

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-177-05

立管间接蒸发冷却器与机械制冷 复合空气处理机组干湿工况运行模式能耗分析

高 帅¹ 孙铁柱¹ 周 理² 严锦程^{1,2}

(1. 西安工程大学 西安 710048; 2. 新疆华奕新能源科技有限公司 西安 710048)

【摘 要】 在达到同样送风要求的前提下, 为了研究立管间接蒸发冷却与机械制冷复合机组在数据中心运行时干湿两种模式的运行能耗, 搭建了实验台, 在室外干球温度为 3-7℃ 范围内, 对其不同干湿模式的运行能耗进行了测试并分析。实验结果表明, 在达到同样送风要求的前提下, 且干湿模式产生的制冷量相同的情况下, 湿模式的能效比明显大于干模式的能效比, 建议加大湿模式的运行时长。

【关键词】 立管间接蒸发冷却; 能耗分析; 干湿运行模式; 能效比

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Analysis of Energy Consumption in Dry and Wet Operating Mode of Vertical Tube Indirect Evaporative Cooler and Mechanical Refrigeration Complex Air Treatment Unit Gao Shuai¹ Sun Tiezhu¹ Zhou Li² Yan Jincheng^{1,2}

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048; 2. Xinjiang Huayi New Energy Technology Co., Ltd, Xi'an, 710048)

【Abstract】 Under the premise of meeting the same air supply requirements, in order to study the operation energy consumption of the riser indirect evaporative cooling and mechanical refrigeration combined unit in the data center operation in both dry and wet modes, an experimental platform was built. The operation energy consumption of different dry and wet modes was tested and analyzed in the outdoor dry bulb temperature range of 3-7℃. The experimental results show that, Under the premise of the same air supply requirements, and the cooling capacity generated by the dry and wet modes is the same, the energy efficiency ratio of the wet mode is obviously greater than that of the dry mode. It is recommended to increase the running time of the wet mode.

【Keywords】 Vertical pipe indirect evaporative cooling; Energy consumption analysis; Wet and dry operation mode; Energy efficiency ratio

0 引言

随着数据中心市场规模逐渐增大, 爆发期也即将来临, 在“新基建”大热及 5G 部署扩展应用场景, 进一步挖掘流量需求的情况下, 促使数据中心的发展进一步提速^[1]。数据中心作为耗能大户, 其总用电量已占到全社会用电量的 2%, 其中空调系统占据了数据中心近 40% 的能耗^[2]。

间接蒸发冷却技术是实现数据中心节能的技

术路径之一^[3], 现如今间接蒸发冷却与机械制冷复合空气处理机组在数据中心已经得到了大量的应用^[4], 很多学者也对其进行了大量研究。武苗苗等人针对该种机组, 分析了室外干、湿球温度对机组总功率以及能效的影响规律, 得出干、湿球温度对于不同运行模式下机组 COP 的影响程度并不相同, 无论哪种模式下, 室外干、湿球温度的上升均会导致空调机组 COP 的下降^[5]; 黄翔与薛运等以

作者简介: 高 帅 (2000-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 2736545897@qq.com

通讯作者: 孙铁柱 (1986-), 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: suntiezhu@xpu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-23

我国不同气象分区的 3 个城市为研究对象,分析了气象条件对该空调系统的运行模式、各模式运行时间、空气处理过程、二次空气的选择以及机械制冷冷凝温度等方面的影响^[6];黄翔与白延斌等人通过实验得出了间接蒸发冷却与机械制冷复合机组在不同厚度填料下宜选用的空气流速、淋水密度及阻力范围^[7];贾晨昱对间接蒸发冷却与机械制冷复合机组在不同地区的三种运行模式的时间分配问题进行研究,进而使机组运行更节能^[8]。某品牌机组甚至明确规定了机组的干湿模式的室外参数。以上研究都没有针对间接蒸发冷却与机械制冷复合空气处理机组,在达到同样送风要求时,干湿模式的运行能耗进行研究。但其运行模式上存在一定的优化空间。在切换季,机组运行干模式和湿模式都能达到送风要求时,分析干湿模式的能耗情况使机组更节能是一个值得研究的课题。

本文对立管式间接蒸发冷却与机械制冷复合空气处理机组干湿模式的运行能耗展开研究,搭建实验台,模拟数据中心回风送入机组处理,以分析在相同工况下干湿运行模式的能效比,进而研究能否通过加大湿模式的运行时长使机组更节能。

1 AHU 机组性能评价指标

评价 AHU 机组制冷能力的指标有全热制冷量以及制冷能效比^[9],其中制冷能效比 EER 表示空调系统单位功率下的制冷量,能效比数值大小反映出不同空调系统的节能情况,能效比数值越大,表明该空调系统的能源转换效率越高,则在单位时间内,该空调系统的耗能也就相对越少^[10]。全热制冷量与制冷能效比计算公式如下:

由式 (1)、(2)、(3) 计算得出全热制冷量。

$$Q_S = C_p \times \gamma \times L \times (T_1 - T_2) \quad (1)$$

$$Q_L = 600 \times \gamma \times L \times (W_1 - W_2) \quad (2)$$

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (3)$$

再由式 (4) 计算得出能效比。

$$EER = \frac{Q_T}{P} \quad (4)$$

式中: Q_T 为全热制冷量, kW; Q_S 为显热制冷量, kW; Q_L 为潜热制冷量, kW; C_p 为空气比热, J/(kg·°C); γ 为空气比重, kg/m³; T_1 为回风温度, °C; T_2 为送风温度, °C; W_1 为回风相对湿度; W_2 为送

风相对湿度; P 为机组的输入功率, kW。

2 机组的运行原理与模式

2.1 机组运行原理

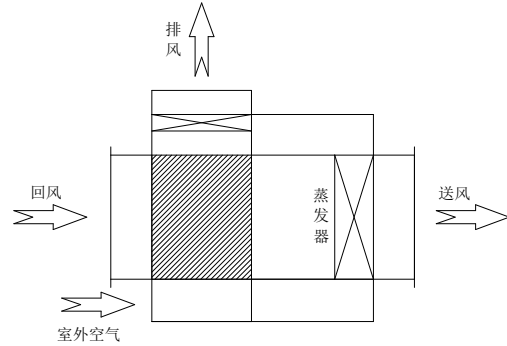


图 1 间接蒸发冷却+机械制冷原理图

Fig.1 Schematic diagram of indirect evaporative cooling and mechanical refrigeration

图 1 为间接蒸发冷却与机械制冷原理图,它是工作空气与循环水在湿通道侧直接接触等焓降温,一次侧的使用空气流经换热芯体的干通道时仅被冷却而不被加湿,两种工作介质通过换热芯体进行换热,从而达到对一次侧使用空气进行等湿降温的效果^[11]。该技术应用于数据中心时,工作空气多为室外低温新风,使用空气多为机房内的热回风,以两者的显热温差为驱动力,通过换热器管壁的热传导将服务器的热量传递给室外侧空气,不足部分通过设置辅助机械制冷满足送风温度要求,从而达到冷却数据中心回风的目的^[8]。

2.2 运行模式

立管式间接蒸发器与机械制冷复合空气处理机组根据室外气象参数的变化可以分为 3 种运行模式,分别为:干模式、湿模式、混合模式。

干模式即只利用立管式间接蒸发冷却器使机房的回风与室外新风在换热体内进行空-空换热,室外空气换热后经二次风机排出,机组回风换热后由一次风机送入数据机房;湿模式即对立管式间接蒸发冷却器换热芯体的湿通道进行淋水,室外新风进入芯体后在湿通道内表面进行直接蒸发冷却等焓降温后与机房回风进行间接换热,最后从二次排风口排出;混合模式则需要喷淋蒸发系统和机械制冷系统同时运行,共同来达到需要的制冷量。即对立管式间接蒸发冷却器换热芯体的湿通道进行淋水,室外新风在换热芯体的湿通道内表面进行直接蒸发冷却等焓降温后与机房回风间接换热,换热后

的回风再通过机械制冷进一步降温, 再由一次送风机送入数据机房。

2.3 运行模式判别依据

对于上述 3 种运行模式切换取决于室外空气的干球温度和湿球温度, 而室外干湿球温度判定的界限又取决于数据中心机房送、回风温度与间接蒸发冷却换热芯体的换热效率。

干模式换热效率为:

$$\eta = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t'_{g1}} \quad (6)$$

式 (6) 中: η 为间接蒸发冷却芯体的换热效率; t_{g1} 为数据中心回风干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t'_{g1} 为室外空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{g2} 为数据中心送风干球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

假设干模式下间接蒸发冷却芯体换热效率为 60%, $t_{g1}=36^{\circ}\text{C}$, $t_{g2}=24^{\circ}\text{C}$, 求得 $t'_{g1}=16^{\circ}\text{C}$ 。

湿模式换热效率为:

$$\eta = \frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{g1} - t_{s1}} \quad (7)$$

式 (7) 中: η 为间接蒸发冷却芯体的换热效率; t_{g1} 为数据中心回风干球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{s1} 为室外空气湿球温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{g2} 为数据中心送风干球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

假设湿模式下间接蒸发冷却芯体换热效率为 70%, $t_{g1}=36^{\circ}\text{C}$, $t_{g2}=24^{\circ}\text{C}$, 求得 $t_{s1}=19^{\circ}\text{C}$ 。

综合以上分析, 得出间接蒸发冷却空调不同模式的切换, 取决于间接蒸发冷却换热芯体的换热效率 (影响因素: 换热器材质、结构形式、风速、换热温差、换热面积等)、数据机房室内侧回风温度、室内侧送风温度的影响, 在设计切换模式的条件时应当充分考虑上述因素。

3 测试与结果分析

3.1 实验系统及方法

实验的装置主要有系统中的换热芯体、循环风机、蒸发器、冷凝器、压缩机以及水泵等。其中数据采集装置如表 1 所示, 图 2 所示为实验场景图。

表 1 数据采集装置表

Table 1 Data Acquisition Device Table

测试参数	仪器型号	精度
温湿度	HL-NT3 温湿度自记仪	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.8\%\text{RH}$
风速	Testo480 风速仪	$\pm 3\%$
功率	PMT-05P	$\pm 4\%$



图 2 实验场景图

Fig.2 Experimental scene diagram

(1) 一、二次空气温湿度

二次空气为室外新风, 一次空气为室内回风。在一次进风口、一次出风口和室外新风入口处各布置一个温湿度自记仪, 如图 3 中 a、b、c 三点。

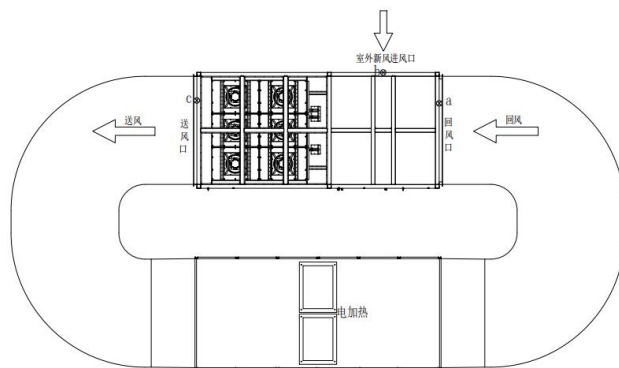


图 3 温湿度测点布置图

Fig.3 Temperature and humidity measurement point layout

(2) 一、二次风量

用 Testo-480 风速仪在回风口处测量一次进风风速, 一共测 36 个点, 逐一测量风速, 取平均值根据风口截面积计算出一次风量, 如图 4 所示为十八宫格法风速测点布置示意图。

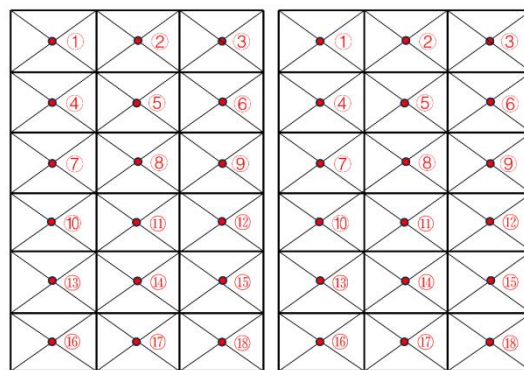


图 4 风速测点布置图

Fig.4 Wind speed measurement point layout

3.2 测试结果分析

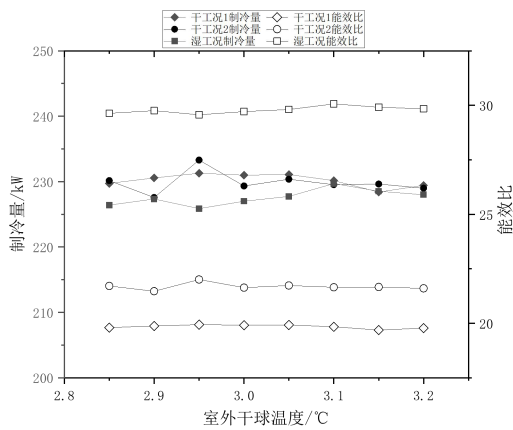


图 5 机组一次风 70%的干湿工况能效对比图

Fig.5 Comparison chart of energy efficiency under dry and wet conditions with 70% primary air of the unit

图 5 为在室外干球温度为 2.85°C-3.2°C 的情况下，机组一次风量为 50181.2m³/h 时分别运行干模式和湿模式的能效比的对比图。在干湿模式的制冷量均在 225kW-230kW 的情况下，干湿模式的送风温度均控制在 25°C 左右，回风温度均控制在 38°C 左右。从图 5 可以看出，干模式 1 的能效比约为 20，干工况 2 的能效比约为 22，而湿模式的能效比约为 30。在达到同样要求的情况下，湿模式比干模式能效比提高了约 43%。

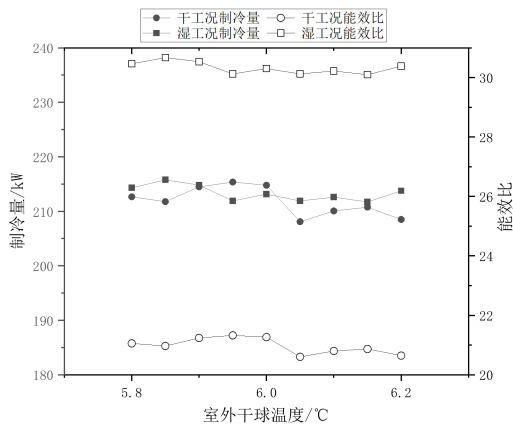


图 6 机组一次风 68%的干湿工况能效对比图

Fig.6 Comparison chart of energy efficiency under dry and wet conditions with 68% primary air of the unit

图 6 为在室外干球温度为 5.8-6.2°C 的情况下，机组一次风量为 47044.8m³/h 时的干模式与湿模式的制冷量与能效比。在干湿模式的制冷量均在 210-215kW 的情况下，干湿模式的送风温度均控

制在 25°C 左右，回风温度均控制在 38°C 左右。湿模式下机组的能效比约为 31，而在干模式下机组的能效比约为 21，在达到同样要求的情况下，湿模式比干模式能效比提高了约 48%。

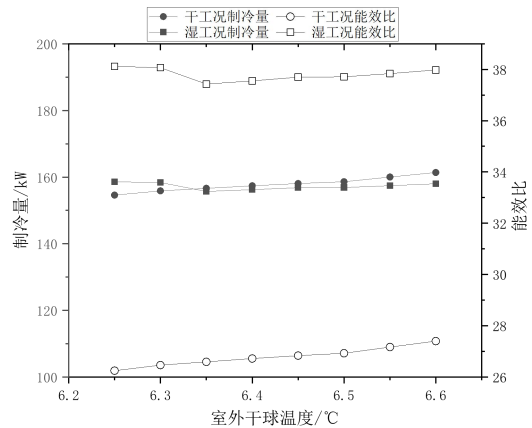


图 7 机组一次风 55%的干湿工况能效对比图

Fig.7 Comparison chart of energy efficiency under dry and wet conditions with 55% primary air of the unit

图 7 为在室外干球温度为 6.25-6.6°C 的情况下，机组一次风量为 36590.4m³/h 的干模式与湿模式的制冷量与能效比。在干湿模式的制冷量均在 155-160kW 的情况下，干湿模式的送风温度均控制在 25°C 左右，回风温度均控制在 38°C 左右。在湿模式下机组的能效比约为 38，而在干模式下机组的能效比约为 27。在达到同样要求的情况下，湿模式比干模式能效比提高了约 41%。

干模式下，整个空调系统的换热过程只有换热芯体处的显热交换，只通过风机的工作使机房回风与室外新风在换热体内进行空-空换热。而在湿模式下，在湿膜段工作中，整个空调系统发生的换热过程不仅有换热芯体处的显热交换，还有湿膜段的潜热交换。湿膜段的潜热交换的制冷能力远大于换热芯体处的显热交换的制冷能力。因此通过干湿运行模式的测试结果，可以得出间接蒸发冷却空调机组水泵运行的功率都很小，其主要差别在于风机的能耗。

4 结论

对 AHU 机组的性能指标进行评价，介绍间接蒸发冷却机组的不同运行模式及模式切换点，继而对机组的干、湿运行工况进行测试，并对测试结果

进行分析,得到结论如下:

(1) 当室外干球温度在 3-7℃左右时,机组的干工况与湿工况在达到同样送风要求的前提下,且干湿模式产生的制冷量相同的情况下,运行湿工况的能效比相较于运行干工况的能效比明显提高,机组运行湿工况更节能。如当室外干球温度在 3℃左右时,运行湿工况的能效比相较于运行干工况的能效比提高了 8-10 左右;当室外干球温度在 5℃左右时,运行湿工况的能效比相较于运行干工况的能效比提高了 10 左右;当室外干球温度在 6-7℃时,运行湿工况的能效比相较于运行干工况的能效比提高了 11 左右。

(2) 在达到同样送风要求的前提下,且干湿模式产生的制冷量相同的情况下,湿模式的能效比明显大于干模式的能效比,建议加大湿模式的运行时长。

参考文献:

- [1] 严政,吴学渊,黄翔,等.间接蒸发冷却空调机组在数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2022,22(11):75-81.
- [2] 徐善梅.绿色数据中心节能技术探讨[J].建设科技,2019,(12):33-36,66.
- [3] 李婷婷,黄翔,折建利,等.东北某数据中心机房空调系统节能改造分析[J].西安工程大学学报,2017,31(3):364-368.
- [4] 刘振宇.蒸发冷却(凝)空调机组的理论与应用研究[D].西安:西安工程大学,2020.
- [5] 武苗苗,黄翔,史东旭,等.不同运行模式下间接蒸发冷却空调的能耗分析[J].西安工程大学学报,2022,36(4):84-91.
- [6] 薛运,黄翔,刘凯磊.气象条件对某新型蒸发冷却空调的影响[J].西安工程大学学报,2016,30(2):177-182,193.
- [7] 黄翔,白延斌,邱佳,等.蒸发冷却空气处理机组关键性能参数探讨[C].绿色设计创新实践—第5届全国建筑环境与设备技术交流大会,2013:107-110.
- [8] 贾晨昱.蒸发冷却+机械制冷组合式空调机组设计与应用研究[D].西安:西安工程大学,2020.
- [9] 胡凯,郭春梅,李勇刚,等.不同运行工况下间接蒸发冷却器换热性能试验研究[J].流体机械,2021,49(8):21-27,70.
- [10] 黄翔,夏青,孙铁柱.蒸发冷却空调技术分类及术语探讨[J].暖通空调,2012,42(9):52-57.
- [11] 陈聪,葛林.数据中心间接蒸发冷却技术应用与思考[J].暖通空调,2023,(4):32-37.