

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-547-05

重庆某数据中心冷却塔冬季供冷能力分析

李佐洋¹ 白雪莲¹ 任 飞¹ 陈飞龙²

(1. 重庆大学土木工程学院 重庆 400045;

2. 重庆云投信息技术有限公司 重庆 400714)

【摘 要】 自然冷却技术的合理利用能够大大降低数据中心能耗, 然而良好效果的实现需要充分考虑室外气象条件和冷却塔换热能力的变化。对重庆某数据中心的现场实测表明: 应用冷却塔对该数据中心进行自然冷却一天可节能 7990kWh, 节能率为 8.05%; 该数据中心冷却塔存在冬季供冷能力不足问题, 应用完全自然冷却时其最大制冷量仅为额定制冷量的 50%左右, 需要额外增开系统数量才能保证末端需求; 最后从设计和运行两个方面提出了相应的解决方案。

【关键词】 数据中心; 冷却塔; 自然冷却; 供冷能力; 节能

中图分类号 TB69 文献标识码 A

Winter Cooling Capacity of Cooling Tower for Data Centers in Chongqing

Li Zuoyang¹ Bai Xuelian¹ Ren Fei¹ Chen Feilong²

(1. School of Civil Engineering Chongqing University, Chongqing, 400045;

2. Chongqing Yuntou Information Technology Co., Ltd, 400714)

【Abstract】 The rational use of natural cooling technology can greatly reduce the energy consumption of the data centers, but the realization of good effects needs to fully consider the changes of outdoor meteorological conditions and heat transfer capacity of cooling towers. The field measurement of a data center in Chongqing shows: the application of water-side free cooling can save 7990 kWh a day and the energy saving rate is 8.05%; the cooling capacity of cooling tower is insufficient in winter, and the maximum cooling capacity of the cooling tower is only about 50% of the rated cooling capacity in winter so that it is necessary to increase the number of systems to meet the terminal requirements; Finally, the corresponding solutions are put forward from two aspects of design and operation.

【Keywords】 data center; cooling tower; free cooling; cooling capacity; energy-saving

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项, “重庆地区数据中心自然冷却及其配套技术措施研发及应用”

(编号: cstc2020jscx-msxmX0184)

作者简介: 李佐洋 (1999.6-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1346782695@qq.com

通信作者: 白雪莲 (1973.10-), 教授, 博士生导师, E-mail: xuelianbai@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-17

0 引言

数据中心是高能耗设施, 有研究推算, 数据中心的全球用电量将从 2010 年的 238 太瓦时/年增加到 2030 年的 2967 太瓦时/年, 占全球电力供应的 19%^[1]。数据中心能耗主要由 IT 设备能耗、空调系统能耗及其他辅助系统能耗构成, 一般的, IT

设备能耗和空调系统能耗分别占数据中心总能耗的 45%和 40%^[2], 如何降低空调能耗是数据中心高效节能运行的关键。

由于数据中心具有全年供冷的特点, 所以在冬季或过渡季节利用自然冷却能够实现良好的节能效果^[3]。自然冷却技术在数据中心的适用性与数据

中心所在地的实际气候特点息息相关,对于室外空气湿球温度较低的地区,冷却塔完全可以满足数据中心的冷却要求^[4]。Dong 等人采用开式冷却塔对某数据中心进行自然冷却,节能率达到 19.2%^[5]。不过值得注意的是,数据中心冷却塔自然冷却技术能否最大程度地利用与系统形式、参数设定等众多因素有关^[6],在实际应用时需要充分考虑室外气象条件和冷却塔换热能力的变化。本文针对重庆某数据中心,通过现场实测来研究冷却塔在冬季的实际供冷能力,发现该技术应用中现存的一些问题,为冷却塔供冷的设计和运行提供参考。

1 现场实测

1.1 工程概况

该数据中心位于重庆市,建筑包括机房楼和动力楼,总建筑面积 20990.34m²,空调设计冷负荷 12289kW。机房楼共设置 10 个 IT 机房模块,共有机柜 2098 个。空调末端采用房间级空调的送风方式,机柜按冷热通道形式布置,冷冻水设计供、回水温度为 12/18℃。采用集中式水冷冷冻水空调系统,冷冻站有 3 台螺杆式冷水机组,4 台离心式冷水机组,每台冷水机组连接一台板式换热器,板换温差为 2℃,冷却塔参数如表 1 所示。

表 1 冷却塔相关参数

Table 1 Relevant parameters of cooling tower

设备名称	主要性能参数
螺杆式系统 冷却塔	冷却水量 365m ³ /h, 风机定频, 功率 5.5kW×3, 1 用 2 备
离心式系统 冷却塔	冷却水量 755m ³ /h, 风机定频, 功率 5.5kW×3 加 7.5kW, 4 用 0 备

1.2 冷却塔供冷系统形式

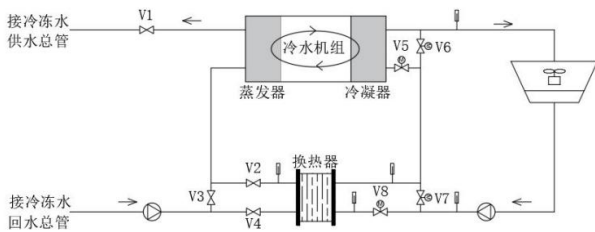


图 1 冷却塔自然冷却原理图

Fig.1 Free cooling principle of cooling towers

根据冷却塔冷却水循环管路与空调末端冷水循环管路是否连通分为冷却塔直接供冷系统和冷却塔间接供冷系统^[7]。该数据中心采用的为开式冷却

塔加板式换热器间接供冷的系统形式,运行原理如图 1 所示。针对变化的室外环境条件,相应的可以分为 3 种运行工况,不同工况的阀门开闭情况如表 2 所示。

表 2 不同工况阀门开闭情况

Table 2 Valve opening and closing under different working conditions

工况 \ 阀门	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
机械制冷	开	关	开	关	开	关	开	关
完全自然冷却	开	开	关	开	关	开	关	开
部分自然冷却	开	开	关	开	调节	调节	关	开

1.3 测试方法

本次现场实测时间为 2018 年 12 月至 2019 年 1 月,测试工况包括机械制冷工况和与自然冷却工况,测试内容主要分为能耗测试以及空调系统参数测试。该数据中心自带电力监控系统和 BA (Building Automation) 系统。电力监控系统可对数据中心各项能耗数据进行逐时监控。BA 系统可对空调系统各项参数以及室外空气温湿度进行监控。冷水机组冷却水流量通过现场安装超声波流量计测得,相关测试仪器具体参数如表 3 所示。

表 3 测试仪器性能参数

Table 3 Performance parameters of testing instruments

仪器名称	测试参数	型号	量程	精度
超声波流量计	冷却水流量	DCT1288i	流速范围: ±0.01~±12m/s	±0.5%
插入式电磁流量计	冷冻水流量	本特万达	0m ³ /h~2543m ³ /h	±2%
温度传感器	温度	Thermistor TBTI	-40℃~+110℃	-

2 测试结果

2.1 冷却塔供冷技术节能量分析

数据中心能耗主要包括 IT 设备能耗、空调系统能耗及其他辅助系统能耗,其他辅助系统主要包括电力系统和照明, P_t 可以用式 (1) 表示:

$$P_t = P_{IT} + P_{HVAC} + P_F \quad (1)$$

式中, P_i 为数据中心总能耗, kWh; P_{IT} 为 IT 设备总能耗, kWh; P_{HVAC} 为空调系统总耗电量, kWh; P_F 为辅助系统总耗电量, kWh。

表 4 统计了该数据中心在不同工况下的日能耗数据, 其中机械制冷工况下的总能耗为 99237kWh, 而完全自然冷却的总能耗为 91247kWh, 每天节能量为 7990kWh。数据中心所需的制冷量绝大部分来自于 IT 设备发热量, 可近似将 IT 设备耗电量大小视为空调系统冷负荷, 根据表 4 中 IT 设备能耗可计算得出自然冷却前后的日累计冷负荷之差为 0.013%, 另外测试期间室外工况接近一致, 可进一步计算节能率为 8.05%。可见, 应用冷却塔供冷能够有效地降低空调系统能耗。根据表 5

的各设备功率数据可计算出, 冷水机组在空调系统能耗为 56%, 占比最大, 完全自然冷却工况下冷水机组停用, 达到很好的节能效果。

表 4 相似日不同工况下数据中心能耗

Table 4 Data center energy consumption under similar days and different working conditions

工况	总能耗 (kWh)	IT 设备能耗 (kWh)	空调系统能耗 (kWh)	其他能耗 (kWh)
完全自然冷却	91247	62395	16632	12220
机械制冷	99237	62478	25045	11705

表 5 机械制冷工况下空调系统各设备功率

Table 5 Power of each equipment in air conditioning system under mechanical refrigeration condition

系统	设备	冷水机组	冷冻水一次泵	冷冻水二次泵	冷却水泵	冷却塔	机房空调
螺杆系统	功率 (kW)	226	22	/	49	16	/
离心系统		469	42	/	78	22	/
总功率		695	64	40	127	38	273

2.2 空调系统参数测试结果分析

图 2 表示了离心式系统应用部分自然冷却工况时板式换热器两侧的进出水温度随时间的变化趋势。可见, 冷却塔出水温度随时间在不断升高, 甚至超过了冷冻水回水温度, 此时冷却水不能对冷冻水回水进行预冷, 部分自然冷却无法应用。测试期间冷却塔在各工况下提供的冷量以及相关空调参数如表 6 所示。可见, 完全自然冷却工况下单套系统冷却塔实际提供的冷量远远小于其额定制冷量, 螺杆式系统冷却塔提供的冷量仅占额定制冷量的 49.6%, 离心式系统为 42.6%, 并且与机械制冷工况相比, 单套系统冷却塔所能提供的冷量也变小, 需要增开系统数量才能保证末端需求。可见, 冷却

塔在冬季存在供冷能力不足问题。

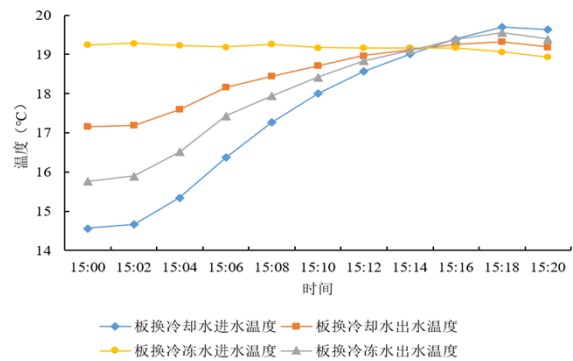


图 2 部分自然冷却工况下板式换热器两侧流体温度
Fig.2 Fluid temperature on both sides of plate heat exchanger under partial free cooling conditions

表 6 各工况下的冷却塔实际提供冷量及相关空调参数

Table 6 Actual cooling capacity provided by cooling tower s and related air conditioning parameters under different condition

系统	工况	螺杆式系统			离心式系统		
		额定工况	机械制冷	完全自然冷却	额定工况	机械制冷	完全自然冷却
冷冻水供水温度 (°C)		12	12	13	12	12	14
冷冻水回水温度 (°C)		18	16	18	18	16	18
冷却水供水温度 (°C)		32	25	12	32	21.5	13

续表 6 各工况下的冷却塔实际提供冷量及相关空调参数

系统	螺杆式系统			离心式系统		
冷却水回水温度 (°C)	37	28	15	37	25.5	16
冷却水流量 (m³/h)	365	388	302	755	560	536
冷却塔提供冷量 (kW)	2129	1358	1057	4404	2613	1876

3 讨论

3.1 冷却塔冬夏供冷能力分析

该数据中心冷却塔均按夏季工况所选型,而冷却塔供冷往往是在冬季使用,这导致了冬季冷却塔的供冷能力不足。如图 3 所示, A1 (温度 6°C, 湿球温度 2.9°C), W1 (温度 11°C) 代表冬季完全自然冷却设计工况点; A2 (温度 27°C, 湿球温度 21.1°C), W2 (温度 32°C) 代表夏季机械制冷工况设计工况点, A1、W1 之间的温差与 A2、W2 之间温差相同,冷却塔在两种工况下的对流传热量相等,但 W2、A2 的水蒸气分压力之差明显大于 W1、A1 的水蒸气分压力之差 (即 $\Delta P_2 > \Delta P_1$), 导致冬季冷却塔的蒸发传热量低于夏季, 最终导致冷却塔散热量变小。当冬季应用机械制冷工况时, 可通过提高冷却塔出水温度的方式增大冷却塔散热量 (见图 3 中 W1' 点)。

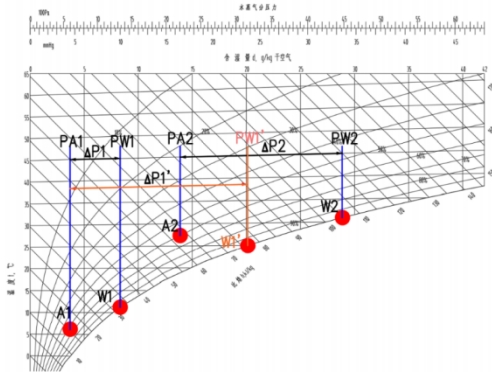


图 3 冷却塔冬夏季蒸发散热水蒸气分压力差对比

Fig.3 The differential pressure of water vapor under cooling tower evaporative cooling

3.2 改进技术措施

冷却塔的散热过程实质上就是空气和水的湿热传递过程, 文献[10]利用前苏联学者提出的四变量模型, 通过 MATLAB 编程计算求解得到到冷却塔热湿传递模型, 并利用相对冷却量 β (见式 (2)) 评价冷却塔实际冷却能力接近额定工况的程度。

$$\beta = Q/Q_1 \quad (2)$$

式中, β 为冷却塔的相对冷却量, %; Q_1 为冷

却塔额定工况条件下的制冷量, kW; Q 为冷却塔实际工况条件下的制冷量, kW。

图 4 为笔者利用冷却塔热湿传递模型, 得到冷却塔进口水温为 18°C, 室外空气湿球温度分别为 7、9、11°C 时, 冷却塔的相对冷却量 β 随水气比 μ 的变化曲线, 其中水气比 μ 的定义式见式 (3)。

$$\mu = W/G \quad (3)$$

式中, μ 为进入冷却塔的循环水和干空气的质量比; W 为冷却塔循环水的质量流量, kg/s; G 为进入冷却塔干空气的质量流量, kg/s。

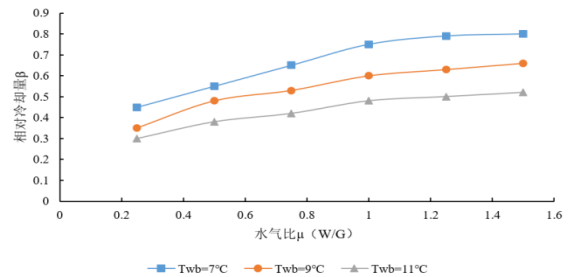


图 4 冷却塔相对冷却量与水气比的关系

Fig.4 Relationship of cooling tower relative cooling capacity and its water air ratio

测试期间室外空气湿球温度与 7°C 最为接近, 选择图 4 中 $T_{wb}=7^\circ\text{C}$ 曲线, 可得到离心式系统和螺杆式系统冷却塔在应用完全自然冷却工况时的最大制冷量分别为 2018kW 和 975kW, 计算结果见表 7。

表 7 冷却塔冬季供冷能力与额定制冷量对比

Table 7 Comparison between cooling capacity and rated cooling capacity of cooling tower in winter

分类	水泵额定/ 计算风 实测流量 量 (m³/h)	水气 相对冷 比 μ 却量 β	最大制 额定制 冷量 冷量 (kW) (kW)
离心式 系统冷 却塔	545/536 1263	0.42 0.55	2018 4404
螺杆式 系统冷 却塔	325/302 714	0.42 0.55	975 2129

根据计算结果, 冬季冷却塔应用完全自然冷却工况时的最大制冷量仅为额定制冷量的 50% 左右, 冷却塔在冬季存在着供冷能力不足的问题, 该问题有两条思路: 其一是在运行时可以通过加开系统设备数量, 但这样会带来额外的输配系统能耗, 削弱节能效果。其二是在设计时避免该问题, 确定系统供冷量后, 对冷却塔按照冬季自然冷却工况选型, 同时对夏季极端湿球温度进行校核, 但这样会带来整个系统初投资的增加; 另外 IT 设备一般是逐步上架, 大部分数据中心在长时间内都有空闲设备, 故在管网设计时可以考虑“一机多塔”的形式, 即一台冷水机组连接多组冷却塔, 这样可以充分利用冗余的设备来进行自然冷却。

4 结论

笔者针对重庆某数据中心, 通过现场实测来研究冷却塔在冬季的实际供冷能力, 量化了冷却塔供冷技术在该数据中心的节能效果, 分析了该技术在应用中存在的问题并提出了相应的改进措施, 结论如下:

(1) 通过对重庆某数据中心的实测发现, 对比机械制冷工况, 完全自然冷却工况下一天的总节能量为 7990kWh, 节能率为 8.05%。

(2) 冷却塔在冬季存在供冷能力不足问题, 应用完全自然冷却时其最大制冷量仅为额定制冷量的 50% 左右, 需要额外增开系统数量来保证末端需求。

(3) 针对冬季冷却塔供冷能力不足的问题提出: 在运行方面加开系统设备数量来满足末端要求, 在设计方面对冷却塔按照冬季自然冷却工况选型

并对夏季极端湿球温度进行校核。

参考文献:

- [1] A S G Andrae, T Edler. On global electricity usage of communication technology: trends to 2030[J]. 2015,6: 117-157.
- [2] 中国制冷协会数据中心冷却组组织编写. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2017[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] Harvey T, P M Bean J. Updated air-side ree cooling maps: the impact of ASHRAE 2011 allowable ranges[R]. The Green Grid, 2012.
- [4] Lui Y Y. Waterside and Airside Economizers Design Considerations for Data Center Facilities[J]. ASHRAE Transactions, 2010,116(1):98-108.
- [5] K Dong, P Li, Z Huang, et al. Research on free cooling of data centers by using indirect cooling of open cooling tower, Procedia Eng, 2017,205:2831-2838.
- [6] Stein J. Waterside economizing in data centers: Design and control considerations[J]. ASHRAE Transactions, 2009,115(2):192-200.
- [7] 钟克承, 夏春华. 严寒地区数据中心冷却塔供冷空调系统不同模式下的节能分析[J]. 暖通空调, 2016,46(10): 5-8.
- [8] Grid T G. The green grid data center power efficiency metrics: PUE and DCiE[R]. The Green Grid, 2007.
- [9] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 90.4-2016, Energy standard for Data Centers[S]. Atlanta GA, 2016.
- [10] 胡桂霞. 冷却塔全年热湿交换特性及适宜条件研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.

(上接第 546 页)

- [4] 何琨, 孙玉浩. 基于 Phoenics 的教室火灾模拟研究[J]. 湖南文理学院学报, 2017,29(3):43-47.
- [5] 孙强. 武汉火神山医院风环境模拟及对防疫工作规划分析响应[J]. 华西医学, 2020,35(3):274-279.
- [6] 惠大好, 狄育慧. 基于 phoenics 在大学教室通风效果的

模拟分析[J]. 制冷与空调, 2021,35(1):78-81.

- [7] 张梓霆, 周春玲. 基于 PHOENICS 软件模拟的医院室外风环境优化[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2021, 38(1):50-56.
- [8] 薛若军, 王革, 唐强. 风口布置对病房内飞沫扩散影响的数值模拟[J]. 洁净与空调技术, 2008,6(2):7-12.