

## 济南某基站自然冷源降温系统实验研究\*

牛琳<sup>1</sup>, 王显龙<sup>2†</sup>, 李华山<sup>2</sup>, 廉永旺<sup>2</sup>, 卜宪标<sup>2</sup>, 王令宝<sup>2</sup>, 陶寿松<sup>3</sup>

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司山东分公司, 济南 250101; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;

3. 宝武集团广东韶关钢铁有限公司, 广东 韶关 512000)

**摘要:**近年来,随着IT行业的快速发展,通信基站空调系统能耗急剧增大。与传统蒸汽压缩式空调系统相比,自然冷源降温技术耗电量小、节能效果显著。本文针对在济南某基站采用自然冷源替代传统蒸汽压缩式空调用于机房降温的可行性进行了分析。结果表明,测试周期内,在4℃温差的自控启动条件下,降温主机的平均能效比可以达到12.78左右,且随着环境温度的降低,室内外温差、主机供冷率和阶段平均能效比均呈增大趋势。此外,通过对测试数据的回归拟合,给出了主机供冷率与室内外温差以及环境温度的经验关联式。实验结果表明,自然冷源降温是一种值得推广的机房节能技术。

**关键词:**自然冷源; 基站; 能效比; 节能

**中图分类号:** TK01      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.06.011

## Experiment Study on Free Cooling System with Temperature Decreasing of Communication Base Station in Jinan

NIU Lin<sup>1</sup>, WANG Xian-long<sup>2</sup>, LI Hua-shan<sup>2</sup>, LIAN Yong-wang<sup>2</sup>,  
BU Xian-Biao<sup>2</sup>, WANG Ling-Bao<sup>2</sup>, TAO Shou-song<sup>3</sup>

(1. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd. Shandong branch, Jinan 250101, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Shaoguan Steel Co., Ltd., Guangdong Shaoguan 512000, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of IT industry, the energy consumption of air conditioning system in telecommunication base stations has increased dramatically. Compared with the traditional vapor compression air conditioning system, the free cooling technology has advantages in relative smaller electricity consumption and remarkable energy-saving. In this paper, the feasibility of using free cooling unit instead of traditional vapor compression air conditioning systems for room cooling in one of base stations is analyzed in Jinan. The results show that, in the testing period, under the condition of automatic temperature control at 4°C, the average EER of the cooling unit can reach about 12.78; with ambient temperature decreasing, the indoor and outdoor temperature difference, cooling unit power output and stage average EER are increased. In addition, through the test data regression, a fitting correlation between the cooling unit power output, indoor and outdoor temperature difference and ambient temperature is also given. The experimental results show the free cooling technology is worthy of promotion in the field of base station energy saving.

**Key words:** free cooling; base station; EER; energy saving

## 0 引言

随着通讯、计算机行业及大数据中心领域的迅猛发展,机房数量和内部设备电耗也迅速增加<sup>[1-2]</sup>。截至2016年,我国已建成的基站数量超过400万个,每年耗电超过千亿 kW·h,美国有2%左右的电耗用

于数据中心供电,其中机房降温是其主要耗电部分之一<sup>[3-5]</sup>,在某些机房耗电占比甚至超过一半。

现阶段,机房降温节能已经成为行业关注的热点。NI等<sup>[6]</sup>对100个数据中心空调运行进行分析,认为应该对IDC空调系统出台标准,减少PUE值。GAO等<sup>[7]</sup>对IBM数据中心的冷却模式和不同工

\* 收稿日期: 2017-05-04      修订日期: 2017-11-11

基金项目: 广东省重大科技专项项目(2013A011405001, 2012A010800024, 2013A011404007); 广东省科技计划项目(2013B010405013, 2013B091500026); 广东省自然科学基金项目(2015A030313714)

† 通信作者: 王显龙, E-mail: wangxl@ms.giec.ac.cn

况进行了实验测试和模拟,指出水冷方式更加节能。KIM 等<sup>[8]</sup>提出干燥冷却耦合的方式进行降温并进行模拟计算。FAKHIM 等<sup>[9]</sup>认为数据中心内部温度场和流场的不均匀性会导致制冷能耗增加,并进行了实际测试。这些研究多为传统的空调降温方向。

近年来,自然冷源降温已成为机房节能的重要研究方向。HASSAN 等<sup>[10]</sup>基于伊斯兰堡的气象条件分析指出在1、2、12月份的自然冷源降温节能效果显著。TUOMO 等<sup>[11]</sup>对兼用太阳能和自然冷源降温两种节能模式的矛盾统一之处进行分析。梁利霞等<sup>[12]</sup>对几种包括兼用自然冷源的制冷模式进行模拟分析,指出水冷和用泵驱动自然冷源的联合制冷模式运行经济性更好。马松<sup>[13]</sup>分析了直接引入新风的降温模式经济性并进行对比计算。吕继祥等<sup>[14]</sup>对基于四个不同维度的典型城市气象数据的数据中心的三种不同制冷模式能耗进行对比分析。机房应用自然冷源降温以理论模拟为主,实际应用案例少,特别是针对已建机房自然冷源降温技术应用更加少见。

表1 实验设备和测试仪器

Table 1 Experiment equipment and testing instruments

名称	型号	厂家	参数
降温主机	FC-0105	定制	双风扇隔离换热
风速仪	DT-619	CEM	0.40~30.00 m/s, 精度 0.01m/s
无纸记录仪	HX3100	广州汉川仪器仪表有限公司	精度 0.2FS%
单相电子式电能表	DDS889	山东鲁正电子有限公司	准确度等级 2

测试过程中,降温主机采用定频风机进行通风换热,控制模式分为自动和手动两种,其中自动模式的控制参数为温差和室温(启动标准可调),为得到更全面的测试数据,测试采用手动全天候运行模式。无纸记录仪测温间隔为1 min。

## 1.2 测试过程

将通风管道与室内空间和室外主机连接,进出口及其他室内室外多个测点分别固定测温热电偶。主机开启后使用风速仪测量进风口不同位置流速并记录,连接电能表对主机耗电进行计量。

## 1.3 数据处理

测试期间降温主机的主要参数指标通过以下公式计算<sup>[15]</sup>:

$$Q_c = \sum W_n \cdot t_{pn} \quad (1)$$

本文通过对已建机房添加自然冷源降温系统,进行实际测试和分析,为其他已建机房的自然冷源制冷提供节能估算依据和设计参考。

## 1 性能测试

### 1.1 设备和仪器

测试地点为山东济南某砖混保温全封闭结构基站,基站机房尺寸约为长7 m、宽3.8 m、高3 m。自然冷源降温主机设备为自行设计和定制加工的样机,通风管道为金属铝板加工而成,主机安装在室外,通过间接换热对室内进行清洁降温。其主要换热原理为:上下两个风机吹过中间隔离的以新型热管为主体的换热器进行换热,当室外温度低于室内温度时,室外冷空气流经换热器上部冷却新型热管内部工质,下部热进风吹过冷工质冷却后重新回到基站内部与内部热空气混合降温。

测温仪器采用无纸记录仪,测温传感器为铜/康铜热电偶,设备和仪器具体参数如表1所示。

$$W_n = C_{pn} (T_{in} - T_{on}) \cdot V_{in} \cdot \rho_{in} \quad (2)$$

$$\Delta T_n = T_{in} - T_{on} \quad (3)$$

$$EER = \frac{Q_c}{Q_{in}} \quad (4)$$

式中, $W_n$ 为测量 $n$ 时刻传入室内的供冷率,kW; $t_{pn}$ 为测量 $n$ 时刻的周期时长,s; $T_{in}$ 、 $T_{on}$ 为 $n$ 时刻主机进出风口的温度,℃; $C_{pn}$ , $n$ 时刻进出口平均温度下空气的平均比热容,kJ/(kg·℃); $V_{in}$ 为 $n$ 时刻主机室内进风平均风量,m<sup>3</sup>/s; $\rho_{in}$ 为 $n$ 时刻主机室内进风密度,kg/m<sup>3</sup>; $Q_c$ 为测试周期内输入室内的冷量,kJ; $\Delta T_n$ 为 $n$ 时刻主机室内进出风温度差,℃; $Q_{in}$ 为测试周期内主机能耗,kJ; $EER$ 为测试周期内主机能效比。

考虑到本次测试期间大部分时段室内温度的变化幅度小于10℃,由此引起空气密度和定压比热容

的变化小于 5%，将计算公式 (2) 中的定压比热容  $C_{pm}$  和密度  $\rho_{in}$  设为定值进行简化计算。

## 2 实验结果分析

对 2016 年 5 月 3 日 14:00 至 5 月 13 日 14:00 共计 240 h 之间的无人干扰情况下的主机运行数据进行测试, 实验和分析结果分别如图 1、图 2 和图 3 所示。对电表测试出的耗电量进行读数后计算发现测试期间降温主机平均功耗为 291 W。

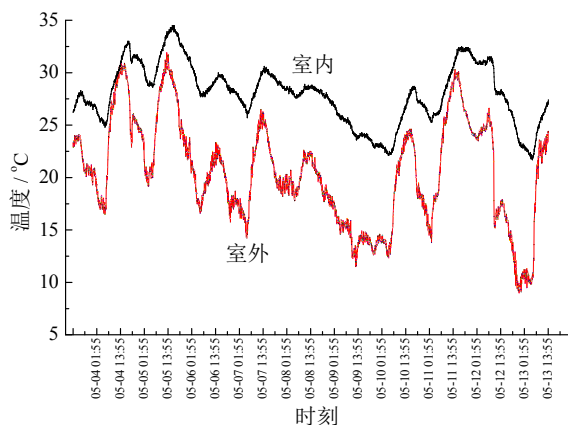


图 1 室内外温度原始数据

Fig. 1 Temperature data of indoor and outdoor

由图 1 可以看出, 在测试期间降温设备常开状态下, 同一时刻室外温度低于室内温度。室内出风口温度始终低于进风口温度, 说明无论室外温度高低主机始终向室内输入冷量。室内温度波动规律基本与室外温度变化一致, 测试期间大部分时段室内温度大于 25℃, 在室外温度低于 10℃的天气时, 室内温度也大于 20℃。

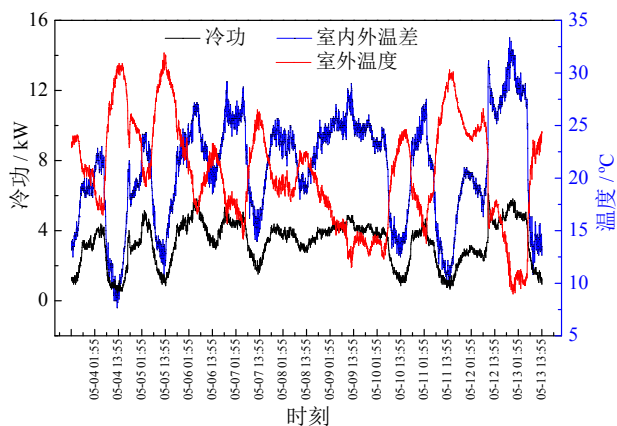


图 2 供冷率与室外温度变化图

Fig. 2 Variation curves of cooling power and outdoor temperature

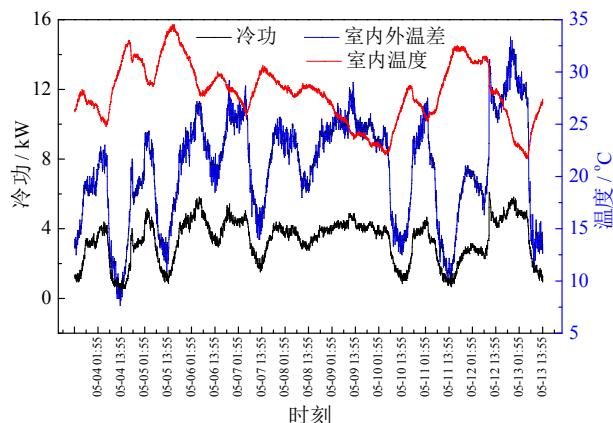


图 3 供冷率与室内温度变化图

Fig. 3 Variation curves of cooling power and indoor temperature

对图 2、图 3 中的数据进行分析后发现, 输入的供冷率与室内外温差曲线之间具有相似变化趋势, 对二者进行拟合后得到以下公式。

$$W_n = 0.3952 \times \Delta T_{an} + 0.346 \quad (\text{拟合度 } R^2=0.9258) \quad (5)$$

$$\Delta T_{an} = T_{in} - T_{an} \quad (6)$$

式中,  $\Delta T_{an}$  为  $n$  时刻室内外温度差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{an}$  为  $n$  时刻室外温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

由式 (5) 可以看出, 降温主机输入的供冷率与室内外温差成正比, 式 (5) 的拟合度超过 0.92, 可将其作为供冷率的精确计算公式在后续的主机设计和模拟中进行应用。

通过对图 2、图 3 中的室内、室外温度与供冷率和温差间的数据进行分析拟合, 发现温差、供冷率二者的变化与室内温度之间相关度小, 难以找到对应的适宜拟合公式, 二者与室外温度之间有一定的变化规律。对室外温度与室内外温差和供冷率分别进行拟合, 拟合公式如下:

$$\Delta T_{an} = -0.527T_{an} + 18.153 \quad (R^2=0.7388) \quad (7)$$

$$W_n = -0.2018T_{an} + 7.4379 \quad (R^2=0.6575) \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可以看出, 室内外温差和降温主机供冷率均与室外温度有较大相关度, 其变化规律类似减函数, 即是说随着室外温度的提升, 温差和供冷率均有所降低。其中, 公式 (7) 的斜率绝对值更大, 表明随着室外温度的降低或者增加拟合曲线的室内外温差的变化值大于降温主机供冷率的变化值。

降温主机的自控模式中应用的两个控制参数为室内温度和室内外温差，其中最小温差限为 4℃。通过剔除室内外温差低于 4℃ 的测试数据，模拟本次测试周期内降温主机采用自动控制模式所得到的数据，如图 4 所示。

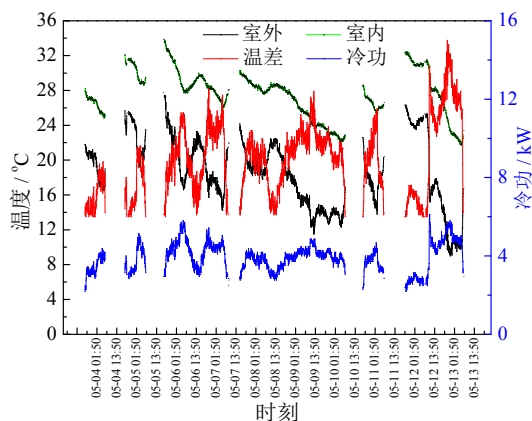


图 4 符合自控要求的测试数据  
Fig. 4 Test data with meeting automatic control conditions

表 2 不同温差带的的数据汇总

Table 2 Data summary of different temperature zone

温差带 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	时长 / h	冷量 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	供冷率 / $\text{kW}$	阶段 EER
$4 \leq \Delta T < 6$	26.34	59.35	2.25	7.74
$6 \leq \Delta T < 8$	52.75	166.33	3.15	10.84
$8 \leq \Delta T < 10$	67.83	272.37	4.02	13.80
$10 \leq \Delta T < 12$	40.25	182.57	4.54	15.59
$12 \leq \Delta T < 14$	9.67	49.04	5.07	17.43
$14 \leq \Delta T$	1.67	9.29	5.57	19.14

表 3 不同温差限的数据汇总

Table 3 Data summary of temperature difference limit

温差限 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	时长 / h	冷量 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	供冷率 / $\text{kW}$	平均 EER
$\Delta T \geq 4$	198.50	738.95	3.72	12.78
$\Delta T \geq 6$	172.17	679.60	3.95	13.57
$\Delta T \geq 8$	119.42	513.26	4.30	14.78
$\Delta T \geq 10$	51.58	240.89	4.67	16.05
$\Delta T \geq 12$	11.33	58.33	5.15	17.70
$\Delta T \geq 14$	1.67	9.29	5.57	19.14

### 3 节能效果分析

基于表 3 中的统计数据，计算测试期间采用自控模式下的降温主机对比采用原有空调系统输入室内同样冷量时的节电量和节电比例，如表 4 所示(其中，原有空调系统计算参数为其额定运行参数；测试期间多数运行时段天气非空调国标测试状况，因此计算结果仅做非精确的对比参考)。

将测试期间符合降温主机自动控制模式要求的数据进行计算分析，对不同室内外温差区间和不同温差限(2℃间隔)的数据进行汇总，对本次测试期间主机符合自控启动条件的时长、输入室内的冷量和供冷率及主机 EER 值进行统计计算，并分别列于表 2 和表 3。

由表 2 可知，不同室内外温差区间的平均 EER 值随着温差数值的增大而提高，当室内外温差从 4~6℃ 区间提高到 14℃ 时(本次测量期间的最大温差)，降温主机 EER 值从 7.74 增大到 19.14，其输入室内的供冷率由 2.25 kW 提高到 5.57 kW。

由表 3 中的数据分析可知，测试周期内降温主机在 4℃ 室内外温差启动的自动控制模式下的全时段平均 EER 为 12.78，其平均供冷率为 3.72 kW。随着启动温差标准的提高，其测试周期内符合条件的运行时长缩短，平均 EER 值和平均供冷率提高，与拟合公式(5)的变化趋势一致。

表 4 不同温差限的节能计算

Table 4 Energy saving data of temperature difference limit

温差限 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	时长 / h	节电量 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	节电率 / %
$\Delta T \geq 4$	198.50	227.55	79.75
$\Delta T \geq 6$	172.17	212.30	80.91
$\Delta T \geq 8$	119.42	163.42	82.46

$$\Delta Q_{\Delta T} = \frac{Q_{\Delta T}}{2.59} - h_{\Delta T} \times 0.291 \quad (9)$$

$$R_{\Delta T} = \frac{259 \times \Delta Q_{\Delta T}}{Q_{\Delta T}} \quad (10)$$

式中,  $\Delta Q_{\Delta T}$  为室内外温差不小于  $\Delta T$  的节电量, kW·h;  $Q_{\Delta T}$  为温差不小于  $\Delta T$  的输入室内的冷量, kW·h;  $h_{\Delta T}$  为温差不小于  $\Delta T$  的时长, h;  $R_{\Delta T}$  为温差不小于  $\Delta T$  的节电率, %; 2.59 为基站原有空调制冷系数; 0.291 为新降温设备的总功率, kW。

联合表 4 和图 4 可知, 本次测试期间大部分时段均符合降温主机的自控要求, 其中室内外温差分别大于 4℃、6℃和 8℃的时长接近测试周期的 82.7%、71.7%和 49.8%, 对比使用原有空调系统符合启动要求的新降温主机输入同样冷量的节能率分别达到 79.75%、80.91%和 82.46%, 节能效果显著。

## 4 结 论

通信行业制冷节能主要措施是提高空调节节能性, 本文设计建造新的无压缩机降温系统, 可在适宜地区以阶段性运行的方式减少基站空调耗电。

对济南已建成运行某基站采用新型自然冷源降温主机进行室内降温, 测试其运行数据并进行分析, 结果表明:

(1) 自行设计加工的主机在 240 h 时长的测试周期内, 温差不小于 4℃的自控模式可启动时长达到全周期的 82.7%, 其平均 EER 达到 12.78, 对比原有空调系统, 其计算节电率达到 79.75%, 节能效果显著。

(2) 采用自然冷源降温技术主机输入室内的供冷率随着室外温度的降低而增大, 表明此技术不仅可以应用在通讯基站, 还可以应用在 IDC、化工厂等常年需要制冷降温的行业, 且更加适用于年平均气温低的地区, 伴随着气温降低其节能效果更好。

## 参考文献:

- [1] EBRAHIMI K, JONES G F, FLEISCHER A S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 31: 622-638. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007.
- [2] C114 中国通信网. 中国前 9 月新增基站 68 万座 总数已达 407.7 万[DB/OL]. (2015-10-22).

- [3] <http://tech.hexun.com/2015-10-22/180027874.html>. 钱存存. 华南地区办公建筑 IDC 机房空调系统优化设计与节能改造方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 1-6.
- [4] ORÓ E, DEPOORTER V, PFLUGRADT N, et al. Overview of direct air free cooling and thermal energy storage potential energy savings in data centres[J]. *Applied thermal engineering*, 2015, 85: 100-110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.001.
- [5] ZHANG H N, SHAO S Q, XU H B, et al. Free cooling of data centers: A review[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, 35: 171-182. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.017.
- [6] NI J C, BAI X L. A review of air conditioning energy performance in data centers[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 67: 625-640. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.050.
- [7] GAO T Y, DAVID M, GEER J, et al. Experimental and numerical dynamic investigation of an energy efficient liquid cooled chiller-less data center test facility[J]. *Energy and buildings*, 2015, 91: 83-96. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.01.028.
- [8] KIM M H, HAM S W, PARK J S, et al. Impact of integrated hot water cooling and desiccant-assisted evaporative cooling systems on energy savings in a data center[J]. *Energy*, 2014, 78: 384-396. DOI: 10.1016/j.energy.2014.10.023.
- [9] FAKHIM B, BEHNIA M, ARMFIELD S W, et al. Cooling solutions in an operational data centre: A case study[J]. *Applied thermal engineering*, 2011, 31(14/15): 2279-2291. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.03.025.
- [10] HASSAN S F, ALI M, SAJID A, et al. Free cooling investigation of SEECs data center[J]. *Energy procedia*, 2015, 75: 1406-1412. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.233.
- [11] MALKĀMAKI T, OVASKA S J. Solar energy and free cooling potential in European data centers[J]. *Procedia computer science*, 2012, 10: 1004-1009. DOI: 10.1016/j.procs.2012.06.138.
- [12] 梁利霞, 刘月琴. 数据中心制冷方案比较分析[J]. *发电与空调*, 2012, 33(5): 83-87. DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-3429.2012.05.024.
- [13] 马松. 利用自然冷源实现机房物理降温[J]. *通信电源技术*, 2014, 33(S): 52-54. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3664.2014.z1.018.
- [14] 吕继祥, 王铁军, 赵丽, 等. 基于自然冷却技术应用的数据中心空调节节能分析[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 113-118. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2016.03.113.
- [15] 弗兰克 P. 英克鲁佩勒, 大卫 P. 德维特, 狄奥多尔 L. 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理: 第 6 版[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 408-442.

## 作者简介:

牛琳 (1984-), 女, 工程师, 主要从事建筑环境与设备工程(暖通)研究。

王显龙 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事节能、余热利用和太阳能热利用方面的技术研究和产品开发。