

# 太阳能辅助地下水源热泵系统在 严寒地区的运行特性分析

张晓明,王 强,孙秋瑾,邵明宇,关浩然

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究太阳能辅助地下水源热泵技术在严寒地区的实际应用性能,缓解严寒地区大型公共建筑能耗过大、污染物排放过多的情况。方法 以沈阳市某大型公共建筑太阳能辅助地下水源热泵系统为例,使用 Trnsys 软件搭建太阳能辅助地下水源热泵系统仿真模型;使用热电偶温度计、超声波流量计等仪器进行实验测试,依据实验结果验证仿真模型的准确性。基于 Trnsys 仿真模型,分析太阳能辅助地下水源热泵系统在严寒地区的运行特性,并与单独地下水源热泵系统进行对比。结果 建立的 Trnsys 仿真模型模拟结果与实验结果的全年最大相对误差约为 7.1%。当太阳能辐射强度达到  $450 \text{ W/m}^2$  以上时太阳能系统满足开启条件。太阳能系统全年开启时间约 47 683 min,供水量约  $3\,910 \text{ m}^3$ 。地下水源热泵冬季为建筑供暖时平均制热系数约 4.23,夏季为建筑供冷时平均制冷系数约 4.68。太阳能系统的使用增加了约 20% 的初投资,但年运行费用明显降低,投资回收期约 3.3 年。结论 太阳能辅助地下水源热泵系统在严寒地区是一种有效的技术手段,大大降低了对环境的污染。

**关键词** 太阳能;地下水源热泵;Trnsys 仿真;投资回收期

中图分类号 TU833.3

文献标志码 A

## Operation Characteristics of Solar Assisted Ground Water Source Heat Pump System in Cold Region

ZHANG Xiaoming, WANG Qiang, SUN Qiujin, SHAO Mingyu,  
GUAN Haoran

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to alleviate the excessive energy consumption and pollutant discharge of large public buildings in cold regions, the practical application performance of solar assisted underground water source heat pump technology is studied. The solar assisted groundwater source heat pump

收稿日期:2021-12-24

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2019YFE0100300)

作者简介:张晓明(1963—),男,教授级高级工程师,主要从事建筑节能方面研究。

system of a large public building in Shenyang as an example, a simulation model of this system was established by Trnsys software. The accuracy of the simulation model is verified with experimental data attained by thermocouple thermometer, ultrasonic flow meter and other instruments. The maximum annual relative error between the simulation results and experimental results is about 7.1%. Based on Trnsys simulation model, the operation characteristics of solar assisted GWHP system in cold region are analyzed and compared with that of GWHP system without solar assisted. It finds when the solar radiation intensity reaches more than  $450\text{ W/m}^2$ , the solar unit of this system meets the opening condition. The annual opening time of the solar unit is about 47 683 minutes, and the water supply is about  $39,10\text{ m}^3$ . The average heating coefficient of GSHP is about 4.23 in winter. The average cooling coefficient for building cooling in summer is about 4.68. The use of the solar unit increased the initial investment by about 20%, but the annual operating cost was significantly reduced, and the payback period was about 3.3 years. Solar assisted underground water source heat pump system is an effective technical means in the cold region, which greatly reduces the pollution to the environment.

**Key words:** solar energy; underground water source heat pump; trnsys simulation; pay back period

我国严寒地区的大型公共建筑,长期以来一直以燃煤作为主要能源,运行能耗大、污染物排放多<sup>[1-3]</sup>。目前,全球的经济都在向低碳方向转型<sup>[4-7]</sup>。地下水源热泵作为一种使用可再生能源的应用技术,只需消耗少量电能即可获得较高的热量,能够取得良好的节能效果<sup>[8-12]</sup>。太阳能是最为清洁的能源之一,不会产生有害物质排放,不会造成环境污染,而且太阳能系统运行费用极低,是非常有利用价值的新能源技术<sup>[13]</sup>。然而太阳能具有不稳定性,需要其他能源补充。将太阳能与地下水源热泵联合使用可以弥补二者的缺点<sup>[14-15]</sup>。目前新能源技术在严寒地区大型公共建筑中的实际应用较少。笔者通过实验和模拟两种方式,分析太阳能辅助地下水源热泵系统在严寒地区大型公共建筑中的实际应用。

1 系统原理

以沈阳市某大型公共建筑为例。该建筑面积约  $45\ 000\text{ m}^2$ ,使用功能包括餐饮、酒店,办公等。图1为系统原理图,该系统包括太阳能集热系统和地下水源热泵系统,由两台地下水源热泵机组承担建筑全年负

荷;由另一台地下水源热泵和太阳能系统联合承担建筑生活热水。当太阳能辐射强度达到可供给生活热水时,太阳能系统开启,太阳能强度不足时,自动切换为地下水源热泵供热。

所使用的槽式太阳能集热器参数如表1所示,其结构为真空型玻璃管结构,管内以导热油作为循环工质,通过聚焦和吸收等过程,完成太阳能到热能的转化,以便于满足不同的负载需求。导热油油温最高可达  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具有良好的集热效果。

表1 槽式太阳能集热器参数  
Table 1 Solar collector parameters

种类	焦距/m	开口距离/m	集热器总面积/ $\text{m}^2$
槽式集热器	0.85	2.5	800

热泵机组参数如表2所示,地下水源热泵机组选用3台,其中两台的主要作用是负责建筑冷热负荷,并作为生活热水的备用能源。第3台的主要作用是在太阳能系统无启的时间提供生活热水,作为生活热水的补充能源。在此系统中太阳能集热器与地下水源热泵互补使用,克服了太阳能系统在夜晚无法开启的弊端。

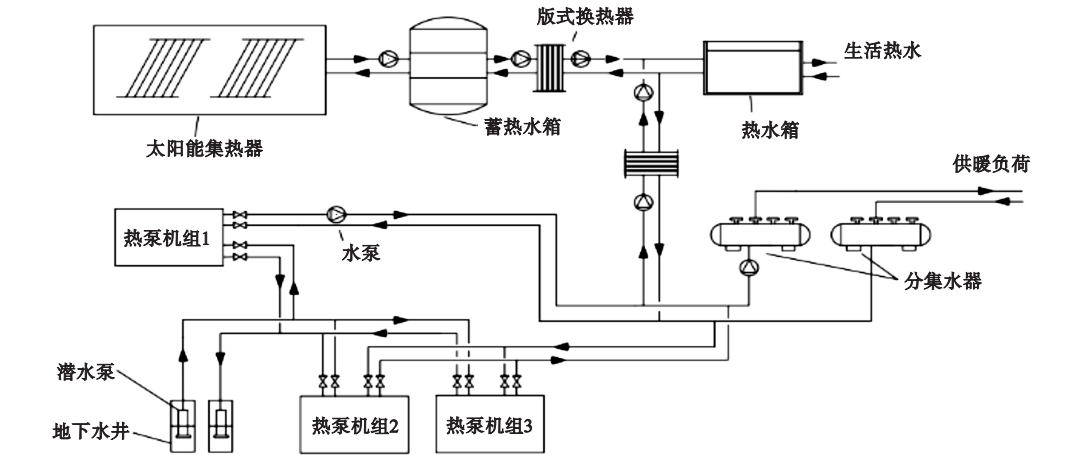


图1 太阳能辅助地下水源热泵系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of solar assisted GWHP system

表2 地下水源热泵机组参数

Table 2 Parameters of GWHP unit

机组型号	额定制热量/kW	额定制冷量/kW
61XW-470B1	1 805	1 688

2 实验内容

测试时间从2020年5月1日开始,到2021年5月1日结束。测试所使用的仪器如表3所示。通过对管道内流体的温度和流量的测量,可以计算出太阳能系统产热量、地下水源热泵系统产热量等数据,使用万用表对耗电量进行测量,进而可计算出热泵机组逐时COP。

表3 实验仪器

Table 3 Experimental instrument

测试内容	实验仪器	型号
水温度	热电偶温度计	PT100
水流量	超声波流量计	FSCS10C1-00C
耗电量	钳形万用表	9205A

$$Q_p = \frac{c_w m (t_h - t_c)}{3\,600} \quad (1)$$

式中: $Q_p$ 为热泵机组制热量,kW·h; $m$ 为质量流量,kg/h; $c_w$ 为流体比热,kJ/(kg·℃); $t_h$ 、 $t_c$ 分别为机组进出口温度,℃。

$$COP_h = \frac{Q_{pr}}{W_p} \quad (2)$$

$$EER_h = \frac{Q_{pl}}{W_p} \quad (3)$$

式中: $COP_h$ 为热泵机组制热性能系数; $EER_h$ 为热泵机组制冷性能系数; $W_p$ 为压缩机耗功率,kW; $Q_{pr}$ 为机组在冬季的制热量,kW; $Q_{pl}$ 为机组在夏季的制冷量,kW。

3 仿真模型

3.1 DeST 计算模型

笔者使用DeST软件建立了建筑模型(见图2)。建筑的供暖季从11月1日开始,到次年3月31日结束。空调季从5月17日开始,到9月15日结束。计算建筑全年逐时负荷,将DeST计算结果导入Trnsys仿真模型,用于进一步计算。

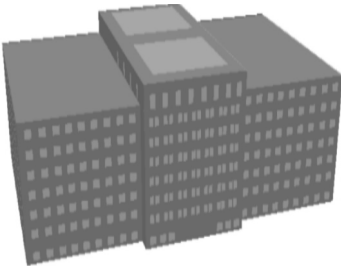


图2 DeST 计算模型

Fig. 2 DeST calculation model

3.2 Trnsys 计算模型

使用 Trnsys 软件建立太阳能辅助地下水水源热泵系统仿真模型,系统模型如图 3 所示。模型包括两个输出末端,分别为生活热水端和建筑负荷端。太阳能集热器选用槽式集热器 type536,热泵机组选用 type225,冷热控制选用 type14h。通过控制器控制机组启

停和阀门切换。使用气象参数控制模块,输入不同典型城市的气象参数。同时建立了单独地下水水源热泵系统的仿真模型,作为对比方案。在此模型中,建筑全年冷热负荷和生活热水都由热泵机组负责,地下水水源热泵系统模型如图 4 所示。

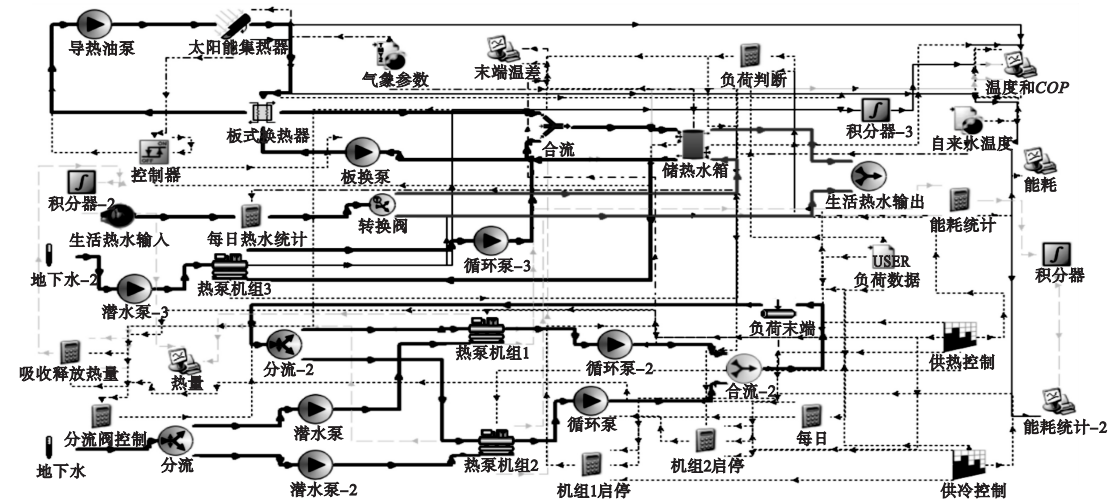


图 3 太阳能辅助地下水水源热泵系统模型

Fig. 3 Solar assisted GWHP system model

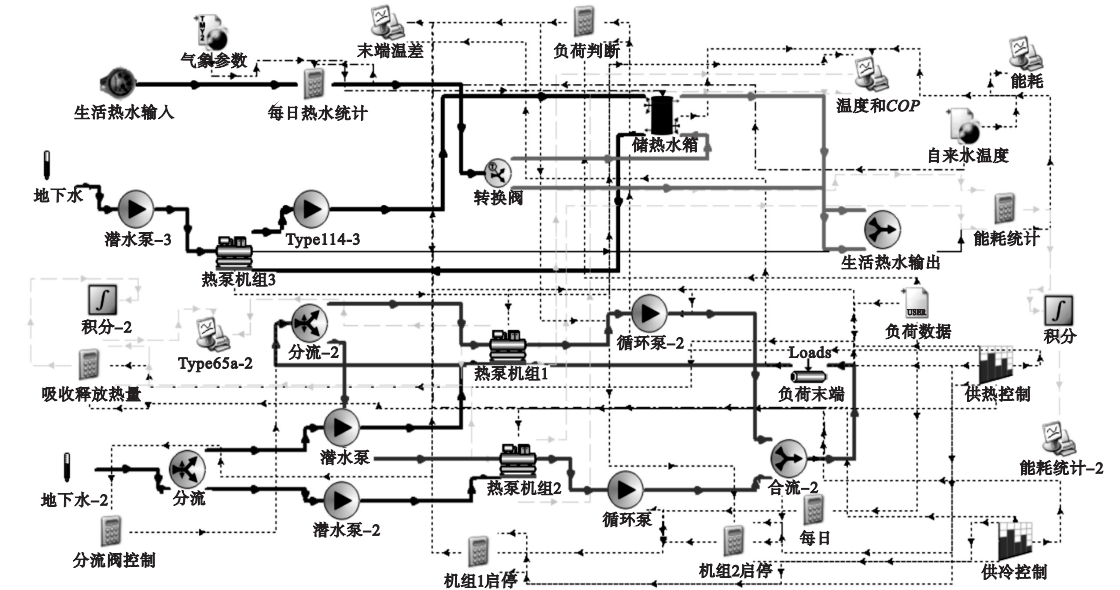


图 4 地下水水源热泵系统模型

Fig. 4 GWHP system model

4 结果与分析

4.1 实验结果

太阳能全年开启时间实验测试结果如图5所示,夏季的开启时间明显高于冬季。系统全年开启时间为47 683 min,供水温度50℃,可制备生活热水约0.082 m<sup>3</sup>/min,全年可制备生活热水总量为3 910 m<sup>3</sup>。在冬至日开启时间为43 min,在夏至日开启时间为623 min。

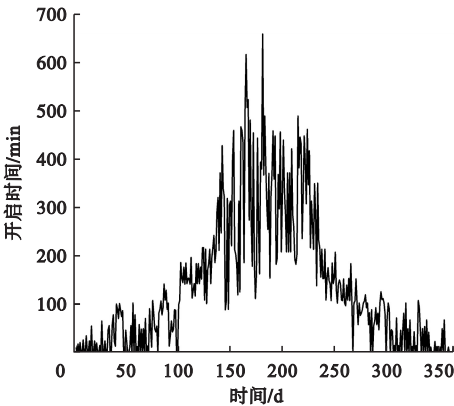


图5 太阳能系统开启时间

Fig.5 Solar system startup time

系统中热泵机组1和2的功能均为负担建筑冷热负荷,在负荷改变时,两台机组同时变化开启率,因此以机组1为代表。图6为热泵机组耗电量测试结果。夏季太阳能辐射强度高,太阳能系统开启时间长,机组耗电量相对较低;冬季太阳能系统开启时间短,因此热泵机组耗电量相对较高。基于测试结果,进行了机组全年COP/EER计算(见图7)。热泵机组1供暖季平均COP约4.23,制冷季平均EER约4.68;热泵机组3全年平均制热COP约4.08。地下水的温度并不是恒定不变的,而是受到周围环境的影响和地下水源热泵取热与补热的影响。一年中地下水温最高约18℃,出现在制冷季结束前后,地下水温最低约12℃,出现在供暖季结束前后。

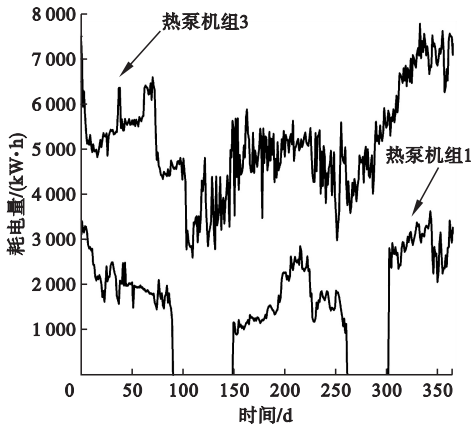


图6 热泵机组耗电量

Fig.6 Heat pump unit power consumption

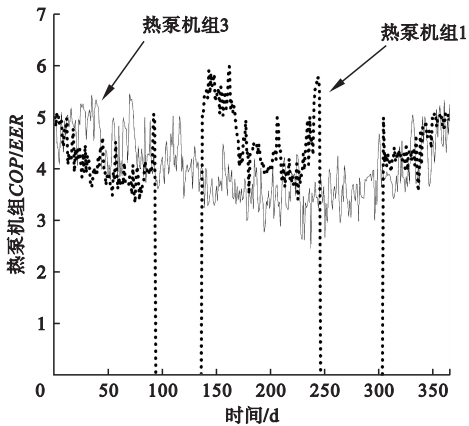


图7 热泵机组全年COP/EER

Fig.7 Annual COP/EER of heat pump units

4.2 模拟结果

使用DeST软件模拟计算建筑全年负荷,图8为建筑全年逐时冷热负荷和全年所需生活热水负荷。生活热水负荷的大小与供水量和自来水温度有关,供水量平均每天需要约15 m<sup>3</sup>,而自来水温度在夏季最高约18℃,在冬季最低约12℃。这种温度的差异造成生活热水负荷是一条变化的曲线。由于建筑供暖的需求,地下水源热泵从地下取热,由于建筑供冷的需求,地下水源热泵向地下补热。全年总热负荷大于冷负荷,比例约1.1/1。加上生活热水的负荷,这种比例被放大到约1.3/1。当有太阳能系统加入之后,这种不平衡被缩减到约1.15/1。这有利于改善地下水温度的堆积情况。



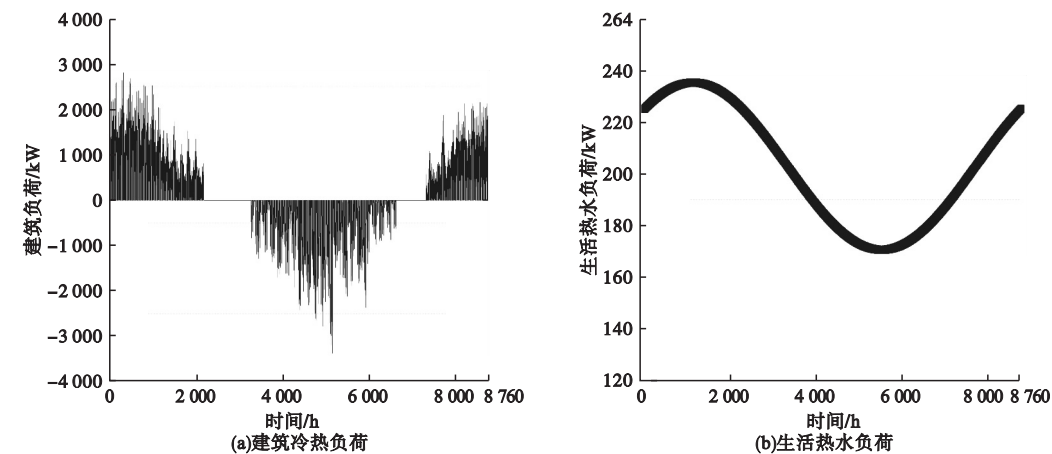


图 8 建筑全年逐时负荷

Fig. 8 Annual hourly load of the building

沈阳地区的全年太阳能辐射强度统计如图 9 所示。经过计算,当太阳能辐射强度达到  $450\text{ W/m}^2$  以上时,太阳能系统自动开启。图 10 是对热泵机组 1 和 3 的全年  $COP$  模拟结果,热泵机组 1 承担建筑冷热负荷,在过渡季不开启,热泵机组 3 作为生活热水的补充热源,需要全年开启。模拟的结果与实验结果基本保持一致。

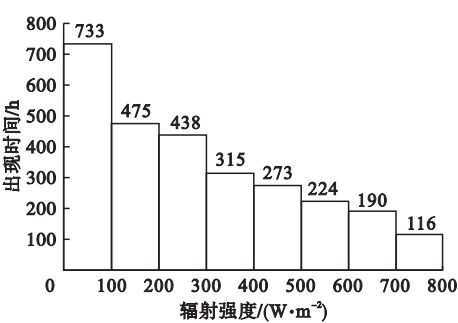


图 9 太阳能辐射强度

Fig. 9 Solar radiation intensity

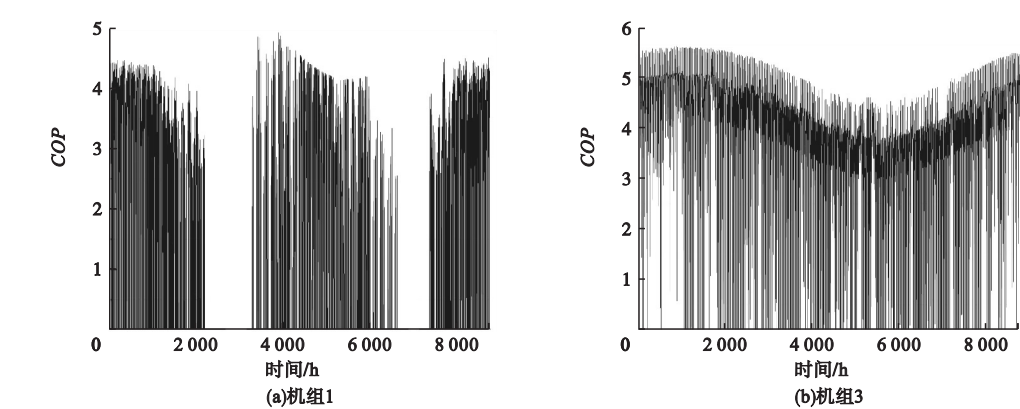


图 10 热泵机组全年逐时  $COP$  模拟结果

Fig. 10 Annual hourly  $COP$  simulation results of heat pump units

4.3 误差分析

为检验所建立的 Trnsys 模型的准确性,笔者进行误差分析。

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% . \tag{4}$$

式中: $\delta$  为实际相对误差; $\Delta$  为绝对误差; $L$  为真值。

造成误差的重要原因之一是测量精度。使用万用表测量耗电量时造成的误差,产生的原因包括档位不同所带来的表头灵敏度差

异,机械调零时带来的误差等;热电偶温度计由于线路距离过长产生的温度偏差等。分别选取太阳能系统开启时间和热泵机组3的COP作为对比数据。图11为相对误差分析

结果,太阳能开启时间的全年最大对误差约5.1%。热泵机组3的COP全年最大相对误差约7.1%。

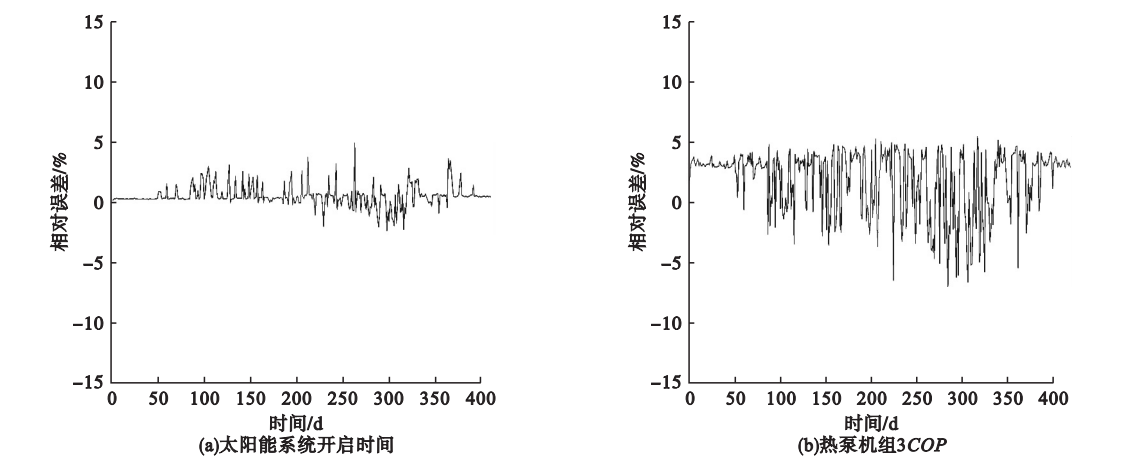


图 11 相对误差分析

Fig. 11 Relative error analysis

4.4 对比分析

将太阳能辅助地下水源热泵的联合运行系统与单独地下水源热泵系统进行初投资和运行能耗对比。基于 Trnsys 仿真模型,模拟了两种模式的全年耗电量。初投资及运行费用统计如表4所示。只有地下水源热泵机组单独运行的系统,机组耗电量比两系统联合运行系统增加约25%。在初投资对比方面,联合运行系统增加了约81万元的初投资,但每年可以节省运行费用24.5万元,投资回收期约3.3年。太阳能系统的加入,虽然增加了部分初投资,但是在运行费用上大大降低。太阳能系统的能耗全部来自于循环水泵,能耗远低于其他系统。

表 4 系统初投资及运行费用

Table 4 Initial investment and operation fees		
系统类型	初投资	年运行费用
联合运行-太阳能系统	108	5.5
联合运行-地下水源热泵系统	378	120
单独运行-地下水源热泵系统	405	150

5 结 论

(1)太阳能开启时间的模拟结果与实验结果的最大相对误差约5.1%;在模拟地下水源热泵COP时,模拟结果与实验结果的最大相对误差约7.1%。

(2)此槽式太阳能集热器系统的最小开启辐射强度约450W/m<sup>2</sup>,在冬至日开启时间约43min,在夏至日开启时间约623min。

(3)地下水的温度并不是保持恒定不变的,一年中地下水温最高约18℃,出现在制冷季结束前后,地下水温最低约12℃,出现在供暖季结束前后。热泵机组1供暖季平均COP约4.23,制冷季平均EER约4.68;热泵机组3全年平均COP约4.08。

(4)严寒地区虽然太阳能辐射强度较低,但太阳能系统仍然有较好的利用价值。对比单独地下水源热泵系统,太阳能与地下水源热泵联合运行系统在初投资方面增加约81万元,年运行费用降低约24.5万元,投资回收期约3.3a,是一种有较好使用前景的能源系统。

## 参考文献

- [1] 王博渊. 基于太阳能与水源热泵的多能源耦合供热技术研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2018.  
(WANG Boyuan. Technology of multi energy coupling heating based on solar energy and water source Heat pump [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2018.)
- [2] 张晓明, 李通禹, 陈柏龙. 空气-土壤双热源热泵系统运行分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 528-533.  
(ZHANG Xiaoming, LI Tongyu, CHEN Bailong. Performance analysis of air-soil dual heat source heat pump system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(3): 528-533.)
- [3] 郝红, 薛翔远. 太阳能-地源热泵与热网互补供热系统运行特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 1068-1076.  
(HAO Hong, XUE Xiangyuan. Running characteristics of the complementary heating system with solar energy-ground source heat pump and heating network [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 1068-1076.)
- [4] 庞战. 济南某热电机组和热水锅炉联合供热优化运行与经济分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
(PANG Zhan. Optimization operation and economic analysis of combined heating of thermal power units and hot water boilers in Jinan [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)
- [5] 王岗, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能-热泵复合供能系统[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2132-2139.  
(WANG Gang, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Solar-heat pump combined energy system [J]. CIESC journal, 2017, 68(5): 2132-2139.)
- [6] 曲世琳, 王东旭, 董家男, 等. 基于 TRNSYS 的太阳能水源热泵系统优化研究[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(4): 494-499.  
(QU Shilin, WANG Dongxu, DONG Jianan, et al. Optimization on solar-assisted heat pump system based on TRNSYS [J]. Journal of Nanjing university of science and technology, 2015, 39(4): 494-499.)
- [7] 尚少文, 朱天然, 刘兵红, 等. 基于 TRNSYS 的地理管换热器温度场变化规律研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 744-750.  
(SHANG Shaowen, ZHU Tianran, LIU Binghong, et al. Research on the change law of temperature field of TRNSYS-based buried tube heat exchangers [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(4): 744-750.)
- [8] 马洪亭, 张传龙, 宋肖, 等. 太阳能-水源热泵多能互补供暖系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2152-2158.  
(MA Hongting, ZHANG Chuanlong, SONG Xiao, et al. Experimental analysis of the solar assisted water source heat pump system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(11): 2152-2158.)
- [9] 李婷. 太阳能供暖在红原机场的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
(LI Ting. Study on the application of solar space heating in Hongyuan Airport [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [10] 刘馨, 李画, 冯国会, 等. 寒冷地区采暖季某办公楼水源热泵系统运行能效综合分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 706-714.  
(LIU Xin, LI Hua, FENG Guohui, et al. Comprehensive analysis of operating energy efficiency for a water source heat pump system in an office building during the heating season in cold regions [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(4): 706-714.)
- [11] 刘望保. 长沙市太阳能及地源热能利用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
(LIU Wangbao. The solar energy and ground source heat energy utilization research of Changsha [D]. Changsha: Hu'nan University, 2014.)
- [12] 原鹏丽. 太阳能-海水源热泵联合供暖系统的模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
(YUAN Pengli. The simulation study of solar assisted sea-water source heat pump system for heating supply [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.)
- [13] 于靓, 毕然冉, 李辰琦, 等. 基于 TRNSYS 的 CIGS 薄膜光伏余热-土壤源双热源热泵系统模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 915-920.  
(YU Liang, BI Ranran, LI Chenqi, et al. Based on TRNSYS's simulation of CIGS film photovoltaic waste heat and soil source double heat source heat pump system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(5): 915-920.)
- [14] 李善可. 太阳能-水源热泵辅助供暖系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.  
(LI Shanke. Solar energy-water source heat pump heating system of auxiliary [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [15] 贺孟春, 刘东, 李斯玮. 集中采暖地区住宅建筑不同采暖方式的经济性比较[J]. 节能技术, 2008, 26(4): 340-346.  
(HE Mengchun, LIU Dong, LI Siwei. Economic research for several main heating supply ways in the residential buildings of centralized heating area [J]. Energy conservation technology, 2008, 26(4): 340-346.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)