

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-142-06

# 数据中心间接蒸发冷却 空调全年运行效果分析与调节策略

田振武<sup>1</sup> 黄翔<sup>2</sup> 褚俊杰<sup>2</sup> 王克勇<sup>1</sup> 王丽<sup>1</sup> 吴磊<sup>3</sup> 李朝阳<sup>4</sup>

(1. 中通服咨询设计研究院有限公司 南京 210019;

2. 西安工程大学 西安 710048;

3. 阿尔西制冷工程技术北京有限公司 北京 100043;

4. 北京工业大学 北京 100124)

**【摘要】** 为全面分析与准确评价数据中心间接蒸发冷却空调全年运行效果,通过焓湿图及空气处理过程进行剖析,提出分别用湿工况效率与干工况效率评价指标刻画间接蒸发冷却空调在数据中心的运行性能。发现间接蒸发冷却空调运行参数与能效参数主要随二次空气和环境空气变化而变化,一次空气机房回风相对湿度每增加10%,回风焓值增加9.4kJ/kg。并且,数据中心间接蒸发冷却空调全年运行调节过程中,干模式与湿模式切换推荐值分别是干球温度14℃,湿球温度19℃,可控制湿通道淋水量、二次风量、干湿模式切换点来调节系统全年运行能效。

**【关键词】** 蒸发冷却; 数据中心; 全年系统运行; 模式切换

中图分类号 TU83 文献标志码 A

## Annual Operation Effect Analysis and Adjustment Strategy of Indirect Evaporative Cooling Air Conditioner in Data Center

Tian Zhenwu<sup>1</sup> Huang Xiang<sup>2</sup> Chu Junjie<sup>2</sup> Wang Keyong<sup>1</sup> Wang Li<sup>1</sup> Wu Lei<sup>3</sup> Li Zhaoyang<sup>4</sup>

(1.China Information Consulting &Designing Institute Co., Ltd, Nanjing, 210019;

2.Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

3.Airsys Refrigeration Systems Ltd, Beijing, 100043;

4.Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

**【Abstract】** In order to comprehensively analyze and accurately evaluate the operating effect of indirect evaporative cooling air conditioners in data centers throughout the year, this paper analyzes the enthalpy humidity chart and the air treatment process, and puts forward evaluation indexes of efficiency in wet and dry conditions to describe the operating performance of indirect evaporative cooling air conditioners in data centers. It is found that the operating parameters and energy efficiency parameters of the indirect evaporative cooling air conditioner mainly change with the change of secondary air and ambient air. When the relative humidity of the return air in the primary air room increases by 10%, the return air enthalpy increases by 9.4kJ/kg. In addition, during the annual operation and adjustment process of indirect evaporative cooling air conditioners in data centers, the recommended switching values of dry mode and wet mode are respectively 14℃ for dry bulb temperature and 19℃ for wet bulb

基金项目: 深圳市科技研发资金资助可持续发展专项项目 (KCXFZ20201221173409026)

作者(通讯作者)简介: 田振武(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, E-mail: tzw199407@163.com

收稿日期: 2023-08-17

temperature, which can regulate the annual energy efficiency of the system by controlling the water volume of wet channel, secondary air volume and the switching point of dry and wet modes.

**【Keywords】** evaporation cooling; data center; Year-round system operation; Running mode switch

## 0 引言

近年来,蒸发冷却技术在国内数据中心项目上逐步得到应用,有效降低了数据中心 PUE 及运营成本,引起业界极大关注,其中间接蒸发冷却技术在数据中心行业存在巨大的发展空间<sup>[1-4]</sup>。樊丽娟等人<sup>[5]</sup>通过改变间接蒸发冷却湿通道气水比、一二次风量比等因素对卧管式间接蒸发冷却器进行试验,结果显示在环境干球温度 35℃ 左右时,湿球效率可在 75% 左右。宋祥龙等人<sup>[6]</sup>对立管间接蒸发冷却器进行实际工程测试,发现一次空气室内全回风 35.2℃~35.3℃,二次空气(室外新风)干球温度 31.9%,相对湿度 60.5% 的情况下,湿球效率为 63%~65%。褚俊杰、贺红霞等人<sup>[7,8]</sup>对逆流式露点间接蒸发冷却器进行试验,在标准干燥工况(干球温度 38℃,湿球温度 23℃)的条件下,其湿球效率可达 105.6%。王玉刚等人<sup>[9,10]</sup>对一种新型露点间接蒸发冷却器在 8 种模拟气候条件下进行适用性试验研究,其湿球效率变化范围为 80%~99%。胡凯等人<sup>[11]</sup>通过实验,通过控制间接蒸发冷却二次空气状态不变,研究了一次空气在不同运行工况下间接蒸发冷却换热性能,结果显示湿球效率均在 57.4%~70.5%。

以上文献均通过研究湿通道气水比、一二次风量淋水密度等因素来强化湿通道的蒸发冷却效果,使湿通道温度逼近湿球温度,但是缺乏针对数据中心全年工况的数据与评价指标,无法对数据中心蒸发冷却设计提供可行性分析依据。针对数据中心间接蒸发冷却所用二次空气均来自室外新风,所用一次空气均来自机房回风,回风工况相对稳定的特点。本文通过对数据中心用间接蒸发冷却空气处理过程以及机房回风焓湿状态变化进行分析,提出分别用间接蒸发冷却湿工况效率和干工况效率来表征间接蒸发冷却全年运行效果,同时针对间接蒸发冷却空调全年运行模式提供调节策略建议。

## 1 数据中心间接蒸发冷却技术原理

### 1.1 数据中心间接蒸发冷却空气处理过程

如图 1 所示,目前在对数据中心机房送回风状

态点的工程设计中基本上要保持送风温湿度在  $N_1-N_2-N_3-N_4$  的范围内;数据中心机房回风作为间接蒸发冷却一次空气,回风温度 35℃ 左右,湿度在 30%~55%<sup>[12,13]</sup>,即图中 a—a' 的范围。空调送风处理至 n 状态点后,在机柜内吸收服务器散热,空气状态等湿升温至 a 状态点。

湿模式下,间接蒸发冷却湿通道内二次空气为室外新风,理想状态下二次空气在湿通道内发生直接蒸发冷却,从 1 状态点等焓冷却至 2 状态点,实际上二次空气在湿通道受换热面积、外热源等因素影响,应是从 1 状态点至 2' 状态点的增焓冷却过程。值得注意的是当机房回风状态点越靠近 a' 状态点(即回风露点温度越高),其露点温度会更高于二次空气饱和温度,回风就越容易发生凝结现象。

在干模式下机房回风处理过程与湿模式类似,而干模式下间接蒸发冷却器二次空气通过换热器与一次空气显热交换,当机房回风状态点露点温度高于二次空气进风温度时,回风也容易发生凝结现象。

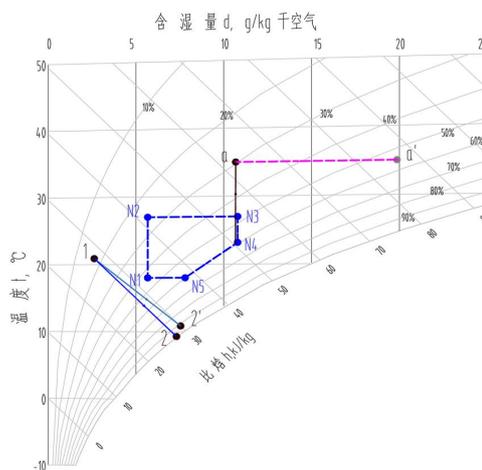


图 1 数据中心间接蒸发冷却空气状态焓湿图

Fig.1 Data center indirect evaporation cooling air state enthalpy moisture chart

### 1.2 数据中心回风湿度与空气焓值关系

机房温度为 35℃ 时,空调送风在带走服务器热量的过程,空气最理想的是能从送风状态点 n(干球 23℃,湿度 60%)沿等含湿量线到达机房回风

状态点 a (干球 35℃, 湿度 30%), 而实际工程设计往往要求机房回风湿度在 30%~60%<sup>[13]</sup>。如图 2 所示, 机房回风湿度在 30% 时送回风焓差为 12.4kJ/kg, 回风相对湿度每增加 10%, 回风焓值就增加 9.4kJ/kg, 因此回风设计相对湿度的提高, 不仅需要机房空气进行加湿以满足回风湿度要求, 而且回风区域也要进行相应的除湿以保证空气处理过程的稳定, 因此高湿度回风对节能不友好。

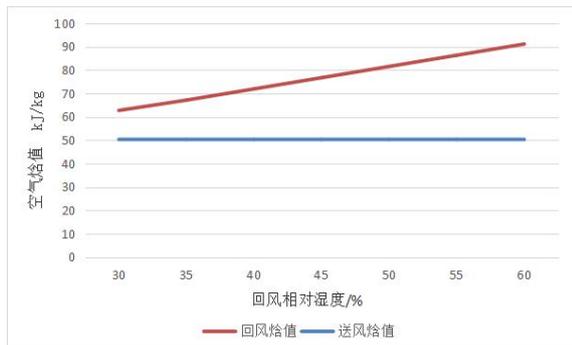


图 2 数据中心机房送回风焓值

Fig.2 Enthalpy of supply and return air by the data center room

### 1.3 数据中心间接蒸发冷却效率

当数据中心用间接蒸发冷却空调并采用湿工况模式运行时, 可用间接蒸发冷却湿球效率来评价, 而间接蒸发冷却空调需要在过渡季节开启干工况模式, 因此本文提出分别用间接蒸发冷却湿工况效率和干工况效率来表征间接蒸发冷却全年运行效果。

#### (1) 间接蒸发冷却湿工况效率

间接蒸发冷却湿工况下, 不论湿通道相关参数如何变化, 一次空气降温的极限是湿通道换热器内壁温度, 而这一温度在理想状态下是二次空气的湿球温度。所以用湿球效率<sup>[14]</sup>来表示湿工况效率, 如公式 (1) 所示, 反映数据中心间接蒸发冷却器将一次空气干球温度逼近二次空气进风湿球温度的程度。

$$n_1 = \frac{t_{g,1j} - t_{g,1c}}{t_{g,1j} - t_{s,2j}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $n_1$  为间接蒸发冷却湿工况效率, %;  $t_{g,1j}$  为一次空气进风干球温度, °C;  $t_{g,1c}$  为一次空气出风干球温度, °C;  $t_{s,2j}$  为二次空气进风湿球温度, °C。

#### (2) 间接蒸发冷却干工况效率

间接蒸发冷却干工况下, 一次空气降温的极限

是二次空气的干球温度。所以本文提出的干工况效率, 如公式 (2) 所示, 反映数据中心间接蒸发冷却器将一次空气干球温度逼近二次空气进风干球温度的程度:

$$n_2 = \frac{t_{g,1j} - t_{g,1c}}{t_{g,1j} - t_{g,2j}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $n_2$  为间接蒸发冷却效率, %;  $t_{g,1j}$  为一次空气进风干球温度, °C;  $t_{g,1c}$  为一次空气出风干球温度, °C;  $t_{g,2j}$  为二次空气进风干球温度, °C。

#### (3) 间接蒸发冷却效率值

对数据中心间接蒸发冷却空调冷却实验中需要控制一次侧进出风温差和风量保持一定, 而二次空气应进行多工况实验, 将一次空气设定为机房空气状态, 二次空气采用室外新风。表 1 所示, 关于间接蒸发冷却空调在控制干通道一次空气一致 (干球温度 25℃, 相对湿度 50%), 而改变湿通道二次空气 (环境空气) 分别为高温高湿、高温干燥、低温高湿、低温干燥状态的实验, 数据显示, 间接蒸发冷却干工况效率只与二次空气 (环境空气) 进风干球温度有关, 二次空气 (环境空气) 干球温度越小, 间接蒸发冷却干工况效率高; 间接蒸发冷却湿工况效率与二次空气 (环境空气) 进风干球温度和相对湿度都有关, 同一干球温度下越干燥, 湿工况效率越大, 而在同一相对湿度下, 干球温度对湿工况效率影响不明显。

表 1 数据中心间接蒸发冷却干、湿工况效率值

Table 1 Efficiency value of data center indirect evaporative cooling under dry and wet conditions

工况	高温高湿	高温干燥	低温高湿	低温干燥
	(干球 35℃, 湿度 70%)	(干球 35℃, 湿度 35%)	(干球 30℃, 湿度 70%)	(干球 30℃, 湿度 35%)
干工况效率	58%	58%	62%	62%
湿工况效率	61%	69.2%	57.4%	70.5%

上述数据只反映了间接蒸发冷却效率随二次空气 (环境空气) 工况变化的关系, 而实际数据中心间接蒸发冷却回风温度一般在 35~38℃。间接蒸发冷却换热器技术形式各有差异, 实际间接蒸发冷却干工况、湿工况效率应根据所在地环境工况与设备制造方测试数据确定。为方便计算本文所述案例

均以间接蒸发冷却干工况效率为 55%, 湿工况效率为 68%来计算。

### 2 数据中心间接蒸发冷全年运行

图 3 为某数据中心间接蒸发冷却空调机组不同工况的第三方检测(中国泰尔实验室)数据, 其中实测机组标准制冷量为 250kW、风量 60000m<sup>3</sup>/h, 在焓差实验室控制室内侧工况为数据中心送回风, 针对机房室外侧干球温度设置五种不同工况。机组在环境干球温度-10~15℃之间机组为干模式运行, 此工况下空调机组只有风机能耗, 室外干球温度越高空凋制冷性能系数越低, 在环境干球温度 25℃时机组为湿模式运行, 此时空调机组既有风机能耗也有水泵能耗, 而室外环境 25℃时和室外环境 15℃时的空调机组制冷性能系数相当, 可见湿模式中的水泵喷淋用少部分能耗却比干模式中风机的部分能耗低。

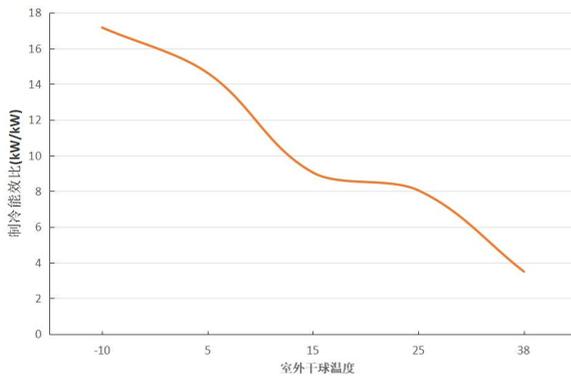


图 3 间接蒸发冷却空调能效比

Fig.3 Energy efficiency ratio of indirect evaporative cooling air conditioning

但在蒸发冷却空调机组全年运行过程中, 环境干球温度与湿球温度在逐时变化, 图 4 所示为北京四季典型日全天逐时气象参数与数据中心机房内送回风状态之间的关系。

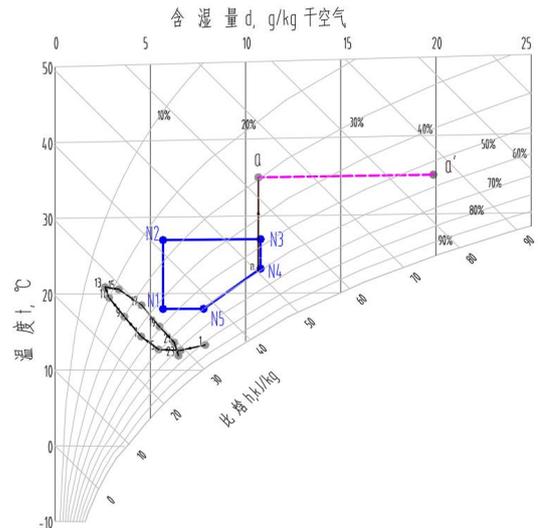
如图 4 (a) 所示, 以春分日为代表的春季, 全天环境湿球温度变化范围为 8.4~11.6℃, 从凌晨 1 点到下午 13 点, 环境干球温度逐渐增加, 从下午 13 点到夜晚 23 点, 环境干球温度逐渐降低。间接蒸发冷却空调这一天, 可在白天上午 7 点到下午 20 点, 即干球温度 14℃ 以上开启湿模式, 同时根据一次空气状态表现, 对湿通道风机、水泵进行变频控制, 其余时间开启干模式。

如图 4 (b) 所示, 以夏至日为代表的夏季,

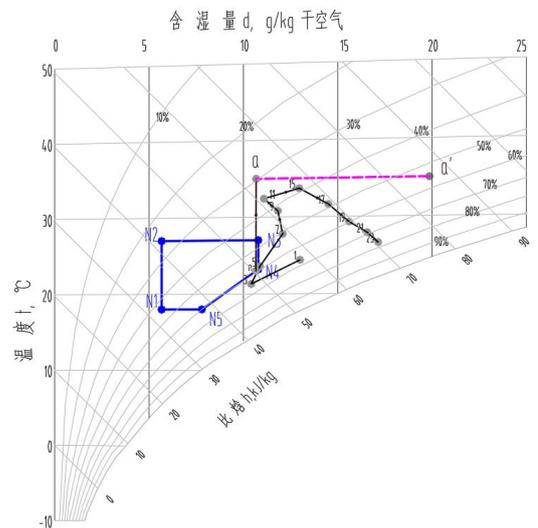
全天环境湿球温度变化范围为 16.9~23.4℃, 当天从凌晨 2 点到凌晨 6 点, 环境湿球温度低于 19℃, 可在此期间开启湿模式, 其余时间开启混合模式并控制机械制冷补冷比例。

如图 4 (c) 所示, 以秋分日为代表的秋季, 全天环境湿球温度变化范围为 2.1~10.5℃, 从早上 7 点到下午 19 点, 干球温度大于 14℃ 开启湿模式, 同时根据一次空气状态表现, 对湿通道风机、水泵进行变频控制, 其余时间开启干模式。

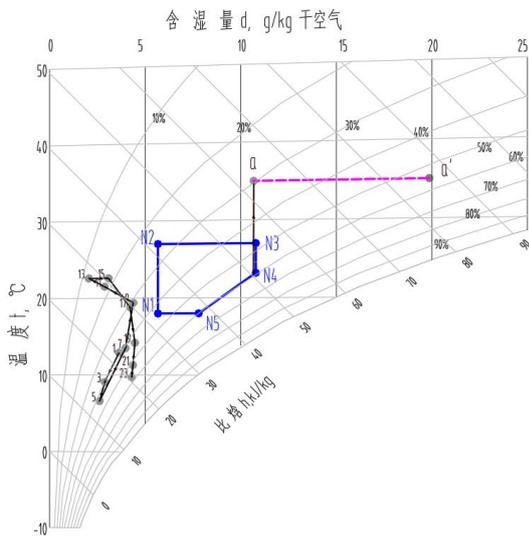
如图 4 (d) 所示, 以冬至日为代表的冬季, 全天环境干球温度变化范围为 -6~-1℃, 全天均开启干模式运行, 同时为防止二次空气温度过低导致机房侧空气结露, 二次侧风机应随环境温度变化变频甚至关闭风机。



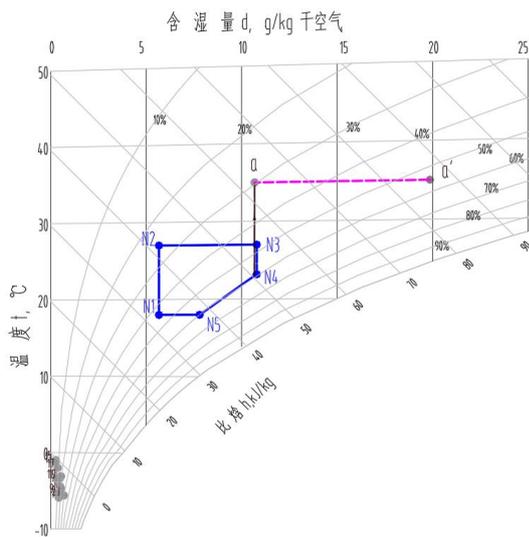
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4 数据中心间接蒸发冷却空调全年运行焓湿图

Fig.4 Data center indirect evaporative cooling air conditioner year-round operation enthalpy moisture chart

### 3 间接蒸发冷却调节过程

#### 3.1 湿通道淋水量

通过控制间接蒸发冷却湿通道喷水量可以节约数据中心全年用水量,同时可以改变淋水密度达到对送风温度及冷量的调节,直至干工况满足机房制冷量要求则关闭喷淋泵。淋水密度是单位时间、单位淋水长度上的淋水量。根据环境工况不同,淋水密度在 15~25kg/(m·h)范围内,一般来说相对较干燥的工况最佳淋水密度越大,但是考虑数据中心

对节约水资源的需求,在保证间接蒸发冷却制冷量要求的情况下可以适当降低淋水密度<sup>[15,16]</sup>。

#### 3.2 二次风量

间接蒸发冷却一次风量根据机房内实际负荷确定,二次风量可根据室外工况变化而做出改变,从而通过风机变频运行来节约能耗。间接蒸发冷却段效率随着二次风量的增大呈现出逐渐增大并保持稳定的趋势,研究表明间接蒸发冷却湿模式最佳二/一次风量为 1.0~2.0,干模式的最佳风量比相对于湿模式过程略高,对于干模式和湿模式运行过程,二次风量可根据环境工况进行调控,以满足间接蒸发制冷量的需要<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 干湿模式切换点

以干模式效率为 55%计算,环境干球温度在 16℃以下可使用干模式,间接蒸发冷却干模式下环境干球温度越低,制冷效果越显著,同时也能适当降低二次风机功率,间接蒸发冷却器干模式下二/一次风量比在 0.9~1.125 时,其系统 COP 较高<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

(1)数据中心机房回风相对湿度每增加 10%,回风焓值就增加 9.4kJ/kg,机房回风相对湿度越低越利于空调系统节能运行。

(2)本文提出分别用间接蒸发冷却湿工况效率和干工况效率来评价间接蒸发冷却空调在数据中心的冷却性能表现,有利于数据中心设计过程中对间接蒸发冷却空调进行准确选型。

(3)数据中心间接蒸发冷却空调全年运行调节过程中,可控制湿通道淋水量、二次风量、干湿模式切换点来调节系统全年运行能效,运行时可取淋水密度在 15~25kg/(m·h),湿模式下二/一次风量比在 1.0~2.0,干模式下二/一次风量比在 0.9~1.125,系统节能性较好。

### 参考文献:

[1] 武苗苗,黄翔,史东旭,等.不同运行模式下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.  
 [2] 褚俊杰,徐伟,黄翔,等.数据中心间接蒸发自然冷却潜力评价计算新方法[J].西安工程大学学报,2022,36(2): 33-39.  
 [3] 吕伟华,李先庭,黄翔,等.自然冷却节能潜力的修正度

- 时数评价方法[J].西安工程大学学报,2022,36(4):4753.
- [4] 田振武,黄翔,褚俊杰,等.干燥地区数据中心水侧蒸发冷却空调系统的实测分析[J].暖通空调,2021,51(8):12-17.
- [5] 樊丽娟,黄翔,徐方成.管式间接蒸发冷风机性能测试及分析[J].建筑科学,2011,27(10):55-57,82.
- [6] 宋祥龙,黄翔.立管式间接蒸发冷却器的节能效果[J].棉纺织技术,2022,50(5):9-11.
- [7] 褚俊杰,黄翔,孙铁柱,等.逆流式露点间接蒸发冷却器性能实验研究[J].制冷学报,2019,40(1):121-127.
- [8] 贺红霞,黄翔,张鸿,等.露点间接蒸发冷却器中布水与存水的试验研究[J].西安工程大学学报,2019,33(4):395-100.
- [9] 王玉刚,王怡,黄翔,等.一种新型露点间接蒸发冷却器在我国不同气候区适用性的试验研究[J].流体机械,2015,43(8):68-72,58.
- [10] 王玉刚,陈奕.露点蒸发冷却空调系统的热力学性能分析[J].西安工程大学学报,2022,36(4):92-97.
- [11] 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.
- [12] 贾晨昱,黄翔,田振武,等.间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [13] GB50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [14] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [15] 靳如意,黄翔,王颖,等.数据中心用高分子板翅式间接蒸发冷却器换热性能的试验研究[J].流体机械,2022,50(12):7-13.
- [16] 张丹,黄翔,吴志湘.蒸发冷却空调最佳淋水密度的实验研究[J].西安工程科技学院学报,2006,(2):191-194.
- [17] 于号,李征涛,王智楷,等.间接蒸发冷却器在干湿模式下的冷却特性[J].化学工程,2022,50(6):38-42,60.

---

(上接第 118 页)

- [18] RW Freedman, BI Ferber. Sampling capability of vacutainers for fixed gases and low-molecular-weight hydrocarbons[M]. ed. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1976.
- [19] T Bui. CFD Analysis of the Nozzle Jet Plume Effects on Sonic Boom Signature[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, USA, 2009.
- [20] DN Sørensen, PV Nielsen. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments[J]. Indoor Air, 2003,13(1):2-17.