

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202102043



SHW 系统和 SHPHW 系统在 寒冷地区的性能模拟与分析

徐振, 田琦, 王永帅, 田健

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 以 TRNSYS 软件为平台, 构建太阳能热水 (SHW) 系统和太阳能热泵热水 (SHPHW) 系统. 基于相同环境条件进行两个系统的能耗对比及经济性分析, 并在山西省太原市搭建实验平台进行验证. 结果表明: 太阳能热水系统和太阳能热泵热水系统年综合性能系数分别为 1.70, 2.04; 相较于传统的太阳能热水系统, 太阳能热泵热水系统太阳能保证率年平均提高 5%, 全年运行能耗节省 16.36%, 运行约 6 a 即可回收成本, 在中国农村寒冷地区优先选用太阳能热泵热水系统, 经济效益良好.

关键词: 太阳能保证率; 热水系统; 热泵热水系统; 寒冷地区; 运行模拟; 经济性; 太原市

中图分类号: TU 832.17

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)01-0081-07

Performance Simulation and Analysis of SHW System and SHPHW System in Cold Regions

XU Zhen, TIAN Qi, WANG Yongshuai, TIAN Jian

(Civil Engineering College, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A solar hot water (SHW) system and a solar heat pump hot water (SHPHW) system were constructed on the platform of TRNSYS software. Based on the same environmental conditions, the energy consumption comparison and economic analysis of each system were carried out. An experimental platform was built in Taiyuan City for verification. The results show that the annual comprehensive performance coefficients of solar hot water system and solar heat pump hot water system are 1.70 and 2.04 respectively. Compared with the traditional solar hot water system, the solar energy guarantee rate of the solar heat pump hot water system is increased by an average of 5% annually, and the annual operation energy consumption can be saved by 16.36%. The cost can be recovered after about 6 years of operation. In the cold rural areas of China, the solar heat pump hot water system is prior selection with good economic benefits.

Keywords: solar energy guarantee rate; hot water system; heat pump hot water system; cold area; operation simulation; economy; Taiyuan City

目前, 太阳能热利用技术已经广泛应用于太阳能热水系统及太阳能热泵热水系统中, 太阳能热水系统已成为技术上最为成熟, 经济上最具竞争力, 应用上最为广泛, 产业化上发展最为迅速的太阳能光热利用技术^[1]. 自 Jordan 等^[2]首次将太阳能集热器与热泵结合后, 太阳能热水系统表现出既克服太阳能低密度、不稳定等缺陷, 又能节省能源等优势. 在太阳能热泵热水系统的研究方面, 国内外学者在实验

收稿日期: 2021-02-28

通信作者: 田琦 (1966-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事可再生能源利用及建筑节能新技术的研究. E-mail: 412559908@qq.com.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAJ04B02)

和模拟等方面均进行了大量的研究^[3-12]. 马洪亭等^[13]搭建太阳能-水源热泵多能互补地板辐射供暖实验系统,并与传统城市集中供暖系统进行对比实验,得出太阳能保证率达 24% 以上,且该系统比传统区域锅炉房集中供暖系统节能 30.55%. 冯涛等^[14]基于 TRNSYS 软件建立太阳能-地源热泵-水源热泵-空气源热泵多能互补耦合系统,对南京地区某科研楼示范项目进行模拟,得到运行约 2 a 即可回归成本,具有良好的经济效益. 朱继宏等^[15]根据不同地区负荷特性,利用 TRNSYS 平台对建筑适用性进行了分析,得出严寒地区及寒冷地区太阳能水源热泵适用性较好,环境效益明显. 陈景等^[16]以南京某别墅的太阳能热泵系统为研究对象,对供暖系统的水箱体积和太阳能集热面积比值(VAR)进行研究,表明当 VAR 取值在 0.053~0.073 之间时,系统的全年费用达到最低,系统的太阳能保证率在 53.26% 左右.

目前,国内外学者研究的内容主要集中在太阳能热利用中集热器性能提升,以及集热器与热泵机组耦合后的运行特性上,而对上述提及的两种热水系统在同一地区的运行性能比较方面研究较少,缺少在系统选择上的理论支撑. 因此,本文以太阳能热水(solar hot water, SHW)系统和太阳能热泵热水(solar heat pump hot water, SHPHW)系统为对象,研究其同一环境下的运行性能,以期为我国寒冷地区农村清洁供暖(或生活热水)系统选择应用上提供一定的指导.

1 SHW 系统和 SHPHW 系统布局

SHW 系统和 SHPHW 系统的原理图,如图 1,2 所示. SHW 系统是利用太阳能集热器在白天接收太阳辐射,将太阳能转化为热能,并通过供热水箱储存起来作为生活热水或供暖使用. 供暖时,启动供暖侧循环水泵,将水箱热水送至用热末端,当供热水箱内的温度低于供暖设定温度(40 ℃)时启动水箱内辅助电加热器.

SHPHW 系统不同于 SHW 系统的地方在于,其多配置了一套一体式水源热泵机组(自带循环水泵)和容积较小的蓄热水箱. 白天,集热器经太阳辐射转化的热能进入较小的蓄热水箱内,提升水箱初始温度,便于热泵快速启动;而热泵消耗少量的电能,在蒸发器侧吸收蓄热水箱的热量经制热循环,并在冷凝器侧将热量释放至供热水箱内储存起来.

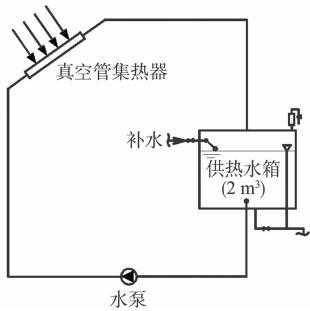


图 1 SHW 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SHW system

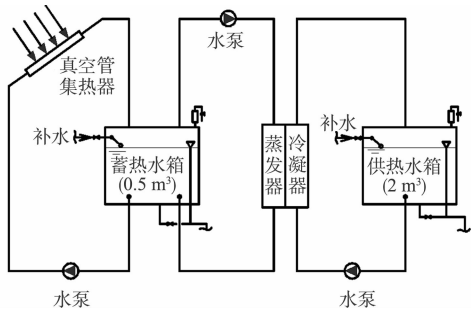


图 2 SHPHW 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPHW system

2 系统数学模型

SHW 系统数学模型为

$$Q_j + Q_{aux} = Q_{t,l} \tag{1}$$

式(1)中: Q_j 为太阳能集热器的得热量, kJ; Q_{aux} 为电辅助加热量, kJ; $Q_{t,l}$ 为供热水箱得热量, kJ.

SHPHW 系统数学模型为

$$Q_j + Q_{aux} + Q_{t,s} = Q_{t,l} - \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_h d\tau \tag{2}$$

式(2)中: $Q_{t,s}$ 为蓄热水箱提供的热量, kJ; P_h 为水源热泵机组运行功率, kW; τ_1, τ_2 分别为热泵开启和停运的时间, s.

集热器得热量的计算公式为

$$Q_j = \int_{\tau_3}^{\tau_4} I \cdot \eta d\tau \cdot A = \int_{\tau_3}^{\tau_4} m_f C_p (t_{f,2} - t_{f,1}) d\tau. \tag{3}$$

式(3)中: I 为太阳辐照度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; η 为集热器的瞬时效率; A 为集热器的采光面积, m^2 ; τ_3, τ_4 分别为太阳辐射照射在集热器开始和终止的时间, s ; m_f 为集热器的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; C_p 为水的定压比热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s})^{-1}$; $t_{f,1}, t_{f,2}$ 分别为集热器瞬时进口和出口温度, $^{\circ}\text{C}$.

水箱得热量的计算公式为

$$Q_{t,i} = m_t C_p (t_{t,2} - t_{t,1}), \quad i=1, \text{s}. \tag{4}$$

式(4)中: m_t 为水箱内水的质量, kg ; $t_{t,1}, t_{t,2}$ 分别为水箱内的初始和终止温度, $^{\circ}\text{C}$.

辅助电加热量计算公式为

$$Q_{\text{aux}} = \int_{\tau_5}^{\tau_6} P_{\text{aux}} d\tau. \tag{5}$$

式(5)中: P_{aux} 为辅助电加热的功率, kW ; τ_5, τ_6 分别为辅助电加热器开启和停运的时间, s .

3 TRNSYS 模型及参数设置

以山西省太原市典型气象年数据为气象参数,在系统原理图和数学模型基础上,依托 TRNSYS 软件,分别建立 SHW 系统模拟平台和 SHPHW 系统模拟平台,分别如图 3,4 所示. 通过模拟得到系统的全年运行数据,并对两种系统进行比较分析.

3.1 SHW 系统

SHW 系统选用 Type2b(控制器),Type3(循环水泵),Type4a(水箱),Type14h(时间相关函数),Type15(天气数据处理器),Type65c(绘图仪),Type71(真空管太阳能集热器)进行模型建立和仿真模拟. SHW 系统仿真模型由集热面积为 14.9 m^2 的真空管太阳能集热器,一台功率为 0.04 kW ,额定流量为 $35 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的循环水泵和蓄水量为 2 m^3 的供热水箱(内含功率为 10 kW 的辅助电加热器)构成太阳能集热循环系统. 为防止循环水泵频繁启停,以供热水箱的出口温度比太阳能集热器的出口温度低 1°C 时关闭循环泵,温差高 3°C 时开启循环泵作为太阳能集热系统的控制策略.

3.2 SHPHW 系统

SHPHW 系统选用 Type668(水源热泵)进行模型建立和仿真模拟. SHPHW 系统的仿真模型由集热面积为 14.9 m^2 的真空管太阳能集热器,一台功率为 0.04 kW ,额定流量为 $35 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的循环水泵和蓄水量为 0.5 m^3 的蓄热水箱构成太阳能集热循环系统,由蓄水量为 2 m^3 的供热水箱(内含功率为 10 kW 的辅助电加热器),额定制热量为 7.4 kW 的热泵机组,一台相同参数的循环水泵构成水源热泵循环系统. 在热泵蒸发器侧设置相同参数的水泵,用以太阳能集热循环系统和水源热泵循环系统之间的连接.

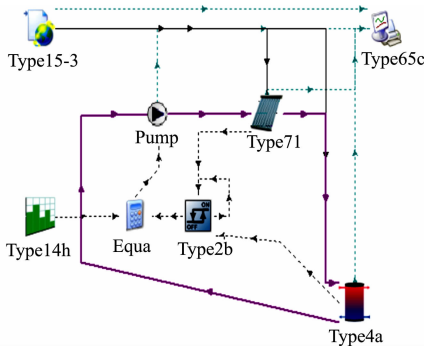


图 3 SHW 系统仿真模型

Fig. 3 SHW system simulation model

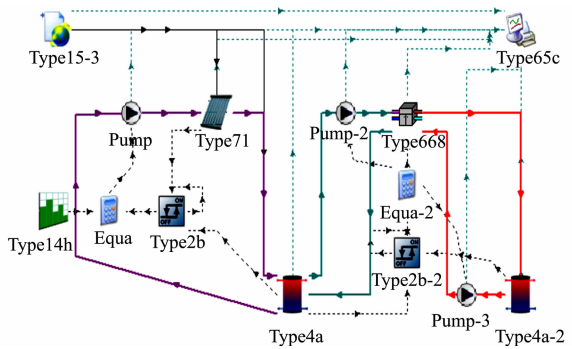


图 4 SHPHW 系统仿真模型

Fig. 4 SHPHW system simulation model

为保证热泵机组的正常运行温度,以热泵热源侧(0.5 m^3 的蓄热水箱内)水温低于 10°C 时热泵停止运行,高于 15°C 时启动运行作为热泵机组的控制策略. 太阳能集热循环泵的控制策略与太阳能热水系统相同.

4 实验结果与分析

4.1 实验验证

在山西省太原市建立了 SHW 和 SHPHW 两套系统,并进行了测试,实验装置如图 5 所示.系统共包含十二组真空管集热器,每组集热器安装 25 根真空管,管间距均为 21.4 mm,两个蓄水量为 2 m³ 的供水水箱(内含功率为 10 kW 的辅助电加热器),一个蓄水量为 0.5 m³ 的蓄热水箱和一台额定制热量为 7.4 kW 一体式热泵机组(自带循环水泵).

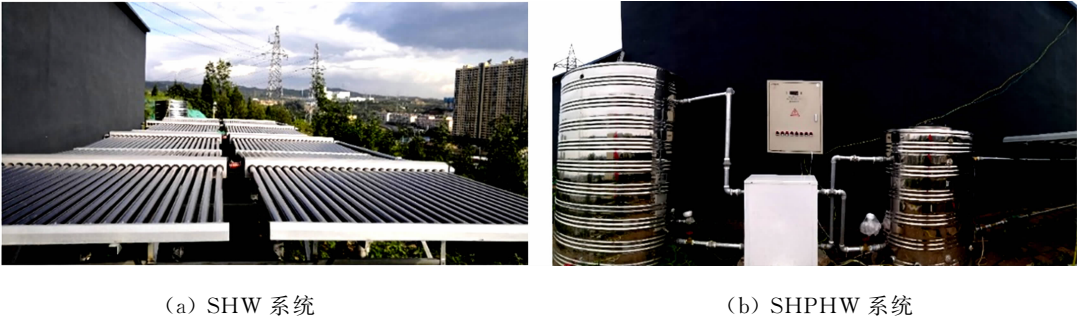


图 5 两套系统的实验装置图
Fig. 5 Experimental setups of two systems

实验中所使用的单只真空管和 XYG-6T 型水源热泵的主要参数,分别如表 1,2 所示.表 1 中: A 为采光面积; p_R 为额定工作压力; V_c 为集热器流体容量; l, b 分别为外形尺寸的长和宽.表 2 中: Q_n 为名义制热量; P_R 为额定功率; m 为 R22 制冷剂质量; t_e, t_c 分别为蒸发温度和冷凝温度; $p_{h/l}$ 为高/低压侧最大允许压力; p_s, p_e 分别为吸气侧、排气侧最大允许压力; p_u 为机组水侧最大允许压力; l, b, h 分别为外形尺寸的长、宽和高.此外,XYG-6T 型水源热泵名义制热量测试工况为室内干球温度和湿球温度分别为 20, 15 °C,蒸发器侧进水温度为 20 °C,机组正常制热蒸发器侧进水温度范围为 10~35 °C.

表 1 单只真空管集热器的主要参数

Tab. 1 Parameters of a single vacuum tube collector

参数	A/m^2	p_R/MPa	V_c/L	$l \times b/\text{mm} \times \text{mm}$
数值	0.099 2	0.06	3.97	$5.8 \times 1\,800$

表 2 XYG-6T 型水源热泵的主要参数

Tab. 2 Water source heat pump parameters of XYG-6T type

参数	Q_n/W	P_R/W	m/g	$t_e/^\circ\text{C}$	$t_c/^\circ\text{C}$	$p_{h/l}/\text{MPa}$	p_s/MPa	p_e/MPa	p_u/MPa	$l \times b \times h/\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$
数值	7 400	1 570	1 000	45	0	2.8	0.75	2.8	1.0	$600 \times 400 \times 650$

在太阳能集热循环回路、热泵连接水箱回路设置流量测点和进出口温度测点,水箱上中下部设置温度测点.环境监测系统设置太阳能辐射仪,记录系统运行时的气象数据变化,同时设置配电箱进行系统用电量的实时监测.

4.2 实验数据与模拟数据对比

选取 10 月 27 日两组实验数据与当天的模拟数据进行对比,SHW 系统和 SHPHW 系统的实验与模拟曲线图,分别如图 6,7 所示.图 6,7 中: t 为水温; P_h 为热泵功率.

从图 6 可知:实验与模拟的水箱内实时水温最大误差为 4.2%,平均误差为 1.8%.从图 7(a)可知:2 m³ 水箱内实验与模拟温度最大误差为 3.2%,平均误差为 1.8%;0.5 m³ 水箱内实验与模拟温度的最大误差为 12.5%,平均误差为 6.4%.从图 7(b)可知:热泵的运行功率最大误差为 6.1%,平均误差为 4.1%.两种系统实验与模拟的曲线变化趋势一致,误差均在合理范围内.因此,可以通过建立的

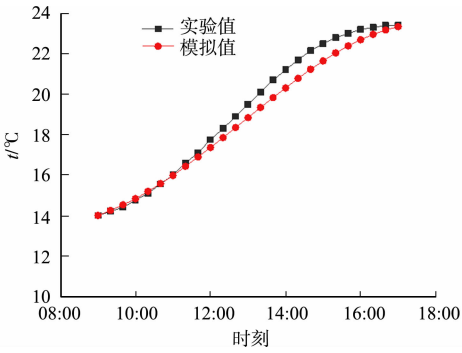


图 6 SHW 系统实验与模拟的曲线对比
Fig. 6 Curve comparison between SHW system experiment and simulation

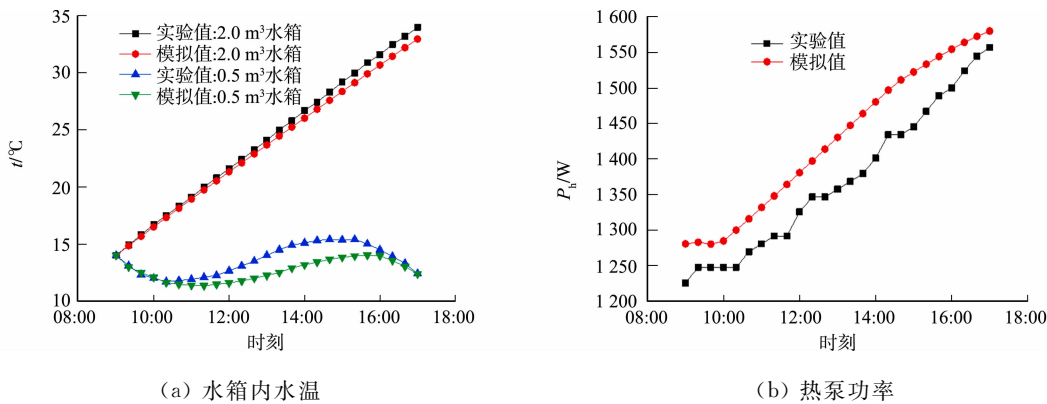


图 7 SHPHW 系统实验与模拟的曲线对比

Fig. 7 Curve comparison between SHPHW system experiment and simulation

TRNSYS 模型对实际的系统进行全年运行模拟,以便后续分析.

4.3 集热器得热量

根据式(3)得出两种系统全年运行过程中集热器每月得热量(Q_j),如图 8 所示. 从图 8 中可知: SHW 系统和 SHPHW 系统的集热器得热量受气候条件的影响呈现先增大后减小的趋势,在 5 月份的太阳辐射量大,得热量最多,分别为 7.50,7.57 GJ;而 12 月份太阳辐射量少,得热量最小,分别为 2.33, 2.39 GJ. 此外,SHPHW 系统中由于热泵运行,使得太阳能集热循环系统整体运行温度更低,较 SHW 系统获得更多的热量.

为比较系统集热器集热优势,定义 SHPHW 系统较 SHW 系统每月多获取的得热量,其与 SHW 系统集热器得热量的比值为 SHPHW 系统集热器增益率(δ),如图 9 所示. 从图 9 中可知:集热器增益率呈现与当地月平均温度相反的变化趋势,在最热的 7 月份,集热器增益率最小,为 0.77%,而在 12 月份集热器增益率最大,为 2.60%.

综上所述,SHPHW 系统较 SHW 系统集热器集热优势体现较为明显的时期在冬季,而夏季这一优势相对较弱.

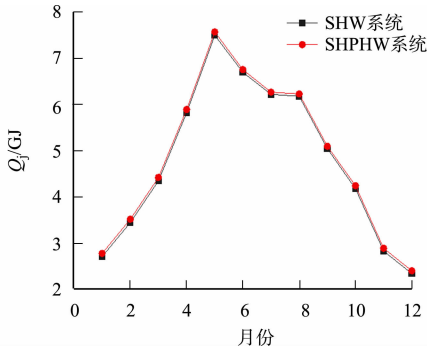


图 8 SHW 系统及 SHPHW 系统集热器月得热量

Fig. 8 SHW system and SHPHW system heat collector monthly heat gain

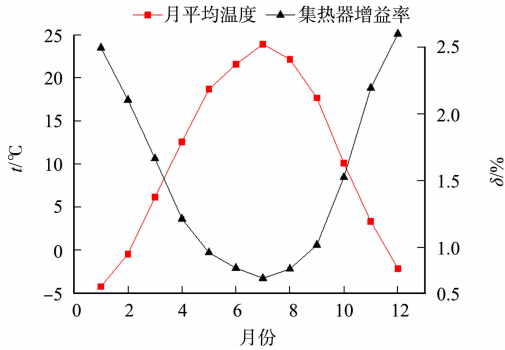


图 9 系统集热器增益率变化曲线

Fig. 9 Gain rate variation curve of system collector

4.4 太阳能保证率

太阳能保证率是衡量太阳能热利用系统的重要评价指标,指太阳能供热水系统中由太阳能供给的能量占系统总热需求的百分比. 其计算式为

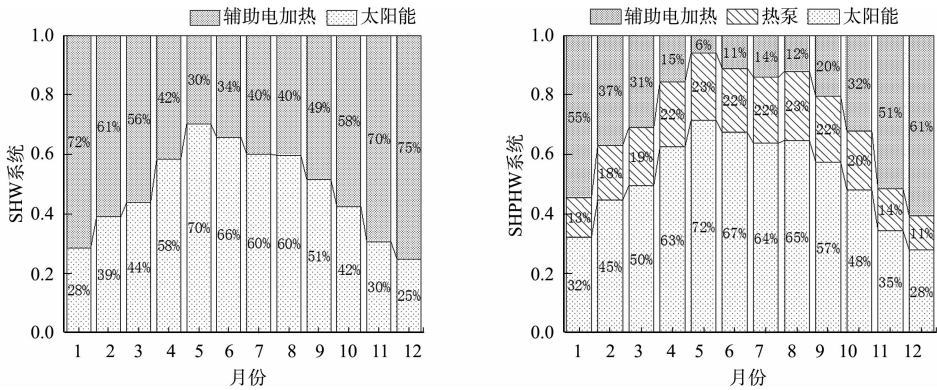
$$R_{\text{SF}} = \frac{Q_j}{Q_j + Q_{\text{aux}}} \times 100\%.$$

(6)

式(6)中: R_{SF} 为太阳能保证率.

SHW 系统和 SHPHW 系统全年模拟过程中每月能源所占比例,如图 10 所示. 由图 10(a)可知: 太阳能保证率大于 50%的月份为 4 月至 9 月,5 月份达到最大值为 70%. 此时,太阳能转化为有用能的热量为 7.5 GJ,辅助电加热当月仅需提供 3.2 GJ;而其他月份因为太阳辐射量的减少,太阳能保证率有所

降低,在 12 月份时,达到最低值,当月太阳能保证率仅有 25%,占当月总的热需求的 1/4. 总体而言,SHW 系统全年太阳能保证率为 48%.



(a) SHW 系统 (b) SHPHW 系统
图 10 SHW 系统和 SHPHW 系统每月能源所占比例

Fig. 10 Monthly energy share of SHW system and SHPHW system

从图 10(b)可知:热泵的运行提高了太阳能保证率,显著减少了辅助电加热能源的占比.以 7 月份为例,SHPHW 系统的太阳能保证率为 64%,辅助电加热器仅提供 14%的能量;相较于 SHW 系统,SHPHW 系统当月太阳能保证率提高了 4%,辅助电加热器耗能减少了 26%. 总体而言,SHPHW 系统全年太阳能保证率为 53%,较 SHW 系统总体提高 5%.

4.5 系统年综合性能系数

以年综合性能系数作为系统运行性能评价指标,定义其为系统全年得到的总热量与系统消耗的总电能的比值,计算式为

C_{APF} = \frac{Q_a}{Q_r} = \frac{\sum Q_j}{\sum Q_{aux}}. (7)

式(7)中:C_{APF}为系统年综合性能系数;Q_a为系统年得热量,kJ;Q_r为系统消耗的总电能,kJ.

基于 TRNSYS 模拟的全年数据可知,SHW 系统和 SHPHW 系统各组件的全年运行能耗分别为 18 011.5,15 064.3 kW · h,总热需求均为 30 676.4 kW · h,则经计算两个系统的年综合性能系数分别为 1.70,2.04. 由此可知,在总热需求一定情况下,年综合性能系数越大,运行能耗越低.

4.6 经济性评价

以投资回收年限法作为系统经济性评价指标,其计算式为

N = \frac{I_{SHPHW} - I_{SHW}}{R_{SHW} - R_{SHPHW}}. (8)

式(8)中:N为 SHPHW 系统的投资回收期,a;I为系统投资费用,元;R为系统的年运行费用,元.

文中采用投资回收年限法(包含初投资和运行费用)对系统进行经济性评价.对于 SHW 系统的初投资,其设备费包含有真空管太阳能集热器、供热水箱、循环水泵及其管路等附属装置,运行费用主要由循环水泵及水箱内的辅助电加热器消耗的电量决定;而对于 SHPHW 系统的初投资,相对 SHW 系统,其设备费多了一套一体式水源热泵机组及便于热泵快速启动的小型蓄热水箱,运行费中另包含有水源热泵机组的耗电量.

根据目前的市场价格,0.5 m³ 的蓄热水箱价格为 1 060 元,一体式水源热泵机组的价格为 7 500 元,当地电价为 0.487 元. 由此,根据式(8)可计算得出,相对于 SHW 系统而言,SHPHW 系统投资回收年限为 6 a.

5 结论

以太阳能热水系统(SHW 系统)和太阳能热泵热水系统(SHPHW 系统)为对象,研究其在同一环境下的运行性能,得到如下 3 点主要结论 .

1) 在寒冷地区, SHPHW 系统和 SHW 系统集热器的月平均得热量整体相近. 以集热器增益率为指标计算出的 SHPHW 系统曲线呈现与月平均温度相反的变化趋势, 即冬季增益率较高而夏季较低, SHPHW 系统集热器年平均增益率为 1.3%.

2) 相较于 SHW 系统, SHPHW 系统可以有效提高全年太阳能保证率, 显著减少了辅助电加热能源的占比, 其全年运行能效提升 16.36%, 整体效果优良.

3) 按照电价进行经济核算, SHPHW 系统相对 SHW 系统投资回收期为 6 a. 因此, 在我国寒冷地区, 保障农村供暖及生活热水使用方面应优先选用 SHPHW 系统, 它具有一定的经济效益.

参考文献:

- [1] 易勇兵. 太阳能水源热泵复合系统运行特性研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2009. DOI:10.7666/d.y1510340.
- [2] JORDAN R C, THERLKELD J L. Design and economics of solar energy heat pump systems[J]. Heating Piping and Air Conditoning, 1954, 26:122-130.
- [3] 赵军, 马一太, 郑宗和, 等. 太阳能热泵供热水系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 1993, 14(4):306-310.
- [4] KAYGUSUZ K. Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump[J]. Renewable Energy, 2000, 21(1):79-102. DOI:10.1016/S 0960-1481(00)00003-3.
- [5] 许本亮. 非直膨式太阳能水源热泵制热系统运行特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013. DOI:10.7666/d.Y2306499.
- [6] DAI Lanhua, LI Sufen, LIN Duanmu, *et al.* Experimental performance analysis of a solar assisted ground source heat pump system under different heating operation modes[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:325-333. DOI:10.1016/j.applthermaleng. 2014. 09. 061.
- [7] 于易平. 严寒地区太阳能热泵供热系统设计及优化分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. DOI:10.7666/d.D238961.
- [8] 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(自然科学版), 2015, 34(4):494-499. DOI:10.14177/j.cnki.32-1397n. 2015. 39. 04. 019.
- [9] 王婷裕. 太阳能辅助水源热泵供暖系统运行策略分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [10] LI Y H, KAO W C. Performance analysis and economic assessment of solar thermal and heat pump combisystems for subtropical and tropical region[J]. Solar Energy, 2017, 153:301-316. DOI:10.1016/j.solener. 2017. 05. 067.
- [11] 马晓丰, 郭健翔, 彭胜男. 太阳能-空气源热泵供暖系统优化研究[J]. 区域供热, 2019(4):123-129, 143. DOI:10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk. 2019. 04. 021.
- [12] 朱传辉, 李保国, 杨会芳, 等. 太阳能辅助热泵系统模型和优化研究进展[J]. 暖通空调, 2020, 50(9):55-61, 90.
- [13] 马洪亭, 张传龙, 宋肖的, 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. DOI:10.3969/j.issn.0254-0096. 2014. 11. 013.
- [14] 冯涛, 杨谋存, 朱跃钊. 基于 TRNSYS 软件多能互补耦合系统的模拟分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(5):649-655. DOI:10.3969/j.issn.1671-7627. 2020. 05. 014.
- [15] 朱继宏, 李德英. 太阳能水源热泵的建筑适用性研究[J]. 建筑节能, 2015(7):34-38. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237. 2015. 07. 009.
- [16] 陈景. 太阳能热水和热泵复合热源的辐射供暖系统的优化设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. DOI:10.7666/d.Y2920405.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)