

文章编号:0253-4339(2019)04-0045-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.045

不同气候区太阳能-空气源热泵热水系统运行性能评价

郭宏伟¹ 王宇¹ 高文学² 李志强³

(1 天津城建大学能源与安全工程学院 天津 300384; 2 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300074;
3 广东万和新电气股份有限公司 佛山 528305)

摘 要 本文采用非稳态制热实验方法测试空气源热泵在典型工况下的能效系数,测试不同日照强度下太阳能平板集热器的热效率,分析户用太阳能-空气源热泵热水系统在 3~5 人典型住宅用户热水负荷下的运行性能;选取不同气候区的代表城市,结合典型年气象数据,评价该系统在不同地区的太阳能贡献率和热水系统全年能效系数(APF)。得出:寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖和温和地区热泵机组单独运行时系统 APF_h 分别为 3.03、3.34、3.79、3.28;4 个地区太阳能年贡献率分别为 29.82%、32.07%、29.58%、38.62%,太阳能-空气源热泵组合系统 APF_s 分别可达 3.67、4.06、4.39、4.45。
关键词 空气源热泵;太阳能集热器;热水系统;年能效系数;不同气候区
中图分类号:TB61⁺1; TK124;TK511.3 **文献标识码**: A

Performance Evaluation of Solar-air Source Heat Pump Hot Water System in Different Climatic Zones

Guo Hongwei¹ Wang Yu¹ Gao Wenxue² Li Zhiqiang³

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin, 300384, China; 2.North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin, 300074, China; 3. Guangdong Vanward New Electric Co., Ltd., Foshan, 528305, China)

Abstract To obtain the applicability and operation superiority of the solar-air source heat pump hot water system in different regions, the operation performance and energy efficiency coefficient of the air source heat pump unit and solar collector unit were tested through experiments under typical conditions. Tianjin, Shanghai, Guangzhou, and Kunming were selected for cold, hot-summer and cold-winter, hot-summer and warm-winter, and temperate regions, respectively. With the consideration of Chinese habits on domestic hot water, the performance of the heat pump system was analyzed in different areas for a typical family with 3~5 persons. The annual performance factor (APF) of a hot water system in different regions is calculated based on the weighted annual meteorological data of different cities. It is concluded that the APF of the hot water system is 3.03, 3.34, 3.79, and 3.28 in cold, hot-summer and cold-winter, hot-summer and warm-winter, and temperate regions, respectively, and the annual contribution rate of solar energy in the four regions is 29.82%, 32.07%, 29.58%, and 38.62%, respectively. The APF of the combination system can reach 3.67, 4.06, 4.39, and 4.45, respectively.
Keywords air source heat pump; solar collector; hot water system; APF; different climate zones

随着生活水平的提高,人们对生活热水的品质要求也逐渐提高。作为新能源热水器的两大主力,太阳能与空气源热泵行业各具优势。作为家庭用热水解决方案,空气源热泵与太阳能复合热水系统将大大拓展应用空间^[1]。夏热冬暖地区具备较好的太阳辐照条件,但阴雨天气相对太阳能资源较丰富的华北、西北地区较多,对太阳能集热装置的全年运行效果具有显著影响;而该地区全年气温多分布于空气源热泵热水器的名义工况及高温工况,因而具有较高的运行能效系数^[2-3]。通过分析人们生

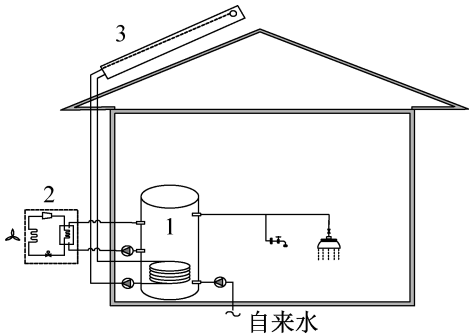
活热水的用水习惯,发现使用时段多集中在晚上。太阳能集热器供热能力受日辐照强度影响明显,且供热峰值出现在中午时段,而空气源热泵可以全天持续提供稳定的热量。两者组合可以高效、稳定地提供满足需求的热水量,在满足热水负荷下能达到可观的节能环保效果。
环境温度或供热负荷的变化,可能会导致热泵瞬时特性的变化,分析其季节性能系数有重要的理论意义和实用价值^[4]。本文通过分析太阳能-空气源热泵热水系统在不同地区的运行性能,得出系统的全年综

合能效系数和太阳能贡献率。为不同气候区下太阳能-空气源热泵热水系统的优化设计和区域适用性评价提供依据。

1 热水系统布局及生活热水分析

1.1 生活热水系统布局

太阳能-空气源热泵热水系统在不同地区搭建需结合当地建筑形式,灵活安装。太阳能集热器一般安装在南向屋顶或阳台外侧,根据当地太阳高度角确定安装倾角;空气源热泵外机安装在室外通风较好的位置;储水箱安装在空间较大的房间角落即可。图 1 所示为太阳能-空气源热泵热水系统简图。



1 储水箱;2 空气源热泵热水器;3 太阳能集热器。
图 1 太阳能-空气源热泵热水系统简图
Fig.1 Schematic diagram of solar-air source heat pump hot water system

1.2 热水使用习惯分析

- 1)我国生活热水主要用于洗浴,对于典型家庭来说,洗浴用水的温度(热水与冷水混合后的水温)一般为 40℃,用水情况较为稳定^[5]。
- 2)早上洗漱会有部分热水消耗,人们的洗浴习惯主要集中在晚上(洗澡和洗脚),其他时间段使用热水较少。

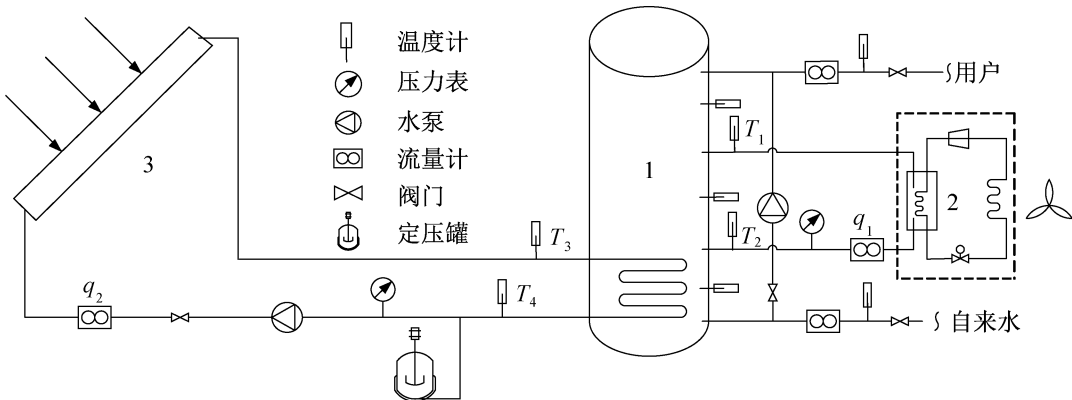


图 2 实验测试系统原理
Fig.2 The principle of experimental test system

1.3 生活热水模型

供热系统中生活热水热负荷取决于冷水温度、热水温度和热水用量。日均热水负荷为:

$$Q_d = m q_r \rho c_p (t_r - t_L)$$
 (1)

式中: Q_d 为日耗热量,kJ; m 为用水计算单位数; q_r 为热水用水定额,取值 75 L; c_p 为水的比热容,kJ/(kg·℃); t_r 为规范^[6]中选取的热水计算温度,60℃; t_L 为规范^[7]中选取的冷水计算温度,℃。

结合国人热水使用习惯,参考日用水负荷分布中用水时间表及热量消耗比例^[8],生活热水逐时使用热水量为:

$$Q_{w1} = Q_d K_h$$
 (2)

式中: Q_{w1} 为生活热水逐时放热量,kJ; K_h 为本小时内用热量占总热量的比例,%。

表 1 生活热水日用热量时间表
Tab.1 Domestic hot water daily heat schedule

时刻	用热量占总供热量的比例 K_h /%
7:00	5
8:00	5
11:00	5
13:00	5
15:00	15
16:00	15
17:00	25
18:00	25

2 测试系统及方法

2.1 实验装置

图 2 所示为实验测试系统原理。系统按照 3~5

人日用水量进行主要单元设备的选配,太阳能集热单元选用 2 块面积为 1.79 m² 的平板型集热器,热泵机组额定制热量为 5.2 kW,蓄热水箱容量为 300 L。该系统有 3 个循环回路:1)太阳能集热器系统,工质在集热板吸收太阳能,温度升高,经管路流入水箱下部盘管,与水箱中的水进行换热,后流回太阳能集热器再次加热;2)空气源热泵系统,系统运行时,冷水在循环水泵的作用下从水箱流入热泵系统的冷凝器中加热,然后热水流回水箱;3)热水供应系统,自来水从水箱底部进入,热水从上部流出供用户使用,如此循环。系统设备规格型号如表 2 所示。

表 2 实验系统设备规格

Tab.2 Equipment specifications of experimental system

设备	规格形式
储水箱	内盘管水箱/300 L
空气源热泵热水器	KRF52-F2/5.2 kW
平板型太阳能集热器	1.79 m ² /2 块

2.2 试验工况确定

1) 热泵进水侧温度界定

依据用户侧热水需求温度约为 40 ℃,考虑空气源热泵的 COP 随热水进口侧温度升高而降低,设定储水箱水温达到 45 ℃时,空气源热泵停止工作,当水温低于 40 ℃时,机组运行。在满足用户热水温度需求的情况下,使空气源热泵机组在较高的机组性能下运行。

参考表 1 全天时刻用热量,最大用热量占总热量的 25%。当自来水温度为 10 ℃,水箱温度为 45 ℃,单次取热量为总热量的 25%时,水箱水温下降 8.75 ℃。在热泵机组工作情况下,水箱温度可维持约为 40 ℃。

综上可得系统在稳定运行的情况下,储水箱水温不会发生陡降陡升式波动,热水系统全年运行的大部分时间储水箱温度约为 40 ℃。由此确定空气源热泵机组试验工况的进水侧温度为 40~45 ℃。

2) 热泵空气侧温度界定

参考标准^[9]中空气源热泵热水器的试验工况空气侧温度为-7、2、7、20、43 ℃。结合我国大部分地区气温分布区间,工况点的选择应在室外干球温度区间中均匀分布,则确定试验工况空气侧温度为-7、2、7、20、30 ℃,下文称为空气源热泵试验工况。

3) 太阳能集热器试验工况

太阳能集热器热效率 η 定义为在测试日内集热器供给储水箱的热量与太阳能日辐照量的比值:

$$\eta=\frac{Q_s}{\varphi} \tag{3}$$

式中: η 为太阳能集热器热效率; Q_s 为集热器为储水箱提供的热量, kJ; φ 为太阳能日辐照量, MJ/(m²·d)。

考虑热水系统全天运行时,储水箱水温大部分时间在 40~45 ℃,即太阳能集热器蓄热初始水温约为 40 ℃,设定试验工况储水箱水温为 40 ℃。 η 受太阳能辐照强度影响明显,则将太阳能日辐照量按照 $\varphi<8$ MJ/(m²·d)、 $8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \leq \varphi<13 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $13 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \leq \varphi<18 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $\varphi \geq 18 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 4 个分区^[10]进行热效率测试,实验确定不同辐照强度下的 η ,4 个不同分区为太阳能试验工况。

2.3 实验步骤及计算方法

运用非稳态制热实验方法在选定的 5 个空气源热泵试验工况下运行机组,待热泵机组运行平稳后,记录一定时间段功率,计算对应时间段制热量,进而得出热泵机组在不同工况下的性能系数。

$$\text{COP}=\frac{Q_h}{P_e} \tag{4}$$
$$Q_h=\frac{(T_1-T_2)q_1\rho_1c_{p1}}{3\ 600} \tag{5}$$
$$\overline{\text{COP}}=\frac{\sum \text{COP}_j}{n} \tag{6}$$

式中: Q_h 为热泵系统的制热量, kW; P_e 为热泵系统的耗电功率, kW; q_1 为热泵系统质量流量, m³/h; ρ_1 为循环工质的密度, 1 000 kg/m³; c_{p1} 为循环工质的比热容, 4.186 kJ/(kg·℃); $\overline{\text{COP}}$ 为不同工况下 COP 平均值; COP_j 为不同工况下热泵机组的性能系数; n 为工况数, 取 5。

在选定的 4 个太阳能试验工况下运行太阳能制热单元,根据式(7)~式(9)计算测试日太阳能集热单元供给储水箱的热量和集热器热效率。

$$Q_{si}=\frac{(T_3-T_4)q_2\rho_2c_{p2}\Delta\tau}{3\ 600} \tag{7}$$
$$Q_s=\sum Q_{si} \tag{8}$$

式中: Q_{si} 为 $\Delta\tau$ 时间内集热器提供的热量, kJ; q_2 为太阳能集热器系统质量流量, m³/h; ρ_2 为循环工质密度, kg/m³; c_{p2} 为循环工质比热容, 3.7 kJ/(kg·℃); $\Delta\tau$ 为读数时间间隔, $\Delta\tau=15 \text{ s}$ 。

$$\eta=\frac{Q_s}{1\ 000\varphi S}\times100\% \tag{9}$$

式中: S 为集热器的采光面积, 3.58 m²; φ 为日辐照量, MJ/(m²·d)。

3 实验结果处理

3.1 空气源热泵机组实验结果

按照上文测试步骤及方法对空气源热泵机组进行变工况实验,控制热泵机组进水温度在 40~45 ℃。图 3 所示为 5 个空气源热泵试验工况下热泵机组压缩机功率随进水温度的变化。由图 3 可知,当空气侧温度一定时,热泵压缩机功率随进水温度升高而增加;当进水温度一定时,压缩机功率随空气侧干球温度升高而增加。

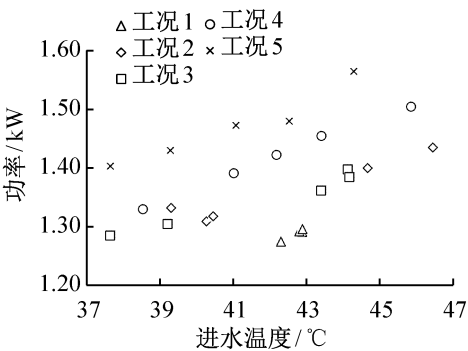


图 3 热泵压缩机功率随进水温度的变化
Fig.3 The power of heat pump compressor changes with inlet temperature

图 4 所示为 5 个空气源热泵试验工况下热泵机组 COP 随进水温度的变化。由图 4 可知,当空气侧温度一定时,热泵 COP 随着进水温度升高而降低;当进水温度一定时,热泵 COP 随着空气侧干球温度升高而升高。

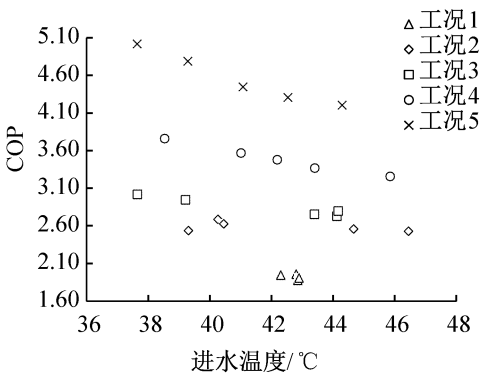


图 4 热泵 COP 随进水温度的变化
Fig.4 COP of heat pump changes with inlet temperature

当空气侧温度一定时,较高的进水温度会增加压缩机功率,降低机组 COP,应尽量降低热泵机组的进水温度,减少高进水温度下热泵运行时间,提高热泵运行性能;当进水温度一定时,空气侧干球温度与热泵机组 COP 呈正相关变化。

当水侧温度在 40~45 ℃ 左右时,计算 5 个测试工况下热泵机组 COP,其与空气侧干球温度实际对应关系拟合得关系式如图 5 所示,为下文评价热泵热水器在不同气候区运行性能提供计算依据。

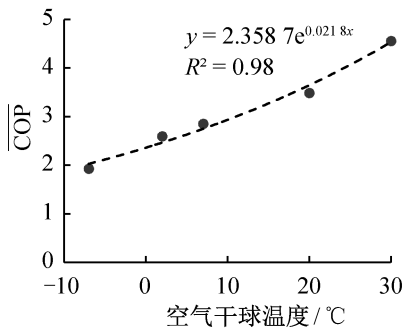


图 5 热泵 COP 随空气侧干球温度的变化
Fig.5 COP of heat pump changes with dry bulb temperature of air side

3.2 太阳能集热器实验结果

按照测试工况对太阳能集热器进行测试,图 6 所示为表 3 中太阳能试验工况 3 中日辐照总量为 14.63 MJ/m² 时集热器单位面积制热量(供给储水箱的热量)与太阳能瞬时辐照量关系。太阳能集热单元日运行时间受日辐照强度影响,通过测试,日平均运行时间取 5 h,系统耗电功率为 0.1 kW。

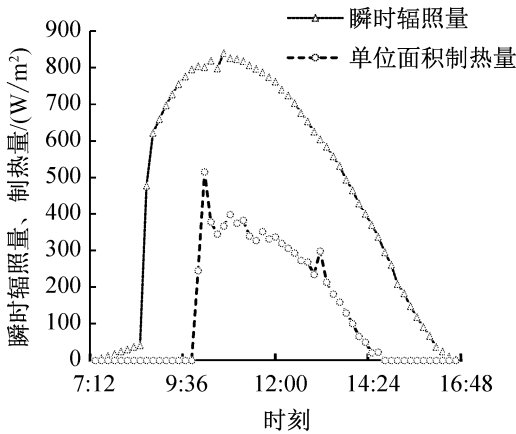


图 6 集热器单位面积制热量与太阳能瞬时辐照量关系
Fig.6 Relationship between solar collector heating capacity per unit area and instantaneous solar radiation

按日辐照量选取日辐照量分区中对应单位日进行测试,计算太阳能集热器热效率,结果如表 3 所示。

结合太阳能热效率与日照强度实际关系得到拟合式,如图 7 所示,为下文评价太阳能在不同气候区贡献率提供计算依据。

表 3 不同日照强度下太阳能集热器热效率
Tab.3 Thermal efficiency of solar collectors under
different sunshine intensities

试验 工况	太阳能日辐 照量分区/ (MJ/(m ² ·d))	测试日储 水箱得热量 Q _s /kJ	测试日太阳 辐照量 φ/ (MJ/(m ² ·d))	热效率 η/%
1	φ<8	5 154.91	5.12	28.12
2	8≤φ<13	12 048.54	9.53	35.31
3	13≤φ<18	20 195.95	14.63	38.46
4	φ≥18	33 003.96	20.12	45.82

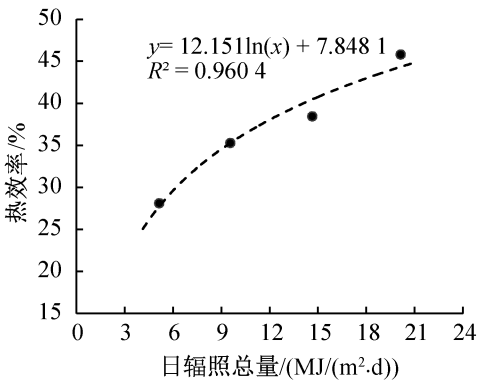


图 7 太阳能集热器热效率与日照强度关系
Fig.7 Relationship between thermal efficiency of solar
collectors and sunshine intensity

4 不同气候区系统运行性能分析

分别分析太阳能-空气源热泵热水系统在寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖和温和地区的运行性能,选取不同气候区代表城市依次为天津、上海、广州和昆明。对比系统在不同气候区的综合能效系数,评价该系统在不同气候下的适用性及优越性。

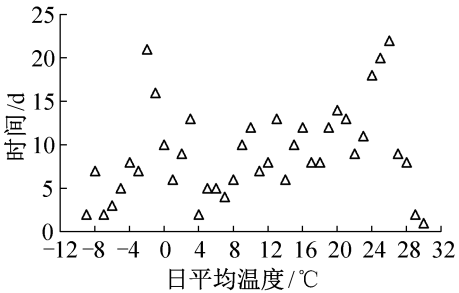
4.1 不同地区代表城市典型年气象数据分析

分析上述 4 个城市典型年气象数据^[11],统计日平均温度频数分布(如图 8 所示)和太阳能日辐照量。结合前文实验得到的拟合式,以日平均温度为热泵空气侧温度,确定热泵日 COP,计算热泵单元和太阳能集热器单元的日制热量,将系统日运行能效作为权重,加权计算得到系统年综合能效系数(APF)。

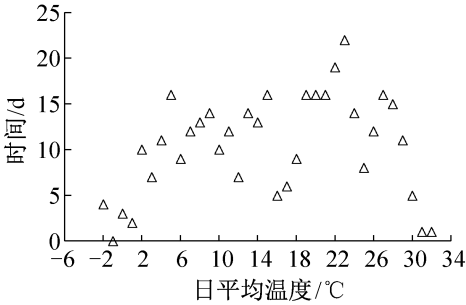
4.2 日热水负荷计算

实验热水系统中设备容量拟承担 3~5 人生活热水需求,用水单位数 *m* 取 4,参考规范中不同城市冷水计算温度,如表 4 所示。按照冷水计算温度的最低值取值,代入式(1)计算不同地区日均热水负荷 *Q_d*。

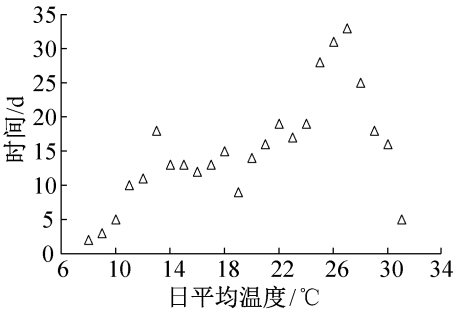
热水系统运行期间有一定热量损失,其大小与热



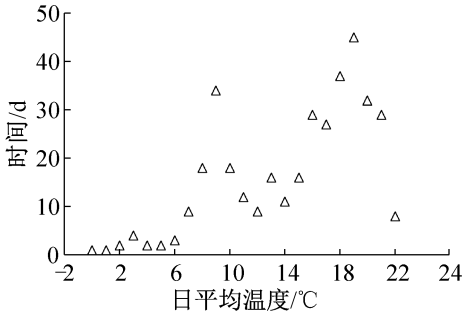
(a) 天津



(b) 上海



(c) 广州



(d) 昆明

图 8 不同地区日平均气温天数统计
Fig.8 Statistics of daily average temperature days
in different areas

水温度、系统保温性能、周围环境温度有关。文献[12]中热水系统日热量损失,按日均热水负荷的 5% 计算,则日热水负荷 *Q* 计算式为:

$$Q=Q_d(1+5\%) \tag{10}$$

4.3 不同地区空气源热泵热水系统年综合能效系数

热水负荷由空气源热泵机组单独承担,根据式

(11) 计算得出系统年综合能效系数 APF_h 。由表 4 可知,夏热冬暖地区较其他 3 个地区高温天数偏多,空气源热泵运行 COP 高,则夏热冬暖地区是其应用的最佳地区,其它地区有很大的推广应用潜力。

$$APF_h = \frac{\sum_{j=1}^n Q_j}{\sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{COP_j}} \quad (11)$$

式中: Q_j 为不同工况下日热水负荷,kJ。

4.4 不同地区组合系统年综合能效系数

1) 热水系统太阳能贡献率
根据前文的测试结果和不同地区日辐照情况,分析不同城市在满足年生活热水负荷下的太阳能贡献率。如图 9 所示,天津地区集热器年制热量较大,此地区太阳能资源丰富,太阳能利用可有效提高热水系统能效;昆明地区太阳能贡献率最高,可达 38.62%。

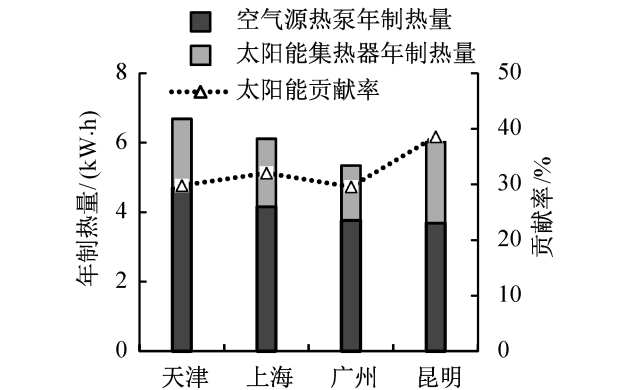


图 9 不同地区太阳能年贡献率

Fig.9 Annual contribution rate of solar energy in different areas

2) 不同地区组合系统年综合能效系数
热负荷由太阳能集热器和空气源热泵机组共同承担,由式 (12) 可得组合系统年综合能效系数 APF_s 。

$$APF_s = \frac{\sum_{j=1}^n Q_j}{\sum_{j=1}^n \frac{Q_j - Q_{sj}}{COP_j} + \sum_{j=1}^n W_{sj}} \quad (12)$$

式中: W_s 为太阳能集热器日耗电量,kW·h。

4.5 结果分析

图 10 所示为不同地区组合系统与单空气源热泵 APF 对比。由图 10 可知,单热泵热水器承担热水负荷时,夏热冬暖地区 APF 最高,可达 3.79,寒冷地区最低;组合系统共同承担热水负荷时,组合系统 APF 较单空气源热泵运行均有较高的提升,其中温和地区太阳能使系统能效提高 35.67%。

表 4 不同地区组合系统年综合能效系数 APF
Tab.4 System annual performance factor in different areas

地区	冷水计算温度/℃	日热负荷 Q /MJ	APF_h	APF_s
天津	10~15	65.93	3.03	3.67
上海	15~20	59.34	3.34	4.06
广州	20	52.74	3.79	4.39
昆明	15~20	59.34	3.28	4.45

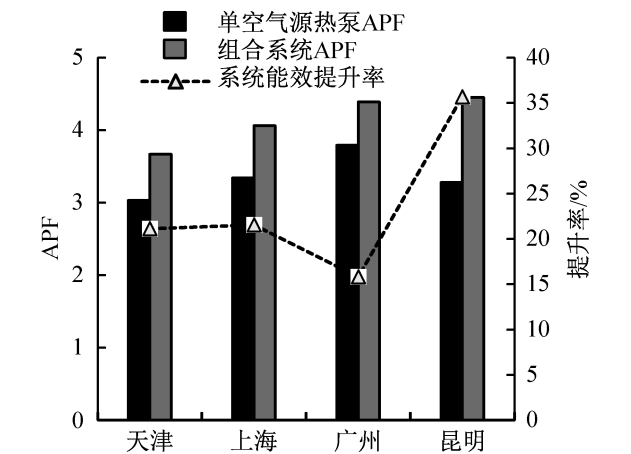


图 10 不同地区组合系统与单空气源热泵 APF 对比

Fig.10 Comparison of APF between combined system and single air source heat pump system in different areas

5 结论

通过实验测试空气源热泵机组和太阳能集热器单元在典型工况下的运行性能及能效系数,寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖和温和地区中,分别选取天津、上海、广州和昆明 4 个城市,结合国人生活用水习惯,分析该系统在不同地区 3~5 人典型住宅用户生活用水负荷下的运行性能,根据不同城市典型年气象数据加权计算得出该热水系统在不同气候区年综合能效系数,得到如下结论:

- 1) 环境温度和水箱温度是影响热泵机组性能的重要因素,当空气源热泵进水温度一定时,随室外环境温度升高,热泵 COP 有较好的正相关性;当室外环境温度一定时,热泵耗电量随进水温度的升高而增大。建议热泵机组以储水箱水温低于 40℃ 启动,高于 45℃ 停止,在满足热水温度要求的情况下提升热泵机组性能,达到节能效果。
- 2) 当太阳能-空气源热泵热水系统中空气源热泵作为独立热源时,室外环境温度是影响系统能效的主要因素,对比 4 个典型地区太阳能-空气源热泵热水系统年能效系数,其中夏热冬暖地区 APF 最高,系统

优势突出;寒冷地区 APF 虽然偏低,但相比于电热水器系统具有明显的节能优势,具有推广意义。

3) 当太阳能-空气源热泵组合热水系统组合供热时,系统在热泵的运行优势上充分利用太阳能,进一步提高系统能效。计算分析太阳能-空气源热泵组合热水系统年综合能效系数,较热泵单独运行均有明显的提升。

4) 本文分析评价了相同形式的热水系统在 4 个典型气候区的运行性能,若使系统在不同地区达到更佳运行性能,提高能源利用效率,需根据不同地区气象条件对关键设备进行优化匹配,系统的优化匹配可进行进一步分析研究。

参考文献

- [1] 王运启.互补式能源发展趋势:空气源热泵热水器与太阳能热水器[J]. 供热制冷,2013(3):52-53. (WANG Yunqi. Development trend of complementary energy sources: air source heat pump water heater and solar water heater[J]. Heating & Refrigeration,2013(3):52-53.)
- [2] 王柯,刘颖,张雷. R417a 替代 R22 工质的静态加热式热泵热水器性能试验研究[J]. 流体机械,2013,41(5):60-65. (WANG Ke, LIU Ying, ZHANG Lei. Performance test of static heating type heat pump water heater for refrigerant R417a replace R22[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(5):60-65.)
- [3] 董振宇,陆春林,金苏敏. 空气源热泵热水器的实验研究[J]. 流体机械,2008,36(8):54-57. (DONG Zhenyu, LU Chunlin, JIN Sumin. Experimental study on air source heat pump water heater[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(8):54-57.)
- [4] 马一太,代宝民.热泵季节性能系数的研究[J]. 制冷学报,2016,37(3):107-112. (MA Yitai, DAI Baomin. Research on heat pump seasonal performance factor[J]. Journal of Refrigeration,2016,37(3):107-112.)
- [5] 林爱革,张龙.空气源热泵热水器全年运行能效评价初探[J]. 制冷,2015,34(3):32-39. (LIN Aige, ZHANG Long. The annual performance factor evaluation method of air source heat pump-water heater[J]. Refrigeration,2015, 34(3):32-39.)
- [6] 小区集中生活热水供应设计规程:CECS 222:2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007. (Specification for design of central hot water supply system in sub-district:CECS 222:2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.)
- [7] 建筑给水排水设计规范:GB 50015—2003[S]. 北京:中国计划出版社,2009. (Code for design of building water supply and drainage:GB 50015—2003[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.)
- [8] 带辅助能源的家用太阳能热水系统热性能试验方法:GB/T 25967—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010. (Test methods for thermal performance of domestic solar-plus-supplementary water heating systems:GB/T 25967—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)
- [9] 家用和类似用途热泵热水器:GB/T 23137—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008. (Heat pump water heater for household and similar application:GB/T 23137—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)
- [10] 徐伟,孙峙峰,何涛,等.《可再生能源建筑应用示范项目测评导则》解读——检测程序·测评标准·测试方法[J]. 建设科技,2009(16):40-45. (XU Wei, SUN Zhifeng, HE Tao, et al. Interpretation of guidelines for evaluation of renewable energy application demonstration projects-testing procedures, evaluation criteria, testing methods[J]. Construction Science and Technology,2009(16):40-45.)
- [11] 中国气象局信息中心气象资料室,清华大学建筑学院建筑技术科学系.中国建筑环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005. (Meteorological Information Center of China Meteorological Bureau, Department of Architectural Technology and Science of the College of Architecture, Tsinghua University. Special meteorological data set for China's architectural environment analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.)
- [12] 太阳能供热采暖工程技术规范:GB/T 50495—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009. (Technical code for solar heating system:GB/T 50495—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.)
- [13] 胡敏东,金苏敏.生活浊水热泵热水器性能的试验研究[J]. 制冷学报,2011,32(2):9-13. (HU Mindong, JIN Sumin. Experimental study on performances of heat pump water heater based on heat recovery of domestic wastewater[J]. Journal of Refrigeration,2011,32(2):9-13.)
- [14] 倪龙,周超辉,姚杨,等.空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. 制冷学报,2017,38(4):23-30. (NI Long, ZHOU Chaohui, YAO Yang, et al. Research progress of air source heat pump heat storage system[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4):23-30.)
- [15] 郭超,王芳,罗谟娇,等.太阳能、空气源热泵热水系统性能优化实验研究[J]. 制冷学报,2013,34(5):41-46. (GUO Chao, WANG Fang, LUO Mojiao, et al. Experimental research on performance optimization of solar-air source heat pump water heater[J]. Journal of Refrigeration, 2013,34(5):41-46.)

(下转第 100 页)

- 验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6):961-963.
(WU Guanghui, WU Keqi. Theoretical analysis and experimental research on variable frequency compressor air conditioning system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(6):961-963.)
- [11] 陈武, 蔡振雄, 周兴禧. 一拖三变频空调系统建模方法及控制研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10):2123-2127.
(CHEN Wu, CAI Zhenxiong, ZHOU Xingxi. Modeling and control research of the triple-evaporator air-conditioner with inverter[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10):2123-2127.)
- [12] 马善伟. 制冷系统稳定性研究综述[J]. 上海第二工业大学学报, 2004, 21(2):36-44.
(MA Shanwei. Research on the stability of refrigeration system review[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2004, 21(2):36-44.)
- [13] 田长青, 窦春鹏, 杨新江, 等. 制冷系统的稳定性[J]. 流体机械, 2002, 30(4):44-47.
(TIAN Changqing, DOU Chunpeng, YANG Xinjiang, et al. The stability of refrigeration systems[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(4):44-47.)
- [14] LIANG Nan, SHAO Shuangquan, XU Hongbo, et al. Instability of refrigeration system—a review[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(11):2169-2178.
- [15] 陈芝久. 制冷装置自动化[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 128-193.
(CHEN Zhijiu. Automation of refrigeration equipment [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 128-193.)

通信作者简介

陶乐仁, 男, 教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn。研究方向: 低温制冷系统, 低温生物医学技术。

About the corresponding author

Tao Leren, male, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. Research fields: low temperature refrigeration system, cryobio-medical technology.

(上接第 51 页)

- [16] 王泮浩, 王志华, 郑煜鑫, 等. 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5):47-54.
(WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Research progress and prospect of air source heat pump in low temperature environment[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5):47-54.)

通信作者简介

郭宏伟, 男, 在读硕士, 天津城建大学能源与安全工程学院, 15222006168, E-mail: 836166621@qq.com。研究方向: 建筑节能及可再生能源综合利用。

About the corresponding author

Guo Hongwei, male, master, School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, + 86 15222006168, E-mail: 836166621@qq.com. Research fields: building energy conservation and comprehensive utilization of renewable energy.