

刘晓刚,邹声华,张杰,等. 无动力回收冷凝水提高分体空调机性能的实验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 39-45. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.006

Liu X G, Zou S H, Zhang J, et al. Experimental Study on Improving the Performance of Split Air Conditioner by Non-power Recovery of Condensed Water [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3): 39-45. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.006

# 无动力回收冷凝水提高分体空调机性能的实验

刘晓刚, 邹声华\*, 张杰, 张哲楠

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**家用空调的使用越来越广泛,在湿热环境,空调产生的冷凝水量相当可观.本文利用冷凝水含有可回收冷量的特点,将其用于降低室外机进风温度来提高室外机的散热性能;通过对比分析冷凝水冷却室外机进风前后的空调机性能,提出一种用冷凝水浸湿的湿帘冷却室外机进风的方案,并设计了一套无动力输入的集冷凝水回收与利用于一体的节能系统,并做了初步实验验证,结果显示在室外温度升高0.02%时,室外机进风湿帘可以小幅度拓展室外机工作温度范围,还有空调COP提高了2.6%.既解决了现实中冷凝水的随意排放造成的环境问题,又提高了空调机的空调效果,是一种很好的节能环保技术.

**关键词:** 冷凝水;家用空调;直接蒸发冷却;节能;环保

**中图分类号:** TU831      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2019)03-0039-07

## Experimental Study on Improving the Performance of Split Air Conditioner by Non-power Recovery of Condensed Water

Liu Xiaogang, Zou Shenghua, Zhang Jie, Zhang Zhenan

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Air conditioner is more and more widely used, in the hot and humid environment, air-conditioning produces a considerable amount of condensate. This paper uses condensed water to contain the characteristics of recoverable cooling capacity, it is used to reduce the inlet air temperature of outdoor machine to improve the heat dissipation performance of outdoor machine; by contrasting and analyzing the performance of air conditioner before and after condensing water cooling outdoor machine inlet air, a scheme for cooling outdoor air inlet with wet curtain soaked by condensation water is proposed. A set of energy-saving system which integrates condensate water recovery and utilization is designed, and a preliminary experimental verification is made, the results show When the outdoor temperature rises by 0.02%, the wet curtain of the outdoor air inlet can be a small expansion of the outdoor unit operating temperature range, as well as air conditioning COP increased by 2.6%. It not only solves the environmental problems caused by the free discharge of condensed water in reality, but also improves the air conditioner effect of air conditioner, and is a good energy saving and environmental protection technology.

**Keywords:** Condensed water; home air-conditioning; direct evaporative cooling; energy conservation; environmental protection

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(511340055)

\*通信作者, E-mail: shzhou@hmust.edu.cn

人们对生活环境舒适性要求随生活水平不断提高,家用空调已成为必备家电.据统计,2009~2014年,我国家用空调产量的增长率为12.35%.空凋制冷运行产生的冷凝水量也随之增加,在湿热地区更加可观,却任意排放未利用,不仅浪费了冷量,而且浪费了水资源,影响建筑市容.目前,国内关于冷凝水利用的研究,主要围绕冷凝水具有冷量的特点展开.具体地,冷凝水经泵直接喷淋或流到冷凝器,或者使冷凝水在冷凝器周围蒸发,通过冷却冷凝器及其环境空气来提高其散热性能<sup>[1-6]</sup>.此外,冷凝水来自空调房间,含有室内空气中灰尘、微生物等,故其化学组成比较复杂.伊朗学者 Alipour V 等,对当地空调冷凝水的 PH 值、硬度等做了调查与分析,提出空调冷凝水可作为市政用途<sup>[7]</sup>.此外,国外也有借水泵雾化冷凝水预冷冷凝器进风的研究<sup>[8-9]</sup>.本文基于直接蒸发冷却技术,借重力作用收集的冷凝水并用于润湿冷凝器进风侧的湿帘,以降低冷凝器进风温度;将实例计算的冷凝水量和蒸发水量与实测冷凝水量和蒸发水量进行了对比分析;通过引入定量自来水,弥补了冷凝水量和蒸发水量的差额,使冷水蒸发量与冷水供应量基本相等,构造冷水供应的自动控制,保持冷水对室外机冷却效果的持续性,从而提高空调性能;设计了一套无动力输入的冷凝水回收利用系统,并初步进行了实验验证,解决现实空调冷凝水未得到利用及影响市容等问题,体现了节能环保的理念.

## 1 基本原理分析

### 1.1 直接蒸发冷却过程

直接蒸发冷却,即空气与水直接接触时发生传热传质(湿)过程.湿帘被水完全浸润,类似于在无吸湿能力的壁面形成水膜,当空气流过附有水膜的固体壁面时,这种气-水界面上会发生热湿交换.由于湿帘材料本身不导热,而且冷水的温度低于环境的温度,所以,高温低湿度的气流通过湿帘时,两者同时存在温差和浓度差.空气与水的温度差就是热量交换的动力;浓度差促使水蒸气发生相变并放出或吸收气化潜热,即推动湿量交换.即可发生热量交换和湿量交换.

### 1.2 冷凝水冷却室外机进风的分析

空调冷凝器的冷却方式有:风冷、水冷和蒸发冷却.风冷,空气与冷媒进行热交换,通过空气流动带走冷媒系统传输的热量;也是家用空调室外机采用的冷却方式.实际工程中,冷凝器的冷凝温度可取冷凝器前部、中部和后部三者的平均值.当用冷凝水冷却室外机进风时,预冷的空气先降低冷凝器前部温度,接着是中部和后部的温度.随着空气穿过冷凝器盘管,这种效果越来越弱,但还是使冷凝器前、中和后部温度有不同程度的下降,最终带来了冷凝器的冷凝温度一定程度上的降低.此外,湿帘冷却室外机进风对冷凝器盘管进风侧的降温最明显,根据目前家用空调的结构,这也就是冷凝器中放热后的液态制冷剂离开冷凝器的出口侧.所以,这也是对低压液态制冷剂再冷却,增加了流过膨胀阀的液态制冷剂比例,增大了其气化时吸热量,提高了制冷量.

由蒸汽压缩式制冷过程分析知,冷凝温度降低,制冷量增加,耗功减少,所以能效比增大.耗功的降低包括:冷凝温度降低,使经冷凝器的冷媒几乎全部液化,流经膨胀阀时气态冷媒占比小,液态变气态的吸热过程更充分,制冷能力更高,同条件下压缩机节省功耗;冷凝温度降低,压缩机排气压力较低,电机电流小,冷量消耗少.所以,冷凝水的使用提高了空调能效.

### 1.3 湿帘蒸发水量的理论计算

冷凝水在湿润的湿帘表面的蒸发过程,可看成水被热气流带走的过程.本文取夏季空调最差工况( $\varphi = 85\%$ ,  $t_w = 40\text{ }^\circ\text{C}$ )计算湿帘表面蒸发水量<sup>[10]</sup>,具体如式(1)和式(2).

$$M_{\text{蒸}} = \frac{\beta(P_{q,b} - p_q) AB}{B'}; \quad (1)$$

$$\beta = (a + 0.003\ 63v) 10^{-5}. \quad (2)$$

式中: $M_{\text{蒸}}$ 为蒸发水量,kg/h; $\beta$ 为蒸发系数,kg/(N·s); $P_{q,b}$ 为对应水表面温度下饱和空气的水蒸气分压

力,水温 40 °C 时,  $P_{q,b} = 7\ 381.1\ \text{Pa}$ ;  $p_q$  为空气中水蒸气分压力,查 40 °C 时  $p_s = 7\ 375\ \text{Pa}$ ,  $p_q = \varphi \cdot p_s$ ;  $A$  为水的蒸发表面积,这里指湿帘的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $B$  为标准大气压,  $\text{Pa}$ ;  $B'$  为湘潭当地大气压,等于  $99\ 242.5\ \text{Pa}$ ;  $a$  为扩散系数,水温 40 °C 时  $\alpha = 0.005\ 8\ \text{kg}/(\text{N} \cdot \text{s})$ ;  $v$  为水面附近气流速度.

湿帘的表面积  $A$ ,可由式  $A = A_0 V$  计算,其中  $A_0$  为湿帘的特征表面积,  $1/\text{m}$ ;  $V$  为湿帘体积,  $\text{m}^3$ . 实验中湿帘  $V = 0.025\ \text{m}^3$ ,  $A_0 = 10\ \text{m}^2/\text{m}^3$ ,得  $A = 0.25\ \text{m}^2$ . 不同相对湿度下蒸发水量与环境温度和风速关系如图 1~图 3.

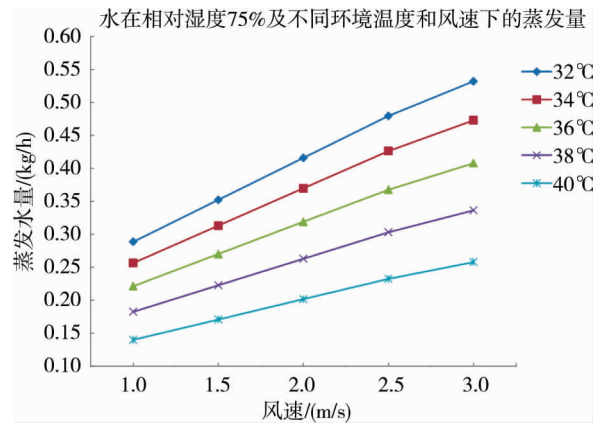
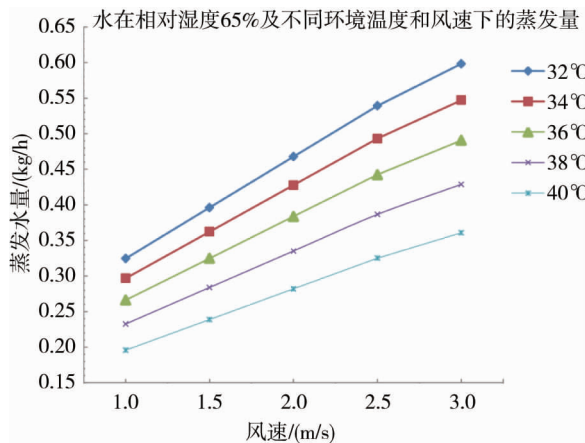


图1 相对湿度  $\varphi = 65\%$ ,蒸发水量与水温 and 室外风速的关系

图2 相对湿度  $\varphi = 75\%$ ,蒸发水量与水温 and 室外风速的关系

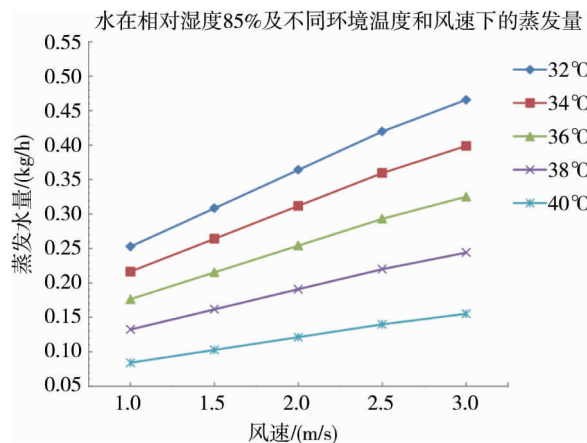


图3 相对湿度  $\varphi = 85\%$ ,蒸发水量与水温 and 室外风速的关系

由图 1~图 3 可知,蒸发水量随环境温度升高而减少,随室外风速增大而快速增加,随室外空气湿度增大而急剧减少.在相同条件下,蒸发水量随湿度增大而减小,一方面,由于空气与湿帘间的水蒸气分压力减小;另一方面,高温高湿条件下水汽和其他微粒容易形成气溶胶聚集在蒸发部位周围环境,风速小时不易消散,不利于热量扩散<sup>[11]</sup>.

根据上述蒸发水量计算式,给定一个水温,只有当地大气压是随地点变化的,其他条件如风速和温度的变化不受地区变化影响.

### 1.4 冷凝水产生量计算

由于分体空调没有单独的新风系统,主要靠门窗渗透补充,故新风比可取  $m = 10\%$ .家用分体空调对室内空气做一次回风处理,则冷凝水产生量计算如式(3):

$$M_{\text{冷}} = \rho V (d_0 - d_L) \tag{3}$$

式中:  $\rho$  为循环空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  为循环空气量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $d_0$  为混合状态下空气的含湿量,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $d_L$  为机器露点状态下空气的含湿量,  $\text{g}/\text{kg}$ .

## 2 实验系统及原理

### 2.1 实验系统

该实验系统基于单人办公室分体壁挂式空调器搭建.该分体壁挂式空调规格:额定制冷量为3 500 W,COP为3.28,功率为1 068 W,循环风量 $630 \text{ m}^3/\text{h}$ ,室内机尺寸 $844 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 183 \text{ mm}$ ,室外机尺寸 $848 \text{ mm} \times 540 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ ,采用的制冷剂为R22.

实验系统关键部分的原理如图4.当空调运行时,室内机蒸发器产生的冷凝水借重力作用沿冷凝水管流入储水箱(如图6),再由分流管流至蒸发冷却器,未蒸发的冷凝水在水槽内继续蒸发.室外空气穿过湿润的湿帘(如图5),冷凝水蒸发吸热,空气得到冷却,温度降低,通过带走更多冷凝器散热量,从而提高冷凝器的散热率.

当室外温度较高时,打开自来水控制阀门,补水箱,保证足量稳定的蒸发水量.当箱内水位达到箱体积的 $2/3$ 时,箱内浮球阀动作,切断自来水供应.反之,供应自来水.

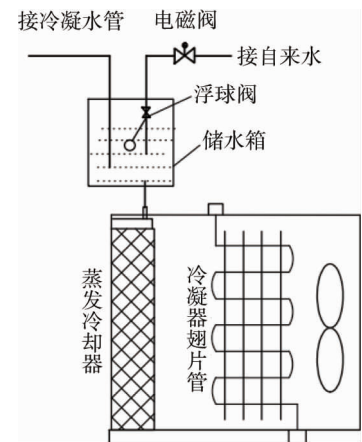


图4 实验系统关键部分原理



图5 室外机水帘布置



图6 储水箱

如图5所示,湿帘与冷凝器间距很小,为保证风量,没有完全覆盖冷凝器进风断面.湿帘的自滴式供水管,在图6中右下部接口与储水箱接通.储水箱固定在室内机下墙壁上,箱体的可开启顶盖接入冷凝水管,右侧端面上部是自来水引入管,对应有浮球阀控制箱内水位下侧是湿帘供水管.

### 2.2 实验测试及主要测试仪器

#### 2.2.1 实验测试

为分析冷凝水对室外机进风的冷却效果,实验主要测定的参数包括:室内机送回风温度、蒸发器温度、储水箱水温、室内温湿度、室外机进排风温度、冷凝器温度、湿帘温度、室外环境温湿度、冷凝水产生量等.

实验在7月当地高温时进行,实验期间空调器的空调温度设置为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .实验前,布置温度K型 $0.5 \text{ mm}$ 的温度探头并接通到数据采集器,待空调运行至实验系统达到稳定后,开始采集数据.实验仪器主要有温湿度计、红外测温仪、电力监测仪等.

#### 2.2.2 主要测试仪器

- 1) 温湿度计.用于测量作业环境温度与湿度的仪器.其规格参数如表1.
- 2) 红外测温仪.体积小,携带方便;性能卓越;激光瞄准,瞬间读取数据.其规格参数如表2.
- 3) 电力监测仪.适用于各种家电,如空调、冰箱等.可以监测功率、电量、电流、电压、频率、功率因数等,其精度是1级,工作环境温湿度: $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\varphi < 90\%$ .

表1 TES-1360A 温湿度计的规格参数

项目	参数
档位	湿度:10%~95%R.H. 温度:-20℃~+60℃(-4°F~+140°F)
分辨率	0.1%R.H.,0.1℃,0.1°F
准确度	湿度:±3%R.H.(at25℃,30~95%R.H.) 温度:±0.8℃,±1.5°F
反应时间	湿度:45%→95%R.H.<=3 min 95%→45%R.H.=5 min 温度:1℃/2 sec

表2 DHS-110 系列红外测温仪规格

项目	参数
测温范围	-18℃~450℃
测量精度	100℃以下±1℃;100℃以上读数值±1%
分辨率	1℃
使用环境条件	-20℃~50℃

4) 温度热电偶. I 级精度 K 型(镍铬-镍硅)热电偶延长型导线,温度允差值为±1.0℃.

5) 数据采集器.将温度传感器的温度信号以数字显示,其测量温度的精度为±0.1℃.

## 2.3 实验结果及分析

### 2.3.1 冷凝水产生量与湿帘的蒸发水量

在有冷凝水试验中同时记录分体空调的冷凝水产生量和实验湿帘的蒸发水量,两者的关系如图7.从图中看出,实验期间,冷凝水的产生量为0.48~0.96 kg/h.湿帘蒸发水量为1.7~2.16 kg/h.由于实验时室外环境参数的波动,室内机产生的冷凝水量不稳定,随着室外温度升高呈现下降趋势,且其产生量远不够湿帘蒸发耗水量.所以,实验中引入定量的自来水补到储水箱,以保证足量的冷水供应,从而维持对室外机进风冷却效果的持续性.实验期间,控制湿帘供水管上阀门的开度,改变蒸发水量的供应,制造冷水供应量和蒸发量的自动控制模式,使这种冷却效果持续作用.

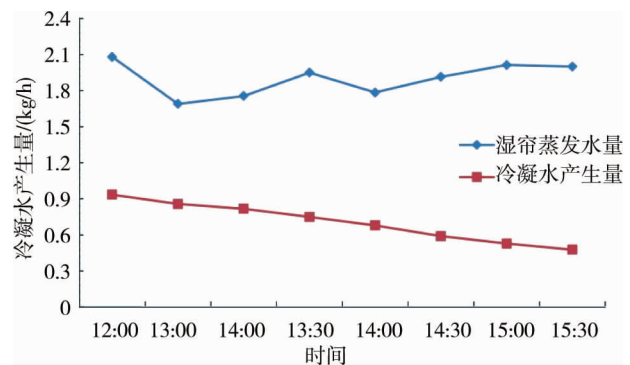


图7 冷凝水产生量与湿帘蒸发水量的比较

### 2.3.2 分体空调室内外机温度分析

实验中测定了有无冷水湿润的湿帘冷却进风时室外机各部位温度变化情况,如图8列出2种情况下室外机排风和冷凝器温度的变化.从图8中可看出实验中无湿帘时室外温度比较高.此时,由于室外湿度较大,冷水蒸发量减少,对室外机进风冷却效果下降.所以,在最初2个小时,无湿帘工况下室外机排风温度低了0.2~0.4℃,冷凝器温度基本相等,最大相差0.2℃.从11:30开始,有湿帘时室外温度高出0.5~1.0℃,但有湿帘时冷凝器最多高了0.3℃左右,试验期间室外温度增大0.02%的情况下,冷凝器温度对应增大0.0094%,后者是前者的0.47倍,说明室外机进风湿帘可以拓展室外机工作温度范围.另外,有湿帘工况下室外机排风温度对应地低了0.1~0.5℃.从图中还看出,有冷凝水实验中环境温度超过空调制冷设计的 $T_1$ 工况室外温度35℃时,冷凝器温度不高于43.5℃,室外机排风温度峰值为45.5℃,且2个温度变化较稳定.

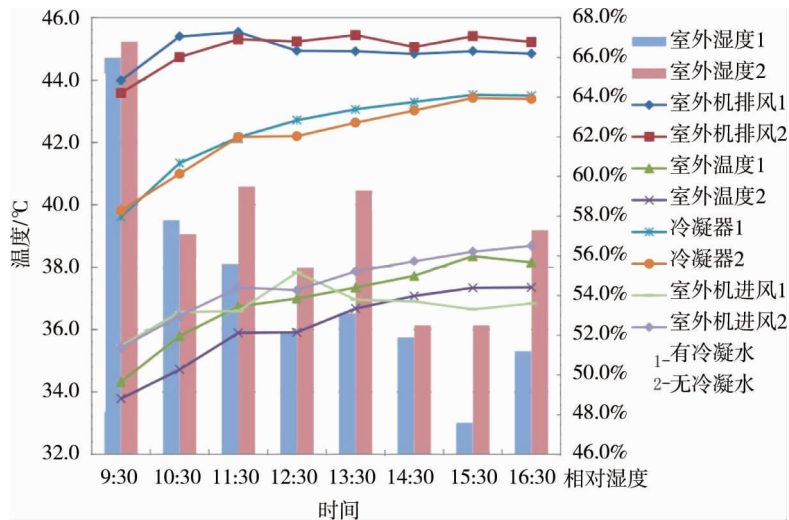


图8 有无冷水时室外机各部位温度

室内机蒸发器,作为制冷循环的4大部件之一,其性能也对系统制冷效果有影响.如图9记录了有无湿帘时室内机出风和蒸发器的温度变化.此时,室外条件同图8.从图9中看出有冷水时蒸发器温度升高了 $0.4\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由压焓图知,蒸发温度在一定范围内升高,可以提高制冷系数,增加制冷量.对于室内机出风温度,刚开始几个小时,由于冷水蒸发量的减少导致室外机进风的冷却效果下降,其散热能力变差,影响了系统制冷性能.所以,如图9这2种情况下室内机出风温度接近,有冷水时略高.中午开始,室外湿度变小,冷水蒸发量增加,冷却效果提高,系统性能提升.所以,室内机出风温度降低了 $0.4\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

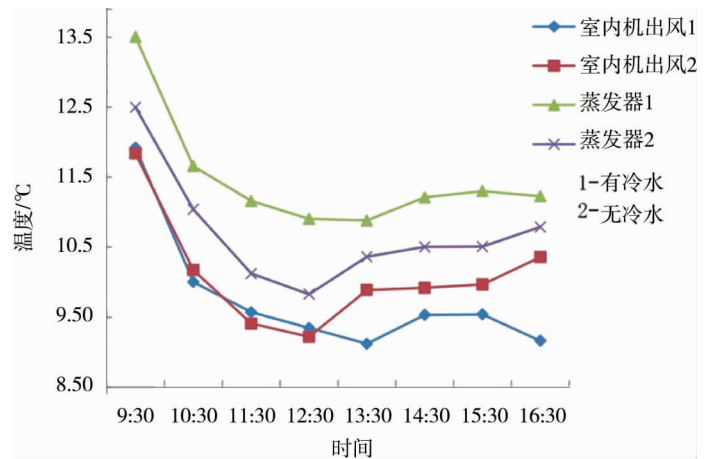


图9 有无冷水时室内机温度

### 2.3.3 湿帘对室外机进风冷却效果分析

由图8知,实验中有冷凝水冷却室外机进风时的室外温度比没有冷凝水时的室外温度高 $0.5\sim 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且在 $11:30\sim 15:30$ ,处于最大.在中午蒸发消耗水多是因为温度升高较快,同时为浸透干燥的湿帘.因此,12:30以后蒸发水量最大且稳定.对应地,同时间段内有冷凝水冷却时室外机进风比没有冷凝水时低了 $0.5\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,还有其他关键部位温度都有相应降低.出现这种起伏变化和室外温湿度变化有关.相对来说,上午温度较低,湿度较大,蒸发过程较弱,冷凝水对进风冷却效果较差;中午,随着蒸发过程进行,蒸发消耗水量突增,室外机周围空气温度稍有降低但湿度增大,冷却效果出现先增强后减弱的现象;蒸发过程持续,温度更高,湿度有所降低,蒸发过程稍有增强,后又减弱,如此起伏变化但变化幅度较小,整体冷却效果稳定.

### 2.3.4 湿帘冷却室外机进风空调器性能分析

由上文知,空调产生的冷凝水量远不满足湿帘蒸发耗水量,所以实验期间只比较有无足量冷水冷却室外机进风时空调性能变化.2种工况的实验期间空调的制冷量、功率及COP变化如图10所示.3个性能参数的具体情况:

**制冷量:**由图10中看出,相比于原装空调,有进风冷却时,空调制冷量平均增加约 $0.09\text{ kW}$ 增加了2.57%.

**功率:**图10中,有冷水冷却室外机进风时,空调的功率平均减少大约 $0.024\text{ kW}$ ,减少的比例为2.28%.

COP:当空调的制冷量相对于功率增大时,其性能系数就会增大.这里看到,制冷量增加,同时功率下降,故有 COP 增大.由 2 种工况对比得到,有冷水冷却室外机进风时,空调 COP 平均提高了 0.026,提高的比例为 2.6%.

通过对冷凝水冷却室外机进风实验结果分析,这种技术做法有一定的节能潜力,接下来将参照一种新型的空调系统可持续性综合评价指标<sup>[12-13]</sup>,结合实验系统的性能提升空间和成本经济性对该实验系统做进一步优化.

### 3 结论

- 1) 利用空调冷凝水的可回收冷量,可以让湿润湿帘冷却室外机进风具有节能效益.
- 2) 引入定量自来水及浮球阀的自动控制,能使空调室外机进风处湿帘冷水蒸发量与供应量实现自循环,保证冷凝器散热持续稳定进行,以改善空调性能.
- 3) 分体挂壁式空调系统的初步实验,在有湿帘室外温度升高了 0.5~1.0 ℃ 的情况下,冷凝器进风比没有冷凝水时降低了 0.5~1.2 ℃,且试验期间冷凝器温度增大幅度约为室外温度增大幅度的 0.47 倍,说明室外机进风湿帘可以拓展室外机工作温度范围,还得出空凋制冷量增加了 2.57%,功率降低 2.28%,系统的性能系数提高 2.6%.

#### 参考文献:

- [1] 姬利明, 祁影霞, 欧阳新萍. 家用空调冷凝水节能利用探讨[J]. 低温与超导, 2011, 39(5): 53-56.
- [2] 沈向阳, 陈嘉澍, 李金成, 等. 分体式空调器冷凝水回收利用方法的分析及探讨[J]. 低温与超导, 2014, 42(8): 69-74.
- [3] 刘静, 卢振, 罗春燕. 多联机室外机雾化喷淋技术节能实测研究[J]. 建筑节能, 2015(12): 87-90.
- [4] 金听祥, 张彩荣, 李改莲, 等. 带超声波雾化冷凝水装置的家用空调节能效果实验研究[J]. 轻工学报, 2016, 31(6): 74-79.
- [5] 徐博, 陈江平. 冷凝水冷却冷凝器节能效果的理论分析与实验[C]//中国制冷学会 2009 年学术年会, 2009.
- [6] 冯志明. 分体空调冷凝器喷雾降温技术实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- [7] Alipour V, Mahvi A H, Rezaei L. Quantitative and qualitative characteristics of condensate water of home air-conditioning system in Iran[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 53(7): 1834-1839.
- [8] Wang T, Sheng C, Nnanna A G A. Experimental investigation of air conditioning system using evaporative cooling condenser [J]. Energy & Buildings, 2014, 81(81): 435-443.
- [9] Sawan R, Ghali K, AlHindi M. Use of condensate drain to pre-cool the inlet air to the condensers: A technique to improve the performance of split air-conditioning units[J]. Hvac& R Research, 2012, 18(3): 417-431.
- [10] 韩宝琦, 李树林. 制冷空调原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 141-142.
- [11] Zou S, Li K, Han Q Y, et al. Numerical simulation of the dynamic formation process of fog-haze and smog in transport tunnels of a hot mine[J]. Indoor & Built Environment, 2017, 26(8): 1062-1069.
- [12] Ding Y Q, Zou S H, Yu C W. A new comprehensive evaluating method for assessing the sustainability credentials of the central air-conditioning system[M]// Separation procedures in inorganic analysis; Griffin, 2016: 1055-1062.
- [13] 邹声华, 丁雨晴, 李孔清, 等. 基于数据融合的中央空调系统综合评价方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(4): 29-34.

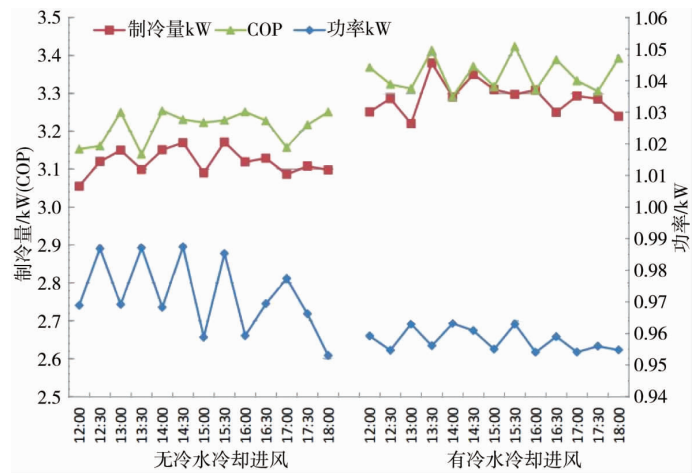


图 10 有无冷水时空调性能参数对比