

文章编号:0253-4339(2018)05-0029-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.05.029

北京某教学楼空气源热泵供暖系统现场实验

周超辉^{1,2} 傅旭辉^{1,2} 倪龙^{1,2} 姚杨^{1,2} 王军³ 黄勇³ 刘东³

(1 哈尔滨工业大学建筑学院 哈尔滨 150090; 2 黑龙江省建筑节能与能源利用重点实验室 哈尔滨 150090;
3 丹佛斯自动控制管理(上海)有限公司 上海 200233)

摘要 本文在 2016—2017 年供暖季,对北京某教学楼 A、B 两区域的空气源热泵地板供暖系统进行了现场实验,其中 A 区系统安装了室温控制和水力平衡装置,系统运行方式分为出水温度为 35 °C 正常供暖的阶段 1 和 20 °C 寒假防冻保护的阶段 2。通过对室内外温度、系统供回水温度及流量和耗电量长达 67 d 的监测,对比分析了两系统在寒冷地区的运行效果。实验结果表明:阶段 1 期间,A 区不但能够保证室内房间温度更适宜,供热量也明显低于 B 区,耗电量实现 24.4% 的节能效果。此外,控制装置不会影响 A 区机组性能,A、B 区的 COP 分别达到 3.56 和 3.54,并且机组实际的运行性能与性能曲线接近。而阶段 2 期间,温控器设置未更改,A 区节能率略有下降,达到 16.3%,建议温控器匹配机组出水温度进行设置实现进一步的节能效果。

关键词 空气源热泵;室温控制;地板供暖;节能率;现场实验

中图分类号:TB61⁺1; TQ051.5; TU833⁺.1

文献标识码:A

Field Test of Air-source Heat Pump Heating System in a Teaching Building of Beijing

Zhou Chaohui^{1,2} Fu Xuhui^{1,2} Ni Long^{1,2} Yao Yang^{1,2} Wang Jun³ Huang Yong³ Liu Dong³

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Building Energy Efficiency and Utilization, Harbin, 150090, China; 3. Danfoss Automatic Controls Management (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200233, China)

Abstract During the 2016-2017 heating season, the floor heating system of a teaching building in Beijing was carried out for a field test. There are two air-source heat pump (ASHP) systems for two areas, i. e. area A and area B, in the building. The room temperature control and hydraulic balancing devices were equipped in the system of area A, and the system operation mode was divided into two periods: Period 1 with a water supply temperature of 35 °C for heating and Period 2 with a temperature of 20 °C for freeze protection. After 67 days of monitoring the indoor and outdoor temperatures, the temperature and flow rate of supply and return water, and power consumption, the operation effect of the two systems was compared and analyzed. The results show that during Period 1, the system of area A not only ensures a more suitable indoor temperature, but also a significantly lower heating capacity than area B, as well as a 24.4% energy saving effect on power consumption. In addition, the control devices do not affect the unit performance of area A. The COPs (coefficient of performance) of areas A and B were 3.56 and 3.54, respectively, and the actual operating performance of the unit was close to the performance curve. During Period 2, the thermostat setting remained unchanged, and the energy saving rate of area A decreased slightly to 16.3%. It is recommended that the thermostat should be set to match the water supply temperature for further energy savings.

Keywords air source heat pump; room temperature control; floor heating; energy-saving; field test

空气源热泵供暖作为一种清洁的供暖形式^[1],在我国北方,特别是京津冀地区具有良好的应用前景^[2]。随着国家“煤改清洁能源”政策的推广,空气源热泵逐渐在寒冷地区普及。为满足市场需求,保证供暖系统在室外气温较低时可以高效稳定运行,市场上出现了大量低温型空气源热泵产品^[3-6],低温工况下的性能系数也有很大提高^[7]。但是在实际应用中

空气源热泵的运行工况常常偏离名义工况和低温工况,存在运行性能远低于铭牌性能的实际问题^[8]。因此,为了解空气源热泵供暖系统在整个供暖期的运行状况,需要大量的现场测试数据的支撑。

随着热计量的推行^[9],温控器逐渐应用于常规的供暖系统^[10-11],既节能又能保证室内环境的热舒适性,克服了用户难以调控供热量及房间温度过高的

难题^[12-13]。而将温控器应用到空气源热泵供暖系统中,温控器对空气源热泵的供暖效果、机组性能以及节能性是否会产生影响,目前相关的研究较少。

本文以建筑供暖为研究对象,通过室温控制结合水力平衡措施减少室内供热量,降低空气源热泵的能耗,达到节能减排的目的。根据北京某教学楼现场实测的数据,采用量化的方法分析了带室温控制的空气源热泵+地板辐射供暖系统的供暖效果、机组性能及节能性。

1 现场测试方案

1.1 测试系统原理

测试的北京某教学楼的建筑平面图如图 1 所示。供暖区域分为 A、B 两区,分别采用了一套空气源热泵+地板辐射供暖系统,热源均采用某品牌喷液型低温空气源热泵,额定制热量为 90.0 kW,两套系统相互独立。图 2 所示为 A/B 区的供暖系统原理。

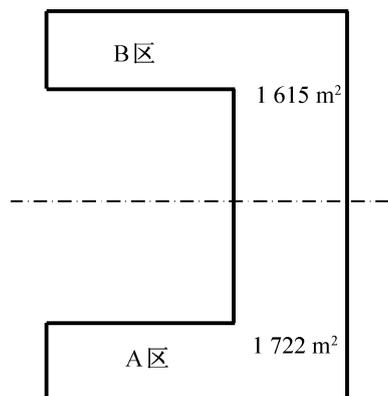


图 1 建筑平面图

Fig. 1 Architectural plan

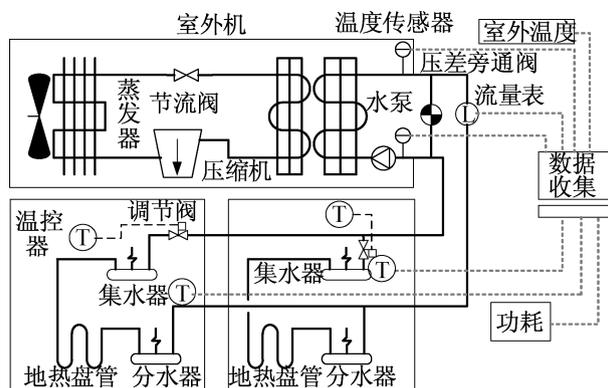


图 2 供暖系统原理

Fig. 2 The principle of heating system

A 区地板辐射供暖末端的分集水器处安装了温控器+动态压差平衡型电动调节阀(后简称调节阀),现场安装如图 3 所示。温控器可以自动控制供

热阀门的开断,实现控制室温和节能的目的;调节阀集压差控制器与电动调节阀为一体,既可控制流量又能保证持续的自动水力平衡,原理可参考文献[14]。在供回水主干路上安装了压差旁通阀,用于供热系统的压差旁通控制,保护系统的正常运行。B 区未安装温控器、调节阀及压差旁通阀,运行中不做流量和室内温度控制。

A 区建筑面积为 1 722 m²,根据围护结构参数,计算得到热指标为 61.6 W/m²,B 区建筑面积为 1 615 m²,热指标为 56.9 W/m²,A 区和 B 区建筑面积和热指标接近,系统形式和布置相同,具有可比性。

根据现场调研结果,按该教学楼的教学时间设定温控器的预设温度,该教学楼周一至周五 8:00—21:30 为教学时间,周末全天无人。综合考虑地板辐射供暖的房间预热特性,温控器房间温度预设值为:周一至周五 05:30—22:30 及 22:30—05:30 设定温度分别为 21 ℃ 及 12 ℃,周末全天设定温度为 12 ℃。



图 3 A 区温控器+调节阀的现场安装

Fig. 3 Field installation of the thermostat and control valve in area A

机组出水温度根据学校教学日历设定:阶段 1 (教学期间)为 2016-12-15—2017-01-23,需保证供暖需求,机组出水温度为 35 ℃;阶段 2 (寒假期间)为 2017-01-24—2017-02-19,仅需防冻,机组出水温度为 20 ℃。

测试了系统的供回水温度、系统流量、耗电量及室内外温度。在热泵机组附近各设 1 个温度传感器,测试室外温度波动,测试精度为 ± 0.3 ℃;在供回水总干管处各设 1 个 Pt1000 铂电阻温度传感器,测试系统供回水温度,测试精度为 ± 0.1 ℃;各房间根据 JGJ/T177—2009^[15]按面积大小分别设置 1~3 个 Pt100 铂电阻温度传感器,测试房间室内温度,测试精度为 ± 0.1 ℃。系统供水管处设电磁流量计,测试精度 0.5 级。电表测试精度 1 级。测试周期均为 5

min, 温度、系统流量、耗电量的测试数据由电脑自动采集和存储。

1.2 数据处理

系统供热量:

$$Q_H = \sum_{i=1}^T \rho V c_p (t_{w1i} - t_{w2i}) \Delta \tau_i \cdot 10^{-6} / 3600 \quad (1)$$

式中: Q_H 为系统的供热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c_p 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V 为系统循环流量, m^3/s ; t_{w1i} 为 i 时刻供暖系统供水温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{w2i} 为 i 时刻供暖系统回水温度, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta \tau_i$ 为 i 次测试时间间隔, s ; T 为测试周期。

热泵机组性能系数:

$$\text{COP}_i = \frac{Q_{Hi}}{N_i} \quad (2)$$

式中: COP_i 为第 i 时段热泵机组性能系数; Q_{Hi} 为第 i 时段热泵机组供热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; N_i 为第 i 时段热泵机组耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

区别于机组性能系数, 考虑水泵对系统性能影响, 系统性能系数:

$$\text{COP}'_i = \frac{Q_{Hi}}{N_i + NB_i} \quad (3)$$

式中: COP'_i 为第 i 时段热泵机组供热的系统性能系数; NB_i 为第 i 时段循环水泵的耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

机组负荷率:

$$K = \frac{T_c}{24n} \times 100\% \quad (4)$$

式中: K 为机组负荷率; T_c 为机组所有压缩机当日总工作时间, h ; n 为机组压缩机个数。

供热量、COP 和 COP' 的相对误差分别为 $\pm 0.8\%$ 、 $\pm 1.8\%$ 和 $\pm 1.8\%$ 。

2 现场实验结果及分析

2.1 供暖效果

图 4 所示为 2016-12-15—2017-02-19 测试期间, 房间室内温度随时间的变化。106 和 107 房间属于 A 区系统, 108 和 109 房间属于 B 区系统。

阶段 1 期间的系统出水温度为 35°C , A 区系统房间温度波动范围为 $16.4 \sim 23.5^{\circ}\text{C}$, 低温时段出现在周末, 与温控器温度预设值相吻合, 而高温时段主要出现在工作日, 从整体上看室温以 7 d 为一个周期呈周期性分布。B 区系统房间温度波动范围为 $22.5 \sim 27.4^{\circ}\text{C}$, 室温波动小。阶段 2 期间的系统出水温度为 20°C , A 区系统室温为 $12.6 \sim 21.9^{\circ}\text{C}$, B 区系统室温为 $13.6 \sim 23.8^{\circ}\text{C}$, 两个系统大多数时间室温约维持 15°C 。

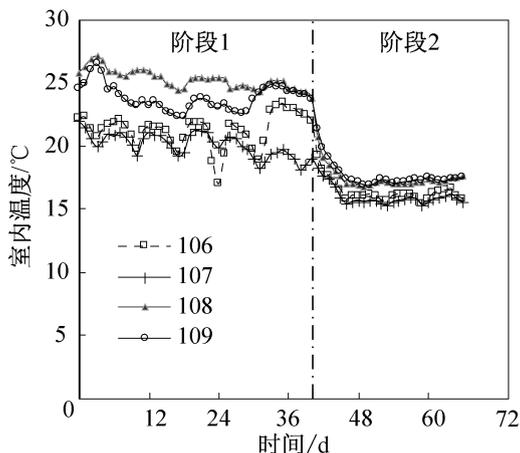


图 4 房间室内温度随时间的变化

Fig. 4 The variation of indoor temperature with time

该供暖系统的供暖效果满足我国寒冷地区室内温度 $18 \sim 24^{\circ}\text{C}$ 的设计要求^[16], 在温控器的调节下, A 区系统的室温低于 B 区系统的室温, 且更满足室温设计要求。

2.2 供热量及调控

在供暖期间, 室外温度是影响建筑需热量变化的主要因素, 室外温度升高, 建筑所需供热量也会相应降低。图 5 所示为 2016-12-15—2017-02-19 总测试期间, A/B 区系统逐日供热量及日均温随时间的变化。可知, 阶段 1 的日供热量大于阶段 2, 这主要是由于机组出水温度由 35°C 降为 20°C 导致。在整个运行阶段, A 区的日供热量小于 B 区, 特别是周末, 日供热量下降明显, 说明温控器发挥了调控日供热量的作用, 能进一步发挥空气源热泵的节能性。

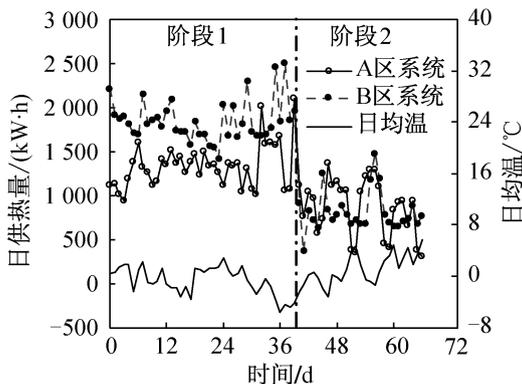
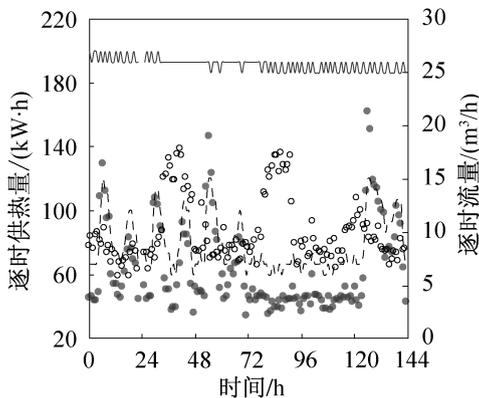


图 5 日供热量与日均温随时间的变化

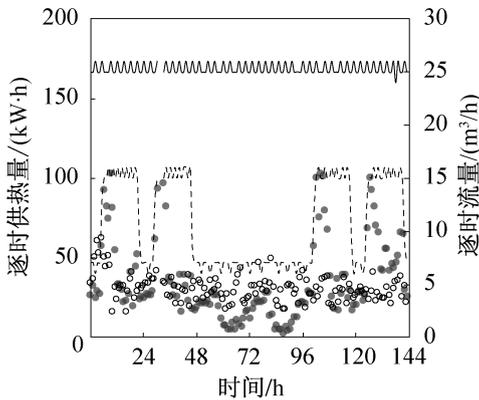
Fig. 5 The variation of daily heating capacity and daily average temperature with time

为进一步研究温控器的控制作用, 选取一组典型的实验数据分析室温控制对系统流量和供热量的影响。图 6 所示为系统的逐时供热量和逐时流量随时

间的变化,其中图 6(a)中测试时间为 2017-01-18—2017-01-23(阶段 1),图 6(b)中测试时间为 2017-02-02—2017-02-08(阶段 2)。由图 6(a)可知,A 区系统在温控器、调节阀与压差旁通阀协同作用下,实际为变流量运行。在工作日的工作时间(05:30—22:30)温控器设定温度为 21℃,供热量需求大,流量增大;当室内温度满足需求后,转为低流量运行;无人时(22:30—05:30)温控器设定温度为 12℃,供热量需求小,流量减小。周末,全天温控器设定为 12℃,供热需求较低,整个时间段都处于低流量运行。A 区系统逐时流量呈明显的周期性变化。B 区系统无室温调控,逐时流量维持不变,在周末无人时,存在较大逐时供热量情况,能量浪费严重。



(a) 2017-01-18—2017-01-23 (阶段1)



(b) 2017-02-02—2017-02-08 (阶段2)

• A 区逐时供热量 ---- A 区逐时流量
○ B 区逐时供热量 —— B 区逐时流量

图 6 逐时供热量和逐时流量随时间的变化

Fig. 6 The variation of hourly heating capacity and flow with time

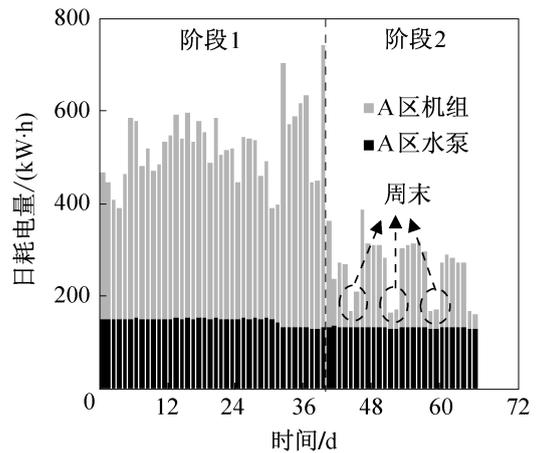
由图 6(b)可知,A/B 区系统的机组出水温度均降为 20℃,但 A 区室内房间温控器的控制逻辑仍与阶段 1 相同,机组出水温度难以满足房间室温 21℃ 的设定要求,在工作日白天仍以大流量供热,这也是造成图 5 中 A 区与 B 区阶段 2 期间逐时供热量相差

不大的原因。A 区功耗增大,节能潜力下降。因此在实际运行中,室内房间的控制逻辑应与室外机组的控制逻辑相匹配。

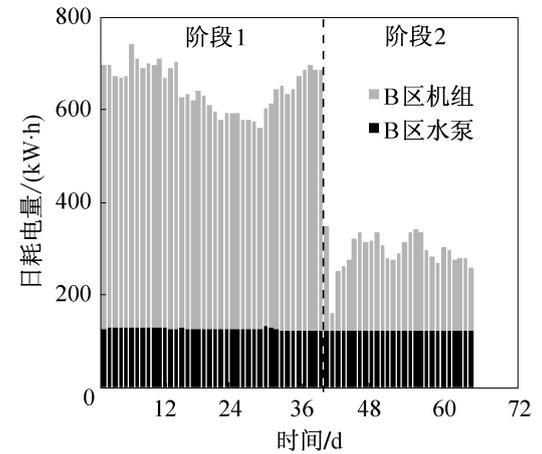
2.3 能耗及能效

2.3.1 能耗

在空气源热泵 + 地板辐射供暖系统上引入室温控制,实现按需供热,提高系统的节能性。耗电量可直观反映引入室温控制的节能效果,为了消除供暖面积和热负荷略微差异的影响,引入单位面积耗电量计算节能率。图 7 所示为 2016-12-15—2017-02-19 总测试期间,日耗电量随时间的变化,统计结果见表 1。



(a) A 区



(b) B 区

图 7 日耗电量随时间的变化

Fig. 7 The variation of daily power consumption with time

由图 7 可知,阶段 1 与阶段 2 相比,热泵机组出水从 35℃ 降至 20℃,日耗电量明显下降,阶段 2 的日耗电量约为阶段 1 的 1/3。阶段 1 期间,A 区系统的日耗电量显著低于 B 区系统的日耗电量;阶段 2 期间,工作日的日耗电量 A 区系统与 B 区系统相差不大,但周末的日耗电量 A 区系统明显低于 B 区系统。由于水泵为定频水泵,其耗电量接近,图 7 中水

泵的耗电量占总耗电量比重较大,特别是 A 区系统,阶段 1 水泵耗电量达到 30% 以上,阶段 2 时水泵占比超过 50%,说明今后的研究中需要进一步降低水泵的耗电量。

由表 1 可知,引入室温控制后,解决了供热过量的问题,大大降低了耗电量。阶段 1 期间,系统正常供暖,节能率为 24.4%;阶段 2 期间,防冻运行工况,

节能率略有下降,为 16.3%。总测试期间,节能率为 22.5%。阶段 2 期间节能率下降的主要原因是,在出水温度降为 20℃ 后,温控器的设置并没有改变,导致系统无法满足室内设定温度,热泵机组工作时间延长,能耗增加。说明当热泵机组在防冻低温运行时,温控器需要相应降低设定的室温,以获得更大节能效益。

表 1 单位建筑面积耗电量的统计
Tab.1 Statistics of power consumption per unit building area

项目	总耗电量/(kW·h)		单位面积耗电量/((kW·h)/m ²)		节能率/%
	A	B	A	B	
阶段 1	20 922	25 871	12.1	16.0	24.4
阶段 2	7 055	7 904	4.1	4.9	16.3
总测试期间	27 977	33 775	16.2	20.9	22.5

2.3.2 能效

图 8 所示为为测试期间 A/B 区的 COP 和 COP' 随时间的变化。阶段 1 期间,A 区系统 COP 在 3.21~4.47 波动,COP' 在 2.26~2.86 波动;B 区系统 COP 在 2.80~4.91 波动,COP' 在 2.32~3.82 波动。可知阶段 1 期间,两系统的热泵机组工作相对平稳,A 区与 B 区系统的 COP 分别为 3.56 和 3.54,无明显差距。说明出水温度为 35℃ 时,引入室温控制和水力平衡调控措施对热泵机组的性能无明显影响。阶段 1 期间,A 区与 B 区系统 COP' 分别为 2.56 和 2.86,原因在于 A 区系统实际为变流量系统,实际运行中水泵流量需求小于设计流量,水泵耗电量占比更大,因此水泵能耗对整个系统的 COP' 有较大影响。

阶段 2 期间,A 区和 B 区系统的 COP 均高于阶段 1,分别为 6.38 和 4.74,其中 A 区系统提升更为明显,周末 COP 大于 10。原因为阶段 2 期间,热泵机组出水温度为 20℃,有利于冷凝器侧的换热;A 区系统带有室温控制,周末大部分时间温控器关闭,建筑侧的耗热量降低导致机组长时间停机,但水泵仍继续运行,而由于室温较低(图 4 阶段 2),室内侧的换热仍持续进行,出现了 COP 非常高的情况。

图 9 所示为 A 区系统阶段 2 期间,机组负荷率随时间的变化,1 月 28 日(周六)供热量是 1 月 27 日(周五)供热量的 59%,但 1 月 28 日的耗电量仅为 1 月 27 日耗电量的 32%,故出现了周末 COP 偏高的情况,周末的部分热量是工作日所制得。对于 B 区系统,没有工作日与周末的区别,负荷率变动幅度不大,故图 8(a)中 B 区系统 COP 变化幅度较小。

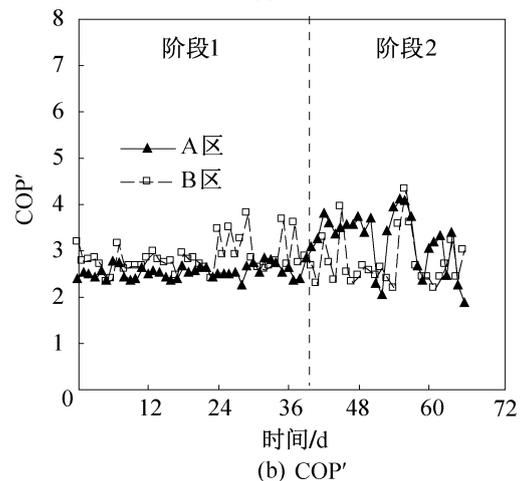
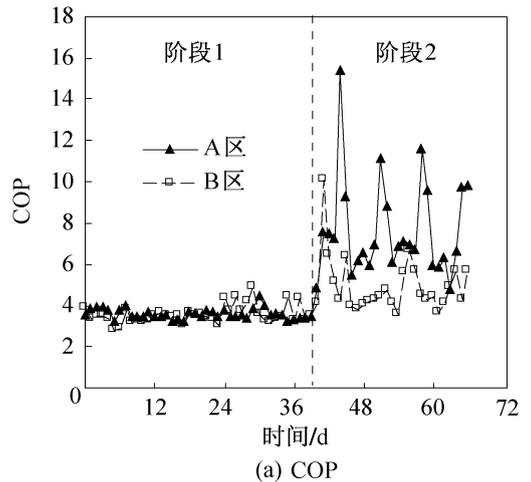


图 8 COP 和 COP' 随时间的变化

Fig. 8 The variation of daily COP and COP' with time

图 10 所示为 COP 随环境温度的变化。验证了进水温度为 30℃,出水温度为 35℃ 时,热泵机组实

际运行的性能曲线,可知实测 COP 与机组性能曲线吻合良好。

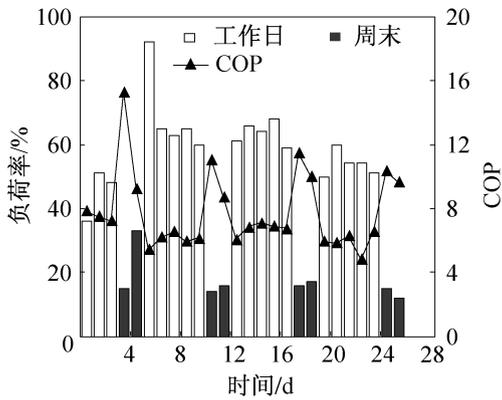


图 9 机组负荷率随时间的变化

Fig. 9 The variation of load factor with time

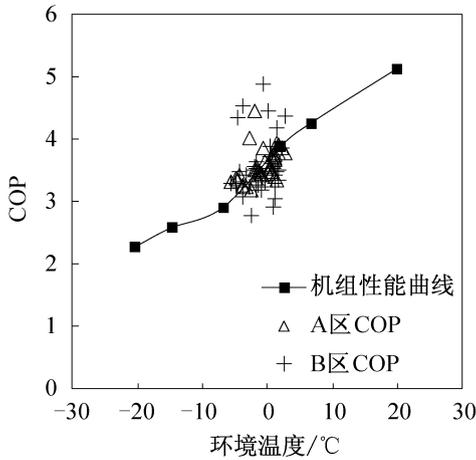


图 10 热泵性能曲线验证

Fig. 10 Verification of heat pump performance curve

3 结论

本文对北京某教学楼 A/B 区域的两套空气源热泵供暖系统进行的现场实验测试,其中 A 区系统末端安装了温控器与动态压差平衡型电动调节阀,通过运行性能对比分析,得到如下结论:

1) 带有室温控制的 A 区系统供暖效果优于无室温控制的 B 区系统,室温更符合人员需求。室温控制的空气源热泵能根据用户需求向室内提供热量,达到“按需供热”的目的。

2) 在正常供暖时,加入室温控制和水力平衡控制不会降低机组性能,且实际 COP 接近机组的性能。供暖期间,A 区和 B 区系统的 COP 分别达到 3.56 和 3.54,无明显差异。

3) 合理设置温控器参数,可以提高系统节能率。在出水 35 °C 的正常供暖期间,A 区系统相比于 B 区

实现了 24.4% 的较高节能率。在出水 20 °C 的防冻期间,由于温控器设置未相应更改,A 区系统节能率仅为 16.3%,整个测试期间的节能率降为 22.5%,说明室温控制应与出水温度相匹配。

4) 适合的水泵运行策略,可以提高系统的性能。考虑水泵的耗电量,A 区和 B 区供暖期间 COP' 分别为 2.56 和 2.86,过高的水泵耗电占比是导致 A 区系统性能略低于 B 区系统性能的主要原因,可考虑采用变频策略控制水泵运行或者两台小型泵,应对不同负荷下的运行,改善系统性能。

参考文献

- [1] LI Xianting, WU Wei, ZHANG Xiaoling, et al. Energy saving potential of low temperature hot water system based on air source absorption heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48: 317-324.
- [2] 王洋浩,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.)
- [3] 王林军,刘伟,张东,等. 寒冷地区低温空气源热泵辐射供暖实验研究[J]. 甘肃科学学报,2016,28(1): 77-82. (WANG Linjun, LIU Wei, ZHANG Dong, et al. Experimental study on radiation heating of low temperature air source heat pump in cold areas[J]. Journal of Gansu Sciences, 2016, 28(1): 77-82.)
- [4] HAKKAKI-FARD A, AIDOUN Z, OUZZANE M. Applying refrigerant mixtures with thermal glide in cold climate air-source heat pumps[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 714-722.
- [5] BUSATO F, LAZZARIN R M, NORO M. Two years of recorded data for a multisource heat pump system: a performance analysis[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 57(1/2): 39-47.
- [6] 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.)
- [7] 张明圣,陈涛,张秀平,等. 国内外空气源热泵产品相关标准现状和进展[J]. 制冷与空调(北京),2014, 14(8): 93-101. (ZHANG Mingsheng, CHEN Tao, ZHANG Xiuping, et al. Current status and progress of foreign and domestic related standards of air-source heat pump products [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(8): 93-101.)

[8] 王伟,刘景东,孙育英,等.空气源热泵在北京地区全工况运行的关键问题及应对策略[J].暖通空调,2017,47(1):20-27.(WANG Wei, LIU Jingdong, SUN Yuying, et al. Key problems and countermeasures for air-source heat pump under whole working conditions in Beijing[J]. Journal of HV & AC, 2017, 47(1): 20-27.)

[9] 齐承英,高俊茹,方立德,等.新型智能供热计量控制系统[J].暖通空调,2004,34(10):103-105.(QI Chengying, GAO Junru, FANG Lide, et al. New intelligent heat metering control system[J]. Journal of HV & AC, 2004, 34(10): 103-105.)

[10] PEFFER T, PRITONI M, MEIER A, et al. How people use thermostats in homes: a review[J]. Building & Environment, 2011, 46(12): 2529-2541.

[11] MEIER A, ARAGON C, PEFFER T, et al. Usability of residential thermostats: preliminary investigations [J]. Building & Environment, 2011, 46(10):1891-1898.

[12] 杜涛,黄珂,周志华,等.中国北方城镇居住建筑供暖能耗现状与节能潜力分析[J].暖通空调,2016,46(10):75-81.(DU Tao, HUANG Ke, ZHOU Zhihua, et al. Analysis on present situation and energy saving potential of heating energy consumption of residential buildings in Chinese northern cities[J]. Journal of HV & AC, 2016, 46(10): 75-81.)

[13] 顾吉浩,李广苏,齐承英,等.基于通断时间面积法的居住建筑供暖能耗分析[J].暖通空调,2015,45(1):47-49.(GU Jihao, LI Guangsu, QI Chengying, et al. Heating

energy consumption analysis of residential buildings based on the on-off time and area method[J]. Journal of HV & AC, 2015, 45(1):47-49.)

[14] Pressure independent balancing and control valve ABQM DN 10-250 [EB/OL]. (2017-07-14) [2018-01-03]. http://heating.danfoss.com/PCMPDF/VDA7F602_AB-QM-DN10-250_industry%20pack.pdf.

[15] 公共建筑节能检测标准: JGJ/T177—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (Standard for energy efficiency test of public buildings: JGJ/T177—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.)

[16] 民用建筑供热通风与空气调节设计规范: GB50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)

通信作者简介

倪龙,男,教授,博士生导师,哈尔滨工业大学建筑学院,(0451)86282123,E-mail:nilonggn@163.com。研究方向:热泵技术及建筑能量系统优化。

About the corresponding author

Ni Long, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Architecture, Harbin Institute of Technology, +86 451-86282123, E-mail: nilonggn@163.com. Research fields: heat pump technology and building energy system optimization.

(上接第 28 页)

[17] ZHU Jiahe, SUN Yuying, WANG Wei, et al. Developing a new frosting map to guide defrosting control for air-source heat pump units[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 782-791.

[18] 王伟,倪龙,马最良.空气源热泵技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.(WANG Wei, NI Long, MA Zuiliang. Air source heat pumps technology and application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)

[19] BORRA S, CIACCIO A D. Measuring the prediction error. A comparison of cross-validation, bootstrap and covariance penalty methods[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2010, 54(12): 2976-2989.

通信作者简介

王伟,男,教授,博士生导师,北京工业大学建筑工程学院,(010)67391608-804,E-mail:mrwangwei@bjut.edu.cn。研究方向:HVAC系统高效运行与优化控制、绿色建筑可再生能源利用关键技术与能效评价。

About the corresponding author

Wang Wei, male, professor, doctoral supervisor, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, +86 10-67391608-804, E-mail: mrwangwei@bjut.edu.cn. Research fields: high efficient operation and optimal control of HVAC systems, key technology and performance evaluation of renewable energy in green buildings.