

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.04.018

上海地区太阳能辅助热泵系统供暖特性研究

韩 玮, 王 芳, 王子龙, 王宇翔

(上海理工大学 制冷及低温工程研究所, 上海 200093)

摘 要:针对长三角地区冬季利用房间空调器等传统采暖方式人体舒适性差、系统能耗高的问题,课题组提出一套太阳能辅助热泵供暖系统,并在上海地区完成搭建测试。依据计算得到的被测房间热负荷完成设备选型,通过并联方式将太阳能集热器和热泵组块连接,选择地暖盘管为室内换热末端;通过在房间内垂直布置温度测点判断温度均匀性,并引入预测平均评价(PMV)和预期不满意百分比(PPD)作为判断房间人体热舒适度依据;在不同天气条件下选择不同运行模式对比系统能效。实验结果表明:该系统可为用户提供良好的热舒适环境,且相较于其他供暖方式更节能、经济和环保。太阳能辅助热泵供暖系统存在在长三角地区有可行性和推广价值。

关 键 词:太阳能辅助热泵系统;地暖供热;舒适性分析;能效分析;经济性分析

中图分类号:TK513.5;TU832;TH185

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)04-0092-06

Research on Solar-Assisted Heat Pump System Heating Performance in Shanghai Area

HAN Wei, WANG Fang, WANG Zilong, WANG Yuxiang

(Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In allusion to problem of poor human comfort and high energy consumption in traditional heating methods in the Yangtze River Delta Region in winter, a solar-assisted heat pump system was presented, which was tested in Shanghai area. According to the calculated heat load of the room, the equipment was selected. The solar collector was connected to the heat pump in parallel. And the system adopted the underfloor heating to provide heating for the room. Temperature uniformity was measured by temperature points vertically in the room, and predictive mean vote (PMV) and predicted percent dissatisfied (PPD) were introduced as the basis for determining human thermal comfort in the room. Selected different operation modes under different weather conditions to compare system energy efficiency. Experimental result shows that the system can provide users with a good thermal comfort environment, and compared with other heating methods the system is more energy saving, economic, environmental protection. The solar assisted heat pump heating system has the feasibility and the promotion value in the Yangtze River Delta Region.

Keywords: solar-assisted heat pump system; underfloor heating; comfort analysis; energy efficiency analysis; economical analysis

随着全球应对气候变化行动加速,世界能源格局深度调整,我国面临众多能源方面的挑战。在建筑领域,推广可再生能源、研发用能装置、提高能源利用效率和降低建筑能耗势在必行,国家也颁布了一系列计划指导建筑能效提升行动。其中,空气源热泵和太阳

能热利用被明确指出需在建筑节能领域加以推广,成为建筑节能领域的研究热门。

随着人民生活水平的提高,大众对室内环境的舒适度提出了更高的要求,如何高效节能的满足室内人体舒适度需求成为一个亟待解决的问题。特别是没有

收稿日期:2019-12-25;修回日期:2020-05-14

基金项目:2018年度上海市级大学生创新创业训练计划项目(SH2018011)。

第一作者简介:韩玮(1994),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事制冷设备测试方面的研究。E-mail:896836237@qq.com

集中供暖的南方地区,冬季采暖方式仍以传统的房间空调器为主。由于房间空调器一般悬挂于屋内上方,送出的热风也多停滞于房间上空,无法满足人体“温足而顶凉”的生理需求。而地暖盘管作为冬季室内换热末端有效避免了上述缺陷,除此之外地暖盘管还有热均匀性好、噪声低、无强制对流等优势,是冬季供暖良好的选择。

国内外对太阳能和空气源热泵联合供暖已颇有成果;Bellos 等^[1]比较了欧洲多个城市的太阳能热泵供暖系统与传统热泵供暖系统的差异;旷玉辉等^[2]和王如竹等^[3]在青岛地区建立太阳能热泵供暖系统,室温可达 16℃ 以上,系统制热性能系数 C_{op} 达 2.55;王新如等^[4]在北方低温地区建立的系统其 C_{op} 为 3.50,制热量是单一热泵系统的 2.1 倍。

但在长三角地区关于太阳能热泵供暖系统的应用较少。何海斌等^[5]在上海地区建立了太阳能空气集热及转轮除湿混合系统,利用风机盘管末端完成空气调节;杨磊等^[6]则模拟了串联式太阳能热泵供热系统性能,发现热泵串联集热器效率更高。课题组设计搭

建了一套以太阳能热泵联合为热源,以地暖为换热末端的复合系统,并在上海地区气候条件下对其进行性能测试。

1 系统原理

课题组设计的太阳能辅助热泵系统原理如图 1 所示。系统由 3 大部分构成:太阳能集热组块、空气源热泵组块以及换热末端组块。太阳能热泵系统形式多样,课题组选用了非直膨式中的并联形式,这是由于并联式各模块相对独立,对热泵改动少,便于后期的维护和修理,且并联式系统效率更高^[7-8]。太阳能集热组块由太阳能集热器及集热水箱、电磁阀 1~3、变频循环泵 1 组成,该部分的作用是负责在太阳热利用工况下的集热蓄热;空气源热泵组块主要由变频压缩机、四通换向阀、翅片管换热器及风机、电子膨胀阀以及由微通道换热器包裹的热泵集热水箱构成,主要作用是在太阳辐射不足的条件下完成制热蓄热;换热末端部分由地暖盘管、变频循环泵 2 以及电磁三通阀 1 和 2 构成,主要作用是完成与室内换热工作,达到供暖供冷的目的。

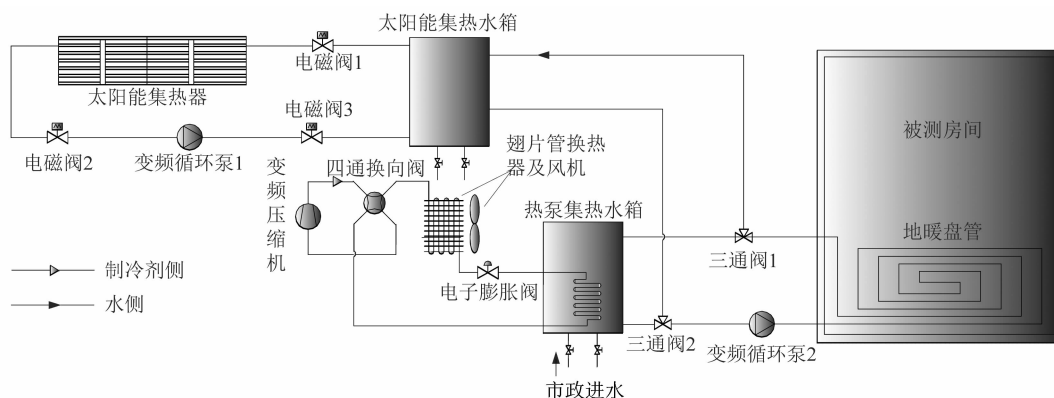


图 1 系统原理

Figure 1 System schematic

系统有 4 种工作模式:

1) 太阳能供暖。在太阳辐射充足的情况下启动该模式,包括集热水箱预热模式和供暖模式。开启电磁阀 1~3 以及循环泵 1 使系统内的水在集热器和集热水箱间循环流动从而预加热水箱以备使用;也可以调节三通阀 1 和 2,使集热器、水箱与地暖盘管间通路,热水循环进行供暖。

2) 空气源热泵供暖。在太阳辐射差或没有太阳的情况下启动该模式。热泵部分工作,制冷剂依次通过压缩机、热泵集热水箱、电子膨胀阀及翅片管换热器完成热泵循环,所生成的热量通过集热水箱内的换热器(冷凝器)释放加热水源,进一步通过调节三通阀 1

和 2 并开启循环泵 2 完成集热水箱与地暖盘管间的热水循环,实现供暖。

3) 太阳能热泵联合供暖。在有一定太阳辐射但不足以满足供暖温度需求时启动该模式,先以太阳能集热供暖,热量缺口以热泵部分工作填补,相互补充配合完成供暖。

4) 化霜模式。当室外气温较低,翅片管换热器表面有结霜现象,可通过四通换向阀完成制冷剂流向的转换,加热换热器化霜。

除此之外太阳能集热部分也可将所集热水用于日常生活使用。

本课题所涉及的被测房间基本参数为 4.2 m × 3.

5 m × 2.5 m, 总占地面积 14.7 m², 一门一窗, 门朝向西北, 窗朝向东南。室内负荷计算主要依据的标准是 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计

规范》, 冬季采取稳态计算方法, 室内设计温度为 24 ℃, 上海室外设计温度选取 -2 ℃, 供暖热负荷计算表如表 1 所示, 最终得到的冬季热负荷约为 1 800 W。

表 1 房间供暖热负荷计算

Table 1 Calculation of heat load for room heating

对象及朝向	面积/m ²	厚度/m	温差修正系数	传热系数/(W · m ⁻² · ℃ ⁻¹)	朝向修正率/%	修正后耗热量/W	冷风渗透耗热量/W	人员和设备耗热量/W	房间总耗热量/W
东南墙	6.50	0.05	1.0	1.12	-5	195.6			
东南窗	2.25	-	1.0	3.16	-5	162.1			
西北墙	7.19	0.05	0.9	1.12	0	205.0			
西北门	1.56	0.05	1.0	2.68	0	100.3			
东北墙	10.50	0.05	0.7	1.12	0	232.8	127.2	-150.0	1 798.6
西南墙	10.50	0.05	1.0	1.12	-5	316.0			
顶棚	14.70	0.05	0.9	1.12	0	419.1			
地面	14.70	-	1.0	0.50	0	190.5			

确定热负荷后对系统设备进行选型。太阳能集热器选取真空管集热器 50 根, 参数为 Ø58 mm × 1 800 mm, 正南方向呈 30° 倾斜布置。压缩机选取滚动转子式变频压缩机, 冷媒为 R410A, 额定功率为 360 ~ 1 333 W, 转速 900 ~ 7 200 r · min⁻¹。室外换热器选取翅片管式换热器, 材质为铜管铝套片, 翅片管内径 6.3 mm, 翅片间距 1.5 mm。热泵集热水箱容积为 200 L, 微通道换热器包裹水箱内胆, 换热器参数为 1 250 mm × 1 050 mm × 26 mm。地暖盘管选取 DN15 的 PE-X 管, 管长 50 m, 并以回字型布管方式布管, 管路下方铺有隔热层和反射膜。变频循环泵 1 选取扬程 10 m, 最大流量为 1.70 m³/h, 变频循环泵 2 选取扬程为 5 m, 最大流量为 0.78 m³/h。

测量系统中: 水温测量使用 Pt100 铂电阻测量; 室内温度使用 T 型热电偶; 流量计使用涡旋流量计; WT230 功率测量仪测量实时电压、功率等; 安捷伦 34970A 数据采集仪采集数据, 最终整合到 PLC 电控柜中。

2 评价指标

2.1 太阳能保证率

太阳能保证率是判断太阳能在整个系统中所能提供能量比例的一个重要参数, 也是影响太阳能热利用系统经济性能的重要指标。一般情况下, 测试结果应在《民用建筑太阳能热水系统应用技术规范》《太阳能供热采暖工程技术规范》的推荐范围。太阳能保证率 f 为太阳能所获能量与系统获得能量的比值, 即

$$f = \frac{Q \rho_f c_{p,f} \Delta T}{q_s} \quad (1)$$

式中: Q 为集热工质流量, m³/h; ρ_f 为集热工质密度, kg/m³; $c_{p,f}$ 为集热工质比热容, kJ/(kg · K); ΔT 为集热

工质进出口温差, K; q_s 为系统单位时间内所提供的能量, kJ/h。

在实际系统中要注意系统散热造成的能量损失, 故计算值往往要乘以系统的传热效率。

2.2 系统性能系数

系统性能系数 C_{OP} 文中指冬季工况下的系统制热系数, 为系统提供的有效热量与系统所需能量的比值。在本系统中系统所需能量主要包括空气源热泵所耗电能、水泵所耗电能。性能系数衡量了整个太阳能辅助热泵系统的工作性能, 且有

$$C_{OP} = q_s / w_s \quad (2)$$

式中: q_s 为系统单位时间内所提供的能量, kJ/h; w_s 为系统单位时间内所消耗的能量, kJ/h。

2.3 主观热舒适度评价

为了更准确评价人体热舒适度, 引入 EN ISO 7730:2005《热环境的人类工效学: 使用 PMV 和 PPD 指数和局部热标准计算热设备的分析测定和解释》评价指标预期平均评价 (predicted mean vote, PMV) 和预期不满意百分比 (predicted percentage dissatisfied, PPD)。PMV 最早由丹麦学者 Fanger 提出, 影响 PMV 值的主要因素包括气温、相对湿度、气流速度、辐射温度、衣着热阻以及人体新陈代谢等^[9], 评价标准如表 2 所示。

表 2 PMV 热感分级

Table 2 Classification of PMV

热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

EN ISO 7730:2005 要求高舒适度热环境下 PMV 应为 -0.5 ~ +0.5 之间, 而根据 GB 50736—2012《民

用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中要求 PMV 值应为 $-1.0 \sim +1.0$ 。

由于人体差异性,即使在相同热舒适度的环境中,当大多数人感到舒适时,仍有一部分人会感到不舒适,故引入 PPD 来表示这部分人所占比例,PPD 与 PMV 关系如图 2 所示。

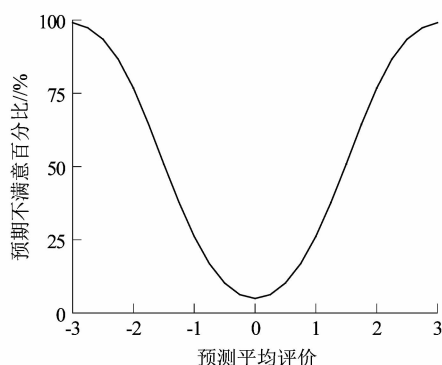


图 2 PMV 与 PPD 关系

Figure 2 Relationship between PMV and PPD

故 EN ISO 7730:2005 和 GB 50736—2012 所推荐 PMV 条件下对应的 PPD 分别为 $\leq 10\%$ 以及 $\leq 26\%$ 。

3 实验研究

以上海冬季某日作为典型气候日进行研究,时间跨度从早晨 08:00 至次日 08:00,天气晴转多云,具体该时间段的实验地区天气参数变化如图 3 所示。

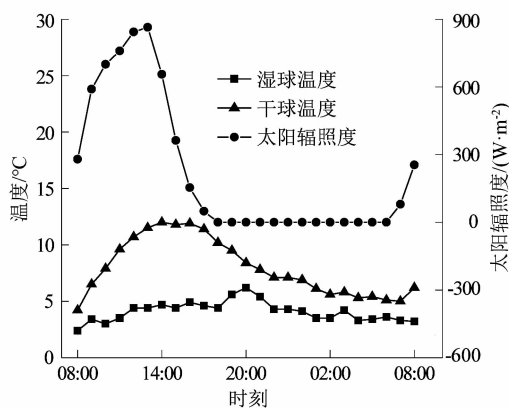


图 3 实验日气象参数变化

Figure 3 Meteorological parameters variation of experimental day

白天适宜采取太阳能供暖模式,真空管集热器经太阳晒 2 h 后加热内部水,打开循环泵完成对室内的供暖循环。集热器进出口以及太阳能集热水箱内温度变化如图 4 所示,可以发现开始运行后集热器出口水温由 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始下降,水箱以及集热器进口温度逐渐

升高,40 min 后整个系统水温稳定中缓慢升温,水箱内水温最高可达 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,当到达 14:30 时系统内水温明显下降,这是由于此时刻太阳辐射度急剧下降,集热器收集的热量无法满足系统热量的维持,此时应关闭太阳能供暖模式,启动热泵供暖模式。

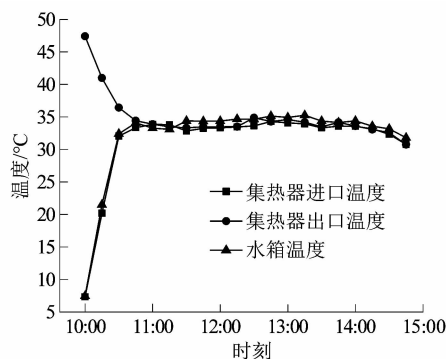


图 4 集热器进出口及太阳能水箱温度变化

Figure 4 Temperature variation of solar storage tank, collector inlet and outlet

热泵加热温度设定为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开启循环,热泵集热水箱温度及热泵机组功率变化如图 5 所示。由图 5 可知水箱内水温均匀升高,大约 1 h 后加热至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,热泵机组功率在前 10 min 迅速上升,之后趋于平稳上升趋势,当水箱达到设定温度时,热泵切换至保温状态,功率迅速下降,当水箱温度低于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热泵启动加热,反复切换。

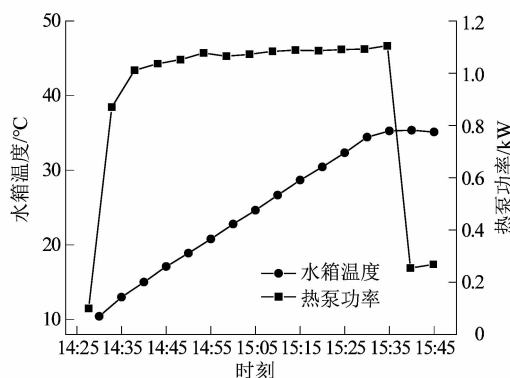


图 5 热泵水箱温度及热泵功率变化

Figure 5 Temperature variation of heat pump tank and power change of heat pump

图 6 所示为被测房间内人体活动区域温度随时间变化关系,反映了同一区域 5 个距地高度不同的测点温度变化。可以发现 08:00 至 10:00 房间内空气场随着室外气温升高而逐渐升高,但房间内随着高度变化有着明显的温度梯度,0.3 和 1.5 m 处最大有 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差,这是由于热空气上浮导致温度分层,违背了人

体舒适性需求。10:00 启动热泵循环后,房间内迅速升温,2.5 h 后所有测点均达到 20℃ 以上,且由于地暖辐射热量均匀自下而上的优势,一定程度上减小了房间内温度梯度,0.3 和 1.5 m 处维持在大约 1.0℃ 的温差,可以很好地满足人体舒适度需求。13:00 ~ 17:00 温度总体呈缓慢上升趋势,1.5 m 处最高可达 23℃,在 15:00 前后有一个小的波动,这是由于供暖模式切换后需加热热泵集热水箱,室温有一个小幅下降。17:00 至次日 06:00,室内温度缓慢下降,这是由于室外气温逐渐降低,围护结构耗热量增加。同理 06:00 后室内温度因室外温度升高而开始回升。可以发现供暖模式开启后,室温可持续维持在 20℃ 以上,且温度分布较均匀,可满足用户正常采暖需求。

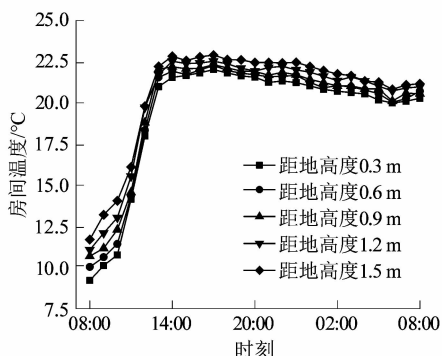


图6 室内距地不同高度温度分布情况

Figure 6 Indoor temperature distribution at different heights

取房间 20:00 数据和相似室外气温下房间空调器为被测房间供暖至相同温度的数据做计算对比,得到了二者 V_{PM} 和 P_{PD} 随距地高度变化趋势如图 7 所示。可以发现地暖供暖舒适性波动远小于空调器,不满意率近在 5% ~ 7%,满足 GB 50736—2012 要求的 $-1.0 \leq V_{PM} \leq 1.0$, $P_{PD} \leq 26\%$,体现出良好的热舒适性。

太阳能集热组块继续单独循环完成集热实验。图 8 所示为测试日逐时太阳能辐照度和集热器集热效率随时间变化关系,可以发现两者变化趋势基本一致,先升后降,13:00 左右太阳辐照度最高时集热效率可达到峰值 0.60,说明太阳辐照度是影响集热器的主要因素,环境温度、管路热量损失会使曲线有小幅波动。

通过计算得到当日太阳能贡献供暖热量 74 220 kJ,热泵贡献供暖热量 127 500 kJ,太阳能保证率为 36.79%,热泵 C_{OP} 为 2.56,系统总 C'_{OP} 为 4.05。可以发现太阳能在测试日天气条件下可有效为系统提供热量,对比同条件下完全使用热泵供暖节约 8.05 kW·h,证明该系统在满足房间舒适度的前提下可有效节能。

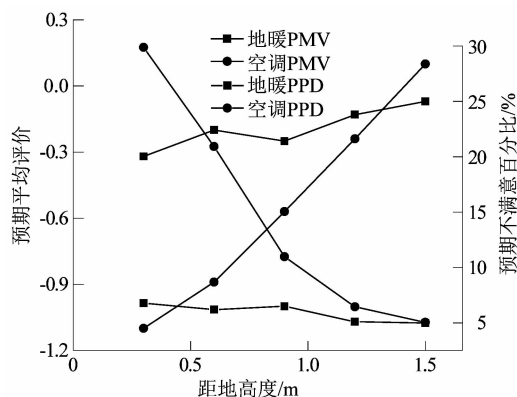


图7 室内距地不同高度 PMV 和 PPD 变化

Figure 7 Indoor PMV and PPD distribution at different heights

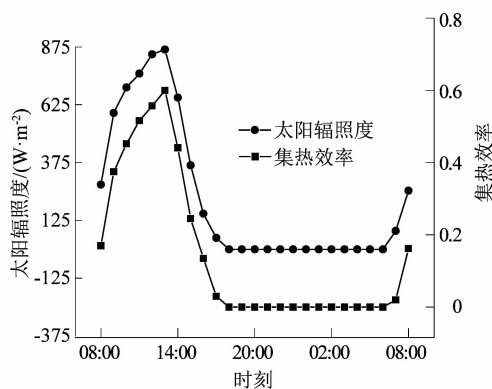


图8 太阳能辐照及集热器集热效率变化

Figure 8 Change of solar irradiation and collector efficiency

本实验包含了房间预加热阶段,需要较多热量,且加热地暖层需要较久的时间,导致房间升温较慢,而北方集中供暖一般在采暖季持续进行,当用户长期不在房间也会造成不必要的能源浪费。该系统在当今大数据智能化技术背景下,用户可以根据当日天气调节不同模式供暖,也可提前预热房间,或在离开房间前提前关闭系统用余热维持温度,控制灵活多变,亦能节省更多能量。

4 经济性及环保性分析

选取冬季 4 种不同天气典型日进行房间 24 h 供暖实验,房间均已预热并使温度维持在 22℃。上海市目前居民用户第一档电价为:波峰期(06:00 ~ 22:00)电价 0.617 元/(kW·h);波谷期(22:00 ~ 次日 06:00)电价 0.307 元/(kW·h)。通过实验数据和计算得到的结果如表 3 所示。因被测日室外气温不同,热泵用电谷期能耗有轻微的浮动。由表 3 可知,联合供

暖相较热泵单独供暖在经济性上有着明显的优势,单位面积供暖费用可节省 0.37 元,即太阳能辅助热泵系统

供暖费用是热泵独立供暖费用的 52.6%,有效证明了联合供暖的经济性。

表 3 典型日实验数据及供暖费用表

Table 3 Data and cost of different experimental day

实验日 天气	运行模式	太阳能 运行时长/h	热泵用电 波峰期时长/h	热泵用电峰期 能耗/(kW·h)	热泵用电波 谷期时长/h	热泵用电谷期 能耗/(kW·h)	系统耗电 总费用/元
晴	联合供暖	8.0	8.0	6.27	8	6.88	6.0
多云	联合供暖	6.5	9.5	7.61	8	6.71	6.8
阴	热泵供暖	0.5	15.5	14.34	8	7.21	11.0
雨	热泵供暖	0.0	16.0	15.06	8	7.14	11.4

为了使太阳能热泵耦合系统的使用更具有典型意义,我们选取典型住宅房间通过模拟计算进行经济性和环保性分析。以上海地区建筑面积为 100 m² 的住宅采暖季单月供暖费用为评价指标,基于上海地区采暖季典型气象月、生活习惯和物价水平对比几种南方地区常见的供暖方式,工作日对房间供暖 12 h,休息日供暖 24 h,所得结果如表 4 所示。在费用上讲,太阳能辅助热泵系统与房间空调器费用最低,但太阳能辅助热泵系统可以结合风机盘管和地暖换热末端,使供暖

方式更加灵活,满足人体更高舒适度的要求,而空气源热泵加地暖组合虽然 C_{OP} 也较高,但要浪费较多的热量在房间预热上,故能耗比较高,而太阳能辅助热泵系统却可以利用太阳能集热巧妙的规避这一部分电耗;从环保角度讲,太阳能辅助热泵系统排碳量最少,也最大程度上减少了电能这种高品位能源向低品位能源转换的资源浪费,是以上海为代表的长三角地区冬季供暖良好选择。

表 4 不同供暖方式对比

Table 4 Comparison of different heating modes

供暖方式	效率 $C_{OP}/\%$	燃料单价/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	单月 总费用/元	单日 费用/元	运行能耗/ (kg 标准煤·d ⁻¹)	折算标煤 CO ₂ 排放量/(kg·d ⁻¹)
太阳能辅助热泵系统+地暖	3.6	0.57	316	10.5	5.0	12.5
空气源热泵+地暖	3.2	0.57	554	13.8	6.6	16.5
房间空调器	3.0	0.57	320	10.7	5.1	12.7
电地暖采暖	95.0	0.57	1 160	38.7	18.6	46.4
天然气壁挂炉	90.0	3.00	930	31.0	12.5	17.2

注:电费按运行用电时段计算得到平均值,热电转化效率取 45%,单位质量标准煤产生 CO₂ 按国家发改委能源研究所推荐 2.493 kg/kg 计算。

5 结语

课题组在上海地区搭建了一套太阳能辅助热泵系统,采取地暖末端为被测房间冬季供暖。通过实验表明,基于实验当日气候条件,室内温度可稳定维持在 20℃ 以上,人体活动区垂直温度差在 1℃ 以内, V_{PM} 为 -0.3~0.0,保证了房间的热舒适性;单日系统太阳能保证率 36.79%,系统总 C_{OP} 可达 4.05,比同条件下单—热泵供暖提升性能 58%,节省 8.05 kW·h,有良好的节能性。通过计算和对比,发现相同条件下太阳能热泵耦合系统在能效、运行费用和 CO₂ 排放量相较其他供暖方式更有优势,有良好的经济性和环保性。综上所述,太阳能辅助热泵系统用于长三角地区冬季供暖有良好的推广基础和应用前景。

参考文献:

[1] BELLOS E, TZIVANIDIS C. Energetic and financial sustainability of solar assisted heat pump heating systems in Europe[J]. Sustainable

Cities & Society, 2017, 33: 70-84.

- [2] 旷玉辉,王如竹,于立强. 太阳能热泵供热系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(4): 1-6.
- [3] 张喜明,于立强,旷玉辉. 太阳能热泵地板辐射供暖系统[J]. 可再生能源, 2005(1): 28-30.
- [4] 王新如,潘嵩,许传奇,等. 低温太阳能热水辅助空气源热泵系统的节能研究[J]. 制冷与空调, 2015, 15(10): 16-19.
- [5] 何海斌,李勇,代彦军,等. 太阳能空气集热及转轮除湿/加湿混合系统冬季供暖分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1690-1696.
- [6] 杨磊,张小松. 复合热源太阳能热泵供热系统及其性能模拟[J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 120-126.
- [7] FREEMAN T L, MITCHELL J W, AUDIT T E. Performance of combined solar-heat pump systems[J]. Solar Energy, 1979, 22(2): 134.
- [8] 江乐新,楼静,黎恢山,等. 并联式太阳能热泵热水系统最佳匹配研究[J]. 给水排水, 2008, 34(9): 89.
- [9] 张吉礼,马良栋,赵天怡. 建筑环境热舒适性研究进展与趋势分析[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(1): 1-10.