

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-637-06

回收利用卫生间排气热的热泵热水器研究

魏晨希 马国远 刘帅领 许树学

(北京工业大学 北京 100124)

【摘要】 热泵热水器作为一种高效节能的系统,目前已走进千家万户。回收室内排风能量可以有效改善热泵热水器的性能,提出采用热泵热水器将卫生间排风能量进行回收用于提供热水,将冷凝器的形式做改进设计,改传统的微通道式为变直径沉浸式盘管换热器,使水箱有更好的换热效果。并与其他系统进行了对比,结果显示,热泵热水器在环境温度为20℃~25℃时表现较优,在全年供暖期间平均COP增加了37%,与电热水器、燃气热水器比较也有明显的节能效果,全年电费减少大约662.58元。

【关键词】 余热回收; 热泵热水器; COP

中图分类号 TB69 文献标识码 A

Study on the Heat Pump Water Heater Recycling and Utilizing the Exhaust Heat of the Toilet

Wei Chenxi Ma Guoyuan Liu Shuailing Xu Shuxue

(Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

【Abstract】 As a high-efficiency and energy-saving system, heat pump water heaters have now entered thousands of households. Recovering indoor exhaust air energy can effectively improve the performance of heat pump water heaters. This paper proposes to use heat pump water heaters to recover bathroom exhaust air energy to provide hot water, and to improve the design of the condenser, change the traditional microchannel type to variable diameter immersed coil heat exchanger, in order to make the water tank have a better heat exchange effect. I also searched for a heat pump system similar to the designed system and placed it in the bathroom for simulation experiments. The average COP increased by 37% during the annual heating period. Compared with electric water heaters and gas water heaters, it also has obvious energy-saving effects. The annual electricity bill is reduced by approximately 662.58 yuan.

【Keywords】 waste heat recovery; heat pump water heater; COP

作者简介: 魏晨希 (1998-), 女, 硕士研究生, E-mail: wxepac@163.com

通讯作者: 许树学 (1981-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2022-01-25

0 引言

自从迈入二十一世纪以来,人们对生活舒适度开始有了更多的要求,这导致了对能源需求的大幅提升。目前商用建筑所用能源的消耗费用已经突破225亿元,家用建筑的能源消耗量更是日益增加^[1]。国家推出的政策中提出,将提高能源利用率作为发展的第一目标,因此,如何在不降低日常需求的基础之上对能源充分利用开始成为人们日益关注的

首要核心^[2]。许多节能环保的措施及理念开始不断地出现,将这些理念融入各种工程之中成为了重中之重,其中,以各种热回收为首的,将建筑内外或设备工作时产生的余热回收进行再利用的理念已经开始大规模实施于工程之中^[3]。

从目前的形势来看,数据中心余热利用已经成为了数据中心节能的重点突破项目。随着新一代技术的快速发展,网络信息技术已经进入了快速增长

期, 数据中心的耗电量占社会总用电量的 2%^[4]。由于数据中心余热潜能巨大, 将冷却用低温冷冻水作为水源热泵的热源十分可靠, 并已经有了相对成熟的技术进展, 可以提供数据中心园区及附近办公区域的供暖热负荷, 相较于使用锅炉供暖的方式有较为显著的节能效益^[5]。

而当前居民建筑因为住宅面积有限, 保证室内的空气流通效果已经成为了基础目标, 如何充分利用建筑内的空间使其更有效的与建筑融为一体是现在着重的问题所在^[6,7]。实验表明^[8], 冷凝热回收具有较高的回收率。将空调冷凝热进行热水加热并将空调与热水结合即形成了热泵空调热水系统, 这种系统可满足家庭用水与空调的两种需求^[9]。对于冷凝热的回收, 部分研究人员首先将热泵热水器与热回收结合, 并首先对热水中的废热进行了回收^[10], 回收后的热水热效率高达 600%~900%; 范秀颂^[11]等人在淋浴后废水余热回收的基础上加入了泵和风机并改进为二次换热加热, 相较之前的研究提高了热水流出温度, 整体提高了系统性能。也有研究人员^[12]将淋浴后的废水与蒸发器进行热量交换, 同样取得了较为不错的效果。

针对环境温度对系统性能带来的影响, 已有研究人员提出利用房间内排气热回收的方式减少环境温度的波动, 陈^[13]等人在厨房内设置了热回收装置, 回收了厨房内的高温烟气以加热生活用水, 改装后样机 COP 可达 4~5, 然而烟气中含有的油污会导致蒸发器换热面积下降, 又因改装成本过高而不适合推广; 孟得林^[14]等在厨房的各个机器的散热点进行余热回收, 再反馈给餐厅内的热泵热水器代替电能加热热水, 这种系统适合在北方寒冷天气下利用机器余热代替低温热源, 改善了北方只能用单一热源进行加热的不利条件, 缓解了厨房内的高温, 整体机组效果良好。郭^[15]等人将热泵热水器的蒸发器单独移至浴室排风口吸入室内空气, 有效避免了霜层的产生并改善了系统的性能。以上研究证实了热泵热水器放置于室内吸收室内排风升温热水的可行性。

本文搭建了一个利用卫生间排气能量提供生活热水的热泵热水器实验装置, 实验研究了环境温度及水温对热泵热水器的制热速率与性能的影响。第一部分, 介绍了系统的工作原理。第二部分, 对实验装置进行了设计计算。第三部分, 对测试结果

及产生的现象进行了详细地阐述。第四部分, 与传统的水热水器进行了经济性比较和分析。目前国外针对余热回收热泵热水器的研究多偏向于回收车库内余热, 尚不能适应我国的国情和居民的使用习惯, 国内对该方面的研究则相对匮乏, 并未对我国情况进行适配。本文章设计的整体热泵热水器呈一体化, 避免了分体式所带来的制冷剂泄漏的问题, 使用时可放置于浴室天花板上, 吸收室内空气热量加热生活用水, 避免了冬季温度低造成的热水器结霜、能耗升高的状况, 夏季亦可保持室内空气流通, 保持房间内温度适宜, 更好的适配了我国的情况。

1 实验装置与原理

回收室内余热空气源热泵热水器如图 1 所示。系统主要由压缩机、蒸发器、冷凝器、毛细管、气液分离器及水箱构成, 其中冷凝器为沉浸式, 放置于水箱内。系统工作过程为: 经压缩机压缩过的高温高压制冷剂气体进入冷凝器, 与水箱内的水换热, 在冷凝器中被冷却制冷剂液体, 后进入毛细管节流降压, 成为低压的两相制冷剂, 最后进入蒸发器与室内空气进行热量交换, 成为低温低压的制冷剂气体再次进入压缩机, 完成一轮循环。待水箱中的热水达到设定温度后停止循环。

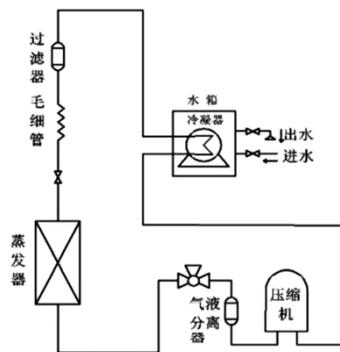


图 1 用于回收卫生间排气热的热泵热水器原理图

Fig.1 Schematic diagram of a heat pump water heater used to recover exhaust heat from toilet

2 实验设备选型参数

2.1 热泵系统计算设计

针对回收室内余热空气源热泵热水器的这种特性对冬夏两季的排风量进行了计算。

冬季与夏季室内空气的温度不同, 空气物性也不同。对所需的排风量进行计算, 冬季室内温度在 18

℃-25℃湿度在 30%-70%之间夏季室内温度在 23℃-28℃,湿度在 30%-60%之间的条件为前提取冬季温度 20℃,相对湿度 50%;夏季温度 25℃,相对湿度 60%。

由焓湿图可以查得,冬季进口温度焓值 $h_{in冬}$ =39kJ/kg 干空气,出口为相对湿度接近 100%的露点温度,其焓值 $h_{out冬}$ =27.8kJ/kg 干空气。 Q_0 为所设计制冷系统的制冷量。可以得到冬季的排风量:

$$V_{冬} = \frac{Q_0}{h_{in} - h_{out}} = 368.64 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

表 1 蒸发器设计参数

Table 1 Design parameters of evaporator

管径直径	翅片厚度	翅片间距	管排排列方式	翅片数量	沿流动方向管排数	总传热管长	翅片宽
φ10	0.2mm	2.2mm	正三角形叉排排列	137	4	8.4m	89.95mm

2.3 冷凝器设计参数

实验采用的冷凝器是在原系统结构型式上进行改进,管路环绕方式采用上窄下宽的梯形结构配置,该结构型式有利于水温的均匀分布,其结构如图 2 所示。计算得到的冷凝器模型设计数据如下:螺旋盘管最底端直径为 200mm,最上端直径为 140mm,每圈间距 20mm。



图 2 所设计冷凝器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the designed condenser structure

3 实验设备及测试

3.1 实验设备及测试环境

根据回收室内余热空气源热泵热水器小风量、小功率的特点,选择了市场上与本设计匹配的空气源热泵热水器作为样机放置于室内模拟运行,如图 3 所示。

夏季进口温度焓值 $h_{in夏}$ =56kJ/kg 干空气,出口为相对湿度接近 100% 的露点温度,其焓值 $h_{out夏}$ =47.6kJ/kg 干空气。可以得到夏季的排风量:

$$V_{夏} = \frac{Q_0}{h_{in} - h_{out}} = 499.819 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

2.2 蒸发器设计参数

系统所采用的蒸发器结构型式为管翅式,详细的结构参数如表 1 所示。



图 3 热泵热水器设备图

Fig.3 Heat pump water heater equipment diagram

本实验的测试仪器采用从欧盟进口的 (LEM) 即电流传感器,通过将测点与三相交流电进行连接,可在该数据测试处理系统上获得热泵热水器在不同工况下的电流、电压、以及功率值。



图 4 测试用 LEM 电流传感器

Fig.4 LEM current sensor for testing

3.2 实验过程

本实验的主要目的为测验原始机组热水器在不同环境温度下的系统性能。根据北京全年室温统计表可以得到，北京室内最高温度大约为 35℃，室内最低温度大约为 7℃，因此将实验中环温的选取确定为 7℃，10℃，15℃，20℃，25℃，30℃及 35℃时，将相同水量从 17℃加热到 55℃，研究空气源热泵热水器机组的升温时间，制热量，整机功耗，COP 与环境温度之间的关系。

制热量的计算公式如下：

$$Q = \frac{(t_2 - t_1) \times C_p \times M}{3600H} \quad (1)$$

式中， Q 为制热量，kW； t_1 为加热开始时水的温度，℃； t_2 为加热终止时水的温度，℃； H 为加热小时数，h； C_p 为水的比热容，取 4.1868kJ/(kg·℃)； M 为水的质量，kg。

整机功耗采用如下公式进行计算：

$$P = P_c + P_f \quad (2)$$

式中， P_c 为压缩机功耗，kW； P_f 为风机功耗，kW。

性能系数 COP 计算公式如下：

$$COP = Q_h / P \quad (3)$$

3.3 实验结果分析

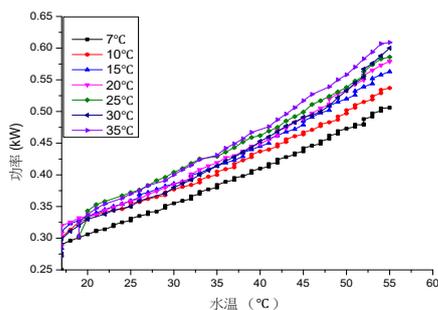


图 5 不同环境温度下功率随水温的变化

Fig.5 Power changes with water temperature under different ambient temperatures

热水器输入功率随水温的变化如图 5 示，随环境温度的升高输入功率呈现逐渐上升的趋势，环境温度越高最终的功率越高，不同环境温度下功率变化的差异较小。例如，环境温度为 7℃和 35℃时，水温从 20℃上升到 55℃，功率分别由 0.3kW 上升到 0.51kW，0.32kW 上升到 0.61kW。不同环温下，最初加热阶段功率上升曲线的斜率基本一致，随着时间的推移，环境温度高时，功率随水温上升增长

越快，这可能是由于在加热过程中水温动态升高导致了冷凝器温度的升高，这导致了曲线斜率的后期上升。

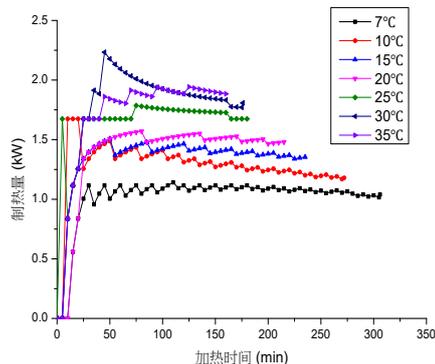


图 6 水温上升过程中制热量随时间变化曲线

Fig.6 The heating capacity changes with time in the process of rising water temperature

制热量随时间的变化如图 6 所示，在整个加热过程中，制热量呈现出先上升后下降，最终趋于平稳的趋势，环境温度越低，系统水温上升所需的时间越长，制热量越低；在开机前五分钟制热量突增可能是由于在系统刚启动的短时间内水温上升较快，稳定过程中的轻微波动则有可能是由于测量的随机误差或环境工况不稳定导致。在环境温度为 30℃时制热量变化较大，在系统工作 55 分钟时达到最高 2.23kW 的瞬时制热量，而后逐渐下降，制热量最终维持在 1.807kW 附近；环境温度为 20℃时整体加热过程没有较大的起伏，最大瞬时制热量为 1.57kW，而后逐渐下降至 1.479kW；环境温度为 25℃时制热量则基本维持在 1.674kW 左右，由此可见，20℃与 25℃随时间变化的制热量曲线较为平稳，20℃-25℃区间可以视作热泵热水器适宜运行的环境温度区间，在此区间内，加热过程中制热功率没有较大波动的同时也拥有较好的制热效果，此温度区间恰好为空调要保持的室内温度的区间，证明了回收卫生间排气余热热泵系统放置于空调室内时的良好性能。

从图 5 和图 6 可以看出，在水温从 17℃上升至 55℃的过程中，环境温度为 7℃时加热达到设定温度时间最长，大约耗时 306 分钟，环境温度为 35℃时加热达到设定温度时间最短，仅需 160 分钟，这表明，相比较于常年放置于室外、所处环境不稳定的传统空气源热泵热水器系统，回收室内余热系统避免了冬季环境温度低的情况，使得加热时间降

低, 同等功率下获得热水速率更快。

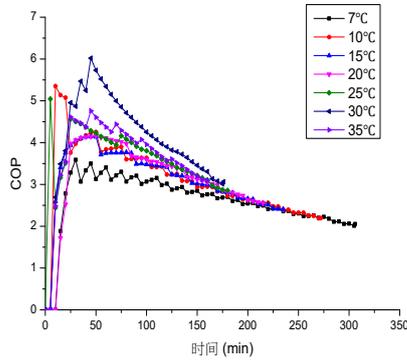


图 7 水温上升过程中 COP 随时间的变化

Fig.7 The change of COP with time during the rise of water temperature

图 7 是在不同环境温度下, 水温上升过程中 COP 随时间的变化, 整体趋势为系统 COP 先急速上升后开始平缓下降, 最终趋于稳定。其中环境温度为 25°C 时的 COP 稳定在 3.1 左右, 环境温度为 20°C 时的 COP 稳定在 2.56 左右。

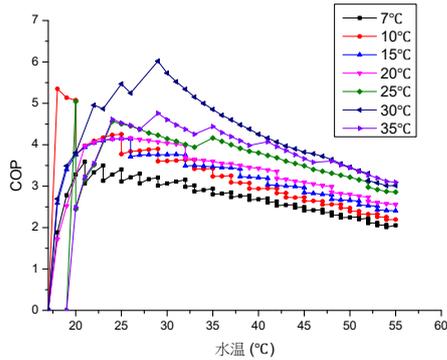


图 8 COP 随水温上升的变化

Fig.8 Changes in COP with rising water temperature

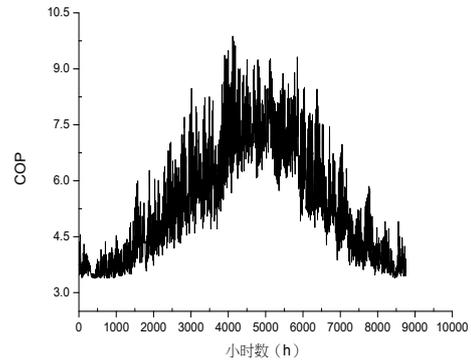
图 8 为 COP 随水温上升的变化曲线。随水温的上升, 环境温度在 20°C 及以下时, COP 曲线变化较为平缓; 环境温度高于 20°C 时, COP 曲线则变化较为剧烈, 主要波动范围为水温 25°C–35°C 之间, 以环境温度为 25°C 时波动最为剧烈; 环境温度为 20°C 时整体系统的波动最小, 且相较于其他环境温度, 最终 COP 保持在较为中等的水平。

4 热水器性能分析比较

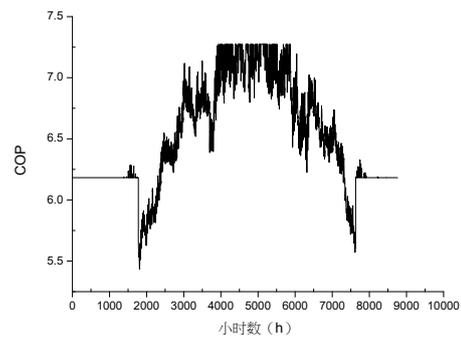
4.1 实验热泵热水器回收余热与置于室外运行性能分析

实验用热泵热水器样机置于室外全年运行及置于室内回收余热时的 COP 变化可用 DeST 软件

模拟计算。首先选取了 DeST 中北京地区一年的室外与室内 (按夏季开空调, 冬季供暖室温) 逐时温度统计, 改变原系统热泵热水器蒸发温度, 对制热 COP 进行了全年的计算, 得到图 9 (a) 和 (b) 的 COP 变化曲线。



(a) 北京置于室外的热泵热水器全年 COP 变化曲线



(b) 北京回收卫生间余热热泵热水器全年 COP 变化曲线

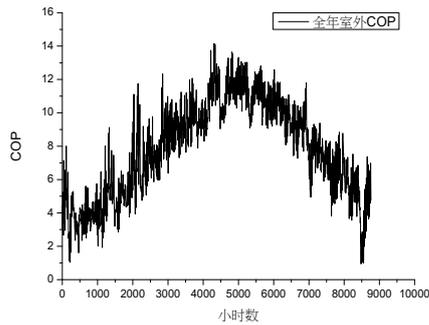
图 9 北京热泵热水器室内室外运行的全年 COP 变化曲线

Fig.9 Annual COP variation curve of Beijing heat pump water heater indoor and outdoor operation

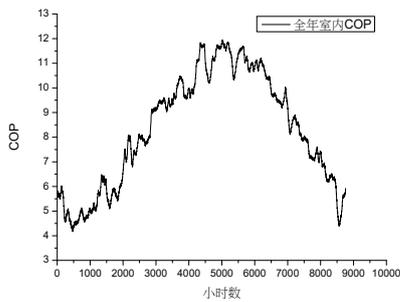
图 9 中的 COP 随小时数变化曲线是在全年逐时环境温度下进行模拟计算得到的图线, 全年放置于室外的普通系统和全年放置于室内的回收余热系统 COP 变化均与温度变化成正比, 随环境温度变化而变化。分别计算室内室外全年供暖期的平均 COP 为: 室外运行全年的 COP 平均值为 3.876, 而室内回收余热运行的 COP 平均值则为 6.183, 比室外运行时高出近 37%。

针对北京全年的逐天室内 (有空调有供暖的情况下) 与逐天室外温度, 按每天制取一次热水计算, 每次加热到 55°C, 可以得到全年普通系统的总功耗为: 439.17kWh, 全年使用回收室内余热系统的功耗为: 338.46kWh, 按一度电 0.48 元计算, 一年

可节约电费 43.54 元。按同样的方法对上海进行计算（室内温度为无空调无供暖的情况），其全年逐时 COP 如图 10（a）、（b）所示，可以看出在上海，全年放置于室内时的 COP 是较为集中的，且波动范围较小。通过计算可以得到上海全年回收室内余热系统的总功耗为：244.572kWh，全年普通系统的总功耗为：291.936kWh，由此可以得到，按一度电 0.48 元计算，一年可节约电费 22.73 元。从上述计算可以看出，无论在南方还是北方，使用回收室内余热系统都可以有效降低能耗。



(a) 上海置于室外的热泵热水器全年 COP 变化曲线



(b) 上海回收卫生间余热热泵热水器全年 COP 变化曲线

图 10 上海热泵热水器室内室外运行的全年 COP 变化曲线

Fig.10 Annual COP variation curve of Shanghai heat pump water heater indoor and outdoor operation

4.2 热泵系统与不同热水器系统性能分析对比

在国内的市场中，热泵热水器仅占一小部分的销售量，储水式电热水器，燃气热水器等市场中仍有着不少的占比，为了更好的体现设计系统的运行性能，本文将地点设置为北京，以同样时间开启热水器和同样的热水加热量为基准对设计系统，原系统，电热水器及燃气热水器进行全年的能耗及费用比较分析，如表 2 所示。

表 2 各种热水器全年能耗比较

Table 2 Comparison of annual energy consumption of various water heaters

	设计系统 /kWh	储水式电热水 水器/kWh	燃气热水 器/m ³
全年能耗	338.46	1718.84	350.76
与设计系统 差值 kWh	—	1380.38	—
年节约电费 (元)	—	662.58	637.27

从表 2 可以看出，设计系统的全年能耗 338.46kWh，储水式电热水器设计系统全年能耗为 1718.84kWh，而燃气热水器全年消耗天然气量为 350.76m³，与其余热水器系统比较，均节约了较多的电费，有较为显著的节能节费效果。

5 结论

本文通过对空气源热泵热水器进行重新设计计算，设计了可放置于室内回收卫生间排气的回收余热空气源热泵热水器系统，该系统全放置于室内回收排风热量，避免了因全年温度变化而造成系统的性能下降和耗电量增加，室内温度在 20℃-25℃ 之间，系统性能相对较高。本文将相似的热泵热水器系统放置于室内进行了模拟实验，得到了以下结论。

(1) 设计得到的回收卫生间余热排风热泵热水器系统 COP 可较普通热泵热水器高出近 37%。

(2) 在室内环境温度分别为 7℃、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃ 和 35℃ 下进行试验，得到的结果表明，在环境温度为 20℃ 时，整体系统制热量变化、COP 变化曲线与功率变化曲线波动较小。

(3) 相较于储水式电热水器，针对北京地区而言，一年可节约电费 662.58 元，相较于燃气热水器，一年可节约费用 637.27 元，相较于普通空气源热泵热水器，一年可节约电费 43.54 元。

参考文献:

[1] 江亿.商业建筑节能技术与市场分析[C].全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集,2000:832-835.
 [2] 公维凤,王传会,周德群,等.双强度约束下行业低碳经济增长路径优化研究[J].中国人口·资源与环境,2013,

