

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-725-08

数据中心间接蒸发自然冷却空调系统 在中国的适用性分析

褚俊杰 徐 伟 霍慧敏

(中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与能源研究院 北京 100013)

【摘 要】 首先基于最新的 ASHRAE 数据中心标准制作的中国自然冷却地图, 直观地说明中国应用自然冷却的范围在逐步扩大。然后针对风侧间接蒸发自然冷却空调系统和水侧间接蒸发自然冷却空调系统的工作原理、模式切换以及运行逻辑进行了分析。按照给出的模式切换点, 分别统计全国 31 个主要城市的系统全年运行时间分布。统计结果表明, 在西宁、拉萨、昆明等城市, 风侧系统全年不需要开启机械制冷冷源, 即可以满足运行要求; 在西宁、拉萨、乌鲁木齐等城市, 水侧系统全年不需要开启机械制冷冷源, 即可以满足运行要求。通过分析指出, 随着国际标准和国内标准中对于数据中心的进风状态参数的逐步放宽, 风侧间接蒸发自然冷却空调系统和水侧间接蒸发自然冷却空调系统在中国数据中心中具有较大的适用性。

【关键词】 数据中心; 间接蒸发自然冷却; 自然冷却地图; 风侧; 水侧; 统计小时数

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Applicability Analysis of Indirect Free Cooling Air Conditioning System for China Data Center

Chu Junjie Xu Wei Huo Huimin

(Institute of Building Environment and Energy, China Academy of Building Research, Beijing, 100013)

【Abstract】 This article first based on the latest ASHRAE data center standard to produce China's natural cooling map, which intuitively shows that the scope of China's application of natural cooling is gradually expanding. Then, the working principle, mode switching and operation logic of the air-side indirect evaporative natural cooling air conditioning system and the water-side indirect evaporative natural cooling air conditioning system are analyzed. According to the given mode switching point, the distribution of the annual running time of the system in 31 major cities in China was calculated. The statistical results show that in xining, Lhasa, kunming and other cities, the wind side system does not need to turn on the mechanical cooling source all year round, that is, it can meet the operational requirements. In xining, Lhasa, urumqi and other cities, the water side system does not need to turn on the mechanical cooling source all year round, that is, it can meet the operational requirements. Through analysis, it is pointed out that with the gradual relaxation of the air inlet state parameters in the international standard and the Chinese standard, the indirect evaporative free cooling air conditioning system on the wind side and the indirect evaporative free cooling air conditioning system on the water side have great applicability in the Chinese data center.

【Keywords】 Data center; Indirect evaporative free cooling; Free cooling map; Wind side; Water side; Count hours

基金项目: 国家重点研发计划“近零能耗建筑技术体系及关键技术开发”(2017YFC0702600); 国家重点研发计划“藏区、西北及高原地区利用可再生能源采暖空调新技术”(2016YFC0700400)

作者(通讯作者)简介: 褚俊杰(1990-), 男, 在读博士研究生, E-mail: chujunjie2010@foxmail.com

收稿日期: 2021-01-20

0 引言

近些年以来,移动互联网、云计算、大数据应用需求呈现出爆发式增长,信息技术创新驱动智能终端、VR、人工智能、可穿戴设备、物联网和5G等领域快速发展以及“互联网+”向各种产业加速渗透,带动了数据存储规模、计算能力以及网络流量的大幅增加。而中国无疑是信息产业技术发展最为活跃的区域,中国移动互联网的访问量和手机保有量均是全球之最。全球上市互联网公司30强中,其中有10个是中国公司^[1]。这么巨大的信息访问量和处理量,带来数据中心的快速建设与发展。随着整个社会发展对数据中心的需求量不断增长,并且由于IT设备的高密度以及全年365天、每天24小时不间断的运行,从而造成了数据中心对电力能源的消耗急剧增长。有相关数据表明,2018年全中国数据中心总用电量为1608.89亿千瓦时,比上海市2018年全社会用电量(1567亿千瓦时)还要多,相当于整个中国三峡大坝的全年发电量^[2]。蒸发冷却技术是一种利用水分蒸发制取冷量的高效自然冷却方式,在数据中心空调系统中利用间接蒸发自然冷却方案时,将会显著提高空调设备的换热效率,延长自然冷源的利用时间^[3]。因此对于应用间接蒸发冷却技术解决数据中心散热问题,已经成为国内外学者研究的热点。Sang-Woo Ham等人^[4]研究了各种风侧冷却器在数据中心中的节能潜力,结果表明与数据中心的传统冷却系统相比,风侧节能装置节能47.5%~67.2%。采用高效换热器的间接风侧冷却器节能效果显著,并且系统结构简单。Yin Bi等人^[5]采用新型露点间接冷却系统和优化的供冷风管理系统,在选定的10种气候条件下进行了实验研究,认为10个典型城市的数据中心空调电耗可节省87.7%~91.6%。谢晓云、冯潇潇等^[6]提出一种基于间接蒸发冷却塔的数据机房冷却系统,夏季,间接蒸发冷却塔作为机械式制冷机的冷却塔,能够制备低于湿球温度的冷却水,从而提高制冷机COP;冬季,间接蒸发冷却塔作为冷却系统的冷源,为数据机房独立供冷,由于间接蒸发冷却塔结构独特,能够实现冷却塔冬季防冻的功能。黄翔等^[7]提出基于直接蒸发冷却技术、间接蒸发冷却技术及乙二醇自然冷却技术实现蒸发冷却空气-水空调系统在数据中心机房空调系统领域中的首次应用,并实现全年100%自然冷却。

本文首先针对“China Free Cooling Tool”工具制作的基于ASHRAE最新标准的中国自然冷却地

图,直观地表现了中国应用自然冷却的范围越来越大。然后系统介绍了基于风侧间接蒸发自然冷却和水侧间接蒸发自然冷却系统的工作原理、模式切换以及运行逻辑,最后选择全国主要的31座城市分别计算分析了自然冷却应用潜力,并得到相关结论。

1 数据中心环境参数范围

数据中心IT设备运行环境空气参数要求对制冷空调系统的能耗以及IT设备的可靠性具有显著的影响。ASHRAE在2001年专门成立了关于数据中心的技术委员会9.9(简称ASHREA TC 9.9),该技术委员会是由数据中心设备生产商、数据处理设备终端用户的业主与管理人员、政府机构、研究机构、设计咨询机构和实验室测试专家等组成专业的研究团队。为了使行业内更好地理解IT设备冷却环境要求对数据中心的影响,ASHRAE TC 9.9在2004年出版了第一版的《数据处理环境热指南》^[8],其中对于1级与2级IT设备进气条件推荐的温度范围是20℃~25℃,相对湿度范围是40%~55%的相对湿度。为了指导运营商维持数据中心内环境的高可靠性,并以最节能的方式运行数据中心,ASHRAE TC 9.9在2008、2011和2015年继续更新了这个指南^[9-11],持续扩大了数据中心IT设备运行环境的环境空气推荐范围,如表1所示,从而使越来越多的地区能够在更长的时间范围内充分利用自然冷源对数据中心进行散热。

表1为ASHRAE四个版本中数据中心环境参数的推荐值。将服务器运行的环境温度(进风温度)从20~25℃放宽到18~27℃。在2015年的更新版本中,推荐值的露点温度继续降低,露点温度的下限达到了-9℃,这更是前所未有的。

表1 ASHRAE TC 9.9 数据中心环境参数推荐值

Table 1 Recommended values of data center environmental parameters in ASHRAE TC 9.9

	ASHRAE TC 9.9 (推荐值)		
	2004版	2008/2011版	2015版
干球温度下限	20℃	18℃	18℃
干球温度上限	25℃	27℃	27℃
露点温度下限	—	5.5℃	-9℃
露点温度上限	—	15℃	15℃
相对湿度下限	40%	—	—
相对湿度上限	55%	60%	60%

除了推荐值, ASHRAE 在 2015 年的更新版本中, 继续对环境参数的追加值进行了更加细致的修订, 如表 2 所示。

表 2 ASHRAE TC 9.9-2015 数据中心环境参数追加^[11]

Table 2 Equipment Environment Specifications for Air Cooling in ASHRAE TC 9.9-2015

等级	干球温度(°C)	湿度范围	最大露点温度(°C)
A1	15~32	8%~80%	17
A2	10~35	8%~80%	21
A3	5~40	8%~85%	24
A4	5~45	8%~90%	24
B	5~35	8%~80%	28
C	5~40	8%~80%	28

国内标准规定的数据中心环境参数范围也随之进行了变更。同时明确规定主机房的温湿度是冷通道或机柜进风区域的干球温度、相对湿度和露点温度。新国标中推荐的冷通道或者机柜的进风温度

表 3 国内标准规定的数据中心机房环境参数范围^[12-14]

Table 3 Equipment Environment Specifications for Air Cooling in domestic standards

	GB50174-2008			GB50174-2017	TCECS 487-2017	
	电子信息系统机房设计规范			数据中心设计规范	数据中心制冷与空调设计标准	
	A 级	B 级	C 级	规定值	推荐值	允许值
干球温度下限	23±1°C	23±1°C	18°C	18°C	18°C	15°C
干球温度上限			28°C	27°C	27°C	32°C
露点温度下限	不得结露	不得结露	不得结露	5.5°C	5.5°C	—
露点温度上限				15°C	15°C	17°C
相对湿度下限	40%	40%	35%	—	—	20%
相对湿度上限	50%	50%	70%	60%	60%	80%

2 中国自然冷却范围

随着数据中心环境参数范围的不断放宽, 再加上数据中心节能减排的巨大压力。因此在数据中心排热过程中充分利用自然冷却技术, 越来越成为人们关注的重点。

使用绿色网格组织 (The Green Grid) 发布的“China Free Cooling Tool”, 在基于 ASHRAE 2015 推荐的数据中心温度和湿度范围内制作了中国自然冷却地图。在更大的允许范围内, 更新的自然冷却地图显示自然冷却技术的扩展潜力, 以鼓励数据中心设计团队采用这些自然冷却节能技术。

是一个范围值而不是一个定值。其中机柜的最高进风温度要求小于 27°C, 机柜的最低进风温度要求大于 18°C, 露点温度范围 5.5~15°C。当 IT 设备对环境温湿度可以放宽要求时, 冷通道或者机柜的进风温度可以扩大到 15~32°C, 其中露点温度要求不能高于 17°C。

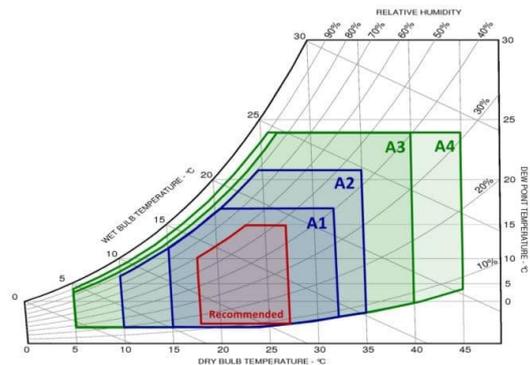


图 1 ASHRAE TC 9.9-2015 数据中心环境参数追加焓湿图^[6]

Fig.1 2015 recommended and allowable envelopes for ASHRAE Classes A1, A2, A3, and A4

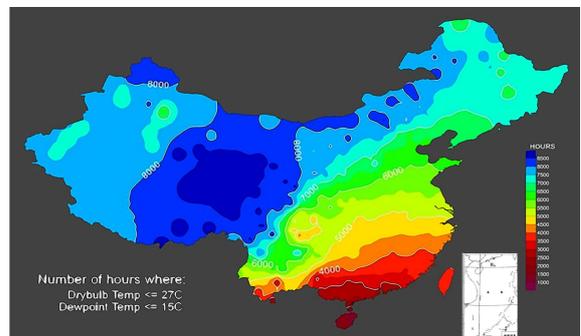


图 2 中国自然冷却地图 (推荐值: 干球温度 $\leq 27^{\circ}\text{C}$, 露点温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$)

Fig.2 Natural cooling map of China (recommended value: dry bulb temperature $\leq 27^{\circ}\text{C}$, dew point temperature $\leq 15^{\circ}\text{C}$)

如图 2 所示,为基于 ASHRAE TC 9.9-2015 推荐值的数据中心温度和湿度范围做出的中国自然冷却地图。地图中显示了基于干球温度 $\leq 27^{\circ}\text{C}$,露点温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ 的全国统计小时数。图中可见,在中国西北绝大部分地区全年利用自然冷却的小时数均高于 8000 小时。甚至有些地区全年都可以应用自然冷却。这些地区建设数据中心,可以为排热系统提供极为便利的自然冷却环境条件。

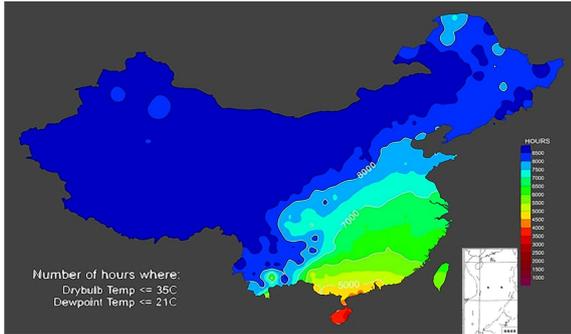


图 3 中国自然冷却地图 (A2 等级: 干球温度 $\leq 35^{\circ}\text{C}$, 露点温度 $\leq 21^{\circ}\text{C}$)

Fig.3 Natural cooling map of China (recommended value: dry bulb temperature $\leq 35^{\circ}\text{C}$, dew point temperature $\leq 21^{\circ}\text{C}$)

如图 3 所示,为基于 ASHRAE TC 9.9-2015 A2 等级的数据中心温度和湿度范围绘制的中国自然冷却地图。地图中显示了基于干球温度 $\leq 35^{\circ}\text{C}$,露点温度 $\leq 21^{\circ}\text{C}$ 的全国统计小时数。当数据中心环境参数进一步放大到 A2 等级,全国可利用自然冷却的范围进一步扩大。全年利用自然冷却的小时数 8000 小时分界线已经到河北、山西、陕西、四川、云南等地。也就是说如果在 A2 等级环境要求下,这些区域也可以在全年绝大部分时间利用自然冷却,即可完全保证数据中心内的热环境。

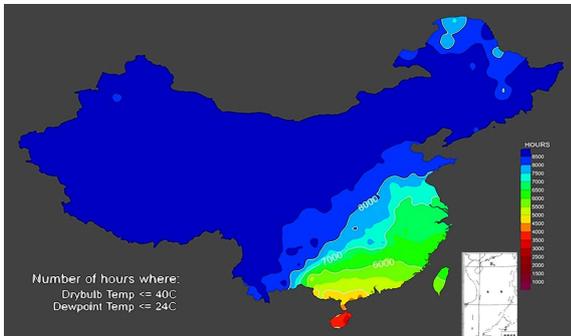


图 4 中国自然冷却地图 (A3 等级: 干球温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$, 露点温度 $\leq 24^{\circ}\text{C}$)

Fig.4 Natural cooling map of China (recommended value: dry bulb temperature $\leq 40^{\circ}\text{C}$, dew point temperature $\leq 24^{\circ}\text{C}$)

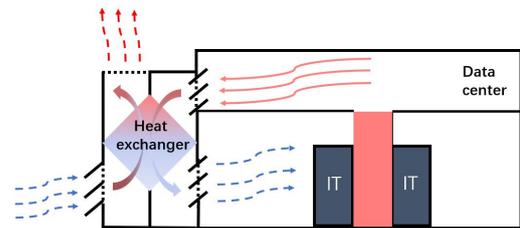
如图 4 所示,为基于 ASHRAE TC 9.9-2015 A3 等级的数据中心温度和湿度范围做出的中国自然冷却地图。地图中显示了基于干球温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$,露点温度 $\leq 24^{\circ}\text{C}$ 的全国统计小时数。如果数据中心环境参数进一步放大到 A3 等级,全国大部分地区全年利用自然冷却的小时数都超过了 8000 小时。中国南方的绝大部分地区全年利用自然冷却的小时数也都超过了 6000 小时以上。

从图 2-图 4 的中国自然冷却地图中可以非常直观地看到,逐步提高的数据中心热环境可允许参数,为数据中心自然冷却的利用提供了极为优越的自然冷却条件。

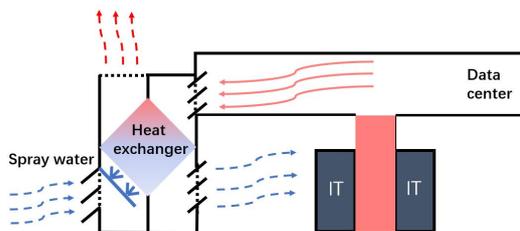
3 间接蒸发自然冷却系统

3.1 风侧间接蒸发自然冷却

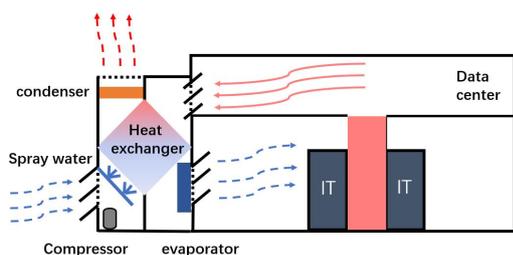
由于中国西北大部分地区的空气质量往往不尽如意。因此在这些地方数据中心建设中,向数据中心内直接引入室外新风的方案风险很大,并不被人们所接受。因此为了降低数据中心的能耗同时更最大限度的利用自然冷源。间接蒸发自然冷却技术成为首要选择。如图 5 所示,为典型的数据中心风侧间接蒸发自然冷却系统示意图。该间接蒸发自然冷却系统在全年工作过程中,有三种工作模式,分别为干模式(冷却器空气/空气换热)、湿模式(风侧间接蒸发冷却)、耦合模式(风侧间接蒸发冷却+机械制冷)。根据室外环境参数全年的动态变化,三种工作模式依次动态切换,为数据中心热环境提供保障。



(a) 干模式



(b) 湿模式



(c) 耦合模式

图 5 数据中心风侧间接蒸发自然冷却系统

Fig.5 Data center air side indirect evaporative natural cooling system

表 4 间接蒸发冷却器换热效率对比^[15]

Table 4 Comparison of heat transfer efficiency of indirect evaporative cooler

冷却器类型	干工况换热效率	湿工况换热效率
板翅式	40%~50%	60%~85%
转轮式	60%~70%	70%~80%
圆管式	40%~50%	60%~85%
板管式	40%~50%	60%~85%

通过总结参考文献发现, 不同间接蒸发冷却器的换热效率有着较大的差别, 如表 4 所示。数据中心空调的冷却器, 不仅仅要考虑夏季湿工况运行模式下的换热效率, 还要考虑冬季和过渡季节干工况运行模式时空气/空气之间的换热效率。考虑换热效率以及经济成本等因素, 板翅式和管式换热器形式在数据中心空调中的应用更为普遍。

表 5 风侧间接蒸发自然冷却空调系统模式切换

Table 5 Mode switching of air side indirect evaporative natural cooling air conditioning system

系统模式选择	系统模式切换逻辑
干模式(空气/空气换热)	干球温度 $\leq 21^{\circ}\text{C}$
湿模式(风侧间接蒸发冷却)	干球温度 $> 21^{\circ}\text{C}$ 且湿球温度 $\leq 21^{\circ}\text{C}$
耦合模式(蒸发冷却+机械制冷)	干球温度 $> 21^{\circ}\text{C}$ 且湿球温度 $> 21^{\circ}\text{C}$ 或者露点温度 $> 17^{\circ}\text{C}$

在送风 25°C 的条件下, 确定风侧间接蒸发自然冷却空调系统模式切换参数点。当室外环境干球温度低于 21°C 时, 为风侧间接蒸发自然冷却空调系统的干运行模式, 如图 5 (a) 所示。此时空调系统通过冷却器空气/空气换热, 为数据中心排热。

当室外环境温度升高干球温度高于 21°C 时, 只是靠空气/空气换热已经无法保证数据中心的有效排热, 此时对换热器的室外侧进行喷淋水, 空调系统切换到湿运行模式即间接蒸发冷却运行模式, 如图 5 (b) 所示。当室外环境温度继续升高, 环境湿球温度高于 21°C 时, 此时通过间接蒸发冷却换热也仍然无法进行有效排热的时候, 开启机械制冷, 运行间接蒸发冷却与机械制冷耦合运行模式, 如图 5 (c) 所示。冷却器的出风经过蒸发器进一步降低后再送入数据中心内。同时冷却器的排风经过冷凝器带走冷凝热, 提高机械冷源的能效。表 5 为风侧间接蒸发自然冷却空调系统各个运行模式的切换点。

3.2 水侧间接蒸发自然冷却

风侧间接蒸发自然冷却系统中需要通过送风管道将制取的冷风送入数据中心的冷通道内。因此系统的送风管道不宜过长, 也不宜有过多的弯头和拐点。因此风侧间接蒸发自然冷却系统往往适用于仓储式、大平层式数据中心。而实际过程中数据中心的建筑形式是多种多样的, 同时由于风的载冷量远小于水。因此水侧间接蒸发自然冷却系统成为数据中心热环境控制的另一种选择。

如图 6 所示, 为数据中心水侧间接蒸发自然冷却系统示意图。水侧系统的核心设备是间接蒸发冷却冷水机组^[16-18]。当室外环境干球温度低于 3°C 时, 为风侧间接蒸发自然冷却空调系统的干运行模式, 如图 6 (a) 所示。此时空调系统通过表冷器内的防冻冷却介质(例如乙二醇)与室外温度较低的空气换热, 为数据中心排热。当室外环境温度升高, 干球温度高于 3°C 时, 只是靠空气/防冻冷却介质换热已经无法保证数据中心的有效排热, 此时间接蒸发冷却冷水机组开始工作, 空调系统切换到湿运行模式即间接蒸发冷却产出冷水运行模式, 利用间接蒸发冷却冷水机组制取的冷水通过板式换热器为数据中心排热, 如图 6 (b) 所示。当室外环境温度继续升高, 环境湿球温度高于 18°C 时, 此时通过间接蒸发冷却模式也仍然无法进行有效排热的时候, 开启机械制冷冷水机组, 运行间接蒸发冷却与机械制冷耦合运行模式, 如图 6 (c) 所示。机械制冷冷水机组产生的冷水直接提供给数据中心的空调末端, 而间接蒸发冷却冷水机组用以排出机械制冷冷水机组的热量。间接蒸发冷却冷水机组制

取的冷水温度要低于普通冷却塔的出水温度,从而提高整个空调系统的能效。表 6 为水侧间接蒸发自然冷却空调系统各个运行模式的切换点。

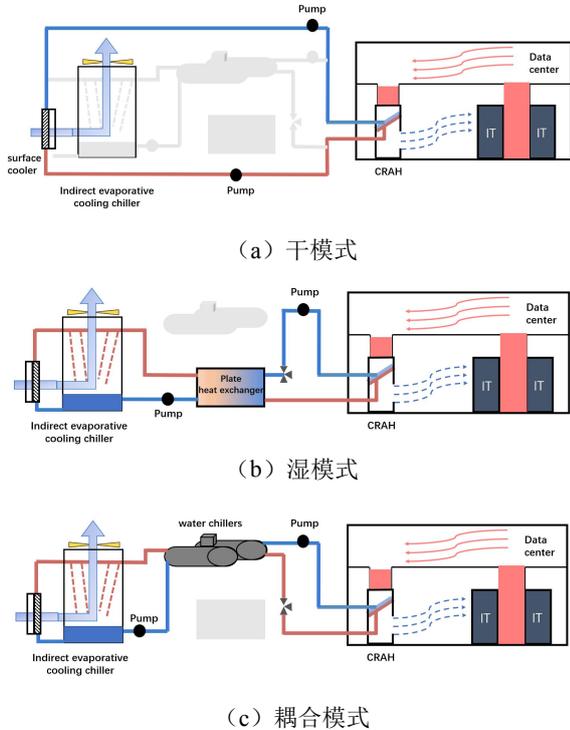


图 6 数据中心水侧间接蒸发自然冷却系统

Fig.6 Data center water side indirect evaporative natural cooling system

表 6 水侧间接蒸发自然冷却模式切换

Table 6 Mode switching of water side indirect evaporative natural cooling air conditioning system

模式选择	系统模式切换逻辑
干模式 (空气/防冻介质换热)	干球温度 $\leq 3^{\circ}\text{C}$
湿模式 (水侧间接蒸发冷却)	干球温度 $> 3^{\circ}\text{C}$ 且湿球温度 $\leq 18^{\circ}\text{C}$
耦合模式 (水侧间接蒸发冷却+机械制冷)	干球温度 $> 3^{\circ}\text{C}$ 且湿球温度 $> 18^{\circ}\text{C}$ 或者露点温度 $> 17^{\circ}\text{C}$

4 自然冷却应用潜力分析

使用《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[19]内的全国各城市的逐时气象参数资料,来分析全国数据中心利用自然冷却的潜力。以陕西省西安市为例,西安市的环境空气干球温度、湿球温度、露点温度的全年分部情况如图 7 所示。西安市干球温度最高在 $37^{\circ}\text{C}\sim 38^{\circ}\text{C}$ 之间,全年仅 5 个小时。西

安市干球温度最低在 $-7^{\circ}\text{C}\sim -6^{\circ}\text{C}$ 之间,全年一共 18 个小时。而处于 $18^{\circ}\text{C}\sim 19^{\circ}\text{C}$ 区间小时数最多,全年达到 324 小时。西安市湿球温度最高在 $27^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 之间,全年仅 4 个小时。西安市湿球温度最低在 $-8^{\circ}\text{C}\sim -9^{\circ}\text{C}$ 之间,全年一共 12 个小时。湿球温度处于 $16^{\circ}\text{C}\sim 17^{\circ}\text{C}$ 之间小时数最多,全年一共 423 个小时。露点温度方面,西安市全年一共有 1929 个小时,露点温度高于 17°C 。此时需考虑对空气进行除湿处理。

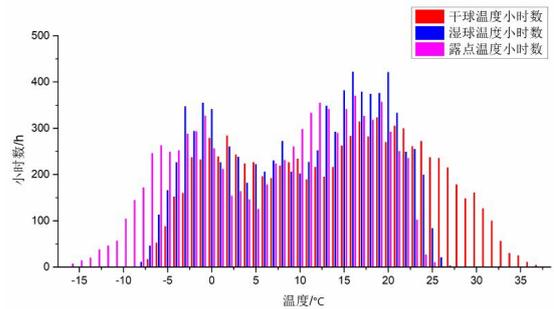


图 7 环境空气干球温度、湿球温度、露点温度全年分布

Fig.7 Ambient air dry bulb temperature, wet bulb temperature, dew point temperature distribution throughout the year

按照表 5 提出的风侧空调系统模式切换点,统计风侧间接蒸发自然冷却系统在西安地区的全面运行时间分布,如图 8 所示。风侧间接蒸发自然冷却系统,全年有 6077 个小时处于干模式,占全年小时数的 69.37%;全年有 1577 个小时处于湿模式,占全年小时数的 18.00%;全年有 1106 个小时处于蒸发冷却与机械制冷的耦合模式,占全年小时数的 12.63%。风侧系统全年一共有 87.37%的时间处于低能耗的运行模式。

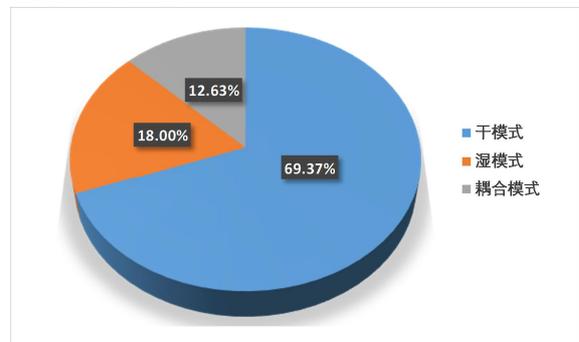


图 8 风侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间

Fig.8 Annual operating hours of the air side indirect evaporative natural cooling system

按照表 6 提出的系统模式切换点, 统计水侧间接蒸发自然冷却系统在西安地区的全面运行时间分布如图 9 所示。水侧间接蒸发自然冷却系统, 全年有 1777 个小时处于干模式, 占全年小时数的 20.29%; 全年有 4707 个小时处于间接蒸发冷却产出冷水的湿模式, 占全年小时数的 53.73%; 全年有 2276 个小时处于间接蒸发冷却冷水机组与机械制冷冷水机组联合工作的耦合模式, 占全年小时数的 25.98%。由此可见, 如果使用水侧间接蒸发自然冷却系统, 湿模式下水侧系统全年运行时间远超过风侧系统湿模式运行时间。水侧系统全年一共有 74.02%的时间处于低能耗的运行模式。

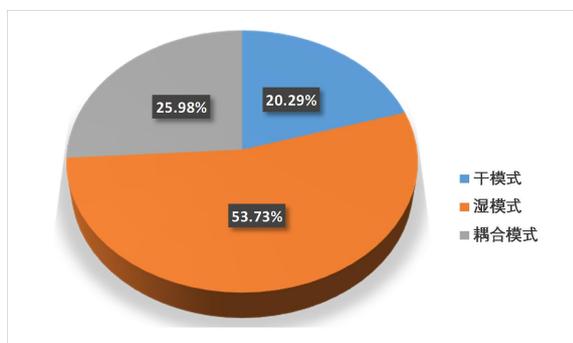


图 9 水侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间

Fig.9 Annual operating hours of the water side indirect evaporative natural cooling system

4.1 风侧间接蒸发自然冷却应用潜力

选择全国 31 个主要的中心城市, 分别统计风侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间, 如图 10 所示。全国 31 个中心城市中, 风侧间接蒸发自然冷却系统, 拉萨市的风侧系统干工况模式运行时间最长为 8365 个小时。风侧系统干工况模式运行时间最短的是海口市, 全年仅为 2317 个小时。湿工况模式运行最长的城市是南宁市, 全年有 3037 个小时间接蒸发冷却模式工作。湿工况模式运行最短的城市是拉萨市, 全年仅 136 个小时间接蒸发冷却模式工作。风侧系统, 间接蒸发冷却与机械制冷联合工作的耦合模式运行时间最长的城市是海口市, 全年中必须有 5475 小时开启机械制冷系统。值得一提的是, 乌鲁木齐市和兰州市全年系统开启机械制冷的时间仅为 6 个小时和 2 个小时, 西宁市、拉萨市和昆明市中, 全年甚至不需要开启机械冷源。在这些地区, 使用风侧间接蒸发自然冷却空调系统, 即可以充分保障数据中心的热环境。

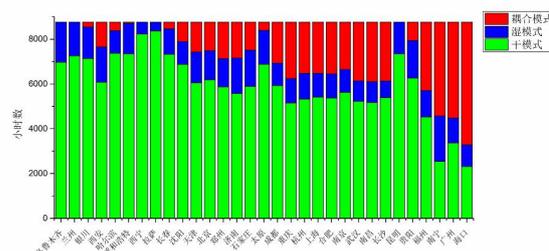


图 10 风侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间

Fig.10 Annual operating hours of the air side indirect evaporative natural cooling system

4.2 水侧间接蒸发自然冷却应用潜力

选择全国主要的 31 个中心城市, 分别统计水侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间, 统计结果如图 11 所示。全国 31 个中心城市中, 水侧间接蒸发自然冷却系统, 哈尔滨市的水侧系统干工况模式运行时间最长为 3983 个小时。有多个城市水侧系统干工况模式运行时间较短, 其中重庆市全年仅运行 5 个小时。甚至福州、南宁、广州、海口全年中最低的干球温度均高于 3℃, 即全年都无需开启干模式运行。湿工况模式即间接蒸发冷却产出冷水模式全年运行最长的城市是昆明市, 全年有 7922 个小时。湿工况模式运行最短的城市是海口市, 全年仅 1703 个小时为间接蒸发冷却产出冷水模式工作。水侧系统, 间接蒸发冷却产出冷水与机械制冷冷水机组联合工作的耦合模式运行时间最长的城市是海口市, 全年中必须有 7057 小时开启机械冷源系统。值得一提的是, 西宁市和乌鲁木齐市全年系统开启机械制冷的时间仅为 22 个小时和 43 个小时, 拉萨市, 全年水侧系统甚至不需要开启机械冷源。在这些地区, 使用水侧间接蒸发自然冷却空调系统, 也可以充分保障数据中心的热环境。

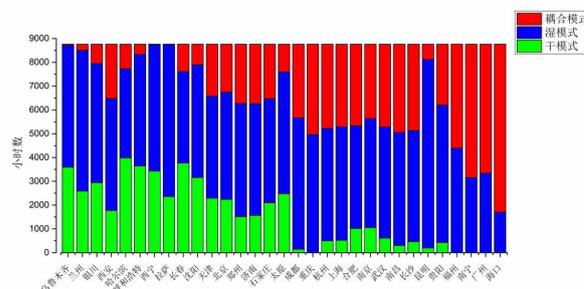


图 11 水侧间接蒸发自然冷却系统全年运行时间

Fig.11 Annual operating hours of the water side indirect evaporative natural cooling system

通过分析这些主要城市的系统全年运行时间发现,水侧间接蒸发自然冷却空调系统更适合用在中国北方地区。即水侧系统空气/防冻冷却介质的换热模式,可以很好地解决冬季水侧系统结冰无法使用的难题。而间接蒸发冷却冷水机组可以产出低于环境空气湿球温度的冷水,相比于冷却塔,大大扩展了蒸发冷却冷水设备的应用范围和时间。

5 结论

(1) 首先针对使用“China Free Cooling Tool”工具制作的基于ASHRAE最新标准的推荐值、A2等级、A3等级参数范围的中国自然冷却地图进行分析,直观地表明随着数据中心送风标准要求的放宽,数据中心可应用自然冷却的范围在逐步扩大。

(2) 分别对风侧间接蒸发自然冷却空调系统和水侧间接蒸发自然冷却空调系统的工作原理、系统模式切换、运行逻辑以及切换环境参数状态点进行了分析。

(3) 在给定的切换环境参数状态点的基础上,分别统计全国31个主要城市的系统全年运行时间分布。结果表明,在西宁、拉萨、昆明等城市,风侧系统全年不需要开启机械制冷冷源,即可以满足运行要求。在西宁、拉萨、乌鲁木齐等城市,水侧系统全年不需要开启机械制冷冷源,即可以满足运行要求。通过分析指出,随着国际标准和国内标准中对于数据中心的进风状态参数的逐步放宽,风侧间接蒸发自然冷却空调系统和水侧间接蒸发自然冷却空调系统在中国数据中心中具有较大的适用性。

参考文献:

- [1] 中国信息通信研究院.中国互联网行业发展态势暨景气指数报告(2019)[R].2019.
- [2] GREENPEACE,华北电力大学.点亮绿色云端:中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究[R].2019.
- [3] 耿志超,黄翔,折建利,等.间接蒸发冷却空调系统在国内外数据中心的应用[J].制冷与空调,2017,31(5):527-532.
- [4] Ham S W, Kim M H, Choi B N, et al. Energy saving potential of various air-side economizers in a modular data center[J]. Applied energy, 2015,138:258-275.
- [5] Bi Y, Wang Y, Ma X, et al. Investigation on the energy saving potential of using a novel dew point cooling system in data centers[J]. Energies, 2017,10(11):1732.
- [6] 冯潇潇,谢晓云.间接蒸发冷却技术在数据中心中的应用[D].北京:清华大学,2017.
- [7] 郭志成.新疆某数据中心自然冷却空调系统的应用研究[D].西安:西安工程大学,2019.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Guidelines for Data Processing Environments[M]. ASHRAE, 2004.
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Guidelines for Data Processing Environments[M]. ASHRAE, 2008.
- [10] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Guidelines for Data Processing Environments[M]. ASHRAE, 2011.
- [11] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Guidelines for Data Processing Environments[M]. ASHRAE, 2015.
- [12] GB 50174-2008,电子信息系统机房设计规范[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [13] GB 50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [14] TCECS 487-2017,数据中心制冷与空调设计标准[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [15] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE HANDBOOK HVAC APPLICATIONS[M]. ASHRAE, 2015.
- [16] Jiang Y, Xie X. Theoretical and testing performance of an innovative indirect evaporative chiller[J]. Solar Energy, 2010,84(12):2041-2055.
- [17] Xie X, Jiang Y. An indirect evaporative chiller[J]. Frontiers in Energy, 2010,4(1):66-76.
- [18] Xie X, Jiang Y. Comparison of Two Kinds of Indirect Evaporative Cooling System: To Produce Cold Water and To Produce Cooling Air[J]. Procedia Engineering, 2015,121:881-890.
- [19] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.