

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-818-08

# 数据中心机房用直接蒸发型干式冷却器研究分析

陈彩凤<sup>1</sup> 吕雯<sup>1</sup> 金莹莹<sup>2</sup> 高壮飞<sup>1</sup> 陈斌<sup>1</sup>

(1. 绍兴市能源检测院 绍兴 312071;

2. 绍兴市质量技术监督检测院 绍兴 312366)

**【摘要】** 为降低数据中心能耗指标 PUE, 直接蒸发型干式冷却器配合风冷变频螺杆冷水机组和泵组箱, 全年 8760 小时联合运行, 能有效提高全年运行能效, 降低数据中心的 PUE。通过设计和测试分析直接蒸发型干式冷却器机组的性能, 得出: 直接蒸发型干式冷却器的换热性能高于常规干式冷却器的换热性能, 微通道干式冷却器不但在成本上有优势, 而且在换热性能上效果更好, 但其长期运行的全生命周期需要进一步验证。提高干式冷却的供水温度和回水温度, 有利于提高干式冷却器的换热量, 提高机组的能效, 降低数据中心机房整体的 PUE。直接蒸发型干式冷却器能够预冷干式冷却器的进风温度, 从而降低换热器进风面的进风温度, 延长干式冷却器的使用时长, 减小机械压缩制冷对的使用时长, 降低数据中心全年制冷系统的能耗。大风机直径, 低转速的 EC 轴流风机, 在满足风量的需求的前提下, 能够宽频调节干式冷却的换热量, 提高机组的能效, 降低整机能耗。

**【关键词】** 数据中心机房; 直接蒸发型干式冷却器; 湿膜加湿; PUE

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Analysis of the Direct Evaporative Dry Cooling Unit Used in Data Center Machine Room

Chen Caifeng<sup>1</sup> Lv Wen<sup>1</sup> Jin Yingying<sup>2</sup> Gao Zhuangfei<sup>1</sup> Chen Bin<sup>1</sup>

(1. Shaoxing Institute of Energy Testing, shaoxing, 312071;

2. Shaoxing Testing Institute of Quality and Technical Supervision, Shaoxing, 312366)

**【Abstract】** In order to reduce the energy consumption index PUE of the data center, the direct evaporative dry cooler, combined with the air-cooled frequency conversion screw chiller and the pump box, runs for 8760 hours a year, which can effectively improve the annual energy efficiency and reduce the PUE of the data center. Through the design, testing and analysis of the performance of the direct evaporation dry cooler unit, it is concluded that the heat transfer performance of the direct evaporation dry cooler is higher than that of the conventional dry cooler. The micro-channel dry cooler not only has advantages in cost, but also has better effect in heat transfer performance. However, its full life cycle of long-term operation needs further verification. Increasing the temperature of water supply and return water for dry cooling helps to increase the heat transfer of the dry cooler, improve the energy efficiency of the unit, and reduce the overall PUE of the data center room. The direct evaporation dry cooler can precool the air inlet temperature of the dry cooler, so as to reduce the air inlet temperature of the heat exchanger, prolong the use time of the dry cooler, reduce the use time of the mechanical compression refrigeration pair, and reduce the annual energy consumption of the data center refrigeration system. The EC axial flow fan with large fan diameter and low speed can broadly adjust the heat transfer of dry cooling on the premise of meeting the air volume requirements, improving the energy efficiency of the unit and reducing the energy consumption of the whole unit.

【Keywords】 Data center computer room; Direct evaporative dry cooler; Wet film humidification; PUE

### 0 引言

降低数据中心能耗指标 PUE 是新旧机房建设和改造的重要目标, 为实现这目标, 研究和开发直接蒸发型干式冷却器机组, 配合风冷变频螺杆冷水机组和水泵集成泵组使用。如图 1 所示, 大型数据中心主流中央冷源的运行模式以风冷变频螺杆冷水机组为主要冷源, 干式冷却器为辅助冷源, 而直接蒸发型干式冷却器机组的开发, 改变这一运行模式, 以干式冷却器为主要冷源, 风冷变频螺杆冷水机组为辅助冷源, 增加干式冷却器的全年运行时长, 减小机械压缩制冷系统的运行时长, 从而实现低能耗, 高效率, 易安装, 便维护。

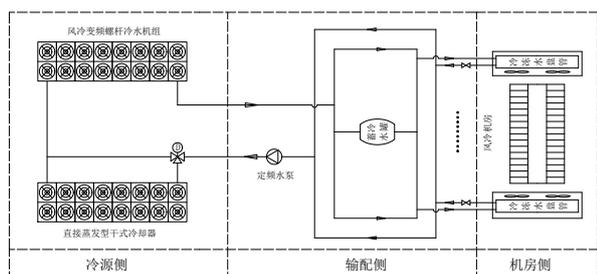
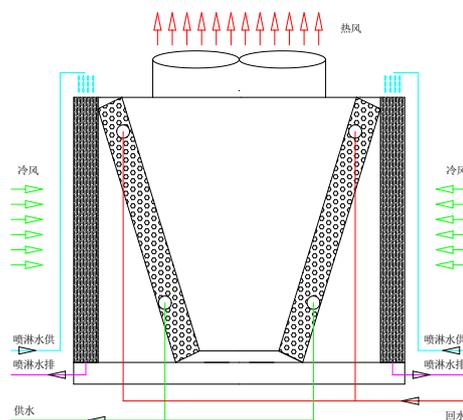


图 1 直接蒸发型干式冷却器应用的系统原理图

Fig.1 System schematic diagram of direct evaporation dry cooler application

直接蒸发型干式冷却器机组风机采用 EC 风机, 具有效率高, 可靠性能高等特点, 利用无极调速功能, 能根据系统负荷变化, 无极调节电机转速, 既实现降低能耗, 又保证充足的风量。换热器采用  $\Phi 12.7$  的光管或微通道换热器, 降低机组水侧流动阻力, 增大换热效果。湿膜组件包边框架不锈钢, 增强耐腐蚀性和防锈性, 芯材采用树脂浸泡的复合无机纤维材质, 具有较强的吸水性, 耐腐蚀性和阻燃防火性。如图 2 所示, 是直接蒸发型干式冷却器的原理图和实物图。从原理图上可以看出水系统喷淋到湿膜上, 对湿膜进行充分的浸湿, 风机开启后, 冷风先通过湿膜进行等焓加湿冷却, 然后再经过换热器盘管或微通道换热器, 将换热器内的工质冷却。冷风经过湿膜加湿后能够将空气状态点改变, 将空气的干球温度尽可能的趋向于湿球温度, 有效降低换热器表面的进风温度。在去掉湿膜和喷淋系统或不开喷淋系统的情况下, 机组就和常规的干式冷却器一样, 直接进风的干球温度通过换热器进行

热交换。



(a) 直接蒸发型干式冷却器原理图



(b) 直接蒸发型干式冷却器实物图

图 2 直接蒸发型干式冷却器原理图和实物图

Fig.2 Schematic diagram and diagram of direct evaporation dry cooler

查阅相关资料和报告, 以提高供回水温度和增大进出水温差, 作为提高能效, 降低能耗的研究重点和突破点, 确定供水温度为  $19^{\circ}\text{C}$ , 回水温度  $35^{\circ}\text{C}$ , 水温差为  $16^{\circ}\text{C}$ , 同时增加湿膜喷淋直接蒸发冷却结构, 可实现在环境温度  $T < 14^{\circ}\text{C}$  条件下完全开启, 为数据中心提供冷源。在环境温度  $14^{\circ}\text{C} \leq T \leq 35^{\circ}\text{C}$  范围内, 与风冷变频螺杆冷水机组串联使用, 通过调节风冷变频螺杆冷水机组的压机频率, 来保证低能耗和足冷量, 但该运行控制部分较为复杂, 本文对群控功能不深入研究。当换热器表面进风干球温度  $T \geq 14^{\circ}\text{C}$ , 湿膜表面进风干球温度  $T \geq 16^{\circ}\text{C}$  时, 自然冷却型干式冷却器完全关闭, 风冷变频螺杆冷水机组承担数据中心机房全部负载。

### 1 直接蒸发型干式冷却器数学模型

干式冷却器制冷量  $Q$  为 130kW，制冷工质为水，供水温度  $t_{l,out}$  为 19℃，回水温度  $t_{l,in}$  为 35℃，干式冷却器进风干球温度  $t_{air,in}$  为 14℃，干式冷却器进出风干球温差  $\Delta t_{air}$  为 8℃，干式冷却器出风干球温度  $t_{air,out}$ ，℃， $\rho_{air}$  是空气密度，kg/m<sup>3</sup>， $c_{p,air}$  是空气热容，kJ/(kg·K)，干式冷却器的换热系数  $K_c$ ，W/(m<sup>2</sup>·K)。

干式冷却器的风机风量：

$$G = Q / (\rho_{air} \times c_{p,air} \times \Delta t_{air}) \quad (1)$$

干式冷却器的对数平均温度差：

$$\theta = \frac{(t_{l,out} - t_{air,out}) - (t_{l,in} - t_{air,in})}{\ln \left[ \frac{(t_{l,out} - t_{air,out})}{(t_{l,in} - t_{air,in})} \right]} \quad (2)$$

干式冷却器的换热面积：

$$A = Q / (\theta \times K_c) \quad (3)$$

干式冷却器测试换热量：

$$Q_{testing} = W \times \rho_{water} \times c_{p,water} \times (t_{water,in} - t_{water,out}) \quad (4)$$

其中， $W$  是系统水流量，m<sup>3</sup>/h； $\rho_{water}$  是水密度，kg/m<sup>3</sup>； $c_{p,water}$  是水的热容，kJ/(kg·K)； $t_{water,in}$  是干式冷却器的实测回水温度，℃； $t_{water,out}$  是干式冷却器的实测供水温度，℃。

#### 1.1 干式冷却器设计计算

考虑到干式冷却器在低环境温度下，制冷工质水在高流速下会产生较大的压力损失，所以采用 12.7mm 的光管，翅片片距在通常情况下采用 2.0mm，如遇到环境质量差的地区，翅片片距为 2.5mm，以克服因翅片尘堵而造成风侧压降增大。铜管铝翅片换热器和微通道换热器的设计参数如下。

表 1 铜管铝翅片换热器结构设计参数

Table 1 Structural design parameters of copper tube aluminum fin heat exchanger

类别	负荷系数	铜管规格 /mm	片厚 $\delta_f$ /mm	片距 $S_f$ /mm	管间距 $S_1$ /mm	排间距 $S_2$ /mm	每米管长总外表 面积 $\delta_{of}$ /m <sup>2</sup> /m
铜管铝翅片换热器	1.0	Φ12.7×0.34	0.12	2.0	31.75	27.5	0.7798

表 2 微通道换热器结构设计参数

Table 2 Structural design parameters of micro-channel heat exchanger

类别	负荷系数	芯体长度 $L$ /mm	芯体高度 $H$ /mm	扁管厚度 $W$ /mm	翅片偏距 $f$ /mm	翅片高度 $h$ /mm	集流管外径 $D$ /mm
微通道换热器	1.0	1722	1100	36*2+10	2.2	8.0	50

#### 1.2 干式冷却器测试平台

机组测试所用焓差实验室控制两个区域。室外侧环境温度控制区，可实现环境温度湿度的稳定控制，保证干式冷却器的进风温湿度度的恒定，可实现环境温度在-30℃~54℃的宽频控制；恒温水箱控制区，可实现进水温度和水流量的控制，保证测试工况的稳定，水温可显现 5℃~45℃的稳定控制。



(a) 工况控制面板



(b) 管路连接搭建

图 3 干式冷却器试验测试环境

Fig.3 Dry cooler test environment

图 3 显示，干式冷却器测试的环境。图 3 (a) 为焓差实验室的工况控制面板，通过提前对测试工况的预设，可以稳定室外侧的进风温度和恒温水箱的温度；图 3 (b) 为水侧管道的连接情况，管路上连接流量开关和压力传感器，可对系统流量和压

力进行监控和调节。

## 2 实验数据分析

铜管铝翅片换热器是常用的换热设备, 具有换热性能好, 性能稳定可靠等优势, 已被行业各大厂商所接受。但随着节能减排, 降本降耗的逐渐推广, 为寻求性能更好的换热器, 根据设计的要求, 采用微通道换热器等效替换铜管铝翅片换热器, 并对实验数据作以横向比较。

### 2.1 供水温度对整机性能的影响

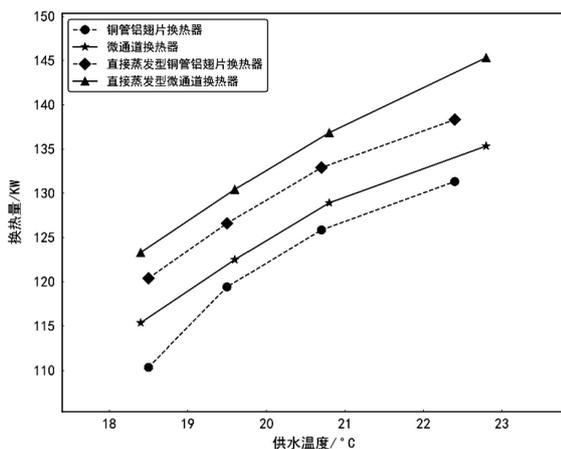


图 4 不同换热器情况下, 干式冷却器供水温度对换热量的影响

Fig.4 Influence of water supply temperature on heat transfer of dry cooler under different heat exchangers

图 4 显示, 干式冷却器供水温度对换热量的影响。从图中可以看出, 在不同的供水温度下, 直接蒸发型干式冷却器的换热量比常规的干式冷却器的换热量高, 且在同等测试工况下, 微通道换热器的换热量比铜管铝翅片换热器的换热量要好; 这是因为, 换热器的进风通过湿膜加湿, 实现了等焓加湿的过程, 干球温度向湿球温度接近, 从而换热器的进风温度降低, 换热器的换热性能增大。同时随供水温度的提高, 干式冷却器的换热量也相应提高; 这是因为, 随供水温度的提高, 换热器水侧和风侧的对数平均温差增大, 换热器的换热性能增加。因而得出: 随供水温度的升高, 干式冷却器的换热量也相应增加, 进而说明提高干式冷却器的供水温度能够提高机组的换热效率; 同时, 在同等类型的换热器前提下, 直接蒸发式的干式冷却器换热量更大。

量更大。

### 2.2 回水温度对整机性能的影响

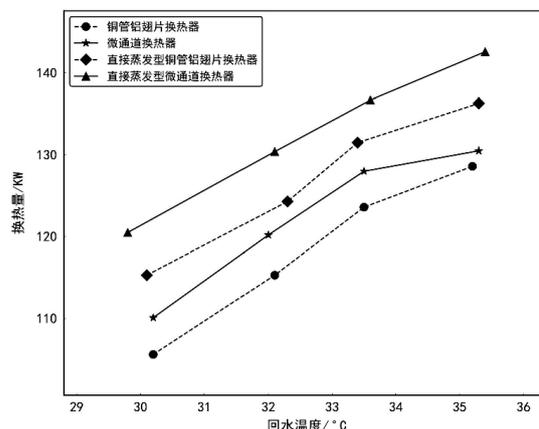


图 5 不同换热器情况下, 干式冷却器回水温度对换热量的影响

Fig.5 Influence of return water temperature on heat transfer of dry cooler under different heat exchangers

图 5 显示, 干式冷却器回水温度对换热量的影响。从图中可以看出, 随回水温度的升高, 干式冷却器的换热量也升高; 这是因为, 随回水温度的升高, 换热器水侧和风侧的对数平均温差增大, 换热器的换热性能增加。因此得出: 随回水温度的升高, 干式冷却器的换热量也升高, 进而说明提高回水温度能够提高机组的换热效率, 降低能耗。

### 2.3 进风温度对整机性能的影响

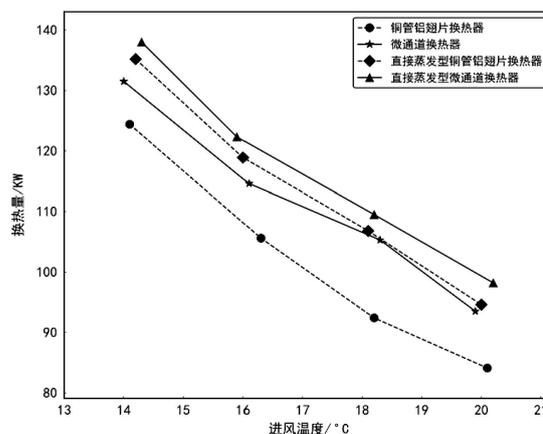


图 6 不同换热器情况下, 干式冷却器进风温度对换热量的影响

Fig.6 Influence of inlet air temperature on heat transfer of dry cooler under different heat exchangers

图 6 显示, 干式冷却器进风温度对换热量的影响。从图中看出, 随干式冷却器进风温度的升高,

干式冷却器的换热量降低；这是因为，随回水温度的升高，换热器水侧和风侧的对数平均温差减小，换热器的换热性能减弱。因此得出：随干式冷却器进风温度的升高，干式冷却器的换热量降低。从而说明，直接蒸发型干式冷却器能够预冷干式冷却器的进风温度，提高机组的全年运行时长，减小机械压缩制冷系统的开启时长，进一步降低数据中心制冷系统的能耗。

### 2.5 风机控制电压对整机性能的影响

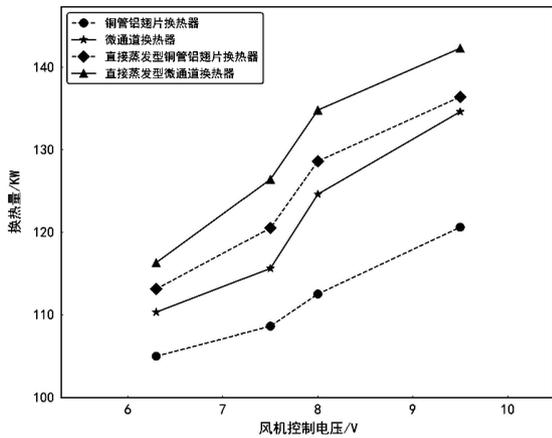


图 7 不同换热器情况下，干式冷却器风机控制电压对换热量的影响

Fig.7 Influence of control voltage on heat transfer of dry cooler under different heat exchangers

图 7 显示，干式冷却器风机控制电压对换热量的影响。干式冷却器选配风机为 EC 轴流风机，0-10V 控制风机的风量，从图中可以看出，随风机控制电压的升高，干式冷却器的换热量也升高；这是因为，随风机控制电压的升高，风机的电机转速增大，风量增大，进出风温差减小，进出水温差增大，换热器水侧和风侧的对数平均温差增大，换热器的换热性能增加。因此可以得出：随风机控制电压的升高，干式冷却器的换热量也升高，从而说明，为降低机组的能耗，提高机组的效率，可以选用大风机直径，低转速的风机，低电压控制风机转速来满足换热量的需求，同时也可以宽频调节制冷量，提高满足制冷量需求的极限环境温度，增加全年的运行时长，降低整个数据中心制冷系统的能耗，降低 PUE。

### 2.6 铜管铝翅片换热器与微通道换热器经济型分析

图 8 显示，铜管铝翅片换热器与微通道换热器成本的对比。以同样工况下设计和选用不同类型的

换热器，发现微通道换热器的成本更有优势，铜管铝翅片换热器的成本价格是微通道换热器成本价格的 1.8 倍，毕竟从原材料的成本角度来看，铜价约是铝价的 3.5 倍。但是微通道换热器的全生命周期还存在风险，需要进一步验证，因为液态工质乙二醇水溶液在长期使用后呈现弱酸性，会与铝发生反应，从而腐蚀换热器，所以通常的做法是在乙二醇水溶液中添加缓蚀剂来减缓长期使用的腐蚀问题，但随技术的不断进步，该问题终将会被解决。

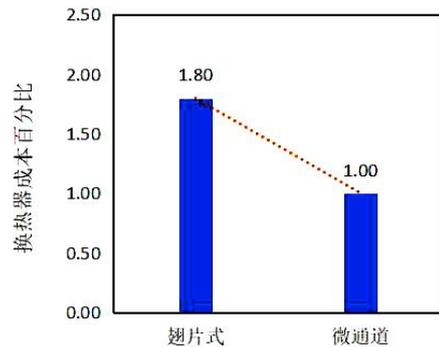
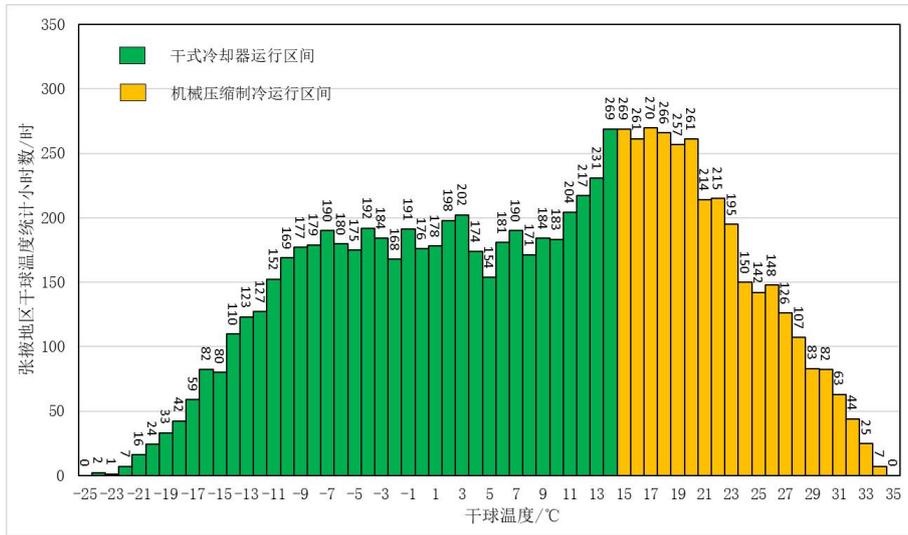


图 8 铜管铝翅片换热器与微通道换热器成本对比

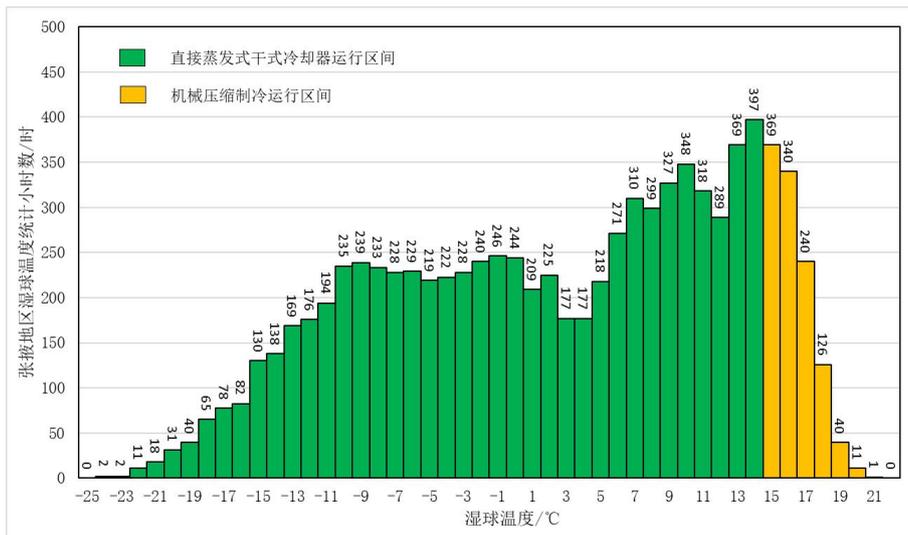
Fig.8 Cost comparison between copper tube aluminum fin heat exchanger and microchannel heat exchanger

### 3 直接蒸发式干式冷却器的应用分析

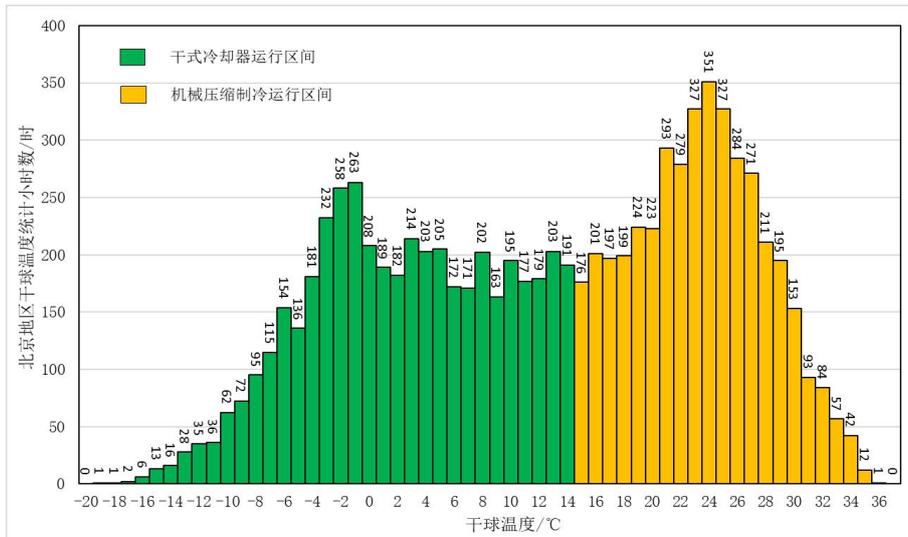
根据 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空调设计规范》的气象数据对张掖、北京、上海和广州四个地区全年的干球温度和湿球温度进行统计，如图 9 所示。发现在温度 14℃ 及以下的条件下，张掖干球温度小时数为 5575 小时，湿球温度为 7633 小时，差值为 2058 小时；北京干球温度小时数为 4560 小时，湿球温度为 5729 小时，差值为 1169 小时；上海干球温度小时数为 3529 小时，湿球温度为 4060 小时，差值为 531 小时；广州干球温度小时数为 1080 小时，湿球温度为 1910 小时，差值为 830 小时。这就说明，在此工况下，环境温度低于 14℃ 就能够满足 130kW 换热量的需求，北方地区全年满足换热量需求的小时数明显高于南方地区，同时北方地区满足 14℃ 的湿球温度和干球温度的小时数差值也大，进一步说明，直接蒸发型干式冷却器的运行时长更长，从而减小机械压缩制冷机组的运行时长，能够极大降低数据中心的能耗，进一步印证，直接蒸发型干式冷却器可以在北方数据中心的建设中广泛应用。



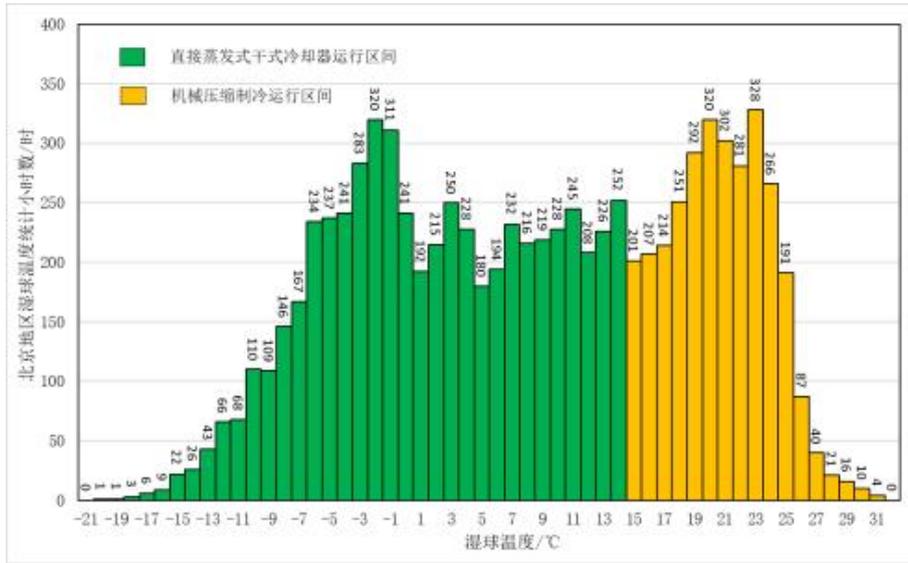
(a) 张掖地区干球温度统计结果



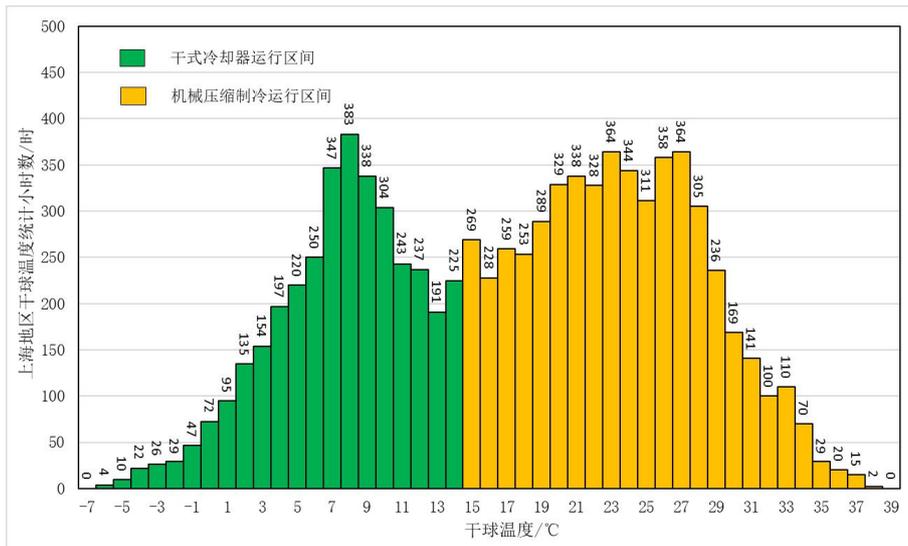
(b) 张掖地区湿球温度统计结果



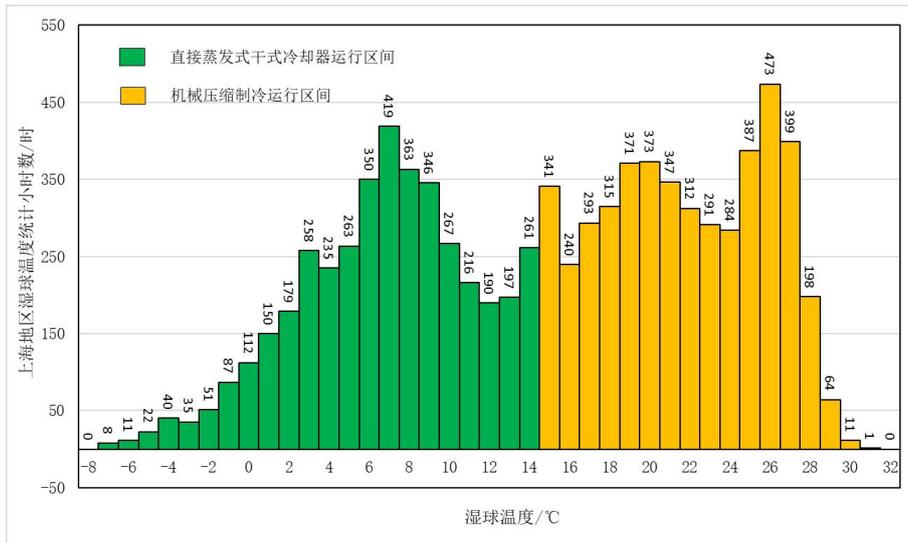
(c) 北京地区干球温度统计结果



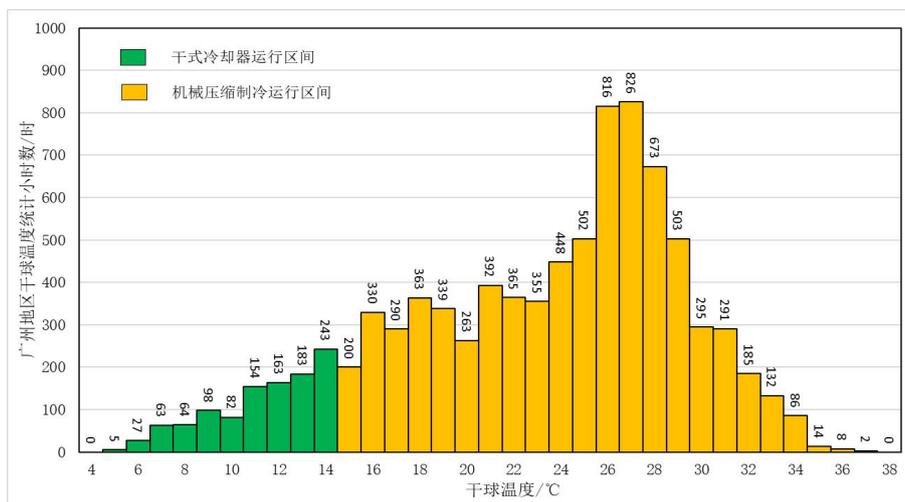
(d) 北京地区湿球温度统计结果



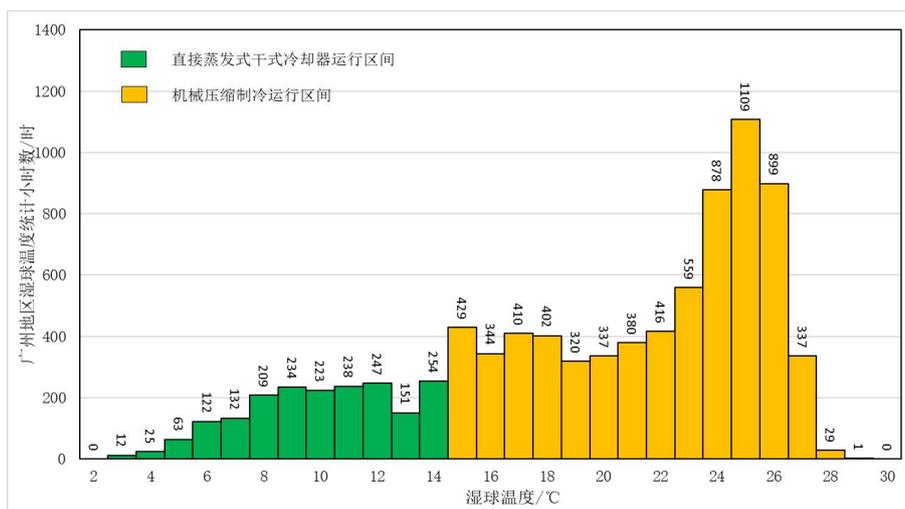
(e) 上海地区干球温度统计结果



(f) 上海地区湿球温度统计结果



(g) 广州地区干球温度统计结果



(h) 广州地区湿球温度统计结果

图 9 张掖、北京、上海和广州四个地区气象数据统计 (GB50736-2012)

Fig.9 Statistics of meteorological data in Zhangye, Beijing, Shanghai and Guangzhou (GB50736-2012)

#### 4 结论

近年来, 各地政府对数据中心节能有明确要求, 特别针对老旧、存量的数据中心提出了明确的节能要求和惩罚性的电费指标。因而数据中心老旧机房节能改造, 已是老旧机房生存和发展的首要选择, 也是实现双“碳”目标的有效措施。

直接蒸发型干冷冷却的研发和设计能够极大程度的提高数据中心的能源利用率和降低能耗, 降低数据中心的 PUE。通过对干式冷却器性能的研究和分析, 可以获得以下结论: 直接蒸发型干式冷却器的换热性能高于常规干式冷却器的换热性能, 微通道干式冷却器不但在成本上有优势, 而且在换热

性能上效果更好, 但其长期运行的全生命周期需要进一步验证。在不影响服务器性能的基础上, 提高干式冷却的供水温度和回水温度, 有利于提高干式冷却器的换热量, 同时提高机组的能效, 有利于降低数据中心机房整体的 PUE。直接蒸发型干式冷却器能够预冷干式冷却器的进风温度, 从而降低进风温度, 延长干式冷却器的使用时长, 减小机械压缩制冷对的使用时长, 降低数据中心全年制冷系统的能耗。选用大风机直径, 低转速的 EC 轴流风机, 在能够满足风量的需求的前提下, 能够宽频调节干式冷却的换热量, 降低整机能耗, 提高机组的能效。

(下转第 844 页)

系统按上述参数运行时,除湿速率可达 0.153g/s (0.55kg/h),可满足通常室内湿负荷要求;当对室内湿负荷有特殊要求时,可通过调节除湿溶液流量等方式调节除湿器除湿速率。

#### 4 结论

设计了基于疏水微孔膜和除湿溶液对室内空气进行除湿的地冷空调系统,给出了系统的结构流程、部件与材料选型数据、特性方程、较佳运行参数等,简要总结如下:

(1) 除湿溶液通过疏水微孔膜从室内空气中吸湿、向室外空气中排湿再生,且再生所需热能主要来自制冷单元余热,因而具有除湿能耗低、对室内空气无污染、除湿溶液无损耗等特点。

(2) 室外空气 35℃、相对湿度 50%、室内空气 28℃、相对湿度 60%、地板有效面积 80m<sup>2</sup>时,系统制冷系数可达 4.4,除湿速率可达 0.55kg/h,能够较好地满足室内制冷与除湿要求。

(3) 通过对除湿溶液类型、流量、温度、浓度等因素的优化,可对除湿器除湿速率在较大范围内进行调控。

#### 参考文献:

- [1] Karmann C, Schiavon S, Bauman F. Thermal comfort in buildings using radiant vs. all-air systems: A critical literature review[J]. *Building and Environment*, 2017, 111:123-131.
- [2] 崔梦颖,刘吉营,朱相源,等.山东典型地区办公建筑地板辐射供冷系统分析[J]. *山东建筑大学学报*, 2023, 38(3):70-79.
- [3] 陈金华,汪文倩,姜冬,等.地板辐射供冷室内热环境改善研究[J]. *暖通空调*, 2020, 50(5):42-48.
- [4] 任雁,刘云亮,周翔,等.长时间处于地板辐射供冷环境

中的人体热反应模拟研究[J]. *制冷技术*, 2019, 39(6):62-69.

- [5] Hernández F F, López J M C, Gutiérrez A F, et al. A new terminal unit combining a radiant floor with an underfloor air system: Experimentation and numerical model[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 133:70-78.
- [6] 秦峰华.混凝土地板辐射制冷系统建模与控制[D].济南:山东建筑大学,2019.
- [7] Ren J, Liu J, Zhou S, et al. Developing a collaborative control strategy of a combined radiant floor cooling and ventilation system: A PMV-based model[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54:104648.
- [8] 郑松,宣永梅,王海亮.辐射供冷系统结露问题的研究现状[J]. *制冷与空调*, 2012, 26(4):399-404.
- [9] 陈宏刚,曹小杰,郝梦丽,等.辐射供冷空调系统防结露研究综述[J]. *建筑热能通风空调*, 2021, 40(2):48-51+38.
- [10] 赵英博,章文杰,贡桐丹,等.送风方式对辐射供冷系统防结露效果的模拟研究[J]. *制冷与空调*, 2022, 36(2):203-208, 219.
- [11] Ren J, Liu J, Zhou S, et al. Experimental study on control strategies of radiant floor cooling system with direct-ground cooling source and displacement ventilation system: A case study in an office building[J]. *Energy*, 2022, 239:122410.
- [12] 李鹏魁,傅允准.辐射空调专用的两级新风除湿机性能测试与分析[J]. *流体机械*, 2019, 47(1), 70-74.
- [13] 刘异,陈柳.高温热泵转轮除湿及辐射供冷空调系统性能研究[J]. *建筑科学*, 2020, 36(8):92-98.
- [14] 崔少云,宋媛,李志勇.除湿技术研究综述与展望[J]. *机械管理开发*, 2021, 36(10):288-291.
- [15] 张大帅,李晨,张小朋,等.料液强化流动对气扫式膜蒸馏影响的实验研究[J]. *膜科学与技术*, 2018, 38(3):91-96, 109.
- [16] 张芑悦.热敏料液专用气扫式膜蒸馏装置的研究[D].天津:天津科技大学,2022.

(上接第 825 页)

#### 参考文献:

- [1] 吴业正.小型制冷装置设计指导(1版)[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [2] GB 50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017
- [3] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

- [4] 黄翔,范坤,宋姣姣.蒸发冷却技术在数据中心的应用探讨[J]. *制冷与空调*, 2013, 13(8):16-22.
- [5] 白延斌.蒸发冷却与机械制冷复合高温冷水机组关键性能参数的研究[D].西安:西安工程大学,2013.
- [6] 田振武,黄翔,郭志成,等.新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析[J]. *制冷与空调*, 2020, 34(3):297-302.