.25°C; 最低温度出现在早上 5:00-6:00 之间, 最低温度为 -8.3°C。

根据图 7, 在典型日 12 月 25 日, 8:00 到 17:00 期间, 太阳能-空气源热泵传统系统与太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的 COP_{sys} 大致相同。然而, 从 18:00 至次日 8:00, 太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的 COP_{sys} 明显高于太阳能-空气源热泵传统系统, 其原因为运行策略的调整。在复合系统中, 当空气源热泵 1 停止运行, 启动水源热泵后, 系统的 COP_{sys} 维持在 3.4 到 4.2 之间。夜间运行水源热泵能够维持较高的系统效率, 避免因气温下降而导致空气源热泵 COP 下降, 从而影响系统 COP_{sys} 。而在 8:00 之后, 由于水源热泵关闭, 室外气温较低, 空气源热泵 COP 也随之下降。

在传统系统中, 由图 6 可知, 夜间室外温度会下降到 0°C, 室外温度的降低会导致空气源热泵 COP 降低, 从而影响系统 COP。从图 7 可以看出, 在 12 月 25 日的 8:00 至 18:00 期间, 复合系统与传统系统的耗电量基本相同。然而由于运行策略的改变, 导致复合系统在其他时间段内的耗电量明显小

于传统系统。

通过对比分析两系统可知, 12 月 25 日太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的最高小时 COP 可到达 4.2, 日平均 COP 为 3.98, 比传统系统日平均 COP 高出 19.88%。此外太阳能-空气源热

泵辅助水源热泵复合系统的耗电量较低, 比传统系统减少了 22.56%, 系统的耗电量可节省 278.08kWh。这些结果表明, 太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统在能效和经济性方面具有明显优势。

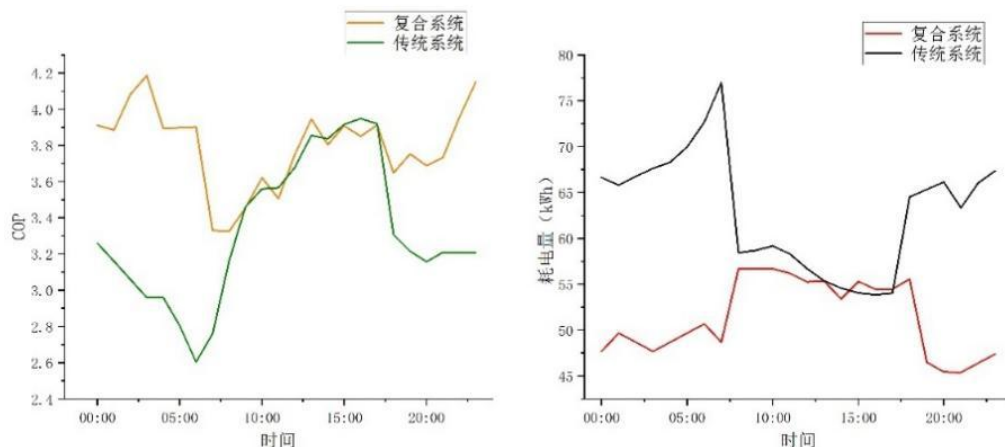


图 7 12 月 25 日复合系统和传统系统 COP 和耗电量对比情况

Fig.7 Comparison of COP and power consumption of composite and conventional systems on 25 December

4.2 不同典型日下复合系统运行对比分析

为了研究系统运行性能, 根据 4.1 节中 12 月 25 日的复合系统运行情况, 并选取另一典型日 11 月 5 日作为对比, 该典型日下建筑负荷较低, 能够提供在不同负荷条件下系统运行表现。

COP 值稳定在 3.8 至 4.1 之间, 相较于 12 月 25 日表现更为稳定。在低负荷情况下, 复合系统通常能在更接近其最佳工作点的状态下运行, 提高了能效比, 使得系统更加经济 and 稳定。

4.3 复合系统内各部分子系统供热量分析

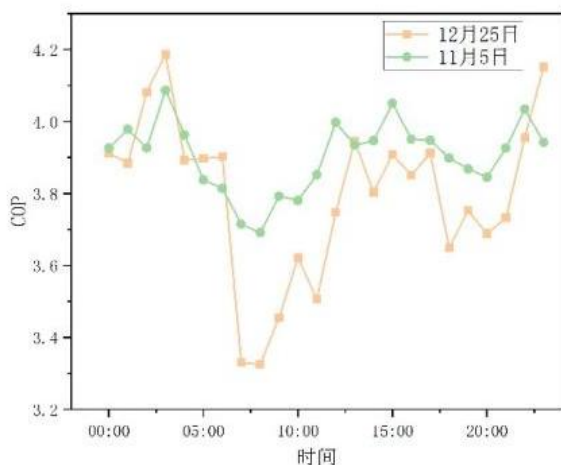


图 8 不同典型日下复合系统 COP 对比情况

Fig.8 Comparison of COP of composite systems under different typical days

通过对比分析系统在两典型日下的模拟运行情况可知, 11 月 5 日太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的最高小时 COP 为 4.1, 日平均 COP 为 4.02。根据图 8 数据显示, 11 月 5 日复合系统

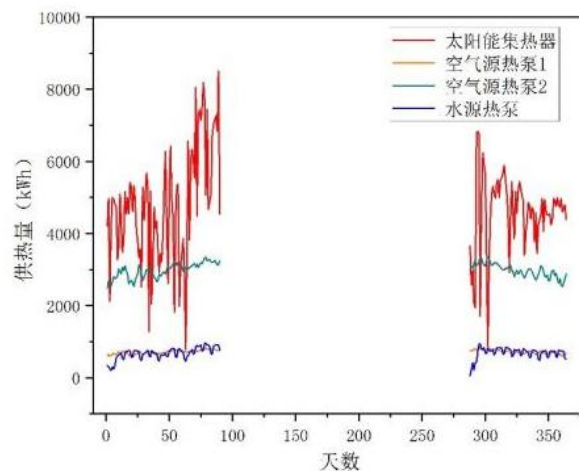


图 9 全年复合系统中各子系统供热量

Fig.9 Sub-system heat supply in a year-round composite system

图 9 展示为一年内复合系统中太阳能集热器、空气源热泵和水源热泵的供热量, 从图中可以看出, 太阳能集热器供热量最多。经过计算, 复合系统的累计供热量 889729.71kWh, 其中太阳能集热

器累计供热量 453762.15kWh, 空气源热泵 1 累计供热量 66729.73kWh, 空气源热泵 2 累计供热量 293610.8kWh, 水源热泵累计供热量 75627.03kWh。太阳能集热器的供热量占系统总供热量的 51.8%, 所有热泵的供热量则占系统总供热量的 48.2%。

5 结果分析

5.1 能耗分析

对整个复合供暖系统进行能耗模拟, 该系统的能耗主要集中在水泵和热泵机组部分。通过逐月积分计算, 得到两种系统供暖季节不同月份累计耗电量和逐月耗电量对比情况。

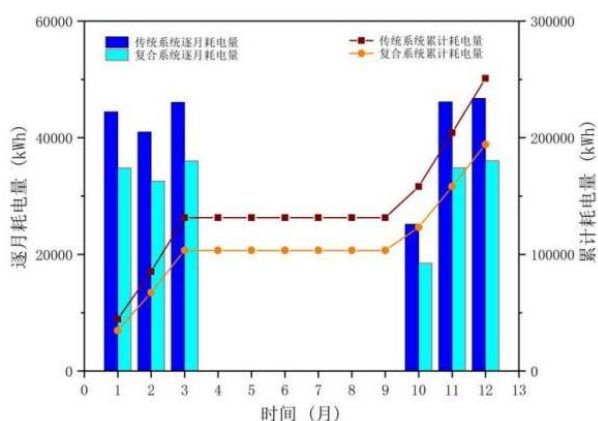


图 10 两种系统各月份累计耗电量和逐月耗电量对比情况

Fig.10 Comparison of cumulative power consumption by month and month-by-month power consumption of the two systems

由图 10 可知, 太阳能-空气源热泵传统系统的耗电量高于太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统, 其原因为复合系统中夜间关闭空气源热泵 1, 水源热泵会承担建筑的采暖热负荷和部分热水负荷, 空气源热泵运行时间较短, 而传统系统中空气源热泵运行时间长, 耗电量多。水源热泵通过提取水中的热量来进行供暖, 水因其较高的比热容, 能够存储更多的热量。这意味着, 相比于空气源热泵, 水源热泵可以在消耗较少能量的情况下提取更多的热量。相反, 空气源热泵则是从空气中提取热量, 但由于空气的比热容较低, 因此在提取相同热量的情况下, 空气源热泵需要消耗更多的电能。所以, 复合供热系统在节能方面表现优于传统系统。

通过对两种系统进行对比分析, 可得太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的总运行能耗为 194264.13kWh。然而, 太阳能-空气源热泵传统

系统的总能耗高达 251013.36kWh。进一步对比发现太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的能耗相比之下降低了 22.61%。

5.2 系统能效比分析

通过计算能够得到以太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统和以太阳能-空气源热泵为基础的传统系统在供暖季各月份的能效比, 所得结果如图 11 所示。

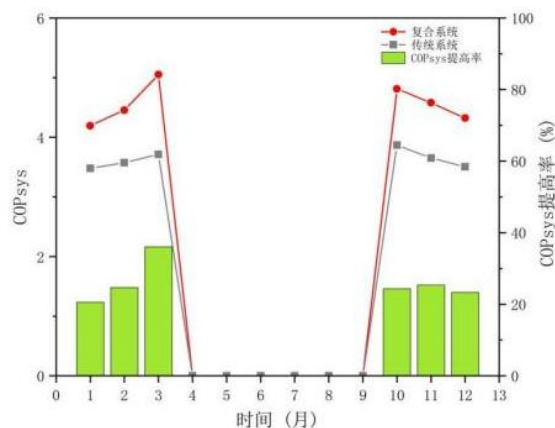


图 11 两种系统不同月份系统能效比对比情况

Fig.11 Comparison of system energy efficiency ratios for different months for both systems

由图 11 得知: 复合系统的平均能效比高于传统系统, 这是因为复合系统能够根据时间变化选择最有效的热泵运行模式。特别是在夜间, 复合系统可以通过集热水箱连接至水源热泵的蒸发器, 充分利用太阳能, 进一步提高热泵的运行效率。

在 1 月份和 12 月份期间, 室外天气变得恶劣, 这导致太阳能的辐射强度和室外温度都有所下降, 这会使水源热泵运行时间减少, 空气源热泵运行模式下的制热性能降低, 因此 1 月份和 12 月份系统 COP_{sys} 低于其他月份。月平均较高 COP_{sys} 的 3 月和 10 月, 是因为期间的室外自然环境较好, 太阳辐射量多, 供暖系统中部分热量来源于太阳能, 降低了一部分空气源和水源热泵耗能, 因此月平均 COP_{sys} 高于其他月份。

COP_{sys} 在不同月份的提高率有所差异。3 月份的提高率达到最高点, 为 36.06%, 而 1 月份的提高率则是最低值, 仅为 20.54%。

复合供热系统的平均 COP_{sys} 为 4.57, 而传统太阳能-空气源热泵供热系统的平均 COP_{sys} 为 3.64。在供暖季节中相比较于传统太阳能-空气源热泵系统, 复合供热系统的平均 COP_{sys} 提高了

25.78%。

6 经济性分析

本文采用了费用年值法,这种方法也被称为赢得值法或偏差分析法,广泛应用于实际工程项目的经济性分析与评估。通过费用年值法,可以实现对项目进度与费用综合控制。该方法通过将项目的初投资资金的现值,按照时间价值和一定的折现率,等额分摊到各使用年限中。

$$AC = C_0 \left[\frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \right] + C_k \quad (7)$$

式中: AC 为费用年值,元/年; C_0 为系统初投资费用造价,元; i 为利率或部门内部的标准收益率系数,取 0.06; n 为热泵系统的使用寿命,年; C_k 为供暖系统年运行费用,包括年电费与维护管理费用,元/年。费用年值法值越小,其方案的经济效益就越好。

系统的初投资包括空气源热泵机组的购置费用、蓄热水箱的购置费、设备的安装费用等。通过与商家咨询,获得 LSQWRF36M/NaE、LSQWRF142M/NaE 和水源热泵 YJR-15SR 的基本参数和价格信息,如表 5 所示。

表 5 空气源热泵和水源热泵的购置费

Table 5 Acquisition costs for air and water-source heat pumps

机组	额定制热量/kW	价格/万元
LSQWRF36M/NaE	36	2.4
LSQWRF142M/NaE	142	7.5
YJR-15SR	57	5

蓄热水箱和缓冲水箱的价格按照每立方米 4000 元进行估算,集热水箱价格为 16.8 万元,缓冲水箱价格为 10 万元。

表 6 为各设备的估算安装费用,设备安装费用按照设备价格的 10%进行估算。

表 6 不同设备的安装费

Table 6 Installation costs for different equipment

设备	总价/万元	安装费用/万元
LSQWRF36M/NaE	2.4	0.24
LSQWRF142M/NaE	7.5	0.75
YJR-15SR	5	0.5

对空气源热泵、水源热泵和蓄热水箱的购置费以及安装费的计算,对建筑的空气源热泵供暖系统的初投资进行确定,确定出复合系统的初投资为 43.2 万元,传统 37.7 万元。

供暖系统的运行费用主要包括两方面,管理与维护费用以及运行耗电费用。系统的管理及维护费用可通过公式(8)进行估算:

$$Q = BK \quad (8)$$

式中: Q 为年维护管理费用; B 为估算系数,本文取 1%; K 为空气源热泵系统的购置费和安装费。

计算得出复合系统的管理与维护费用为 0.11 万元,传统系统为 0.16 万元。通过查询当地电价,计算得出建筑不同系统的机组年运行耗电费用,复合系统年运行耗电费用为 3.89 万元,传统系统年运行耗电费用为 5.02 万元。

为了对比建筑不同供暖系统的经济性,本文采用费用年值方法进行分析。供暖系统的使用寿命周期设定为 15 年,基于前文所述费用年值计算公式,以及各类型系统的初投资以及运行费用,进行经济性分析,得出复合系统经济费用为 101.66 万元,传统系统为 113.16 万元。总体来看,太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的经济性要好于传统供热系统

7 结论

(1) 太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统在能效和经济性方面具有明显优势。12 月 25 日太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的日平均 COP 为 3.98,比传统系统日平均 COP 高出 19.88%。此外太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的耗电量较低,比传统系统减少了 22.56%,系统的耗电量可节省 278.08kWh。

(2) 太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统的累计供热量 889729.71kWh,其中太阳能集热器累计供热量 453762.15kWh,空气源热泵 1 累计供热量 66729.73kWh,空气源热泵 2 累计供热量 293610.8kWh,水源热泵累计供热量 75627.03kWh。太阳能集热器的供热量占系统总供热量的 51.8%,所有热泵的供热量则占系统总供热量的 48.2%。

(3) 在冬季取暖期间,太阳能-空气源热泵辅

助水源热泵复合系统的总能耗为194264.13kWh。

复合系统会在夜间使用水源热泵进行供热,有效减少空气源热泵的运行时间。复合系统相对于传统太阳能-空气源热泵系统而言,能耗降低了22.61%。

(4)与传统系统相比,该复合系统解决了夜间供热不稳定、舒适性差等问题。此外,水源热泵机组在冬季可以利用的水体温度高于室外空气温度,导致热泵循环的蒸发温度提高,从而提升了能效比。具体说来,与传统太阳能-空气源热泵供热相比,该系统的能效比提高了25.78%。

(5)太阳能-空气源热泵辅助水源热泵复合系统虽然初投资高于传统系统,但在整个生命周期的运行中,其经济性明显优于传统系统。

本文研究由于条件的限制,仍存在局限性:在TRNSYS模型中,各设备选型是根据公式进行的,但未经过进一步的选型优化。这可能导致出现设备选择型号偏大的问题,例如太阳能集热器的面积选择偏大,从而增加初始投资成本。

综上所述,在西藏高寒地区,太阳能-空气源热泵辅助水源热泵系统展现了显著的运行效果。该复合系统成功地实现了对太阳能的有效利用,并且能为类似复合供暖系统的应用提供了宝贵的参考。

参考文献:

- [1] 庄贵阳,周枕戈,王思博,等.绿色竞合态势下中国碳中和政策的国际协同[J].拉丁美洲研究,2023,45(5): 62-77, 160.
- [2] 邹才能,熊波,李士祥,等.碳中和背景世界能源转型与中国式现代化的能源革命[J/OL].石油科技论坛: 20[2024-04-08].<https://kns-cnki-net.webvpn.sdjzu.edu.cn/kcms/detail/11.5614.G3.20231108.1557.002.html>.
- [3] 何李丽,张恒.“双碳”目标下我国能源转型路径[J].上海节能,2023,(9):1285-1294.
- [4] Ye Q, Tianle L, Lyu J. China's energy transition towards carbon neutrality with minimum cost[J]. Journal of Cleaner Production, 2023:388.
- [5] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J].建筑, 2024,(2):46-59.
- [6] 翁楚彬,周雄冬,徐梦珍.西藏可再生能源开发适宜度评价[J].太阳能学报,2023,44(1):475-484.
- [7] 王敏,张昕宇,李博佳,等.西藏太阳能区域供暖技术应用探讨[J].建筑科学,2022,38(10):1-6,14.
- [8] 赵斌,卢大为,刘维安,等.高寒高海拔地区太阳能集中供暖技术及其应用[J].华电技术,2020,42(11):51-55.
- [9] 崔玉,高理福.太阳能热泵在西部高海拔地区应用的试验研究[J].建筑热能通风空调,2018,37(7):15-17,20.
- [10] 祝彩霞,孙婷婷,刘艳峰,等.太阳能与空气源热泵联合供暖系统容量匹配及运行优化[J].太阳能学报,2021, 42(8):215-222.
- [11] 宋航,赵鹏,申妙.太阳能-空气源热泵双联系统在高寒地区的应用[J].区域供热,2023,(3):112-122.
- [12] 杨方德,倪丹,彭淑英,等.西藏地区民居建筑太阳能+空气源热泵供暖系统性能及碳排放浅析[J].暖通空调,2023,53(S1):1-3.
- [13] 住房和城乡建设部关于发布国家标准《太阳能供热采暖工程技术标准》的公告[J].建筑节能,2019,47(11):30.
- [14] 马一程,席剑飞,蔡杰,等.太阳能-空气源热泵热水系统多水箱设计方案的优化与能效分析[J].太阳能学报,2023,44(10):229-236.
- [15] GB 50015-2019,建筑给水排水设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [16] GB 50364-2018,民用建筑太阳能热水系统应用技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [17] 邓淑丹,王亮,史杨华,等.夏热冬冷地区办公建筑空气源热泵与太阳能复合供暖系统运行特性[J].西安工程大学学报,2023,37(6):8-16.
- [18] Han C, Kim J, Cho W, et al. Annual performance analysis of solar-assisted raw-water source heat pumps at low water temperatures[J]. Energy, 2024,291:130386.