

户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统性能模拟研究

张春枝, 王 可, 李 涛, 周思童, 毛前军

(武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 针对夏热冬冷地区家庭供冷、供暖和生活热水需求特点, 建立了一套户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统。调研形成了夏热冬冷地区住宅用能模型, 构建住宅建筑模型, 进一步用 TRNSYS 软件搭建系统仿真模型, 模拟系统全年运行并得到相应数据。仿真结果表明: 系统全年运行的太阳能集热效率在 40% 左右, 系统能效比为 4.45, 系统不保证率为 0.9%, 佐证系统的可行性; 对系统全年能耗进行分类分析, 与传统系统进行对比, 成本差额动态回收期为 11.0 a, 年运行费用节省 621.8 元, 年碳排放减少 621.2 kg, 验证了系统的经济性与环保性; 通过对太阳能集热器面积和贮热水箱体积进行调节模拟确立系统参数的最佳匹配范围, 以夏热冬冷地区两居室为例, 空气源热泵依据供冷供热负荷选型后, 匹配的太阳能集热器面积推荐范围为 $2.7 \pm 0.3 \text{ m}^2$ 、贮热水箱容积推荐范围为 $0.20 \pm 0.05 \text{ m}^3$, 可为系统的推广应用提供理论依据。

关键词: 夏热冬冷地区; 住宅建筑; 太阳能热利用; 空气源热泵; 数值模拟

中图分类号: TU832.1⁺7; TK513.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0867-09

Performance simulation of household solar-air source heat pump coupling energy supply system

ZHANG Chunzhi, WANG Ke, LI Tao, ZHOU Sitong, MAO Qianjun

(School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: In order to meet the needs of household cooling, heating and domestic hot water in hot summer and cold winter areas, a solar-air source heat pump coupling energy supply system for household is established. The residential energy consumption model in hot summer and cold winter areas is formed through investigation, and the residential building model is constructed. The system simulation model is further built by means of TRNSYS software to simulate the annual operation of the system and obtain the corresponding data. The simulation results show that the annual solar collector efficiency of the system is about 40%, the energy efficiency ratio of the system is 4.45, and the non-guarantee rate of the system is 0.9%, which proves the feasibility of the system. By classifying and analyzing the annual energy consumption of the system and comparing it with the traditional system, it is found that the dynamic payback period of cost difference of the constructed system is 11.0 a, the annual operating cost is saved by 621.8 yuan, and the annual carbon emission is reduced by 621.2 kg, which verifies the economy and environmental friendliness of the system. The optimal matching range of system parameters is established by adjusting and simulating the area of the solar collector and the volume of the hot water storage tank. And then, taking the two-bedroom apartment in hot summer and cold winter area as an example, after the selection of air source heat pump according to the cooling and heating load, the recommended range of the matching solar collector area is $2.7 \pm 0.3 \text{ m}^2$, and the recommended range of hot water storage tank volume is $0.20 \pm 0.05 \text{ m}^3$, which can provide theoretical basis for the popularization and application of the system.

Key words: hot summer and cold winter area; residential buildings; solar energy utilization; air source heat pump; numerical simulation

收稿日期: 2021-07-12

修改稿日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876147)

第一作者: 张春枝(1971—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事建筑节能研究。E-mail: zhangchunzhi@wust.edu.cn

通信作者: 李 涛(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事太阳能热利用研究。E-mail: litao1001@wust.edu.cn

我国建筑能耗中供暖、通风、空调及生活热水的能耗约占 2/3 以上,随着城市化水平和人民生活质量的提高,供暖和生活热水能耗将进一步增加^[1]。我国夏热冬冷地区,88%的居民已开始采取措施进行取暖,其中以可再生能源为热源的仅占 5%^[2];制取生活热水则主要以电热水器和燃气热水器为主,存在一次能效低、能源高质低用等不足^[3]。在当前“双碳”目标下,住宅用能设备电气化是降低碳排放的措施之一,使用和开发高能效的设备,是当前形势所需,本文研究的户用太阳能-空气源热泵耦合供暖系统正是基于此目标。

太阳能正逐步应用于建筑供暖和生活热水,但太阳能的使用受气候条件制约,具有不稳定性^[4]。空气源热泵具有常年可使用等优点,但其性能受室外环境温湿度的影响,环境温度越低能效越低^[5]。目前已有较多研究将二者结合,其中 Lerch 等^[6]模拟计算了包括太阳能集热器与空气源热泵并联、太阳能集热器作为空气源热泵的热源等多种太阳能空气源热泵系统。结果表明太阳能和空气源结合的热泵系统能效均高于传统空气源热泵。太阳能与空气源热泵结合的最常见形式为直膨式,是将太阳能集热器作为热泵系统的蒸发器^[7]。杜伯尧等^[8]以平板热管为核心部件,设计了一种新型太阳能光伏/空气集热蒸发器并建立了光伏直膨式太阳能/空气能多能互补热泵系统,但直膨式系统无法直接利用太阳能制热,且在夏热冬冷地区冬季室外温度偏低、湿度较大的情况下存在结霜严重影响系统能效比等问题,系统无法推广应用。另一种结合的常见形式为并联式,刘寅等^[9-11]通过模拟和实验的方法研究采用双热源蒸发器的太阳能空气源热泵,将太阳能集热器制取的热通入蒸发器中。该系统在太阳能资源非丰富区域无法利用太阳能直接制热,而是将白天蓄存的太阳能热水在夜间环境温度较低时通入热泵蒸发器以提高蒸发温度,存在太阳能的高质低用问题。

现有文献中太阳能与空气源热泵结合研究存在上述问题,由此本文所提出的太阳能-空气源热泵耦合供暖系统直接利用太阳能供给生活热水,空气源热泵作为生活热水系统的辅助装置;同时依据夏热冬冷地区气候特点,空气源热泵的选型以夏季供冷为主,由于冬季供热负荷较小,热泵一般可满足供热,且避免集热器匹配面积过大的问题,所以不考虑太阳能供暖和预热的功能,着重于以空气源热泵补充太阳能制取生活热水,使

得住宅尽可能地使用可再生能源满足用能需求。为验证耦合供暖系统的工程应用可行性,通过调研确立夏热冬冷地区典型住宅用能特征,建立典型住宅建筑三维模型,利用 TRNSYS 软件搭建耦合供暖系统的仿真模型,模拟系统在典型气象年全年动态运行情况,对全年系统运行参数如太阳能集热量、系统各部件耗能量和各循环涉及水温等数据进行数理分析研究,验证系统的可行性、经济性和可持续性。

1 住宅用能特征

1.1 典型住宅建筑

通过查询房屋交易平台的公开信息,以两居室为调研目标进行总面积及各功能房间面积统计。随机抽样武汉市 300 套两居室户型信息,其中 245 套户型为两卧一厅一厨一卫一阳台,将其定为典型户型。对调研结果进行统计后,将得到的各功能房间面积均值作为参考值。对照调研数据集,确立两居室户型空间分布,其中各功能房间面积为:客厅 26.7 m²、主卧 13.1 m²、次卧 11.2 m²、厨房 4.7 m²、卫生间 4.3 m²、阳台 5.4 m²。以武汉市作为建筑所在地,选取气象数据并依照相关规范对层高、窗墙比和围护结构传热系数等进行取值^[12-13],搭建建筑仿真模型。

1.2 住宅用能模式

为更好反映耦合用能系统在实际住宅工程应用中的性能,以及为系统运行确立更切合实际生活的控制目标,本研究开展了对家庭空调及生活热水使用情况的调研^[14-15]。按照用能及作息习惯,家庭成员可被分为上班人群、上学人群及居家老人三类。综合文献与实际调研确立了各类人员的用能模式如图 1 所示。

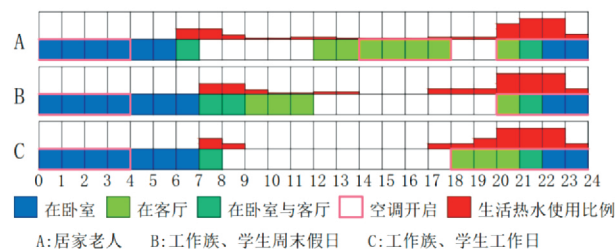


图1 人员用能模式图

Fig. 1 Personnel energy consumption pattern diagram

由图可知,不同家庭成员在各房间在室时刻与时长不同,以致空调与生活热水的使用情况存在明显差异。由此在两居室的基础上,组合不同家庭成员,得到“两上班族一老人”与“两上班族一

学生”两种家庭结构,将各人员的用能模式输入,得到两种家庭用能模型,以此研究系统在不同用能模型上的运行性能。

2 户用太阳能-空气源热泵耦合系统设计

2.1 系统设计

夏热冬冷地区住宅内供冷供暖需求通常采用“部分空间、部分时间”的间歇供能模式来满足,既保障舒适性又有利于节能减排。在尽可能地利用太阳能作为用能热源的同时,空气源热泵作为生活热水系统的辅助装置,改善夏热冬冷地区太阳能资源不丰富与住宅太阳能可利用空间限制的问题。针对以上用能特征设计如图2所示户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统。

太阳能集热器作为生活热水水箱的第一热源,在太阳能满足条件时启动水泵3,循环加热水箱内的水以供生活热水;不足时启动空气源热泵制热模式并启动水泵1,开启制热循环作为补充;当空气源热泵在供冷工况或冬季需优先满足供热需求时,以水箱内置电辅助加热器作为备用热源。空气源热泵通过板式换热器2及水泵2来优先满足末端的冷热负荷,其次通过板式换热器1及水泵1作为生活热水的补充。

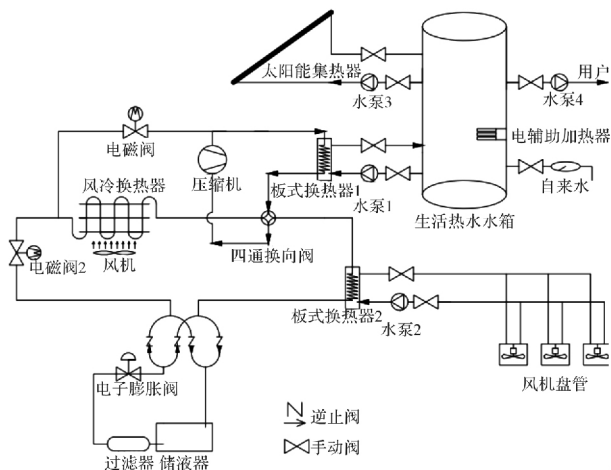


图2 户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统

Fig.2 Household solar energy - air source heat pump coupling energy supply system

2.2 系统设计数值计算

2.2.1 太阳能集热器数值模型

为了简化计算,本文选用了平板集热器稳态模型。模拟过程中的假设条件:(1)各部件对太阳能集热器热容的影响可忽略不计;(2)太阳能集热器采光面无遮挡。

平板型太阳能集热器的能量平衡方程、总有效能量收集和集热效率的计算式^[16]分别为

$$Q_a = Q_l + Q_u + Q_s \quad (1)$$

$$Q_u = m C_p (T_{11} - T_{12}) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a I} = F' (\tau \alpha - U_L \frac{T_{12}}{T_a}) \quad (3)$$

式中: Q_a 为单位时间内吸收的太阳辐射能, W; Q_l 为单位时间内能量损失, W; Q_u 为单位时间内有用输出能量, W; Q_s 为单位时间内热容的变化量, W; C_p 为太阳能集热器内工质的定压比热容, 取 $4.19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为工质的流量, kg/s ; T_{11}/T_{12} 为太阳能集热器中工质的出/进口温度, $^\circ\text{C}$; T_a 为环境温度, $^\circ\text{C}$; η 为集热效率; A_a 为采光面积, m^2 ; I 为太阳辐射强度, kW/m^2 ; F' 为太阳能集热器的效率因子, 集热器实际输出的能量与假定整个吸热板处于介质平均温度时输出能量之比; τ 为盖板的太阳光透过率; α 为吸热板的太阳光透过率; U_L 为太阳能集热器的总热损失系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2.2.2 太阳能集热器集热面积的计算

太阳能-空气源热泵耦合供能系统中太阳能贮热系统为直接加热式太阳能热水系统。集热面积由系统负荷、集热器类型、气象参数、太阳能辐射强度等决定。依据文献[17], 太阳能集热器集热面积 A 的计算式为

$$A = \frac{Q_w \rho_w C_p (t_{\text{end}} - t_0) f}{J_T \eta_{\text{cd}} (1 - \eta_L)} \quad (4)$$

式中: Q_w 为户用日均用热水量, $3 \text{ 人} \times 60 \text{ L}/\text{人} = 180 \text{ L}$, $60 \text{ L}/\text{人}$ 为依据规范取中间值; ρ_w 为水的密度; t_{end}/t_0 为贮热水箱内热水的终止/初始设计温度, 按照系统设计与推荐取值分别为 $50/5 \text{ }^\circ\text{C}$; f 为太阳能保证率, 按规范推荐取值 45% ; J_T 为太阳能集热器单位面积上的日平均太阳辐射量, 按标准附录选取武汉市相应数据为 $13\,707.02 \text{ kJ}/(\text{m}^2)$; η_{cd} 为太阳能集热器年平均集热效率, 按标准附录选取 40% ; η_L 为贮热水箱和管路系统的热损失率, 依据规范推荐范围选取为 20% 。

将上述数值代入公式(4)计算可得: 集热器面积 $A = 2.78 \text{ m}^2$ 。

3 耦合供能系统模型

3.1 TRNSYS 模型构建

基于 TRNSYS 软件, 建立了如图3所示夏热冬冷地区两居室住宅户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统的仿真模型, 各部件的型号选择见表1。

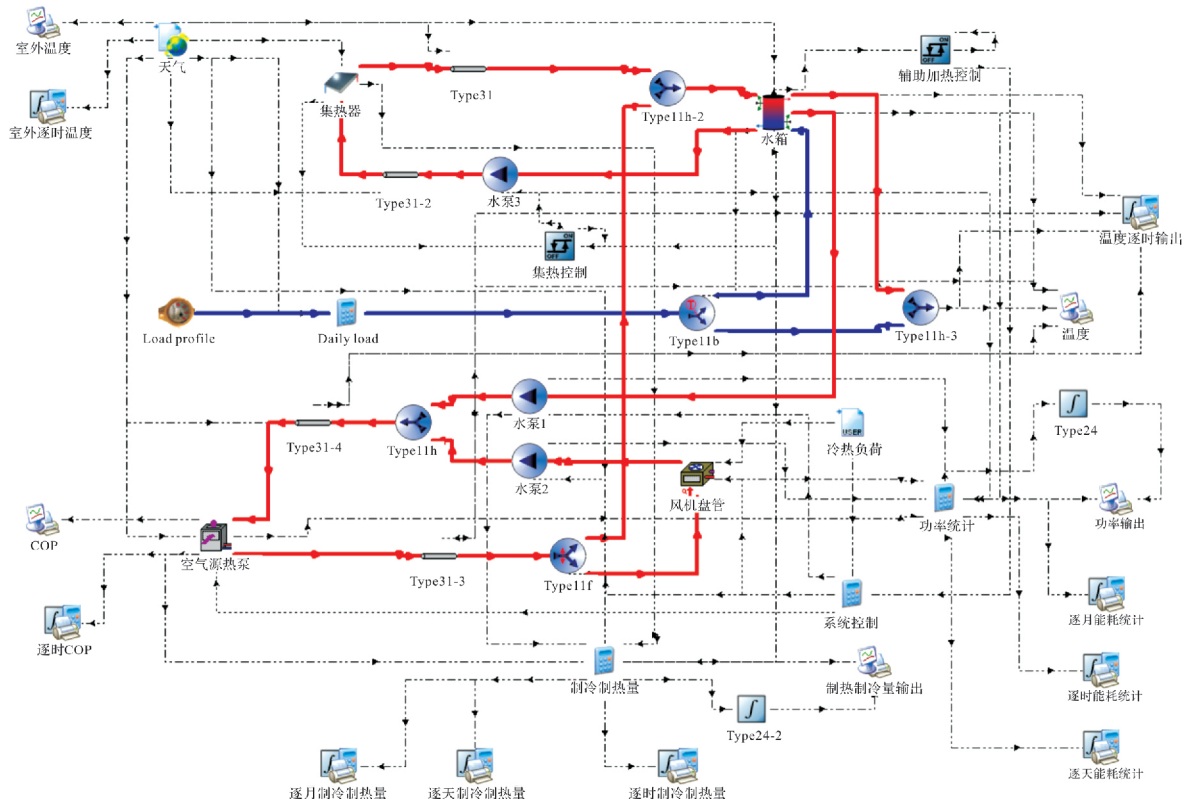


图 3 户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统 TRNSYS 仿真模拟图

Fig. 3 Simulation model diagram of household solar energy - air source heat pump coupling energy supply system

表 1 TRNSYS 仿真模型主要部件明细

Tab. 1 Major components of the simulation model in TRNSYS

系统部件	部件代码	参数
太阳能集热器	Type1b	平板型太阳能集热器, 面积 2.78 m ²
贮热水箱	Type4c	水箱体积: 0.17 m ³
空气源热泵	Type228	制热功率 4.5 kW, 制冷功率 4 kW
分流器	Type11f	控制模式为模式 2, 依据流量分流
分流器	Type11b	控制模式为模式 4, 依据温度分流
合流器	Type11h	控制模式为模式 1
水泵	Type3b	根据水泵不同用途设置不同参数
风机盘管	Type673	耗电量 135 W
建筑负荷读取器	Type9	读取建筑全年冷热负荷
集热控制器	Type23	根据温度设定控制集热系统启停
天气	Type15-2	武汉市典型气象年数据

3.2 耦合供能系统控制策略

空气源热泵供暖供冷控制: 启停控制上, 在供冷/供暖季节, 根据居家人员需求启停; 夜间 4 点以后为人员熟睡段, 关闭卧室空调. 温度控制上, 由夏热冬冷地区住宅用能模式的调研得: 上

学人群(青少年)冬夏在室温度设定为 24/22 ℃, 上班人群(成年)设定为 26/20 ℃, 居家老人设定为 28/18 ℃. 研究表明, 当多类人群共处一室时, 温度控制倾向于年龄更低的人群, 因此本文也依照此结论设定: 当多人同时在室时, 温度控制优先级为上学人群>上班人群>居家老人.

生活热水制热控制: 如图 4 所示, 首先判断太阳能集热器出口水温与贮热水箱底部水温温差, 若前者超过后者 8 ℃, 则启动集热器侧水泵并开启太阳能集热循环, 直至两者温差小于 2 ℃. 然后判断水箱上部温度是否大于 47 ℃, 若大于则停止循环. 否则判断空气源热泵是否为供冷模式, 非供冷模式时, 启动空气源热泵制热循环直至水箱上部温度大于 47 ℃; 供冷模式时或开启空气源热泵后有用水需求但水温仍小于 47 ℃时, 则关闭空气源热泵, 启动水箱内电辅助加热器直至水箱上部温度超过 47 ℃后关闭制热系统.

生活热水出水温度控制: 通过温控阀监控水箱顶部温度, 控制分流比例, 当使用生活热水时, 一部分自来水向贮热水箱补水, 贮热水箱向用水端输出与补水相同量的热水到混水阀; 与此同时, 一部分自来水直接流向混水阀与水箱输出的热水混合以供使用.

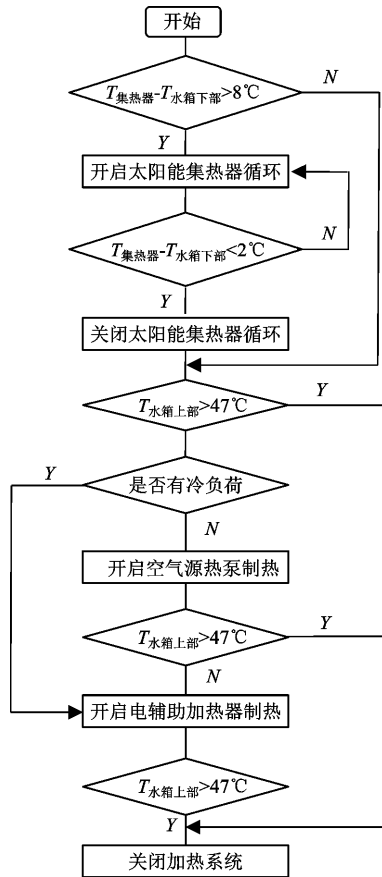


图4 生活热水制热控制流程图

Fig. 4 Flow chart of domestic hot water heating control

4 仿真结果验证及分析

4.1 系统验证

本耦合供能系统中供生活热水部分与文献[18]中的太阳能-空气源热泵热水系统结构相近、运行逻辑相似,且文献研究中包含夏热冬冷地区。因此本文以该文献中的公开实测数据来验证本系统仿真模型运行结果的准确性,模拟数据与实测数据对照结果如图5所示。

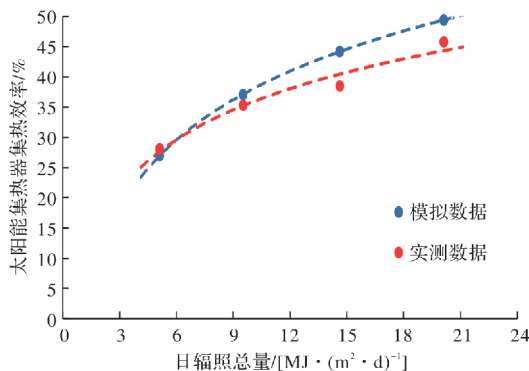


图5 太阳能集热效率与日照强度关系

Fig. 5 Relationship between solar energy collection efficiency and sunshine intensity

从图5可以看出:实际测试的集热效率和模拟

结果的集热效率随日照辐射总量的变化趋势相同,且误差范围为4.0%~12.9%,平均误差为7.3%,证明本研究所建立户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统模型是准确的。

4.2 系统能耗分析

在户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统中需要用电的设备有:太阳能集热循环水泵、空气源辅助制热循环水泵、空气源供冷供热循环水泵、空气源热泵机组、风机盘管及电辅热设备,以时、月、年为积分时间分析各设备的能耗数据。

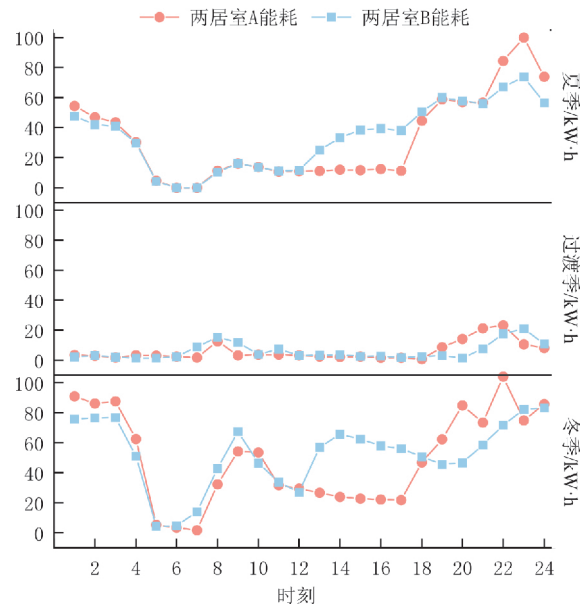


图6 两种家庭结构下系统逐时累计耗电量

Fig. 6 Hourly cumulative power consumption of the system under two household structures

如前述,本研究设定了两居室中两种家庭结构并进行系统运行逐时能耗对比,其中A家庭为两名上班成员加一名上学成员,B家庭为两名上班成员加一名居家老人成员。系统分季节逐时累计能耗模拟结果如图6所示,睡眠非空调时间段供冷与供热能耗均为0,此时一般为人睡眠后半段,由于人在深度睡眠阶段对温度敏感性降低,热需求也随之降低,关闭空调可节能。在夏季22:00~23:00空调能耗骤增,此时段,房间空调开启台数增多,故能耗最大。

白天人员在室率较低能耗较少,夜间空调使用频率更高,能耗也随之增高,与文献[19-20]的研究结果一致。一天中大多数时刻有学生的家庭A的能耗大于有老人的家庭B的能耗,这是因为青少年热需求更大,且在客厅这样的公共空间时将温度设定为自己偏好值的“利己行为”,使得公共空间空调能耗增加,从而有青少年的家庭的整体

能耗增加. 仅在 12:00~18:00 的时间段除外, 因为家庭 A 仅在节假日有热需求, 虽然设置了学生寒暑假, 但考虑到实际情况, 学生假期也设置为 12 点以前在室, 而家庭 B 因老人在室一直有热需求, 因此该时间段能耗更大.

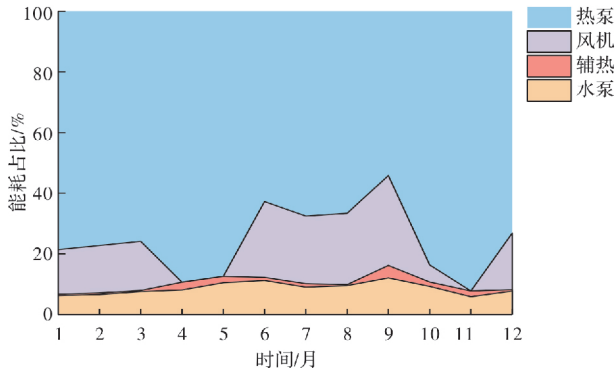


图7 系统设备能耗逐月占比

Fig. 7 Monthly proportion of energy consumption of system equipment

以 A 家庭的用能模型做进一步研究分析, 户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统的各主要能耗设备逐月占比如图 7 所示. 空气源热泵的能耗占比最大, 最大月份为十一月达 92.34%, 这是由于过渡季节无空调运行能耗, 仅生活热水系统运行而太阳能集热系统能耗小, 能耗集中在空气源热泵补热运行. 电辅热的月能耗最小为 $0.41 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 最大为 $6.86 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 累计为 $19.97 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 月能耗占比在 $0.32\% \sim 4.11\%$ 间, 年总能耗占比为 0.94% , 说明空气源热泵作为生活热水的补充热源的耦合供能系统可满足家庭用能需求, 极少数情况下需要电辅热运行.

4.3 集热量及效率分析

图 8 中曲线为集热器所受太阳能辐射量, 全年各月太阳能辐射量有明显的差异, 7 月太阳能辐射量最大, 其值为 $456.90 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 1 月太阳能辐射量最小, 其值为 $255.19 \text{ MJ}/\text{m}^2$. 从集热器吸收的有效集热量柱状图可以看出太阳能集热器的集热量最大值在 8 月为 536.93 MJ , 最小值在一月为 266.29 MJ .

武汉地处长江流域, 属于太阳能资源可利用区域. 太阳能集热器吸收的有效集热量一定程度上能满足住宅家用生活热水供应. 而以模拟中设定的集热器面积为 2.78 m^2 计算可知, 集热器所受太阳能辐射量远大于其实际集热量, 一方面是部分时间根据系统设计已达到集热循环关闭条件, 系统暂停集热; 另一方面是平板集热器的效率仍有提高空间.

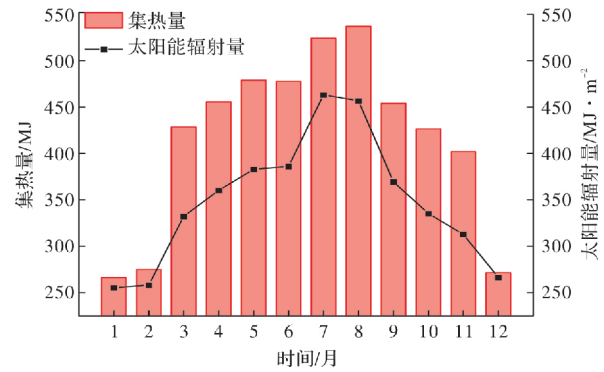


图8 系统集热量及武汉市太阳能辐射量

Fig. 8 Heat collection of the system and the solar radiation in Wuhan

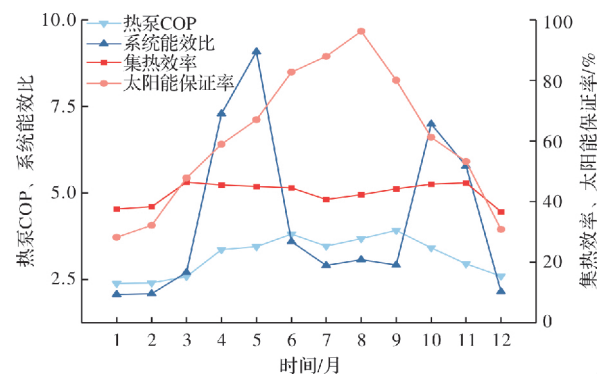


图9 系统各性能系数及效率

Fig. 9 Performance coefficient and efficiency of the system

由图 9 可知, 太阳能集热器集热效率值集中在 40% 左右, 其中三月达到最高为 46.40% , 在十二月最低为 36.65% . 太阳能保证率为供给生活热水所需热量中太阳能所占比率, 表征系统利用太阳能满足用能需求的能力. 夏热冬冷地区气候季节差异大, 夏季太阳辐射强度大, 气温及自来水温偏高; 而冬季太阳辐射强度较小, 气温及自来水温低. 由此太阳能保证率相较集热效率波动较大和受季节影响的特点更为明显: 太阳能保证率最大值出现在八月为 96.22% , 最小值出现在一月为 28.22% , 均值为 60.53% , 综上, 户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统太阳能利用率及保证率较高.

空气源热泵的每月性能系数 COP 等于当月制热量与制冷量之和除以当月热泵总耗电量, 其中, 六月和九月的 COP 较高, 分别为 3.81 和 3.92 , 十二月至三月 COP 值约为 2.50 , 其他月 COP 约为 3.50 , 总体而言, 夏季性能系数较大, 过渡季其次, 冬季最小. 耦合供能系统能效比较大值集中在过渡季节: 四、五、十月的系统能效比分别为 7.29 、 9.08 和 6.99 , 这是由于过渡季节没有供

冷与供热负荷, 太阳能辐射量较强、气温较高, 太阳能集热系统运行良好因此系统能效比高; 冬季与夏季系统能效比则集中在 2.7 左右, 系统全年能效比为 4.22, 由数据可知户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统的效率和性能系数都处在正常范围, 该系统整体运行是可靠且可持续的。

4.4 系统优化分析

本研究在系统设计中首先调研建筑自身能耗情况, 然后确定系统工作原理, 结合当地太阳辐射等气候情况调整系统参数, 最终模拟得到系统的太阳能保证率、系统能耗与能效比变化趋势, 从而反映其综合性能。系统太阳能保证率是反映耦合系统性能的重要指标, 除了太阳能辐射量、建筑用能负荷、系统形式等因素, 集热器面积和贮热水箱体积也是影响系统太阳能保证率的重要因素。

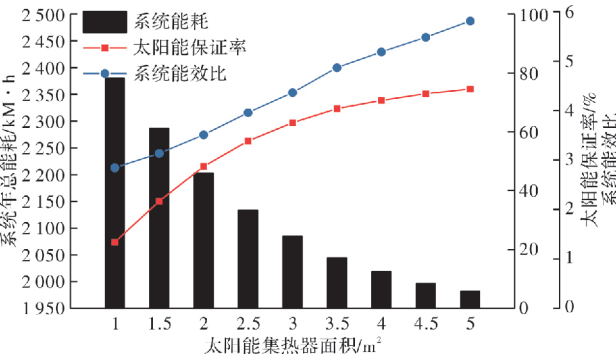


图 10 不同集热器面积下系统性能变化

Fig. 10 Variation of system performance under different solar collector area

考虑到住宅中太阳能集热器安装空间的限制问题, 选取集热器面积变化范围为 1~5 m², 由图 10 可知, 系统能效比与集热器面积接近一次函数关系, 增长速率为 0.78。太阳能保证率和系统能耗与集热器面积呈非线性关系, 集热器面积增大的幅度不变, 保证率增大的程度逐渐变小, 能耗下降的程度也逐渐变小。依照公式(4), 系统太阳能集热器面积设计计算值为 2.78 m², 当太阳能集热器面积大于 3 m² 后, 集热器面积每增大 1 m², 系统最多可节能 81 kW·h, 而集热器单位面积成本高于节能所带来经济效益。因此推荐范围为规范计算值所在的面积区间即 2.7±0.3 m²。

仅改变供能系统贮热水箱体积大小, 系统各性能参数变化如图 11 所示。水箱体积在小于 0.15 m³ 范围内递增时, 系统的能耗大幅度降低, 变化速率为 546.05 kW·h/m³; 太阳能保证率及系统能效比增大明显, 增幅分别为 11.58% 和 0.56。而当水箱

体积大于 0.25 m³ 后, 由于系统的用能负荷不变, 系统太阳能保证率和能效比均趋于定值, 水箱体积增大但能耗反而上升。因此在两居室用能模型中系统的贮热水箱容积推荐范围为 0.20±0.05 m³。

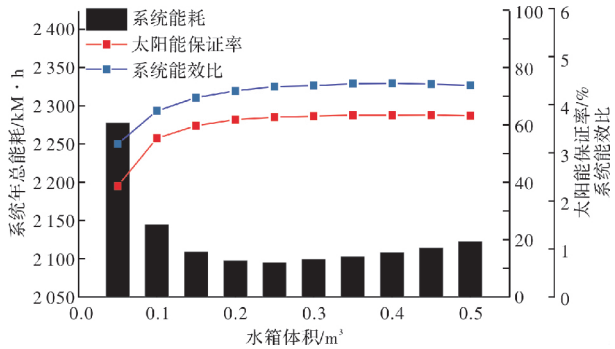


图 11 不同水箱体积下系统性能变化

Fig. 11 Variation of system performance under different volume of water tank

4.5 经济环保效益

武汉市住宅用电与用水实行分档累进递增的阶梯价格, 具体如表 2 所示。以耦合供能系统为例: 系统年运行耗电量的模拟结果为 2 176.46 kW·h; 三口之家年用水量为 175.2 m³[21]; 设备年维护费为初始投资费用×年维护费率(2%); 三项累加得到系统的全年运行费用。计算结果见表 3, 静态和动态投资回收期是根据太阳能热水系统相对于全空气源热泵系统的增投资和年节省费两个指标计算得出的, 结果显示系统投资回收期均小于武汉地区太阳能热水系统 15 年的使用寿命[22], 增投资成本可回收, 系统全生命周期经济性更优。

表 2 武汉市住宅用电与水价格表

Tab. 2 Price list of residential electricity and water in Wuhan

类别	第一档	第二档	第三档
电价/kW·h	<2 160	2 160~4 800	>4 800
元/kW·h	0.558	0.608	0.858
水价/m ³	<300	300~396	>396
元/m ³	2.32	3.08	3.84

表 3 供能系统经济性对比

Tab. 3 Economic comparison of energy supply system

类别	太阳能-空气源 耦合系统	全空气源热泵系统
成本/万元	3.46	3.01
年运行费用/元	2 313.75	2 935.55
静态投资回收期/a	对比基准	5.60
动态投资回收期/a	对比基准	11.02

通过折合碳排放量来分析太阳能-空气源热泵耦合供能系统的环保效益。依照计算标准[23], 系统全年运行总碳排放计算式为

$$C_M = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p \right] y}{A} \quad (5)$$

本系统暂不考虑建筑绿地碳汇系统年减碳量 C_p ；本研究计算某建筑全年碳排放量，故运行年数 y 取 1，略去建筑面积 A 。由上对原计算公式进行简化得建筑运营阶段年碳排放量计算公式为

$$C_{YX} = \sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) \quad (6)$$

式中： C_{YX} 为建筑运行阶段碳排放量， kgCO_2 ； E_i 为建筑第 i 类能源年消耗量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 m^3 ； EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子， $\text{kg/kW} \cdot \text{h}$ 或 kg/m^3 ； i 为建筑消耗终端能源类型； n 为消耗的能源，共 n 种，消耗量如表 4。

表 4 建筑运行阶段能源消耗量与能源碳排放因子

Tab. 4 Energy consumption and energy carbon emission factors in building operation stage

类别	天然气	普通家电	照明	太-空供能系统	空气源供能系统
消耗量	$322.5 \text{ m}^3 [24]$	$1763.4 \text{ kW} \cdot \text{h} [24]$	$195.6 \text{ kW} \cdot \text{h} [24]$	$2176.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$	$2927.1 \text{ kW} \cdot \text{h}$
碳排放因子	$2.1622 \text{ kg/m}^3 [25]$	$0.801 \text{ kg/kW} \cdot \text{h} [24]$	$0.801 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$	$0.801 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$	$0.801 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$

计算得到太阳能-空气源热泵耦合供能系统年碳排放量为 3977.63 kg ，空气源热泵供能系统年碳排放量为 4598.83 kg 。一户三口之家全年最少可减少碳排放 621.20 kg ，以湖北省为例，湖北全省共有家庭户 1993.10 万户，其中约 28.4% 为三口之家^[26]，即 566.04 万户，则仅湖北省一年即可减少碳排放近 351.62 万 t 。

5 结论

针对上述基于 TRNSYS 的户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统性能模拟研究可得出以下结论：

(1) 户用太阳能-空气源热泵耦合供能系统的能耗随用能需求的不同而不同，有学龄成员的家庭由于青少年的利己行为，在室时能耗更高，有居家老人的家庭在室耗能时间更长。电辅热年总能耗占系统总能耗仅为 0.94% ，说明太阳能-空气源热泵耦合供能系统利用可再生能源即可满足一般家庭用能需求；

(2) 虽然夏热冬冷地区气候季节性变化大，但是太阳能集热器全年集热效率稳定在 40% 左右；年太阳能保证率为 60.53% 。同时系统全年能效比为 4.22 ，可以看出耦合供能系统的太阳能利用程度较高且系统稳定可靠。与全空气源热泵供能系统比较，系统成本回收期在设备生命回收期内，且每年可减少碳排放 12.9% 。证明采用太阳能-空气源热泵耦合供能系统经济效益更高的同时具有节能性与环保性；

(3) 在可利用空间范围内，太阳能集热器面积的增大带来系统能效比的增大和能耗的降低，而贮热水箱体积在大于一定值后，对系统性能提升很小。以夏热冬冷地区两居室为例，空气源热泵依据供冷供热负荷选型后，综合经济性因素，匹

配的太阳能集热器面积推荐范围为 $2.7 \pm 0.3 \text{ m}^2$ 、贮热水箱容积推荐范围为 $0.20 \pm 0.05 \text{ m}^3$ ，本研究所得性能变化结论可为太阳能-空气源热泵耦合系统在住宅建筑实际应用提供理论依据。

参考文献 References

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Tsinghua University Building Energy Efficiency Research Center. Annual development research report of building energy efficiency in China 2015[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [2] 董旭娟, 闫增峰, 王智伟, 等. 夏热冬冷地区典型城市住宅供暖模式选择研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(6): 865-870. DONG Xujuan, YAN Zengfeng, WANG Zhiwei, et al. Study on selection of typical city residential heating mode in hot summer and cold winter zone[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(6): 865-870.
- [3] 冉思源, 李先庭, 徐伟. 新型间联式太阳能空气源热泵用于供热的效果分析[J]. 暖通空调, 2016, 46(12): 8-14. RAN Siyuan, LI Xianting, XU Wei. Effect analysis of new interconnected solar air source heat pump for heating[J]. HVAC, 2016, 46(12): 8-14.
- [4] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能采暖设计原理与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. LIU Yanfeng, WANG Dengjia. Design principle and technology of solar heating[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [5] 祝彩霞, 刘艳峰, 孙婷婷, 等. 太阳能与空气源热泵联合供暖系统运行优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(4): 53-57.

- ZHU Caixia, LIU Yanfeng, SUN Tingting, et al. Operation optimization of solar energy and air source heat pump combined heating system[J]. Building Thermal Ventilation and Air Conditioning, 2020, 39(4): 53-57.
- [6] LERCH W, HEINZ A, HEIMRATH R. Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2015, 100(15): 34-42.
- [7] KONG X Q, SUN P L, LI Y, et al. Experimental studies of a variable capacity direct-expansion solar-assisted heat pump water heater in autumn and winter conditions[J]. Solar Energy, 2018, 170: 352-357.
- [8] 杜伯尧, 全贞花, 侯隆澍, 等. 新型光伏直膨式太阳能/空气能多能互补热泵性能[J]. 化工学报, 2020, 71(z1): 368-374.
- DU Boyao, QUAN Zhenhua, HOU Longshu, et al. Performance of a new photovoltaic direct expansion solar energy/air energy multi-energy complementary heat pump[J]. Journal of Chemical Engineering, 2020, 71(z1): 368-374.
- [9] LIU Y, ZHOU G, MA J. Experimental investigation on a solar air heat pump by heat source[J]. Energy Procedia, 2012, 14(1): 1590-1594.
- [10] LIU Y, MA J, ZHOU G, et al. Performance of a solar air composite heat source heat pump system[J]. Renewable Energy, 2016, 87(3): 1053-1058.
- [11] 刘寅. 太阳能—空气复合热源热泵系统性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010: 20-85.
- LIU Yin. Study on performance of solar-air hybrid heat source heat pump system[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010: 20-85.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Energy efficiency design standard for residential buildings in hot summer and cold winter areas: JGJ 134-2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅设计规范: GB 50096-2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for residential design: GB 50096-2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [14] JIANG H C, YAO R M, HAN S Y, et al. How do urban residents use energy for winter heating at home? A large-scale survey in the hot summer and cold winter climate zone in the Yangtze River region[J]. Energy & Buildings, 2020, 223: 1101-1131.
- [15] 王靖华, 吕存阵, 王小红. 夏热冬冷地区空气源热泵热水系统设计参数的探讨与检测[J]. 给水排水, 2015(10): 75-79.
- WANG Jinghua, LU Cunzhen, WANG Xiaohong. Discussion and detection of design parameters of air source heat pump hot water system in hot summer and cold winter areas[J]. Water Supply and Drainage, 2015(10): 75-79.
- [16] 别玉, 胡明辅, 郭丽. 平板型太阳集热器瞬时效率曲线的统一性分析[J]. 可再生能源, 2007, 25(4): 18-20.
- BIE Yu, HU Mingfu, GUO Li. Unity analysis of instantaneous efficiency curve of flat plate solar collector[J]. Renewable Energy, 2007, 25(4): 18-20.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑太阳能热水系统应用技术标准: GB 50364-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for application of solar water heating system for civil buildings: GB 50364-2018 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2018.
- [18] 郭宏伟, 王宇, 高文学, 等. 不同气候区太阳能-空气源热泵热水系统运行性能评价[J]. 制冷学报, 2019, 40(4): 45-51, 100.
- GUO Hongwei, WANG Yu, GAO Wenxue, et al. Performance evaluation of solar-air source heat pump hot water system in different climatic regions[J]. Acta Refrigeration Sinica, 2019, 40(4): 45-51, 100.
- [19] 李楠. 夏热冬冷地区人员行为对住宅建筑能耗的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- LI Nan. Study on the influence of personnel behavior on residential building energy consumption in hot summer and cold winter areas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [20] XIA Dawei, LOU Siwei, HUANG Yu, et al. A study on occupant behaviour related to air-conditioning usage in residential buildings [J]. Energy & Buildings, 2019, 203.
- [21] 姜文超, 黄常, 刘秋虹, 等. 重庆市住宅用水量现状调查及用水定额研究[J]. 给水排水, 2019, 45(2): 102-106.
- JIANG Wenchao, HUANG Chang, LIU QiuHong, et al. Investigation on the current situation of residential water consumption and research on water quota in Chongqing[J]. Water Supply and Drainage, 2019, 45(2): 102-106.