



寒冷地区农村清洁能源供暖系统经济性研究

马天锋¹, 张亚茹¹, 商天文²

(1. 上海应用技术大学, 上海 201418; 2. 国网物资有限公司, 北京 100032)

摘要: 当前, 中国北方农村的传统供暖方式不利于碳减排, 如何选取清洁能源供暖方式是当前农村地区面临的主要问题。使用 TRNSYS 仿真软件构建了天然气锅炉供暖、空气源热泵供暖和太阳能耦合空气源热泵供暖3种分散式清洁能源供暖系统模型。以山西某村一户典型农宅为例, 对3种系统进行了模拟。研究结果表明: 太阳能耦合空气源热泵供暖系统在供暖稳定性和运行效率上表现优异, 而且在使用年限内运行成本最低; 此外, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统的低二氧化碳排放量也更有利于碳减排。这些研究结果为寒冷地区农村选择清洁能源供暖方式提供了重要参考, 有助于指导政策制定和资源配置, 推动清洁能源供暖在农村地区的普及和应用。

关键词: 清洁能源供暖; 太阳能; 空气源热泵; TRNSYS; 经济性

中图分类号: TM743

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024260

Research on the economic of clean energy heating systems in cold rural regions

MA Tianfeng¹, ZHANG Yaru¹, SHANG Tianwen²

1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

2. State Grid Materials Co., Ltd., Beijing 100032, China

Abstract: At present, the conventional heating methods in rural areas of northern China present challenges to carbon emission reduction efforts. Consequently, selecting appropriate clean energy heating methods in rural areas has emerged as a significant concern. The TRNSYS was used to simulation software to construct three decentralized clean energy heating systems-natural gas boiler heating, air source heat pump heating, and solar-coupled air source heat pump heating. Then, a typical rural household in Shanxi Province was taken as an example, simulations were conducted for the three systems. The research findings indicate that the solar-coupled air source heat pump heating system performs excellently in heating stability and operational efficiency. It exhibits the lowest operating costs over its lifespan, Moreover, the solar-coupled air source heat pump heating system is more conducive to carbon emissions reduction. These research results provide an important reference for choosing clean energy heating methods in rural ar-

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No.72304186); 国家社会科学基金后期资助项目 (No.20FYB052)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.72304186), The National Social Science Fund of China (No.20FYB052)



areas of northern China, which can help guide policymaking and resource allocation and promote the popularization and application of clean energy heating in rural areas.

Key words: clean energy heating, solar energy, air source heat pump, TRNSYS, economics

0 引言

目前,中国北方农村普遍采用燃烧薪柴、散煤和秸秆的分散式炉灶进行供暖^[1]。这些供暖方式所产生的二氧化碳不利于碳减排,为实现“双碳”目标愿景^[2],亟须推动农村清洁能源供暖。预计到2035年,清洁能源供暖替代燃煤供暖的可替代价值可达到150.58亿平方米,在低碳情景和强化低碳情景下,届时的可替代价值将更大,分别为187.26亿平方米和250.80亿平方米^[3]。中国农村经济发展不平衡、消费水平差异较大的特征,直接影响了农村居民清洁能源供暖方式的选择。农村地区如何选取清洁能源供暖方式是当前碳减排面临的主要挑战^[4]。

目前,已有学者针对不同清洁能源供暖方式的经济性进行了研究。例如,文献[5]构建了中国北方农村清洁取暖能源选择的评价指标体系,通过模糊综合评判方法计算得出天然气供暖更适合经济水平较高的省份,而燃烧清洁煤则适合偏远省份,资源优势明显的省份应因地制宜地开发供暖能源,并优先使用热泵供暖。文献[6]通过收集11个欧盟成员的供暖和制冷技术的数据,找出这些国家建筑类型的区别,得出在化石燃料锅炉中,天然气锅炉的效率最高,并且成本低于生物质锅炉。文献[7]对比了承德市典型农宅使用空气源热泵和蓄热式电锅炉两种清洁能源供暖系统的运行费用,得出空气源热泵供暖系统的运行费用比蓄热式电锅炉供暖系统的运行费用少约20%。文献[8]对比了太阳能耦合空气源热泵供暖系统与燃煤锅炉供暖系统的运行费用,得出太阳能耦合空气源热泵供暖系统的运行费用比燃煤锅炉供暖系统低26%。文献[9]对比了生物质颗粒炉具与天然气壁挂炉的费用年值,结果表明天然气壁挂炉

费用年值比生物质颗粒炉具高42%。文献[10]建立了低温循环和高温循环模型,对比了空气源热泵和地源热泵在俄罗斯雅库茨克的全年运行费用,结果表明地源热泵比空气源热泵费用低约10%。文献[11]对北京市清洁能源集中供暖方式进行经济性与节能性的综合分析,得出地源热泵和空气源热泵具有较好的经济性。

综上所述,目前较少研究考虑中国北方寒冷地区特殊气候条件和房屋结构特征,以及运用仿真模拟对比分析农村分散式供暖系统特点。由此,利用TRNSYS模拟软件结合Dest-h建模仿真软件构建3种常见农村分散式供暖系统——天然气锅炉供暖系统、空气源热泵供暖系统、太阳能耦合空气源热泵供暖系统,考虑北方气候自然条件和房屋结构特征,以山西某村独立一层民房为例,按照初投资、运行费用、维护费用和环境效益4种指标对比不同分散式供暖系统的优劣。最后,根据模拟结果提出相应建议,为推广农村分散式清洁能源供暖系统提供一定参考。

1 系统模型建立

为实现“双碳”目标,亟须推动北方农村清洁能源供暖改造。在改造措施中,“煤改气”“煤改电”是当前的主要手段^[12],分散式的天然气锅炉供暖系统、空气源热泵供暖系统、太阳能耦合空气源热泵供暖系统均是基于这两种改造方法。TRNSYS软件可精确地模拟各种能源系统,采用模块化的设计方式,选择相应的模块进行组合^[13],构建出分散式的天然气锅炉供暖、空气源热泵供暖、太阳能耦合空气源热泵供暖系统模型。利用Dest-h软件精准地模拟建筑环境和供暖系统的运行情况,获得采暖季内建筑所需热负荷^[14]。

在 TRNSYS 模拟系统中, 3 种系统主要由供暖设备、缓冲水箱、循环泵、用户末端组成^[7]。在系统中, 供暖设备和用户末端通过缓冲水箱并联, 在系统中加入缓冲水箱作为储热工具, 可避免供暖设备频繁启停并降低系统运行成本^[15]。此外, 因为各供暖系统均通过循环泵进行水循环, 供暖时, 长期加热后会产生水垢, 进而造成系统堵塞, 通过加设缓冲水箱可使水垢沉降在水箱底部, 并用水箱过滤网使其不进入供暖设备和末端, 从而降低系统堵塞产生的维护成本。除上述设备外, TRNSYS 模拟系统中还加入计算器、积分器、数据显示器等模块用于计算和统计系统产热量及能耗。以下为 3 种供暖系统具体的模型建立。

1.1 天然气锅炉供暖系统

预计到 2030 年, 中国的天然气管网总长将超过 20 万千米, 覆盖超 7 亿人口, 惠及全国主要地级市、区县, 同时辐射小城市和乡镇, 形成成熟的现代化管网系统^[16]。对于未能实现管网联通的部分偏远农村, 可采用压缩天然气 (compressed natural gas, CNG) 或液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 的方式运输。CNG 体积大、运输效率低、成本高, 而 LNG 的高体积压缩比降

低了运输频次和成本, 且其供气系统建设灵活, 可以根据不同地区和用户所需求的耗气量选择适宜的建设规模, 适应性较强。但考虑建设成本和运输成本, 天然气锅炉供暖系统更适用于气源丰富或有政府补贴的区域。

天然气锅炉供暖 TRNSYS 模拟系统如图 1 所示, 该系统包含天然气锅炉、循环水泵、缓冲水箱、用户末端、热负荷数据读取模块、环境温度读取模块、设备启停控制模块、能耗检测模块、计算器和能耗图形输出模块等。

系统中的天然气锅炉、循环水泵启停受用户末端建筑热负荷的影响, 系统控制方案如下。

(1) 仿真时间设置为采暖季采暖时长, 仿真步长设置为 0.125 h, 天然气锅炉作为热源侧供暖设备提供用户末端所需热量。

(2) 循环水泵、缓冲水箱连接热源侧供暖设备和负荷侧用户末端, 进行热量存储和热量交换。

(3) 通过 Dest-h 软件对目标建筑进行供暖期内的逐时热负荷分析, 将得到的热负荷数据导入 TRNSYS 数据读取模块中, Meteonorm 软件中得到目标地的环境温度数据导入 TRNSYS 环境

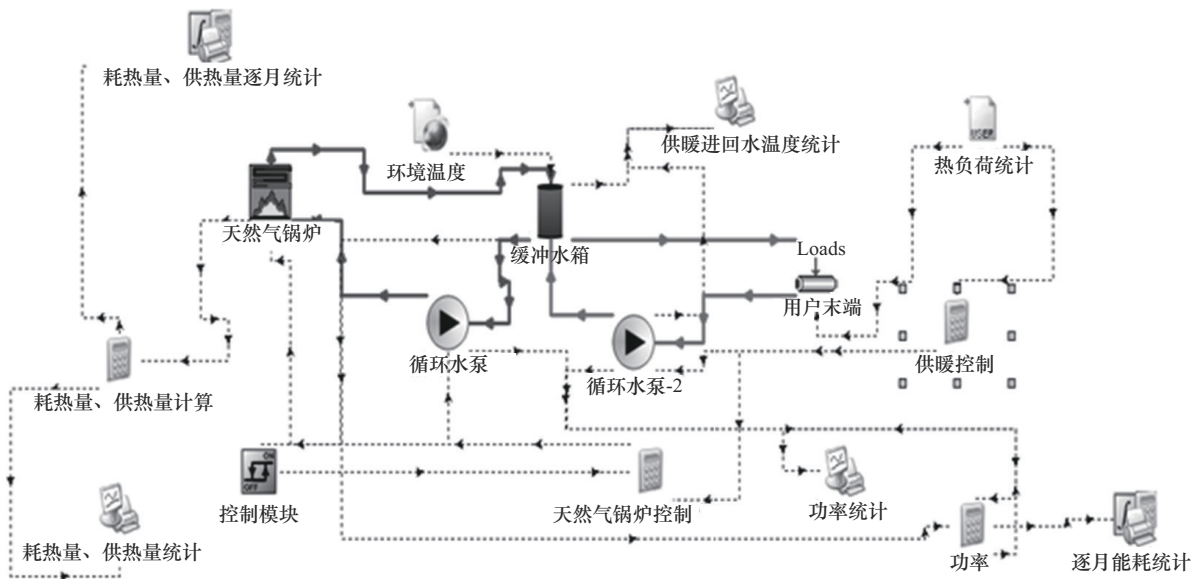


图 1 天然气锅炉供暖 TRNSYS 模拟系统



温度读取模块中,设备启停控制模块将环境温度数据和建筑热负荷参数作为控制信号来控制天然气锅炉和循环水泵的启停。能耗检测模块和能耗图形输出模块将模拟结果统一处理后输出模拟数据。

1.2 空气源热泵供暖系统

研究表明,空气源热泵能够消耗较少的电能产生大量的热能,具有显著的能效优势和明显的节能效果^[17-19]。然而,在北方低温条件下运行的空气源热泵压缩机高压比会增加,升高压缩机的故障率,使系统效率降低,从而对系统的稳定性影响较大^[20]。此外,为了适应北方极端的气候条件,按照最大热负荷要求配置设备可能会导致资金投入偏高,从而限制空气源热泵供暖的发展。

空气源热泵供暖 TRNSYS 模拟系统如图 2 所示,该系统除热源侧供暖设备空气源热泵外,其他模块与天然气锅炉供暖系统均相同,控制方式也与天然气锅炉供暖系统相同。

1.3 太阳能耦合空气源热泵供暖系统

太阳能独立供暖系统受降雨、积尘等环境条件影响较大^[21],限制了系统的稳定性和可靠

性。通过与空气源热泵耦合,可以提高供暖系统效率^[22]。但耦合系统初投资大,农村居民的消费水平差异较大,可能会影响农村居民选择意愿。

太阳能耦合空气源热泵供暖 TRNSYS 模拟系统如图 3 所示,该系统包含空气源热泵、太阳能集热器、时间控制模块、循环泵、缓冲水箱、用户末端、热负荷数据读取模块、环境温度读取模块、设备启停控制模块、能耗检测模块、计算器和能耗图形输出模块。

系统中的空气源热泵、循环泵启停受用户末端建筑热负荷的影响,太阳能集热器启停受光照时间影响,系统控制方案如下。

(1) 仿真时间设置为采暖季采暖时长,仿真步长设置为 0.125 h,空气源热泵作为热源侧供暖设备提供用户末端所需热量。

(2) 太阳能集热器作为辅助热源,帮助空气源热泵加热缓冲水箱中的供暖用水,减少空气源热泵工作时长,降低系统用电负荷。当遇到低温天气时,也可以利用太阳能热源对耦合系统进行热量补充,防止空气源热泵压缩机因低温出现故障,确保持续提供稳定的供暖。其主要工作时间

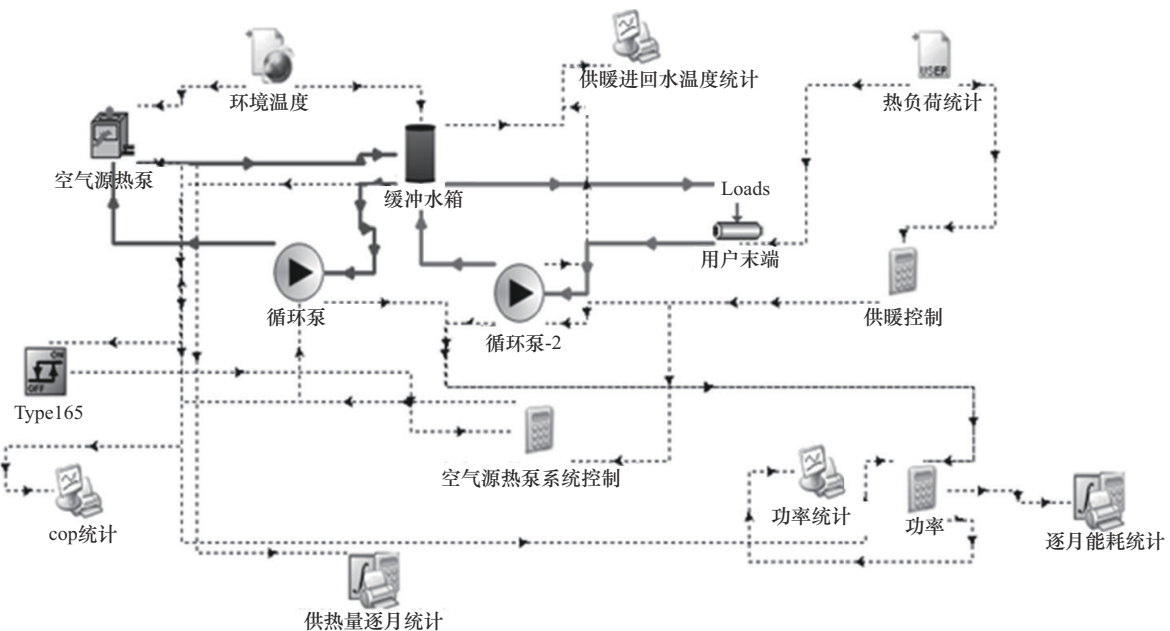


图2 空气源热泵供暖 TRNSYS 模拟系统

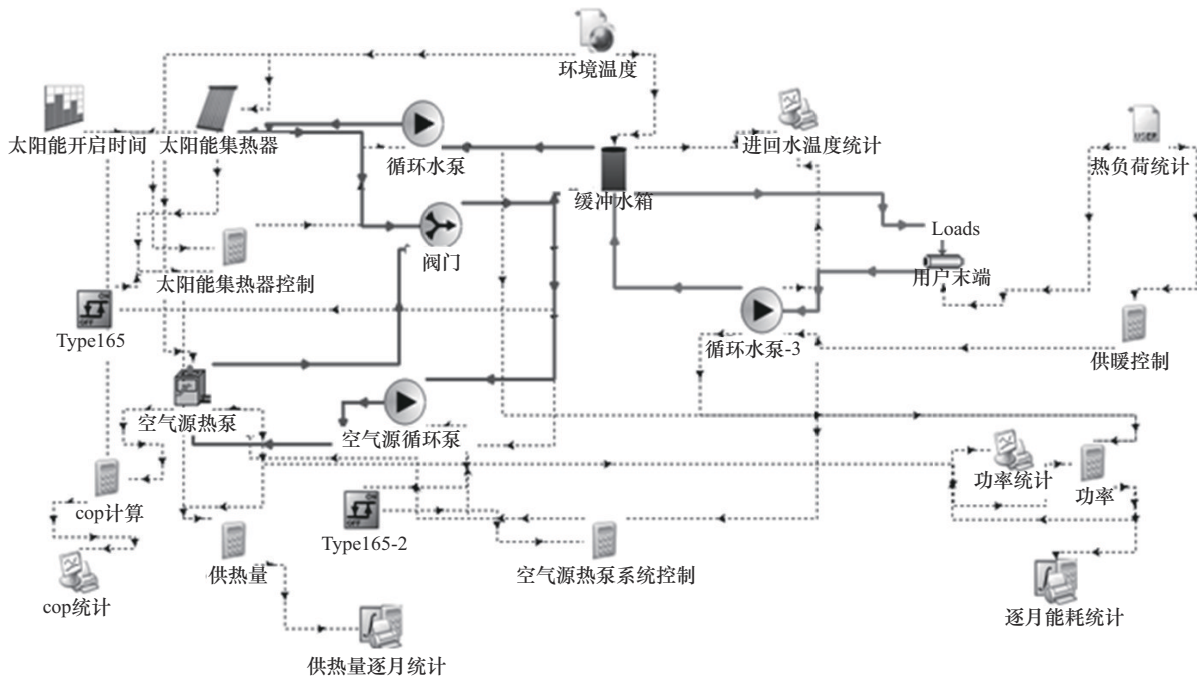


图3 太阳能耦合空气源热泵供暖 TRNSYS 模拟系统

为光照充足的08:00—16:00时段，共计8 h，可充分吸收太阳热源。太阳能集热器由时间控制模块开启，最高出水温度设定在80℃，当太阳能集热器出水温度与缓冲水箱温度差低于5℃时，由设备启停控制模块关闭。

(3) 循环水泵、缓冲水箱连接热源侧供暖设备和负荷侧用户末端进行热量存储和热量交换。

通过Dest-h软件对目标建筑进行供暖期内的逐时热负荷分析，得到的热负荷数据被导入TRNSYS数据读取模块中。然后，利用Meteo-norm软件得到的目标地环境温度数据被导入TRNSYS环境温度读取模块中，环境温度和热负荷数据结合计算器、设备启停控制模块作为控制空气源热泵和循环水泵的控制方案可控制空气源热泵和循环泵的启停。能耗检测模块和能耗图形输出模块将模拟结果统一处理后输出模拟数据。

2 案例分析

砖混结构是中国北方农村房屋的主要类型之

一^[23]，它是一种将砖和混凝土两种材料组合在一起的建筑物形式。本文以山西省某村的砖混结构房屋为研究对象，对上述3种系统进行实证研究。房屋为高4 m的一层住宅，建筑空调面积为108 m²。其墙面为砖混结构，传热系数 $k=2.02 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，屋顶为钢梁混凝土板平屋顶，传热系数 $k=2.17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，住宅采用单层玻璃铝合金门窗，传热系数 $k=5.7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、地面为40 mm混凝土砖楼地，地面传热阻 $r=0.295 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。供暖周期为11月1日到次年3月31日，共151 d。在Dest-h软件中根据以上数据建立建筑模型后得到房屋热负荷数据见表1。

表1 房屋热负荷数据

参数	单位	统计值
建筑空调面积	m ²	108
全年最大热负荷	kW	33.11
全年累计热负荷	kW·h	26 646.57
全年最大热负荷指标	W/m ²	306.55
全年累计热负荷指标	kW·h/m ²	246.73
采暖季热负荷指标	W/m ²	61.24



随后采用 Meteonorm 软件获得该村全年气象数据。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》设计 3 种系统供暖水温, 将供水温度设置在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[24], 回水温度与供水温度温差不大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 供暖系统设备选型

根据模拟得到房屋热负荷数据、采暖季气象数据和设定的供暖水温对 3 种供暖系统的供暖设备进行选型, 选型方法参考文献[25-26]。计算公式见附录(式(1)~式(4))。

本文选用制热量为 16 kW 的天然气锅炉^[26], 一台即可满足系统供暖需求。空气源热泵供暖系统选用制热量为 10 kW 空气源热泵, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统选用 10 m^2 太阳能集热器, 制热量为 5 kW 空气源热泵。3 种系统均选用 1.5 m^3 缓冲水箱, 以及选用流量为 $8\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程为 10 m 的循环水泵。

2.2 结果与分析

2.2.1 系统稳定性分析

将已获得的房屋热负荷数据、设备参数与气象数据代入 3 种 TRNSYS 系统, 得到天然气锅炉供暖系统供回水温度如图 4 所示, 空气源热泵供暖系统供回水温度如图 5 所示, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统供回水温度如图 6 所示。

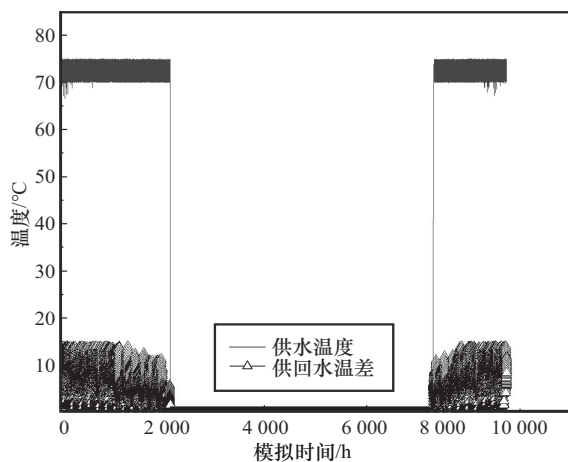


图4 天然气锅炉供暖系统供回水温度

由图 4~图 6 可以看出, 3 种供暖系统供回水温差均在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 这表明热水从热源侧流向末端后再回流到热源侧的水温与供热出水温度的差异较小。这意味着供暖系统的热量传递效率较高, 能够有效地将热量传递到建筑内。

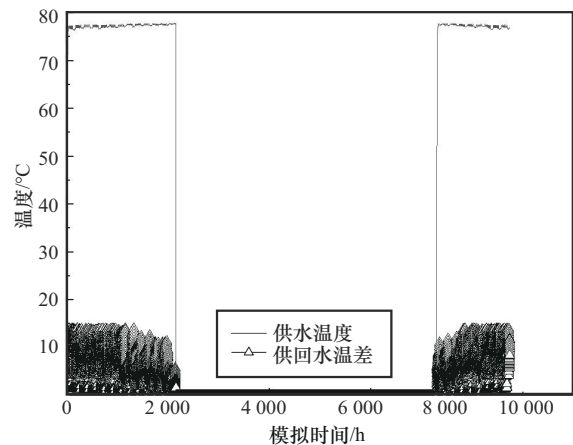


图5 空气源热泵供暖系统供回水温度

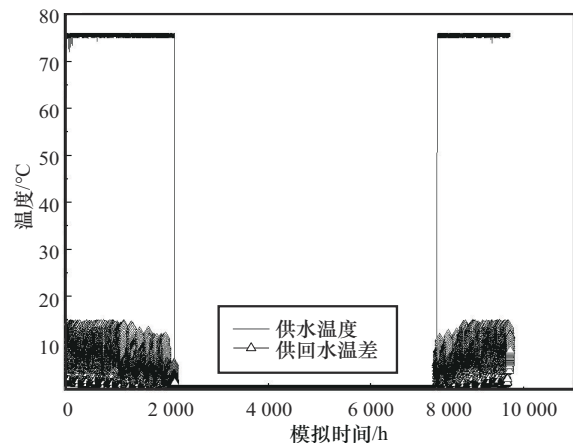


图6 太阳能耦合空气源热泵供暖系统供回水温度

经对比, 3 种系统都可以满足设计的供水温度, 但由图 4 可知, 天然气锅炉供暖系统的供水温度在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间浮动明显, 系统供暖稳定性较差, 想要维持设计的 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 供水温度, 需要持续燃烧天然气, 明显增加了运行能耗。通过观察图 5 和图 6 可知, 空气源热泵供暖系统和太阳能耦合空气源热泵供暖系统总体上都可以达到设计的 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 供水温度, 且供水温度浮动较小, 这说明

后两种供暖系统维持设计水温所消耗的能耗相对较少。但空气源热泵供暖系统供水温度曲线相对稀疏，这是因为空气源热泵在低温情况下制热性能较差，制热效率偏低^[27]。而且空气源热泵供暖系统只有空气源热泵作为单一热源，受环境温度影响也较大。太阳能耦合空气源热泵供暖系统因为有太阳辐射作为热源补充，供水温度曲线相对密集，系统稳定性较强。

2.2.2 系统效率分析

效率是供暖系统供热量与系统能耗之比，它是衡量供暖系统的重要指标，效率越高，能源转化损失越低，供暖系统越节能^[28]。通过 TRNSYS 模拟系统的中能耗检测模块和能耗图形输出模块可以得到 3 种系统采暖季逐月效率，如图 7 所示。由于温度越低空气源热泵效率越低，结合 Meteo-norm 软件可获得全年逐时温度，如图 8 所示。可以看出，在采暖季中，1 月和 12 月温度接近 -20°C ，空气源热泵供暖系统效率为 1.5 和 1.8。而太阳能耦合空气源热泵供暖系统由于装有太阳集热器，可以利用太阳辐射作为辅助热源，补充空气源热泵因气温降低而降低的制热量，所以采暖季效率可维持在 3.5 和 4.1。对于天然气锅炉系统来说，即使天然气锅炉供热效率受天气影响较小，但因为天然气不完全燃烧，化学能不能完全转化成热能，供热效率最低，为 0.7 左右。

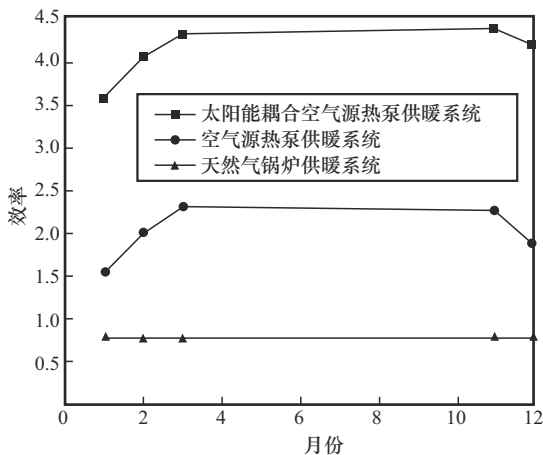


图7 3种系统采暖季逐月效率

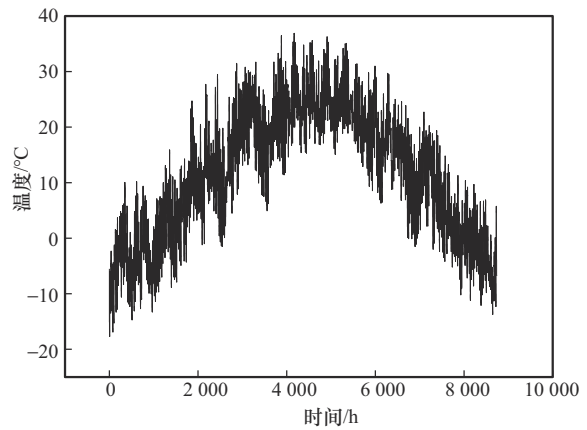


图8 全年逐时温度

2.2.3 经济性与环境效益分析

费用年值法可评估清洁能源供暖改造项目的经济可行性^[29]。费用年值可通过计算项目初始投资、运行费用、维护费用得出。计算过程参考文献^[30]，计算式详见附录（式（5）~式（12））。环境效益分析计算过程参考文献^[31-32]，计算式详见附录（式（13）~（14）），分析过程中，主要对煤炭燃烧排放的二氧化碳量进行比较。当前，中国火电标准煤耗量为 $300\sim 310\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[33]，将 3 种系统能耗换算成煤耗量后再进行比较。根据 Dest-h 软件模拟得出该建筑热负荷指标为 $61.24\text{ W}/\text{m}^2$ ，空调采暖面积为 108 m^2 。选用山西省平段计价电价 $0.47\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，天然气单价取 $2.5\text{ 元}/\text{m}^3$ ，并根据设备对市场上各种类供暖设备品牌、型号、价格及使用寿命等要素进行选型，选择出较为标准的系统初期投资和使用年限。在不考虑通货膨胀、电网、管网铺设的情况下，对 3 种供暖系统进行费用年值、环境效益计算。

(1) 天然气锅炉供暖系统费用年值、环境效益计算。天然气锅炉供暖系统的初始投资按照每平方米 60 元计算，初期总投资 6 480 元，使用寿命为 10 a。计算得出运行费用为 3 968.28 元，维护费用为 194.4 元，费用年值为 5 069.88 元/a。天然气锅炉供暖系统在采暖期耗电量为 $1\,766\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，系统供电煤耗量 0.5 t，二氧化碳排放量约为



1.5 t, 天然气燃烧二氧化碳排放量约为2.5 t, 共计4.0 t。

(2) 空气源热泵供暖系统费用年值、环境效益计算。空气源热泵系统的初始投资为每平方米85元, 据此计算, 系统的初期总投资约为9 180元, 使用寿命为15 a。由于空气源热泵系统主要运行费用为电费, 但机组不可能长时间满负荷运行, 机组主要工作负荷可能集中在75%和50%区间, 所以引用综合部分复合系数(integrated part load value, IPLV)的计算方法^[34]来计算耗电量。参考系统运行策略, 计算得到的运行费用约2 461元。维护费用约137.7元, 最终计算出费用年值为3 516.7元/a。空气源热泵供暖系统在采暖期耗电5 236 kW·h, 系统供电煤耗量为1.6 t, 计算得出二氧化碳排放量约为4.2 t。

(3) 太阳能耦合空气源热泵供暖系统费用年值、环境效益计算。太阳能耦合空气源热泵供暖系统的初始投资为每平方米100元, 据此计算, 系统的初期总投资约为10 800元, 使用寿命为15 a。系统的运行费主要为电费, 参考系统的运行策略, 计算得到的运行成本为1 762.5元。维护费用为162元, 最终计算出的年度费用为3 004.5元。太阳能耦合空气源热泵供暖系统在采暖期耗电3 750 kW·h, 系统供电煤耗量为1 134 kg, 计算得出二氧化碳排放量约为3.3 t。

经过对3种供暖系统费用年值和环境效益的计算, 可得到不同供暖方式经济性对比见表2。

经对比分析, 耦合系统明显优于其他供暖系统, 比天然气锅炉供暖系统的费用年值低40%, 比空气源热泵供暖系统的费用年值低15%, 显示

出良好的经济性和发展潜力。它不仅在经济性方面表现出色, 而且比天然气锅炉供暖系统二氧化碳排放量低18%, 比空气源热泵供暖系统二氧化碳排放量低21%, 在可持续发展方面具有显著优势。

3 结束语

本文使用TRNSYS仿真软件构建了天然气锅炉供暖系统、空气源热泵供暖系统、太阳能耦合空气源热泵供暖系统3种分散式清洁能源供暖系统模型, 以山西某村一户典型农宅为研究对象, 对比分析了3种系统在采暖季的供暖稳定性、系统效率、经济性和环境效益, 并得到以下结论。

(1) 从系统效率的角度看, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统在采暖季天气温度最低的工况下的系统效率比天然气锅炉供暖系统高约3.5倍, 比空气源热泵供暖系统高约1.5倍。

(2) 从经济性角度看, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统比天然气锅炉供暖系统的费用年值低40%, 比空气源热泵供暖系统的费用年值低15%, 具有一定的经济性。

(3) 从环境效益角度看, 太阳能耦合空气源热泵供暖系统的二氧化碳排放量比天然气锅炉供暖系统的二氧化碳排放量低18%, 比空气源热泵供暖系统的二氧化碳排放量低21%, 具有良好的可持续发展性。

通过以上结论, 本文建议在因地制宜、因地制宜的基础上优先推广太阳能耦合空气源热泵供暖系统。同时, 建议出台能体现出不同清洁能源供暖方式成本和居民经济水平差异性的补贴政策,

表2 不同供暖方式经济性对比

供暖方式	初始投资/元	能源运行费用单价/元	运行费用/元	维护费用/元	使用年限/a	费用年值/元	二氧化碳排放量/t
天然气锅炉供暖系统	6 480	2.50	3 968.28	194.4	10	5 069.88	4.0
空气源热泵供暖系统	9 180	0.47	2 461	137.7	15	3 516.7	4.2
太阳能耦合空气源热泵供暖系统	10 800	0.47	1 762.5	162.0	15	3 004.5	3.3

并主动走到居民身边, 监测供暖效果和供暖费用花费, 及时调整补贴政策, 让清洁能源供暖改造方式成为提升居民满意度和幸福感的有效措施。

附录

空气源热泵选型计算式为:

$$W_k = \frac{Q_f}{3600H} \quad (1)$$

其中, W_k 表示空气源热水机组制热量, 单位为kW; Q_f 表示每天热水负荷, 单位为kJ; H 表示空气源热水机组每天工作的时间, 单位为h。

太阳能集热器面积计算式为:

$$A_s = \frac{\delta\Phi_{\text{sum}}}{E_f\eta_d(1-\eta_1)} \quad (2)$$

其中, A_s 表示太阳能集热器集热面积, 单位为 m^2 ; δ 表示太阳能保证率, 取值50%; Φ_{sum} 表示农村住宅热负荷, 单位为W, 由第三章Dest-h软件模拟得出, 取值为6614W; E_f 表示单位集热器集热面积太阳辐射照度, 取值为700 W/m^2 ; η_d 表示集热器集热效率, 取值为0.6; η_1 表示管道及蓄热水箱热损失率, 取值为0.15。

循环水泵选型计算式为:

$$Q_1 = \frac{0.86 \times 1.2 \times W_z}{5} \quad (3)$$

其中, Q_1 表示循环水泵流量, 单位为 m^3/h ; 0.86为制热量转换流量转换系数; 1.2为余量系数; W_z 表示设备制热量, 单位为kW。

缓冲水箱选型计算式为:

$$V_s = \frac{q}{h_1} h_2 K_y \quad (4)$$

其中, V_s 表示缓冲水箱体积, 单位为 m^3 ; h_1 表示热水使用时间, 单位为h; h_2 表示保证热水时间, 单位为h; q 表示热水使用量, 单位为 m^3 ; K_y 表示设计安全系数, 取值为1.3。

清洁能源供暖系统费用年值、系统资本收益系数、系统维护费用、维护系数的计算式分别如下:

$$A_c = O_c + M_c + C_g I_c \quad (5)$$

$$C_g = \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \quad (6)$$

$$M_c = I_c \gamma \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{M_f}{n} \times 100\% \quad (8)$$

其中, A_c 表示系统的费用年值, 单位为元/a; O_c 表示系统年运行费用, 单位为元/a; I_c 表示系统初期投资, 单位为元/a; C_g 表示系统资本收益系数; i 表示系统折现率, 取8%; n 表示系统寿命; M_c 表示系统维护费用, 单位为元/a; γ 表示系统维护系数; M_f 表示设备维护次数。

天然气锅炉供暖系统运行费用分为燃气费和电费两部分, 计算燃气费先要计算系统日耗气量:

$$V_h = \frac{Q}{F_v \beta} \quad (9)$$

其中, V_h 表示耗气量, 单位为 m^3 ; F_v 表示天然气热值, 取35 MJ/m^3 ; β 表示天然气锅炉效率, 由TRNSYS模拟计算得出为0.78; Q 表示建筑热负荷。由此可得系统燃气费为:

$$F_c = dV_h p \quad (10)$$

其中, F_c 表示燃料费, 单位为元; d 表示采暖天数, 单位为d; V_h 表示耗气量, 单位为 m^3/d ; p 表示天然气单价, 取值为2.5元。

系统电费为:

$$E_c = dhKM \quad (11)$$

其中, E_c 表示电费, 单位为元; h 表示单日采暖运行时间, 单位为h; K 表示系统耗电量, 单位为kW; M 表示单位电价, 单位为元/(kW·h)。系统年运行费用为系统燃气费与系统电费之和。

空气源热泵供暖系统、太阳能耦合空气源热泵供暖系统中, 空气源热泵机组主要工作负荷可能集中在75%和50%, 所以引用IPLV的计算方法来进行耗电量计算:

$$\text{IPLV} = 15.1\%A + 33.7\%B + 35.2\%C + 16.1\%D \quad (12)$$

其中, 根据中国典型气候区IPLV取系数15.1%、



33.7%、35.2%、16.1%； A 、 B 、 C 、 D 分别表示设备在100%、75%、50%、25%工作负荷下的能效比值。

环境效益分析主要对煤炭燃烧排放二氧化碳的量进行比较，天然气燃烧后排放的污染物为二氧化碳：

$$E_m = \frac{V_h}{0.78M_v} C_d \quad (13)$$

其中， V_h 表示耗气量，单位为 m^3 ； M_v 表示天然气摩尔体积，取值为22.4 L/mol； C_d 表示二氧化碳的摩尔质量，取值为44 g/mol；0.78是天然气不完全燃烧效率。

运行耗电量转为煤耗量，将3种系统能耗换算成煤耗量后再进行比较，进而计算出二氧化碳排放量为：

$$CEEC = \sum_{i=1}^n EC_i \times CEF_i \quad (14)$$

其中， $CEEC$ 表示能源消费的二氧化碳排放量，单位为 t ； EC_i 表示化石能源 i 的消费量，单位为 t ； CEF_i 表示单位化石能源 i 的二氧化碳排放量，称为二氧化碳排放系数，取值为2.7725； n 表示化石能源消费品种数，取值为1。

参考文献：

- [1] 韦新东, 冯亚东, 王禹崴, 等. 严寒地区农村供暖现状及优化——以长春市农村地区为例[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 85-89.
WEI X D, FENG Y D, WANG Y W, et al. Current situation and optimization of rural heating in severe cold areas: a case study of Changchun rural area[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 85-89.
- [2] 周晴晴, 赵六珍, 郝放, 等. “双碳”背景下低碳供暖体系与能源消费结构构建与优化[J]. 上海企业, 2023, (10): 30-2.
ZHOU Q Q, ZHAO L Z, HAO F, et al. Construction and optimization of low-carbon heating system and energy consumption structure under the background of "dual carbon" [J] Shanghai Enterprises, 2023(10): 30-2
- [3] WANG W, LI F. Study on substitutable value of electric heating instead of coal heating in northern China under carbon constraints[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121155.
- [4] 严雯莲, 李鸿飞. 我国建筑能耗现状及节能途径分析[J]. 上海房地, 2023(11): 60-62.
YAN W L, LI H F. Analysis on the current situation of building energy consumption and energy-saving ways in China[J]. Shanghai Real Estate, 2023(11): 60-62.
- [5] XU S, GE J. Sustainable development of clean heating in rural northern China: Locally tailored energy options[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 35: 655-67.
- [6] MITTERRUTZNER B, CALLEGHER C Z, FRABONI R. Review of heating and cooling technologies for buildings: A techno-economic case study of eleven European countries[J]. Energy, 2023, 284: 129252.
- [7] 袁静, 王选, 马骊, 等. 基于既有农村住宅能效提升的常规清洁取暖方式经济性分析[J]. 暖通空调, 2024, 54(3): 19-23, 117.
YUAN J, WANG X, MA L, et al. Economic analysis of conventional clean heating methods based on energy efficiency improvement in existing rural houses[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2024, 54(3): 19-23, 117.
- [8] 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.
YANG F D, NI D, PENG S Y, et al. Analysis on the performance and carbon emission of solar energy+air source heat pump heating system for residential buildings in Tibet[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2023, 53(S1): 1-3.
- [9] 焦铭泽, 闫铭, 薛春瑜, 等. 碳中和目标下农村地区生物质清洁供暖碳减排及经济性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(11): 1436-1441.
JIAO M Z, YAN M, XUE C Y, et al. Carbon emission reduction and economic analysis of clean biomass heating in rural areas under the goal of carbon neutrality[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11): 1436-1441.
- [10] NIKITIN A, DEYMI-DASHTEBAYAZ M, MURAVEINIKOV S, et al. Comparative study of air source and ground source heat pumps in 10 coldest Russian cities based on energy-exergy-economic-environmental analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128979.
- [11] 唐志伟, 刘静, 石英, 等. 低碳供热技术节能指标与经济效益综合分析[J]. 化工进展, 2021, 40(S1): 156-162.
TANG Z W, LIU J, SHI Y, et al. Comprehensive analysis of energy saving index and economic benefit of low carbon heating technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,

- 2021, 40(S1): 156-162.
- [12] 付毕安. 重视建筑节能改造, 推进我国北方农村地区清洁取暖可持续发展[J]. 中国能源, 2023, 45(S1): 82-90.
FU B A. Attach importance to building energy-saving transformation and promote the sustainable development of clean heating in rural areas in Northern China[J]. Energy of China, 2023, 45(S1): 82-90.
- [13] RANA A, GRÓF G. Assessment of prosumer-based energy system for rural areas by using TRNSYS software[J]. Cleaner Energy Systems, 2024, 8: 100110.
- [14] LI L, CHEN G, ZHANG L, et al. Research on the application of passive solar heating technology in new buildings in the Western Sichuan Plateau[J]. Energy Reports, 2021, 7: 906-914.
- [15] 李钊, 张强强, 沈晨彬, 等. 缓冲水箱对小型户式化空调系统制冷运行影响的研究[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(2): 59-63.
LI Z, ZHANG Q Q, SHEN C B, et al. Influence of buffer water tank on the refrigeration operation of small household air conditioning system[J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(2): 59-63.
- [16] 孔丹丹. 浅谈天然气长输管网安全运营中存在的问题及对策措施[J]. 石化技术, 2023, 30(12): 109-111, 100.
KONG D D. Discussion on the problems and countermeasures in the safe operation of long-distance natural gas pipeline network[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(12): 109-111, 100.
- [17] LI J P, WEI S F, DONG Y H, et al. Technical and economic performance study on winter heating system of air source heat pump assisted solar evacuated tube water heater[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 221: 119851.
- [18] 张志刚, 刘莹, 姚万祥. 空气源热泵热水器在寒冷地区冬季的能效分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 543-550.
ZHANG Z G, LIU Y, YAO W X. Energy efficiency analysis of air energy water heater in cold area in winter[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(1): 543-550.
- [19] 何梦翰, 陈激, 张树前, 等. 空气源热泵热水系统应用能效评价研究[J]. 给水排水, 2023, 49(5): 98-104.
HE M H, CHEN J, ZHANG S Q, et al. Study on energy efficiency evaluation of air source heat pump hot water unit[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(5): 98-104.
- [20] 颜丙正. 低温气候空气源热泵技术分析[J]. 中国设备工程, 2023(21): 239-241.
YAN B Z. Technical analysis of air source heat pump in low temperature climate[J]. China Plant Engineering, 2023(21): 239-241.
- [21] 杨鲁伟, 李明, 王富强, 等. 平板太阳能集热器热损系数及稳定性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 268-275.
YANG L W, LI M, WANG F Q, et al. Research on heat loss coefficient and stability for flat-plate solar collectors[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(2): 268-275.
- [22] 张超, 王洪利, 梁精龙, 等. 太阳能-空气源耦合热泵系统性能研究[J]. 化学工程, 2022, 50(6): 12-16, 28.
ZHANG C, WANG H L, LIANG J L, et al. Performance research on solar-air source coupled heat pump system[J]. Chemical Engineering (China), 2022, 50(6): 12-16, 28.
- [23] 袁闪闪, 张宇峰, 肖慧. 清洁取暖用户侧建筑能效提升方案研究及实施建议[J]. 建设科技, 2021(15): 18-22, 27.
YUAN S S, ZHANG Y F, XIAO H. Study on building energy efficiency improvement scheme and implement suggestions of clean heating users[J]. Construction Science and Technology, 2021(15): 18-22, 27.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 附条文说明: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [25] 杨玥, 王伟东. 青岛某宾馆热水系统改造项目设计与经济性分析[J]. 机电信息, 2021(7): 60-62.
YANG Y, WANG W D. Design and economic analysis of hot water system reconstruction project in a hotel in Qingdao[J]. Mechanical and Electrical Information, 2021(7): 60-62.
- [26] 李程萌, 李持佳, 闫一莹, 等. 北京农村住宅清洁能源供暖方案经济性分析[J]. 煤气与热力, 2017, 37(1): 19-23.
LI C M, LI C J, YAN Y Y, et al. Economic analysis of clean energy heating schemes in Beijing rural area[J]. Gas & Heat, 2017, 37(1): 19-23.
- [27] 李金平, 董玉慧, 李彩军, 等. 寒冷地区空气源热泵辅助太阳能热水器供暖性能[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 910-920.
LI J P, DONG Y H, LI C J, et al. Performance of solar vacuum tube water heater-air source heat pump system in cold area[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(7): 910-920.
- [28] 符永正, 梁明珊. 关于热泵一次能源利用率的计算与分析[J]. 暖通空调, 2022, 52(2): 41-45.



FU Y Z, LIANG M S. Calculation and analysis of primary energy utilization rate of heat pumps[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(2): 41-45.

[29] 冯为民, 付晓灵. 工程经济学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2012.

FENG W M, FU X L. Engineering economics[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2012.

[30] 闫凯玲, 刘爱明, 米生福, 等. 严寒地区区域供暖系统优化方案技术经济性分析[J]. 建材世界, 2023, 44(1): 129-132.

YAN K L, LIU A M, MI S F, et al. Analysis of the renovation plan of the existing district heating system in the cold area[J]. The World of Building Materials, 2023, 44(1): 129-132.

[31] 任豪, 闫亚钦, 袁涛. 典型农宅采暖方式经济性分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(14): 90-93.

REN H, YAN Y Q, YUAN T. Economic analysis of typical rural house heating methods[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(14): 90-93.

[32] 吴国华. 化石能源消费的二氧化碳排放量计算与分析: 以济南市为例[J]. 理论学刊, 2012(3): 61-65.

WU G H. Calculation and analysis of carbon dioxide emissions from fossil energy consumption—taking Jinan as an example[J]. Theory Journal, 2012(3): 61-65.

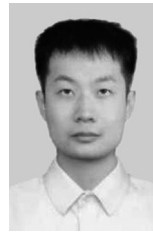
[33] 常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额: GB21258—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

The norm energy consumption per unit product of generocr coal-fired power set: GB21258—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[34] 王嘉, 谢峤, 石文星, 等. 低温空气源热泵(冷水)机组的 IPLV (H)评价方法研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(06): 9-14.

WANG J, XIE Q, SHI W X, et al. Research on IPLV (H) for low temperature air source heat pump (water chilling) packages [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6): 9-14.

[作者简介]



马天锋 (1994-), 男, 上海应用技术大学硕士生, 主要研究方向为能源系统优化。



张亚茹 (1985-), 女, 博士, 上海应用技术大学讲师, 主要研究方向为技术采纳、能源系统优化。



商天文 (1994-), 男, 国网物资有限公司工程师, 主要研究方向为电力大数据与数字物流。