

户式空气源热泵供热系统控制策略优化分析

张亚丽, 李绪泉*, 龚鸣禹, 董策, 于慧俐

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 基于一种新型的户式空气源热泵供热系统的实验测试和仿真研究, 采用 TRNOPT 模块作为优化途径, 通过 Hook-Jeeves 算法对机组现有控制策略, 即供水温度的设定值进行优化。建立仿真模型, 选取实验期内典型周进行验证, 得到现有控制策略及优化后控制策略的能效比。结果表明: 在满足室内供暖设计温度 20 °C, 设定供水温度为 45 °C 时, 能效比为 2.88; 在供水温度为 43 °C 时, 能效比为 3.10。优化供水温度的控制策略可为户式空气源热泵在青岛等寒冷地区的节能运行提供参考。

关键词: 供热系统; 控制策略优化; TRNOPT; 户式空气源热泵; 能效比

中图分类号: TU836

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0113-06

Optimization analysis of the control strategy of household air source heat pump heating system

ZHANG Yali, LI Xuquan*, GONG Mingyu, DONG Ce, YU Huili

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Based on the experimental test and simulation research of a new type of household air source heat pump heating system, and taking the TRNOPT module as a way of optimization, this study optimized the existing control strategies of the unit, namely the setting values of water supply temperature by using the Hook-Jeeves algorithm. A simulation model was established, a typical week during the experiment period was selected for verification, and the coefficient of performance(COP) of existing control strategies and optimized control strategies were obtained. The results show that the coefficient of performance is 2.88 when the water supply temperature is set at 45 °C and the design temperature of indoor heating 20 °C is satisfied; the coefficient of performance is 3.10 when the water supply temperature is set at 43 °C. The optimization of the control strategies of water supply temperature provides a reference for the energy-saving operation of household air source heat pumps in cold areas such as Qingdao.

Key words: heating system; optimization of control strategies; TRNOPT; household air source heat pump; coefficient of performance(COP)

收稿日期: 2024-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(52078257)

作者简介: 张亚丽(1998—), 女, 河北河间人。硕士, 研究方向为可再生能源的利用。E-mail: 1445630274@qq.com。

* 通信作者: 李绪泉(1969—), 男, 山东莒南人。博士, 副教授, 主要从事暖通空调系统仿真控制方面的研究。

E-mail: lxuquan@163.com。

2020年,我国提出“碳达峰”及“碳中和”的目标,这预示着可再生能源利用已成为当今主流趋势^[1-2]。降低不可再生能源的消耗,提高可再生能源的开发与利用逐渐成为全球共识,各国政府陆续推出了许多能源政策,鼓励、调整节能和可持续资源的利用^[3-4],多能互补系统弥补了部分可再生能源的短板,应用前景广阔^[5]。

目前,国内学者对空气源热泵在寒冷地区的应用开展了大量研究^[6-7],彭胜男等^[8]建立了一种适用于北方农村独立民居的光伏-空气源热泵联合供热系统,在满足供暖需求的同时达到节能的目的。贾恩灿等^[9]结合西北地区干燥气候特点,对复叠式空气源热泵机组现场测试,结果表明,该机组相较于传统供暖系统具备良好的经济效益和环境效益。韩子辰等^[10]研究发现在邯郸地区供暖期(11月至次年3月)太阳能和空气源热泵切换供暖的双热源系统节能效果更为显著。国内外研究在户式热泵控制方面主要是针对温湿度采用风量的控制来实现优化目标^[11-12]采用多区域多工况的供暖控制方法^[13]。

本文所研究的户式空气源热泵机组在满足房间供暖需求的同时,也承担生活热水热负荷,与常规热泵供热较为不同。对实验供暖期机组的能耗、室内温度等数据进行分析,总结当前户式空气源热泵设备供热系统的控制运行策略,在原有控制策略的基础上进行优化模拟,以最大程度降低电能辅助加热、提高热泵能效比为目标,提出户式空气源热泵优化供水温度控制策略,为机组供暖运行提供指导。

1 实验台及测量装置

1.1 供热系统测试实验台

实验采用户式空气源热泵系统,主要分为室内机和室外机两部分。室内机包含板式换热器、电加热器、膨胀水箱、水泵、膨胀罐、加热盘管以及三通阀等装置。而室外机则包含压缩机、热交换器、电子膨胀阀以及四通阀等部件。该系统不仅适用于冬季供暖,还能在夏季进行供冷,甚至全年都能为用户提供生活热水。另外,该机组系统整体安装2个电加热器辅助加热,分别位于板式换热器出水后的供水管路和水箱内部,功率均为1 kW,用以提高供水温度和生活热水温度。由于是分体式的设计,整个水系统都设在室内,相比于整体式空气源热泵系统(其水系统位于室外),这种设计更能有效地实现防冻功能,实验系统原理如图1所示。

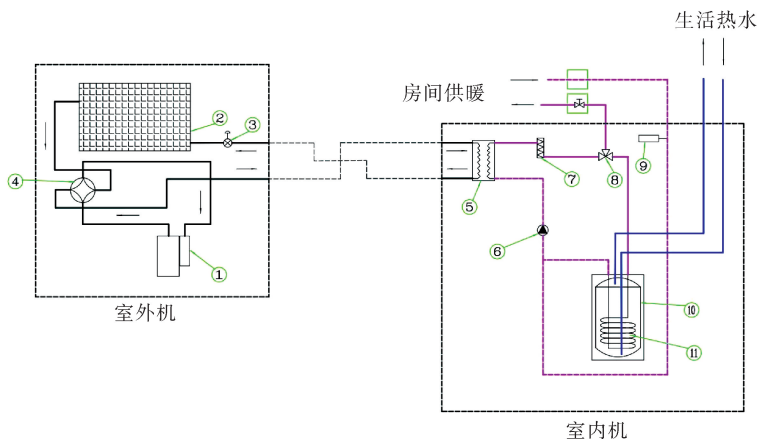


图1 实验系统原理

①—压缩机; ②—热交换器; ③—电子膨胀阀; ④—四通换向阀; ⑤—板式换热器;
⑥—水泵; ⑦—电加热器; ⑧—三通阀; ⑨—膨胀罐; ⑩—膨胀水箱; ⑪—加热盘管

实验系统安装于青岛理工大学实验楼内的3个房间中,室外机安放在3楼平台,与室内机之间仅一墙之隔。风机盘管及室内机安装在室内。额定风量为340、680 m³/h的风机盘管各1台,安装在建筑面积为70 m²的房间A内;额定风量为340 m³/h的风机盘管1台,安装在建筑面积为30 m²的房间B内。房间内均安装红外线温控开关,设置房间供暖温度为20℃,实时粗略测得房间温度,用以控制风机盘管的启停,以满足实际供暖需求并达到不浪费能源的目的。房间A、B相邻,室内机安装在房间C内,如图2所示。该热泵机组额定制热能力为8 kW,额定输出功率为3.75 kW,进出口流量均为1.38 m³/h,电加热器功率为1 kW,每天24 h不间断供暖。

1.2 供热系统实验测量仪器

实验系统分为温度、流量、功率测量三部分,房间A和B内的温度以及供回水温度用热电偶测量,管道流量用超声波流量计测量,机组耗电量用功率计测量,仪器仪表的规格参数如表1所示。

2 户式空气源热泵供热系统仿真

2.1 模型建立及参数设置

以实验台建筑为模拟原型进行建筑逐时负荷计算,采用 TRNBuild 软件进行建模。该建筑层高为 4.0 m,供暖面积为 100 m²。设置外墙、外窗、楼板等建筑外围护结构参数。外墙类型为 EXTERNAL,传热系数为 0.54 W/(m²·K)。外窗传热类型为 EXTERNAL,传热系数为 1.5 W/(m²·K)。地板类型为 BOUNDARY。楼板类型为 ADJACENT,与上一层楼层间无传热。建筑内部热源选择无限制供暖,设定室内设计供暖温度为 20 °C,相对湿度为 60%,冬季渗透换气次数设置为 0.5 次/h,房间人数为 3 人,暂不考虑其他设备干扰,选取系统能效比 COP 作为主要评价指标^[14-15]。

通过 TRNSYS18 仿真平台建立户式空气源热泵机组供热系统,建立的 TRNSYS 模型如图 3 所示。

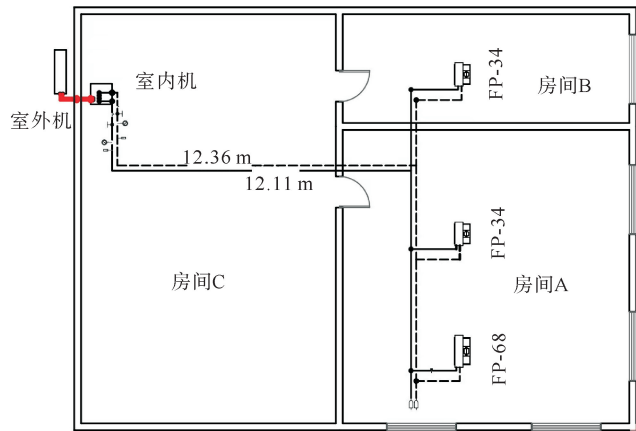


图 2 实验安装房间平面

表 1 测量仪器仪表参数

名称	型号	参数
安捷伦温度采集仪	34970A	量程: -100~1200 °C;精度: ±5%
功率计	TP600	量程: 0~2315 kW·h;精度: ±5%
超声波流量计	PF204plus	量程: 0.1~20 m/s;精度: ±1%

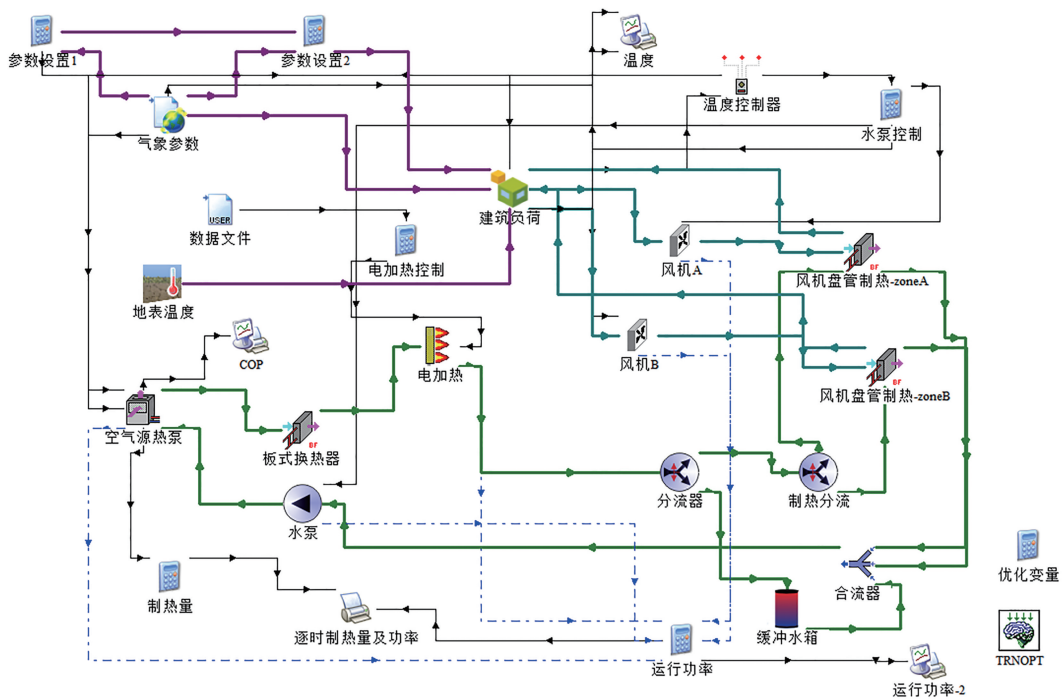


图 3 户式空气源热泵机组供热系统的 TRNSYS 模型

2.2 模型实验验证

在供热方面,基于当前控制策略,户式空气源热泵机组供水温度设定为 45 °C。当热泵启动后,供水温度逐渐上升,在热泵运行过程中,由于室外空气温度的变化会导致室内供暖热负荷的波动,热泵存在无法完全满足室内供暖需求的可能。此时,电加热器启动,提升供水温度,使其能够在短时间内达到设定的 45

℃,热泵便再次启动并继续运行。

为了确保整个系统的稳定运行,设置相应的出口水温控制条件。当供水温度低于 45 ℃时,电加热器自动开启,用该供热系统仿真模型运行青岛地区典型年的供暖期,通过计算得到机组系统供暖期的 COP 为 2.91。

选取实验期内典型周的仿真模拟数据和实验采集数据进行对比,如图 4 所示。

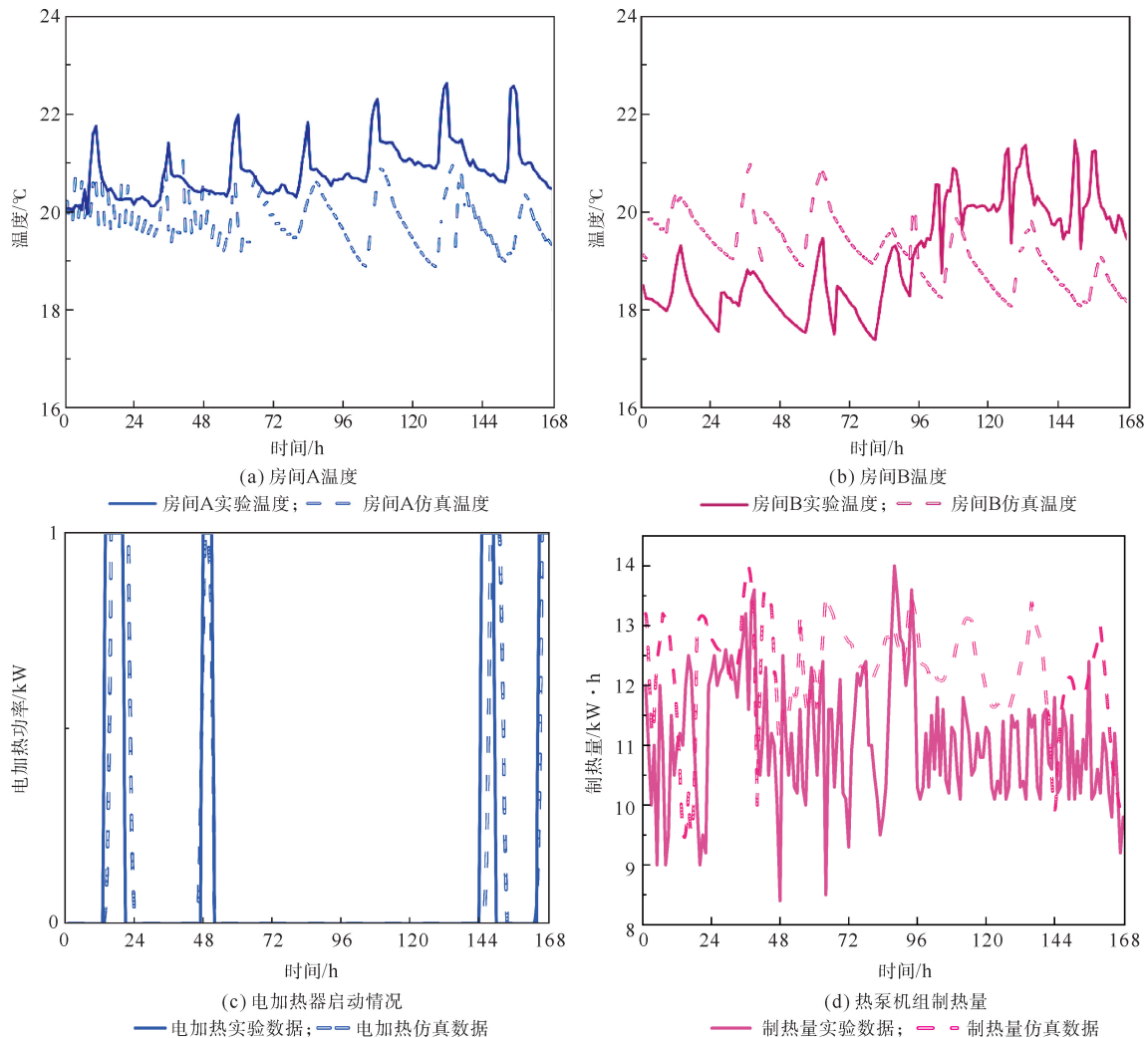


图 4 典型周热泵机组模拟与实验数据对照

在 1 周内,2 个房间的实验与仿真房间温度波动趋势近乎相同,电加热器的启动情况与实验数据几乎一致,模拟制热能力波动趋势与实际运行数据基本一致。现有控制策略下,模型仿真的电加热启动时长为 35 h。而实际实验数据显示,电加热的启动时长为 38 h,两者数值大致接近。通过输出数据计算得到整个供暖期的平均 COP 为 2.88。根据实验测试结果,机组实际供暖的 COP 值为 2.82。仿真结果与实际实验结果误差为 2.13%,从而验证了该模型的准确性及可靠性。

3 控制策略的仿真优化

3.1 控制优化算法

利用 TRNSYS 内的 TRNOPT 模块进行优化,选择控制信号中的供水温度作为关键优化变量。为了方便数据处理,创建后缀为 .dck 的输入文件。将 COP 作为优化的目标函数。为了更有效地优化连续变量,采用了 Hooke-Jeeves 算法。

Hook-Jeeves 算法的基本思想是通过不断调整搜索方向和步长来寻找函数的局部最小值。其数学公式可以表示为以下 3 个步骤:

- 1) 初始点设定。假设初始搜索点为 x_k , 设定搜索步长 h 和收敛精度 v 。
- 2) 探测步骤。在当前搜索点 x_k 附近以步长 h 沿各个坐标轴方向进行探测, 计算函数在各个探测点的函数值; 如果在 d 方向上找到更小的函数值, 则朝该方向移动, 更新搜索点 x_{k+1} , 即 $x_{k+1} = x_k + d \times h$ 。
- 3) 搜索当前点 x_{k+1} 的相邻域, 找到使目标函数值下降的新点 x , 如果新点的目标函数值较低, 则更新当前点: $x_{k+1} = x$, 否则缩小搜索范围。

由于 Hook-Jeeves 算法是一种常用的无约束优化算法, 通常用于寻找目标函数的最小值, 因此需要将目标函数最大值问题转化为最小值问题, 即目标函数为 COP 的相反数, 所得优化函数值均为负值, 其函数最小值为 COP 最大值。在优化过程中, 选择优化变量, 并为其设定合理的初始值、最大值、最小值以及步长。

在系统供热侧, 控制器将实时监测供热侧的供水温度 T_1 和房间温度 T_0 , 并与当前模式下室内设定的温度范围 20°C 进行比较。一旦 T_0 低于设定房间温度 20°C , 即表示房间需要供暖, 此时控制器将启动热泵, 系统判断 T_1 是否大于设定值 T_m 。当 $T_1 < T_m$ 时, 系统中的电加热器启动, 并单独负责末端的供暖工作, 直至 $T_1 \geq T_m$; 否则, 供暖任务将继续由空气源热泵承担。经过一段时间后, 如果 T_0 大于等于设定的 20°C , 意味着房间温度已超出舒适范围, 此时无需继续供暖, 控制器将关闭热泵, 如图 5 所示。

3.2 现有控制策略优化

为探索在现有控制策略下户式空气源热泵机组最佳的供热效果, 通过改变供水温度进行多次模拟仿真。对比 COP 值得出机组在青岛地区达到较好供暖效果时的供水温度。

以实验中设定的供水温度 45°C 为基准, 设置供水温度适宜温度较大值为 46°C , 最小值为 42°C , 网格划分为 100 个, 步长设定值为 0.1, 随机选取起点数 10 个, 并将这些参数代入仿真模型中运行。选取优化运行结果绘制模拟曲线, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 机组在供水温度 43°C 时能效比较高。在整个供暖实验期 2023 年 12 月 20 日至 2024 年 1 月 20 日运行, 供水温度分别设定为 46、45、44、43、42 $^\circ\text{C}$ 时机组电加热器的启动情况如图 7 所示。

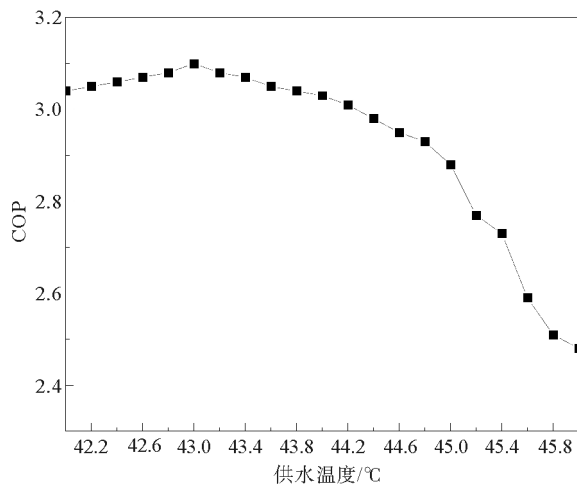


图 6 适宜供水温度模拟曲线

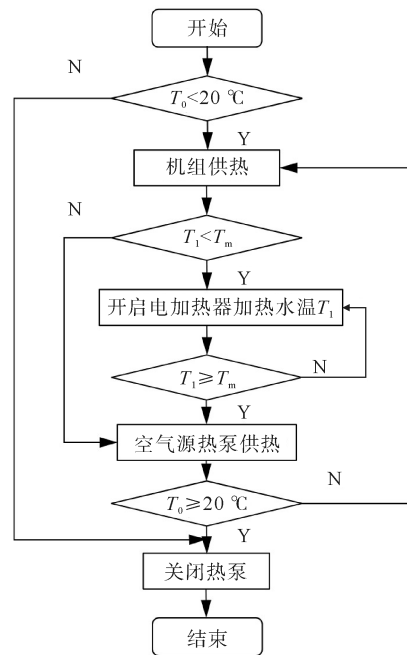


图 5 户式空气源热泵机组供热侧控制逻辑

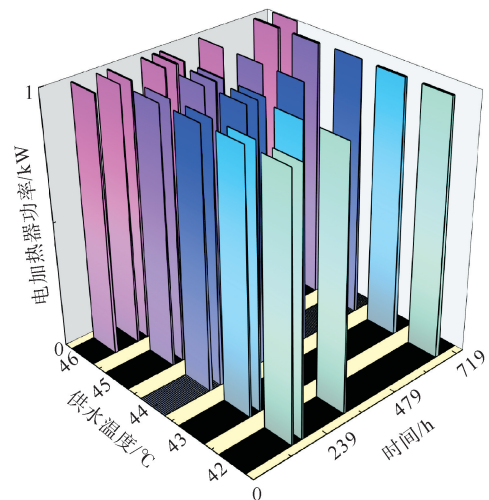


图 7 不同供水温度下电加热器的启动情况

在保证室内供暖需求的基础上,随着供水温度的设定值逐渐降低,电加热的启动时长也相应减少。通过系统运行处理输出数据,计算得到各供水温度下的热泵机组整个实验期的平均 COP,见表 2。

如表 2 所示,当供水温度降低时,电加热时长减少,机组系统更加节能,也验证了优化结果的可靠性。43 ℃这一数值相较于实验过程中设定的供水温度 45 ℃,机组的电加热时长减少了 15 h,机组系统的能效比增大了 0.22,说明在 43 ℃供水温度下,机组在青岛等寒冷地区供暖效果较好。

表 2 不同供水温度下的机组能效比

供水温度/℃	电加热时长/h	COP
46	49	2.48
45	35	2.88
44	30	3.03
43	20	3.10
42	13	3.04

4 结论

采用 TRNSYS 仿真软件,建立了户式空气源热泵供热系统模型,并实验验证了现有控制策略的可行性。在现有控制策略的基础上,对供水温度进行仿真优化,得出在 43 ℃供水温度下,机组能效比为 3.10,对比实验期内机组设定供水温度为 45 ℃的情况,机组能效比有所增大。因此,优化后的控制策略,可为户式空气源热泵机组在青岛等寒冷地区的供暖应用提供指导。

参考文献(References):

- [1] 伏云辉. 全球 150 余国提出碳中和目标[J]. 生态经济,2024,40(3):1-4.
FU Yunhui. More than 150 countries around the world propose carbon-neutral targets[J]. Ecological Economy,2024,40(3):1-4.
- [2] FRANCO S,MANDLA V R,RAO K R M. Urbanization,energy consumption and emissions in the Indian context:A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,71:898-907.
- [3] 何诗霏. 北极国家加快可再生能源开发利用[N]. 国际商报,2024-03-13(4 版).
HE Shifei. Arctic countries accelerate renewable energy development[N]. International Business Daily,2024-03-13(4th ed).
- [4] WEI C,NI J L,LI C Z. CO₂ allocation and equity issues under China's carbon neutrality targets:Recent advances and a review[J]. China Economic Review,2024,83:102108.
- [5] 黄文龙,葛文超,任洪波,等. 全可再生能源多能互补系统优化配置与运行探索[J]. 太阳能学报,2024,45(5):351-359.
HUANG Wenlong,GE Wenchao,REN Hongbo. Exploration of optimal configuration and operation for all-renewable energy multi-energy complementary systems[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2024,45(5):351-359.
- [6] 饶荣水,谷波,周泽,等. 寒冷地区用空气源热泵技术进展[J]. 建筑热能通风空调,2005,24(4):24-28.
RAO Rongshui,GU Bo,ZHOU Ze,et al. Development of air source heat pump for cold regions[J]. Building Energy & Environment,2005,24(4):24-28.
- [7] 张了. 小型低温空气源热泵采暖在北京农村的适用性研究[D]. 北京:清华大学,2015.
ZHANG Liao. Research on low temperature air-source heat pump for residential heating applications in rural area,Beijing[D]. Beijing:Tsinghua University,2015.
- [8] 彭胜男,郭健翔,马晓丰. 适用于北方农村独立民居的光伏-空气源热泵联合供热系统[J]. 青岛理工大学学报,2019,40(6):103-109.
PENG Shengnan,GUO Jianxiang,MA Xiaofeng. Combined heating system of photovoltaic-air source heat pump for independent rural houses in the north[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2019,40(6):103-109.
- [9] 贾恩灿,王刚,梁士民,等. 西北地区复叠式空气源热泵机组应用的现场实测研究[J]. 青岛理工大学学报,2024,45(6):126-135.
JIA Encan,WANG Gang,LIANG Shimin,et al. A field study on the application of cascade air source heat pump unit in Northwest China[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2024,45(6):126-135.
- [10] 韩子辰,刘伟,贡静宝,等. 基于 TRNSYS 模拟的户式地源热泵运行特性分析[J]. 节能,2021,40(2):20-23.
HAN Zichen,LIU Wei,GONG Jingbao,et al. Analysis of operating characteristics of household ground source heat pump based on TRNSYS[J]. Energy Conservation,2021,40(2):20-23.
- [11] 张涛,刘国丹,管宏宇,等. 某医院病房楼温湿度独立控制空调系统设计[J]. 青岛理工大学学报,2018,39(3):96-101.
ZHANG Tao,LIU Guodan,GUAN Hongyu,et al. System design of air conditioning in temperature and humidity independent control in ward building[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2018,39(3):96-101.
- [12] DONGELLINI M,NALDI C,MORINI G L. Influence of sizing strategy and control rules on the energy saving potential of heat pump hybrid systems in a residential building[J]. Energy Conversion and Management,2021,235:114022.

(下转第 135 页)