

文章编号: 1671-6612 (2020) 02- 257-05

基于湿帘蒸发冷却技术回收利用制冷冷凝水的分体式空调设计与实验应用

黄紫旭¹ 贾春辉² 田政¹ 陈璐¹

(1. 西南科技大学城市学院 绵阳 621000; 2. 西南科技大学 绵阳 621010)

【摘要】 分体式空调在我国建筑中广泛使用, 暖通空调能耗占建筑能耗可达到40%~50%, 分体式空调的节能优化设计是空调节能的重要环节。分体式空调在湿负荷较大的场所, 每1kW冷负荷每小时产生约0.8kg的冷凝水, 冷凝水温度较低约为10~15℃。空气露点温度越高, 含湿量越大, 产生的冷凝水越多, 而冷凝水需要设置排水管进行有组织排放, 这既造成冷凝水冷量浪费又增加了排水管的管材使用。本文提出了一种基于湿帘蒸发冷却技术回收利用制冷冷凝水的分体式空调设计与实验应用。通过实验、计算和对比分析出利用制冷冷凝水后的实际节能效果, 结果表明: 通过利用湿帘蒸发冷却回收利用制冷冷凝水的分体式空调不仅可以提高制冷量约4.612%和能效比约9.302%, 降低冷凝温度约4.685%, 而且不需要设置排水管。

【关键词】 湿帘; 分体式空调; 制冷冷凝水; 回收利用

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Split-type Air Conditioning Design and Experimental Application based on Wet Curtain Evaporative Cooling Technology for Recycling Refrigeration Condensate

Huang Zixu¹ Jia Chunhui² Tian Zheng¹ Chen Lu¹

(1. City college, southwest University of science and Technology, Mianyang, 621000;

2. Southwest University of science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 Split-type air conditioners are widely used in China's buildings. HVAC energy consumption accounts for 40%~50% of building energy consumption. The energy-saving optimization design of split-type air conditioners is an important part of air-conditioning energy conservation. The split type air conditioner generates about 0.8 kg of condensed water per hour of cold load in a place with a large wet load, and the condensed water temperature is about 10 to 15℃ lower. The higher the air dew point temperature, the greater the moisture content, the more condensed water is produced, and the condensate needs to be equipped with a drain pipe for organized discharge, which causes waste of condensed water and increases the use of the pipe of the drain pipe. This paper presents a design and experimental application of a split air conditioner based on the wet curtain evaporative cooling technology to recycle refrigeration condensate. Through experiments, calculations and comparisons, the actual energy efficiency after using refrigeration condensate is analyzed. The results show that the split air conditioner that utilizes the cooling condensate by using the wet curtain evaporative cooling can not only increase the cooling capacity. About 4.612% and the energy efficiency ratio is about 9.302%, the condensation temperature is lowered by about 4.685%, and there is no need to install a drain pipe.

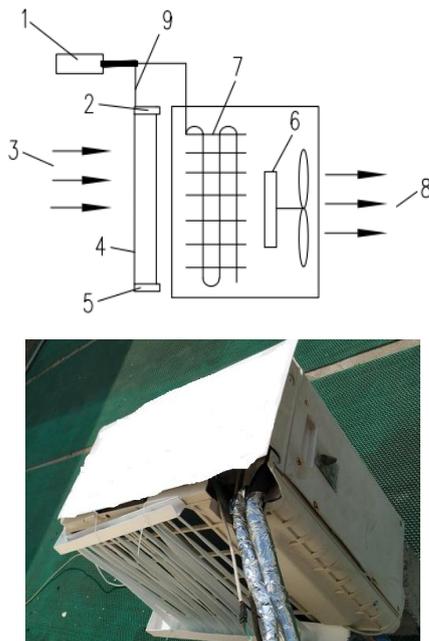
【Keywords】 wet curtain; split type air conditioner; cooling condensate; recycling and utilization

基金项目: 西南科技大学城市学院科学研究(基于冷凝水回收利用的分体式空调研制 2019XJXM32)项目资助
作者(通讯作者)简介: 黄紫旭(1992.08-), 男, 本科, 助教, E-mail: 1315723896@qq.com
收稿日期: 2019-05-30

0 引言

我国的经济迅速发展,能源消耗的缺口日趋增大,截止到2010年,我国已取代美国成为世界上最大的能源消耗国^[1]。暖通空调系统的节能是建筑节能中一个迫切的问题。暖通空调能耗占建筑能耗可达到40%~50%^[2],分体式空调的节能优化设计是空调节能的重要环节。分体式空调制冷时产生的冷凝水通常作为废水直接排向室外,但冷凝水品质较高且温度较低,一般10~15℃,带有很大的冷量,如果直接排向室外会造成制冷时的冷量浪费^[3-5]。在环境与能源问题严重的今天,空调冷凝水也是一项宝贵的资源,因此通过排水管将空调冷凝水直接排放至室外的传统做法需要改进^[6],本文提出了一种基于利用湿帘蒸发冷却回收利用制冷冷凝水的分体式空调。

1 利用湿帘蒸发冷却技术回收制冷冷凝水的分体式空调设计



1.室内机; 2.分水槽; 3.空气; 4.湿帘; 5.蓄水槽; 6.风机;
7.风冷冷凝器; 8.空气; 9.冷凝水回水管

图1 制冷冷凝水回收利用的分体式空调机组设计
原理图与样本图

Fig.1 Design schematic and sample drawing of split air conditioning unit for refrigeration condensate recovery and utilization

分体式空调制冷运行时室内机通常采用大温

差、机器露点送风方式^[7],此时蒸发器表面就会有冷凝水产生,若能把室内机产生的冷凝水送到室外机冷凝器通过与风冷散热结合用于辅助冷凝器散热,则既保留了风冷方式简单的特点,又发挥了冷凝水蒸发吸热来强化冷凝器散热的优势,提高分体式空调的制冷能效比,从而实现节能的目的。

分体式空调在制冷运行时,室内机的蒸发器通过冷却除湿时产生冷凝水,这部分冷凝水通过冷凝水回收管进入到分水槽,分水槽里的制冷冷凝水在重力作用下沿着湿帘缓慢下降,这时湿帘蒸发冷却加湿进入室外机冷凝器的空气,该过程可近似认为是对进入室外机冷凝器的空气等焓加湿过程。在分体式空调制冷运行初期,冷凝水产生量大时,会存在部分未及时蒸发的冷凝水通过湿帘下降到蓄水槽中;在冷凝水产生量小时,蓄水槽中的冷凝水通过毛细力沿湿帘上升继续加湿进入室外机冷凝器的空气。

2 分体式空调制冷冷凝水水量计算

以四川省绵阳市某学校30m²的教师办公室为空调制冷冷凝水水量计算对象,夏季大气压力95060Pa,空调室外计算干球温度32.8℃,室外相对湿度为65%^[8]。教师办公室室内设计温度26℃,相对湿度为55%,人均新风量取30m³/h·人。教师办公室人数为6人,静坐状态下成年男子在室内温度26℃的散湿量为g=68g/h,办公室的群集系数为n₁=0.96^[9]。本实验所用的分体式空调室外风量为1150m³/h,额定输入功率1.18kW,额定输入电流5.6A,制冷剂为R22。空调系统冷凝水量主要包括新风湿负荷和室内人员湿负荷形成的冷凝水,当空调房间人员密度增加或新风量增加,空调系统的冷凝水量则增加^[10]。

(1) 新风湿负荷形成的冷凝水水量计算

该教师办公室新风量为: $G=30 \times 6=180\text{m}^3/\text{h}$,查焓湿图得该教师办公室空调设计参数下室内空气含湿量 $d_N=12.3\text{g}/\text{kg}$,室外空气含湿量 $d_w=21.9\text{g}/\text{kg}$ 。

新风湿负荷形成的冷凝水水量:

$$\Delta m=0.001\rho G(d_w-d_N)=2.074\text{kg}/\text{h} \quad (1)$$

式中, Δm 为冷凝水流量, kg/h; G 为新风量, m³/h; ρ 为新风密度, kg/m³; d_N 为室内含湿量, g/kg; d_w 为室外的含湿量, g/kg。

(2) 人员散湿形成的冷凝水水量计算

人员散湿形成的冷凝水水量计算:

$$\sum d = 0.001n_1 \sum n_2 g = 0.392 \text{ kg/h} \quad (2)$$

式中, $\sum d$ 为冷凝水流量, kg/h; n_1 为群集系数; n_2 为室内人数, 人; g 为成年男子散湿量, g/h。则该教师办公室分体式空调产生的制冷冷凝水水量为: $M = \Delta m + \sum d = 2.403 \text{ kg/h}$

3 利用湿帘蒸发冷却技术回收制冷冷凝水的分体式空调实验测试

3.1 制冷冷凝水冷量回收潜力

分体式空调在湿负荷较大的场所, 每 1kW 冷负荷每小时产生约 0.8kg 的冷凝水, 当冷凝水量温度为 15℃ 时, 在理想情况下可增加室外机冷凝器散热量 0.562kW。

3.2 分体式空调室外机风量测试

本实验室室外机增加了湿帘, 使室外机冷凝器的

风量减少。通过实验测量利用湿帘后分体式空调室外机风量。将室外机上的风机形成的圆断面分成若干个面积相等的同心圆环, 在每个圆环上布置 4 个测点且使 4 个测点位于互相垂直的两条直径。使用叶轮风速仪测量各点的风速, 实验测得各点的风速见表 1 和表 2。

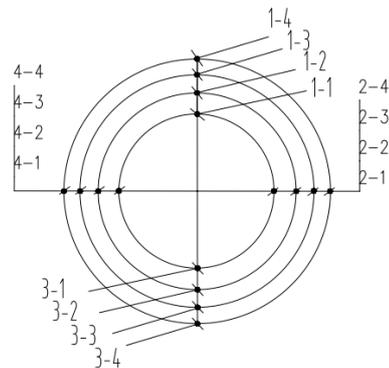


图 2 圆形风机测点布置

Fig.2 Circular fan measuring point arrangement

表 1 利用湿帘测点的风速

Table 1 Wind speed using wet curtain

圆环 1 测点	风速 m/s	圆环 2 测点	风速 m/s	圆环 3 测点	风速 m/s	圆环 4 测点	风速 m/s
1-1	3.671	1-2	5.463	1-3	5.913	1-4	5.194
2-1	4.162	2-2	5.366	2-3	5.534	2-4	5.499
3-1	2.565	3-2	5.504	3-3	6.258	3-4	5.256
4-1	4.008	4-2	5.808	4-3	5.697	4-4	4.329

表 2 未利用湿帘测点的风速

Table 2 Wind speed without measuring the wet curtain

圆环 1 测点	风速 m/s	圆环 2 测点	风速 m/s	圆环 3 测点	风速 m/s	圆环 4 测点	风速 m/s
1-1	4.655	1-2	6.736	1-3	6.590	1-4	5.717
2-1	5.383	2-2	6.292	2-3	6.388	2-4	5.029
3-1	4.634	3-2	5.937	3-3	6.638	3-4	5.510
4-1	3.867	4-2	4.793	4-3	5.206	4-4	4.515

由实验测得的各点风量数据可以算出平均风速, 从而算出风量。

$$\bar{V} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{n} \quad (3)$$

$$L = 3600F\bar{V} \quad (4)$$

式中, v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 为各个圆环上平均风速, m/s; n 为所测圆环的个数; F 为所测圆环的面积,

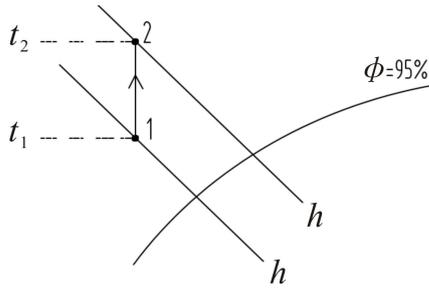
0.058m²。

代入数据得: $L_{未利用} = 1127 \text{ m}^3/\text{h}$, $L_{利用} = 1049.72 \text{ m}^3/\text{h}$, 利用湿帘后室外机风量减少 6.86%。

3.3 分体式空调室外机散热量测试

3.3.1 未利用冷凝水的分体式空调室外机散热量

进入室外机的空气被冷凝器等湿加热, 在焓湿图上为 1-2 过程, 如图 3 所示。



1.未利用冷凝水时冷凝器的进风状态点;
2.未利用冷凝水时冷凝器的出风状态点

图3 未利用冷凝水进入冷凝器的室外空气状态变化焓湿图

Fig.3 Outdoor air state change enthalpy diagram without condensed water entering the condenser

表3 未利用冷凝水冷凝器的进出风口测试数据

Table 3 Test data for inlet and outlet of condensate condenser

运行时间 min	t_1 (°C)	Ψ_1 (%)	h_1 (kJ/kg)	t_2 (°C)	Ψ_2 (%)	h_2 (kJ/kg)
60	32.8	52	77.7	42.2	32	88.6
90	32.6	53	77.8	42.0	33	89.4
120	33.0	51	77.5	42.1	33	89.8

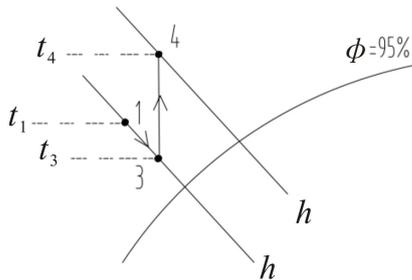
未利用冷凝水的分体式空调室外机散热量

$Q_{s \text{ 未利用}}$:

$$Q_{s \text{ 未利用}} = L_{\text{未利用}} (h_2 - h_1) = 4.428 \text{ kW} \quad (5)$$

式中: h_1 为 1 点焓值, kJ/kg; h_2 为 2 点焓值, kJ/kg; $L_{\text{未利用}}$ 为室外机风量, kg/s。

3.3.2 利用制冷冷凝水的分体式空调室外机散热量
进入室外机的空气可近似看作先经过湿帘等焓加湿, 在焓湿图上为 1-3 过程, 再被冷凝器等湿加热, 在焓湿图上为 3-4 过程, 如图 4 所示。



1.利用冷凝水时室外空气状态点; 3.利用冷凝水时冷凝器进风状态点; 4.利用冷凝水时冷凝器出风状态点

图4 利用冷凝水进入冷凝器的室外空气状态变化焓湿图

Fig.4 Outdoor air state change phlegm map using condensed water into the condenser

表4 利用冷凝水冷凝器的进出风口测试数据

Table 4 Test data using the inlet and outlet of the condensate condenser

运行时间 min	t_1 (°C)	Ψ_1 (%)	h_1 (kJ/kg)	t_3 (°C)	Ψ_3 (%)	h_3 (kJ/kg)	t_4 (°C)	Ψ_4 (%)	h_4 (kJ/kg)
60	32.8	52	77.7	30.7	63	79.0	40.3	39	91.5
90	32.6	53	77.8	30.9	61	78.1	40.1	39	90.8
120	33.0	51	77.5	30.5	66	78.2	39.9	40	91.4

利用制冷冷凝水的分体式空调室外机散热量

$Q_{s \text{ 利用}}$:

$$Q_{s \text{ 利用}} = L_{\text{利用}} (h_4 - h_3) = 4.548 \text{ kW} \quad (6)$$

式中, h_3 为 3 点焓值; h_4 为 4 点焓值; $L_{\text{利用}}$ 为利用制冷冷凝水后室外机风量, kg/s。

3.3.3 分体式空调实际制冷量与压缩机能耗变化

利用湿帘蒸发冷却技术回收利用制冷冷凝水的分体式空调比未利用冷凝水的分体式空调室外机冷凝器的冷凝温度低, 其压缩机能耗也会下降, 冷凝温度每下降 1°C 压缩机能耗下降约 1.97%^[11]。

为了简化计算, 可以认为制冷剂的温度等于冷凝温度。因此, 冷凝器内制冷剂和冷却剂的平均对数传热温差为:

$$\Delta T_m = \frac{t_c - t_s}{\ln \frac{t_k - t_s}{t_k - t_c}} \quad (7)$$

式中, ΔT_m 为制冷剂与冷却剂间的平均对数温差, °C; t_s 为进风温度, °C; t_c 为出风温度, °C; t_k 为冷凝温度, °C。对于空气强制流动的风冷式冷凝器, 冷凝温度与空气进风口温度之差取 10~16°C 左右 (取 13°C)^[12]。

$$\text{冷凝器的散热量: } Q_s = KF\Delta T_m \quad (8)$$

$$\text{冷凝器的散热量: } Q_s = Q_k + P \quad (9)$$

全封闭压缩机的制冷系统的冷凝负荷:

$$Q_k = Q_0(A + Bt_k) \quad (10)$$

式 (8)、(9) 中, K 为传热系数, W/(m²·K); F 为传热面积, m²; ΔT_m 为平均对数温差, K; Q_s 为冷凝器散热量, kW; P 为压缩机的轴功率, kW; Q_k 为全封闭压缩机的制冷系统的冷凝负荷, kW; Q_0 为实际制冷量即蒸发器的得热量, kW; t_k 为冷凝温度, °C; $A=0.86$, $B=0.0042$ ^[12]。

未利用冷凝水的分体式空调实际制冷量 $Q_{0 \text{ 未利用}}$ 及冷凝温度 $t_{k \text{ 未利用}}$: $t_{k \text{ 未利用}} = 45.8^\circ\text{C}$

$$Q_{K未利用} = Q_{s未利用} - P = 4.428 - 1.18 = 3.248 \text{ kW}$$

$$Q_{0未利用} = \frac{Q_{k未利用}}{A + Bt_{k未利用}} = \frac{3.248}{0.86 + 0.0042 \times 45.8} = 3.086 \text{ kW}$$

利用冷凝水的分体式空调实际制冷量 $Q_{0利用}$ 及冷凝温度 $t_{k利用}$: $t_{k利用} = 43.65^\circ\text{C}$

$$Q_{K利用} = Q_{s利用} - P_{利用} = 4.548 - 1.129 = 3.368 \text{ kW}$$

$$Q_{0利用} = \frac{Q_{k利用}}{A + Bt_{k利用}} = \frac{3.368}{0.86 + 0.0042 \times 43.65} = 3.228 \text{ kW}$$

则制冷量增加了:

$$\Delta Q_0 = Q_{0利用} - Q_{0未利用} = 3.228 - 3.086 = 0.142 \text{ kW}$$

3.4 利用制冷冷凝水的分体式空调实验结果分析
经实验测定与计算,利用制冷冷凝水的分体式空调与未利用制冷冷凝水的分体式空调对比,室外机风量下降 6.86%;冷凝温度下降约 2.15°C;散热量增加 0.138 kW;制冷量增加 0.142 kW。

空调能效比:

$$EER = \frac{Q_0}{P} \quad (11)$$

式中, Q_0 为空调实际制冷量, kW; P 为输入功率, kW。

未利用冷凝水时:

$$EER_{未利用} = \frac{Q_{0未利用}}{P_{未利用}} = \frac{3.068}{1.18} = 2.615$$

利用冷凝水时:

$$EER_{利用} = \frac{Q_{0利用}}{P_{利用}} = \frac{3.228}{1.129} = 2.858$$

能效比增加了: $\Delta EER = 9.302\%$

4 结论

本文通过对分体式空调冷凝水量的计算和实验测试,结合绵阳市夏季空调运行的室内外条件,对未利用冷凝水和利用冷凝水节能性进行对比,得出以下结论:

(1) 湿帘上的冷凝水和冷凝器周围的空气进行热质交换,降低了进入冷凝器空气的温度,从而

增大冷凝器的换热能力。

(2) 湿帘上的冷凝水温度相对于周围的空气较低,使制冷剂和冷却剂的平均对数传热温差降低,降低了冷凝温度约 3°C;增加了空调制冷量约 0.142 kW;提高空调能效比约 0.243,即提高约 9.302%,节能效果显著。

(3) 冷凝水回收利用的设备结构简单、安装方便、价格低廉等优点,由于湿帘的使用,该设备有使用寿命短等缺点。

参考文献:

- [1] M Asif, T Muneer, R Kelley. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland[J]. Building and Environment, 2005,42(3):1391-1394.
- [2] 安瑞楠.绿色公共建筑项目中暖通空调节能设计浅析[J].制冷与空调,2014,28(6):668-671.
- [3] 梁仁建,李林.空调冷凝水净化直饮水装置的研制[J].低温与超导,2009,37(2):65-67,74.
- [4] 魏燕,胡永海.空调冷凝水作为饮用水的回收利用[J].节能,2008,(3):41-43,3.
- [5] 朱娟娟.空调冷凝水回收利用潜力及处理技术研究[D].北京:北京建筑大学,2018.
- [6] 周蔚.空调冷凝水回收利用技术及实践分析[J].实验室科学,2011,14(5):66-68.
- [7] 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(05):53-56,68.
- [8] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:1998-1999.
- [9] 徐勇.通风与空调工程[M].北京:机械工业出版社,2016:71-72.
- [10] 高峰,周国民,王运平.空调季冷凝水回收量的动态计算方法[J].建筑节能,2017,45(6):7-9.
- [11] 丁勇,史丽莎.分体式空调冷凝水回用节能潜力分析[J].建筑节能,2016,44(11):97-101.
- [12] 石文星,田长青.空气调节用制冷技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2016:103-104.