

制冷技术

Chinese Journal of Refrigeration Technology

ISSN 2095-4468

CN 31-1492/TB

增刊

2024



上海市制冷学会



中国制冷学会

主办



华奕公众号



华奕新能源
HUAYI NEW ENERGY

绿色科技 蒸创未来

[蒸发冷却技术引领企业 数据中心温控节能专家]



华奕新能源制冷解决方案



间接复合机械冷
空调机组



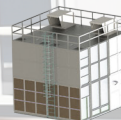
间接蒸发冷却
冷水机组



间接蒸发冷却
水氟换热机组



AI智能控制系统



间接蒸发冷却
一体化集成冷站



可叠加式集装箱
数据中心

增刊备案号: 311492202401
ISSN 2095-4468



9 772095 446247



中国数据中心冷却技术 年度发展研究报告 2023

©中国制冷学会数据中心冷却工作组 组织编写

《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊
 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
 中国期刊全文数据库收录期刊(CJFD)
 中文科技期刊数据库(维普网)全文收录期刊
 万方数据——数字化期刊群收录期刊
 EBSCO 学术数据库收录期刊
 日本科学技术振兴机构数据库(JST)收录期刊
 中国学术期刊文摘收录期刊(CSAC)
 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊(CAJCED)
 超星期刊域出版平台全文收录期刊
 中国科学引文索引(CSCI)数据库收录期刊

目次

■ 《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》(2023版)

刊首语 (1)

数据中心发展进展 陈焕新,
王宜卿, 张丽, 樊超, 张忠斌, 张羽, 许陆顺, 荆华乾 (2)

中小型数据中心冷却系统末端气流组织问题分析和优化
黄冬梅, 郑品迪, 郑竺凌, 韩泽磊, 杨超, 龚红超, 钟志鲲 (20)

中小型数据中心冷却系统节能诊断与改造方案
邵双全, 刘晴晴, 王宁波, 郑竺凌, 吴成斌, 黄翔, 褚俊杰,
周峰, 孙海峰, 姜鏊, 王飞, 李震, 姜宇光, 王泽青, 罗海亮,
李钊, 周文杰, 陈孝元, 陈功林, 赵国君, 张晓宁 (40)

数据中心冷却系统运维技术研究进展
黄贇, 陈强, 葛鸽, 黄璜, 沈佳, 王松利, 陈腾飞, 杨泽业 (76)

中小型数据中心冷却系统优化案例研究进展
..... 黄翔, 郑竺凌, 褚俊杰, 严政, 郑品迪, 田振武,
严锦程, 袁卫星, 夏卫东, 王骞, 周峰, 沈天磊, 姜鏊 (95)

《制冷技术》编委会

顾 问: 金嘉玮
 主 编: 王如竹
 常务副主编: 胡海涛
 副 主 编: 荆华乾
 编 委: (按姓名拼音次序、不分先后)

曹 阳 陈光明 陈焕新 陈江平 成建宏 丁国良
 高屹峰 韩维哲 李 军 刘春慧 刘 华 刘 挺
 马 进 马一太 糜 华 潘云钢 申 江 史初良
 石文星 寿炜炜 王志强 魏文建 喜冠南 谢 晶
 邢子文 徐敬玉 杨 军 杨焱华 殷光文 俞国新
 于志强 岳 宝 张 华 张明圣 张小松 张信荣
 张秀平 张 旭 周大志

责任编辑: 张婷婷

编 辑: 谈 筠

出版单位: 《制冷技术》编辑部

发行范围: 公开

发行单位: 《制冷技术》发行组

地 址: 上海市南昌路47号3号楼3313室

邮 编: 200020

电话/传真: 021-53828229

网 址: zljscbpt.cnki.net

电子邮箱: zljssubmit@163.com; editor@cnsr.org

主管单位: 上海市科学技术协会

主办单位: 上海市制冷学会; 中国制冷学会

理事单位: 国际铜业协会

国家节能环保制冷设备工程技术研究中心

冰轮环境技术股份有限公司

上海海立电器有限公司

东芝开利空调销售(上海)有限公司

谷轮环境科技(苏州)有限公司

广东美的暖通设备有限公司

昊姆(上海)节能科技有限公司

中国标准连续出版物号: ISSN 2095-4468

CN 31-1492/TB

广告发布登记号: 3100120190002

增刊备案号: 311492202401

印刷单位: 上海商务联西印刷有限公司

定 价: 50.00元/册

数字出版: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社

出版网址: 中国知网(www.cnki.net)

■ 通 知

《制冷技术》版权声明 (118)

■ 广 告

新疆华奕新能源科技股份有限公司 (封面)

2024 数据中心冷却高峰论坛(大湾区) (封二)

中国制冷学会/中国制冷学会数据中心冷却工作组 (插页)

节能减排 科学发展(公益广告) (插页)

深圳市英维克科技股份有限公司 (封三)

广东美的暖通设备有限公司 (封底)

2024 No.S1 (ser.No.201)

Editorial Committee

Adviser: JIN Jiawei

(Order by last name alphabet)

Editor-in-Chief: WANG Ruzhu

Executive Associate Editor-in-Chief: HU Haitao

Associate Editor-in-Chief: JING Huaqian

Editorial Board:

CAO Yang, CHEN Guangming, CHEN Huanxin, CHEN Jiangping, CHENG Jianhong, DING Guoliang, GAO Yifeng, HAN Weizhe, LI Jun, LIU Chunhui, LIU Hua, LIU Ting, MA Jin, MA Yitai, MI Hua, PAN Yungang, SHEN Jiang, SHI Chuliang, SHI Wenxing, SHOU Weiwei, WANG Zhiqiang, WEI Wenjian, XI Guannan, XIE Jing, XING Ziwen, XU Jingyu, YANG Jun, YANG Yihua, YIN Guangwen, YU Guoxin, YU Zhiqiang, YUE Bao, ZHANG Hua, ZHANG Mingsheng, ZHANG Xiaosong, ZHANG Xinrong, ZHANG Xiuping, ZHANG Xu, ZHOU Dazhi

(Order by last name alphabet)

Executive Editor: ZHANG Tingting

Editor: TAN Yun

Council Members:

International Copper Association; National Engineering Research Center of Green Refrigeration Equipment; Moon Environment Technology Co., Ltd.; Shanghai Highly Electrical Appliances Co., Ltd.; Toshiba Carrier Air-Conditioning Sales (Shanghai) Co., Ltd.; Copeland Climate Technologies (Suzhou) Co., Ltd.; Guangdong Midea Commercial Air Conditioner Equipment Co., Ltd.; Heimdallr (ShangHai) Hi-Tech Energy Reservation Co., Ltd.

Edited by: Editorial Office of Chinese Journal of Refrigeration Technology

Distributed by: Distribution Office of Chinese Journal of Refrigeration Technology

Address: Room 3313, Building 3, Shanghai Science Hall, Nanchang Road 47, Shanghai

Postcode: 200020

Tel/Fax: 021-53828229

Website: zljscbpt.cnki.net

E-mail: zljssubmit@163.com; editor@cnsr.org

Introduction (1)

Development Progress of Data Centers CHEN Huanxin, WANG Yiqing, ZHANG Li, et al (2)

Problem Analysis and Optimization of Airflow Field at Cooling System Terminal in Small and Medium-sized Data Centers HUANG Dongmei, ZHENG Pindi, ZHENG Zhuling, et al (20)

Diagnosis and Renovation on Cooling System for Energy Saving in Small and Medium-sized Data Centers SHAO Shuangquan, LIU Qingqing, WANG Ningbo, et al (40)

Research Progress on Operation and Maintenance Technology of Data Center Cooling System HUANG Yun, CHEN Qiang, GE Ge, et al (76)

Research Progress of Optimization Case for Cooling System in Small and Medium-sized Data Centers HUANG Xiang, ZHENG Lanling, CHU Junjie, et al (95)

刊首语

1 年度发展报告背景

随着生产力的不断发展，信息化与智能化成为人类社会在生产和生活领域的不可或缺的元素。依托数字、算力提升科研水平、生产效率、社会管理水平成为今后各世界大国的重要举措。数字存储处理及算力供给的重要场所——数据中心也因此而大幅度增加。在数据中心聚集的城市，其能耗已经超过城市总能耗的2%，且依然不断增长。

由于数据中心具有能耗强度高、能耗总量大的特点，是节能降碳工作的重点关注对象。当前小微数据中心能效很低，中型数据中心和早期建设的大型数据中心有较大的能效提升空间，即便是近年新建的大型数据中心的能效依然还有技术挖掘的潜力。其中，数据中心冷却系统能耗占比大且有较大的提升空间。冷却系统的能效提升，是数据中心节能工作的重中之重。

中国制冷学会于2015年成立了“数据中心冷却工作组”，对数据中心冷却系统现状、冷却技术发展方向、不同冷却技术的工程应用等进行了深入研究。先后出版了《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》（2016版、2017版、2018版、2019版、2020版、2021版、2022版）共计7本专著，对数据中心冷却技术进行了全面梳理。从2016年的系统化介绍，到近几年技术和设备的专项介绍，本系列专著越发关注专项技术点的提升和发展。《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》（2023版）针对中小型数据中心这一存量较多且能效提升空间巨大的研究对象，开展了系统性冷却技术研究。

2 报告内容和资料来源

《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》

（2023版）结合了数据中心行业整体发展趋势、从IT设备到冷源的冷量输配问题和解决途径、冷源系统能效提升空间和实现措施、数据中心运维重点和要点、中小型数据中心冷却系统优化案例等方面开展了系统性的研究。通过资料的搜集、整理、筛选、分析，经客观、科学、有效地研究论证并最终形成报告。数据来自但不局限于国家统计局数据等官方资料、中国制冷学会等各行业数据、第三方咨询公司公开资料、会员单位提供资料、核心企业提供资料等。最终，本报告经各重点企业、行业专家进行审核后出版。

3 报告价值及局限性

本报告系统性分析了中小型数据中心在室内冷量输配和冷源系统供冷两个方面存在的一系列问题，针对不同问题分析其原因并提出了切实有效的解决措施。各中小型数据中心运维管理人员通过对本报告内所涉及问题的对比即可发现自身数据中心冷却系统的绝大多数节能潜力。进一步对照解决措施并针对性开展优化提升工作，即可实现中小型数据中心的能效提升。本报告基于大量实际工作，可作为中小型数据中心运维人员编制管理手册和节能方案的参考，具有针对性强、适用性高的优点。

当然，本报告在冷却系统控制优化、中小型数据中心液冷技术应用等方面还存在较多的空缺，还需要进一步积累相关技术，力争在下次中小型数据中心专项报告中进一步完善。欢迎有关方面和业内人士就报告中的观点和数据瑕疵与中国制冷学会进行沟通与交流。中国制冷学会将逐年提升报告质量、扩大报告覆盖技术范围、优化报告调研方法、提高报告局限性，力争为中国数据中心冷却行业提供全面、客观、权威的技术报告。

中国制冷学会数据中心冷却工作组
2024年3月

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2024.z1.101

数据中心发展进展

陈焕新^{*1}, 王宜卿¹, 张丽¹, 樊超¹, 张忠斌², 张羽², 许陆顺², 荆华乾³

(1-华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北武汉 430074; 2-南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏南京 210023; 3-中国制冷学会, 北京 100142)

[摘要] 本文采用文献调研的方法, 研究了中国数据中心在新型基础设施建设等策略下的市场规模与发展趋势, 并对比了中外数据中心发展特点及政策导向。本文分析了近年来中国数据中心耗电量、算力规模、机架数等关键指标的变化趋势。结果表明: 我国数据中心市场规模将保持持续增长态势, 增长率将保持在20%以上。“东数西算”政策驱动下, 未来数据中心将朝着高效化、大型化、绿色化的新兴数据中心发展。冷却技术的高速发展将助力数据中心能效不断提升, 使电能使用效率降至1.1左右。

[关键词] 数据中心; 东数西算; 低碳; 能效

中图分类号: TB61⁺1; TQ051.5

文献标识码: A

Development Progress of Data Centers

CHEN Huanxin^{*1}, WANG Yiqing¹, ZHANG Li¹, FAN Chao¹, ZHANG Zhongbin²,
ZHANG Yu², XU Lushun², JING Huaqian³

(1-School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2-School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3-Chinese Association of Refrigeration, Beijing 100142, China)

[Abstract] In this paper, the method of literature research is adopted to study the market size and development trends of Chinese data centers under strategies such as new infrastructure construction, and the development characteristics and policy directions of data centers at home and abroad are compared. The changing trends of key indicators such as power consumption, computing power scale, and number of racks in China's data centers in recent years are analyzed. The results show that the market size of China's data centers will continue to grow, with a growth rate of over 20%. Driven by the policy of computing from the east to the west, future data centers will develop towards emerging data centers that are efficient, large-scale, and green. The rapid development of cooling technology will help improve the energy efficiency of data centers, reducing the efficiency of electricity usage to around 1.1.

[Keywords] Data center; Counting from east to west; Low carbon; Energy efficiency

0 引言

数据中心是大数据存储及运营维护的基础载体。随着中国“新型基础设施建设”一系列政策的提出, 国内数据中心产业在国家政策的大力支持与互联网技术飞速发展背景下兴起^[1]。而在“东数西算”“碳中和”等顶层设计的指导下, 数据中

心发展呈现高效节能、低碳绿色的协同格局。在此背景下, 对数据中心市场规模、发展趋势及相关影响进行分析, 具有重要意义。

1 中国数据中心及冷却系统发展状况

1.1 中国数据中心热性能指标

SHARMA 等^[2]引入了两种关键的评价指标: 供

*陈焕新(1964—), 男, 教授, 博士。研究方向: 暖通空调的故障诊断与检测。联系地址: 湖北省武汉市珞喻路1037号华中科技大学能源与动力工程学院, 邮编430074。联系电话: 027-87558330。E-mail: chenhuaxin@tsinghua.org.cn。

热指数 (Supply Heat Index, SHI) 和回热指数 (Return Heat Index, RHI)。这些指标旨在量化和评估数据中心冷热通道布局的效率。

$$S_{\text{HI}} = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{\sum_j \sum_i M_{i,j}^r c_p [(T_{\text{in}}^r)_{i,j} - T_{\text{ref}}]}{\sum_j \sum_i M_{i,j}^r c_p [(T_{\text{out}}^r)_{i,j} - T_{\text{ref}}]} \quad (1)$$

$$R_{\text{HI}} = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} = \frac{\sum_j \sum_i M_{i,j}^r c_p [(T_{\text{out}}^r)_{i,j} - (T_{\text{in}}^r)_{i,j}]}{\sum_j \sum_i M_{i,j}^r c_p [(T_{\text{out}}^r)_{i,j} - T_{\text{ref}}]} \quad (2)$$

式中, Q 为机架的总散热量, kW; δQ 为进入机架之前的冷空气焓变量, kW; i, j 为表示机架所在的行和列; M_{ij}^r 为流经第 i 行第 j 列机架的空气质量流量, kg/s; c_p 为空气定压比热, kJ/(kg·K); T_{out}^r 为机架出口的温度, K; T_{in}^r 为机架进口的温度, K; T_{ref} 为计算机房空调送风温度, K。

SHI 和 RHI 作为衡量数据中心热性能的整体指标, 尽管能够反映出数据中心在热管理方面的一般表现, 但它们并不足以揭示内部可能存在的局部热点问题。即便数据中心表现出良好的整体热性能, 即低 SHI 值和高 RHI 值, 也可能伴随着热点区域, 这些区域的过热可能会导致设备运行异常或损坏。在数据中心的, 气流的分布对于维持设备的热环境至关重要, 影响着室内处理设备的运行效率和可靠性。为了确保数据中心设计的有效性, 至关重要的一点是要保持电子设备进风口的温度和湿度在指定的操作范围之内。

为了更精确地评估 IT 设备在局部区域内的热性能, SCHMIDT 等^[2]在 2005 年对原有的 SHI 计算方法进行了改进, 并引入了新的指标, 即 β 指标。

$$b = \Delta T_{\text{inlet}} / \Delta T_{\text{rack}} \quad (3)$$

式中, ΔT_{inlet} 为机架进气口温度与供冷系统进气口温度之间的差值, K; ΔT_{rack} 为空气流经机架时的温度升高值, K。

机架进气和排气温差是用来量化冷热空气混合效率的一个指标。 β 指标因机架的不同部位及其前方的特定位置而异, 其值域在 0 到 1 之间变化。在机架的特定区域, β 值可能会达到 1 甚至更高, 这通常意味着在该点, 热空气的再循环并未显著影响局部入口温度, 即该点的局部入口温度与机架排气的平均温度持平。如果机架的某个局部区域出现

了排气的自我再循环现象, β 值将超过 1。 β 值的降低表明对于机架热环境的整体评估更为有利。

风冷设备的热环境主要受到进气口空气温度的影响。可以通过计算超出特定温度阈值的进气口数量来形成一个基础的衡量指标。为了更深入地理解和提升热设计及性能, 已经引入了其他一些设计指标, 如供热指数 (SHI) 和回热指数 (RHI)。这些无量纲的指标不仅作为评估机房内对流热传递的工具, 而且还指导提升能效的方法。如果冷却系统和机房的布局设计不当, 就可能导致冷热空气混合, 这将对能源消耗产生不利影响。

在 2005 年, HERRLIN 等^[4]提出了一个新的无量纲指标, 即机架冷却指数 (Rack Cooling Index, RCI), 旨在衡量机架的冷却效率以及如何遵循行业热指南和标准的前提下有效地维持机架的冷却。RCI 对于评估数据中心的运行状况以及管理现有的环境或设计新的环境非常有效。在提出 RCI 的过程中, HERRLIN 等^[4]强调了以下特性: 1) 关注超过推荐最高温度的温度值, 以避免温度相关的设备故障, 并帮助评估设备的健康状况, 这对于管理现有环境或设计新环境至关重要; 2) 不能简单地认为某些机架的过冷可以补偿其他机架的冷却不足。对于低于建议的最低进气温度, 过冷也是不可取的; 3) 指标的设计应便于使用计算机建模或直接测量来获取确定指标所需的数据; 4) 指标应该是无量纲的, 能够作为使用的指南或标准的相对量度, 独立于具体的测量单位。

$$R_{\text{CIHI}} = \left[1 - \frac{\sum (T_x - T_{\text{max-rec}})_{T_x > T_{\text{max-rec}}}}{(T_{\text{max-all}} - T_{\text{max-rec}})n} \right] \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{\text{CILLO}} = \left[1 - \frac{\sum (T_{\text{min-rec}} - T_x)_{T_x > T_{\text{min-rec}}}}{(T_{\text{min-rec}} - T_{\text{min-all}})n} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中, T_x 为进气口 x 的平均温度, K; $T_{\text{max-rec}}$ 为行业指南或标准推荐的最高温度, K; $T_{\text{min-rec}}$ 为行业指南或标准推荐的最低温度, K; $T_{\text{max-all}}$ 为行业指南或标准定义的最高允许温度, K; $T_{\text{min-rec}}$ 为行业指南或标准定义的最低允许温度, K; n 为进气口数量。

当 RCI 高温指数 (R_{CIHI}) 等于 100%, 表明所有的进气口温度均不超过推荐的最高温度限值; 若 R_{CIHI} 低于 100%, 则意味着至少有一个进气口的温度超出了推荐的最高温度限值; 当 RCI 低温指数

(RCI_{LO}) 等于 100%，表明所有的进气口温度均不低于推荐的最低温度限值；若 RCI_{LO} 低于 100%，则说明有至少一个进气口的温度低于推荐的最低温度限值。

RCI 作为数据中心冷却状况的指标，分为两个部分： RCI_{HI} 和 RCI_{LO} 。 RCI_{HI} 用于衡量机架入口的温度是否超过了推荐的上限值，100%的 RCI_{HI} 值意味着没有超温现象。百分比下降（甚至出现负值）时，意味着设备面临的过热风险增加。相反， RCI_{LO} 关注的是温度是否低于推荐的下限值。RCI 指标反映了机架进气温度是否符合标准，与理想值 1 的偏差越大，表明机架的进气条件与推荐标准的偏离程度越大，热环境的评价也越差。理想的 RCI 值是 100%，这代表着既没有过热也没有过冷，且温度完全符合推荐的范围。

在 2006 年，JAMES 等^[5]引入了新的评估机架冷却效能的指标，称为再循环指数（Recirculation Index, RI）。该指标用于量化从数据中心冷通道吸入的空气中再循环的空气的百分比。

$$R_i = M_{rec} / M_{tot} \quad (6)$$

式中， M_{rec} 为再循环的空气质量，kg； M_{tot} 为总吸入空气的质量，kg。

当 RI 达到 100% 时，这意味着机架吸入的所有空气都是来自于冷通道之外的空气。相反，如果 RI 为 0%，则表明机架入口的空气完全来自于穿孔地板的直接吸入，没有再循环空气的参与。

JAMES 等^[5]引入一个新的基于气流的评估指标，称为捕获指数（Capture Index, CI）。CI 是再循环指数（RI）的一个补充，专门用于冷通道和热通道的评估中，其目的在于衡量特定机架的进气流量。

$$C_{ii}(ca) = \frac{c_i}{c_{cooling}} \quad (7)$$

$$C_{ii}(ha) = \sum_{j=1}^N \frac{c_j^i Q_j}{Q_i} \quad (8)$$

式中， c_i 为机架 i 入口处的浓度，kg/s； $c_{cooling}$ 为冷通道内冷却气流的浓度，kg/s； c_j^i 为冷却器 j 入口处 i 物质的浓度，kg/s； Q_j 为通过冷却器 j 的体积气流量， m^3/s ； Q_i 为通过机架 i 的体积气流量， m^3/s 。

CI 用于在不同机架之间进行比较的指标，其值范围从 0~100%。CI 较高通常表示机架的冷却效能

较好。在冷通道的分析中，一个较高的 CI 表明机架吸入的空气主要来源于近距离的冷却设施，而不是室内其他区域或已被 IT 设备预热的空气。这样，机架入口处的温度将更接近于穿孔地板供应的气流温度，且如果这些温度保持在预定的范围内，可以保证冷却效果是可接受的。对于热通道的分析，较高的 CI 有助于确保机架排出的热空气在本地被有效处理，而对周围环境影响最小。

在同一时期，HERRLIN 等^[7]提出了另一项指标，称为回温指数（Return Temperature Index, RTI），用于评估机架周围的空气分布和温控管理水平。RTI 是机架进气和排气温差与 IT 设备内部温差之间的比率，以百分比形式表示，用于量化冷却效率。

$$R_{TI} = \Delta T_{rack} / \Delta T_{equip} \quad (9)$$

式中， ΔT_{rack} 为机架进气和排气之间的温度差值，K； ΔT_{equip} 为 IT 设备内部前后的温度差值，K。

平均进气和排气温度差对于评估 CRAC 的热环境和冷却效能是关键。这个指标揭示了冷热气混合的程度。在最佳情况下，RTI 应接近 1，这意味着机架上的热空气与冷空气没有发生显著的不均匀混合。如果 RTI 超过 1，这通常指示热空气回流成为主导现象；而 RTI 低于 1 则意味着存在冷空气旁路。RTI 值偏离 1 的程度越大，表明空气分布状况越差，热环境的效率评价也随之降低。结合使用 RTI 和 CI 能够提供更全面的数据中心热管理情况分析，其中 CI 关注机架的冷却条件，而 RTI 专注于气流的效率。

在数据中心的气流管理中，多种气流混合现象是常见的。评估这些主要的气流混合现象对于数据中心运维人员和所有者来说至关重要，因为它们可以借此改进数据中心的设计和运作，从而提升气流冷却的效率。在 2009 年，TOZER 等^[7]提出了负压比（Negative Pressure Ratio, NP），旁路比（Bypass Ratio, BP），再循环比（Recirculation Ratio, R），平衡比（Balance Ratio, BAL）等，这些都是衡量数据中心内部气流动态的重要工具。

CRAC 单元产生的风量往往超过服务器实际所需，这种情况通常是由于 IT 和通信设备并未满负荷运作，以及为了保障系统可靠性而运行的额外 CRAC 单元。旁路气流指的是未经过服务器冷却就

直接返回 CRAC 单元的空气。而再循环气流是指服务器排出的热空气与送入服务器的冷空气发生混合的情况。这些指标的计算公式如下：

$$N_p = \frac{T_f - T_c}{T_r - T_f} \quad (10)$$

$$B_p = \frac{T_h - T_r}{T_h - T_f} \quad (11)$$

$$R = \frac{T_s - T_f}{T_h - T_f} \quad (12)$$

$$B_{AL} = \frac{T_h - T_s}{T_r - T_c} \quad (13)$$

式中， T_f 为地板空间温度，K； T_c 为 CRAC 的送风温度，K； T_r 为 CRAC 的回风温度，K； T_h 为服务器出风温度，K； T_s 为服务器进风温度，K。

负压、旁通气流和再循环气流对数据中心的影 响可以用 NP、BP 和 R 表示。当该值为 0 时，冷却效率更高，并且空气管理条件良好。BAL 表示服务器机架中的实际气流分布与所需气流分布之间的平衡。理想情况下，BAL 值为 1，即 CRAC 的入口和出口温度与机架的温度相同。

许多数据中心管理者并未充分注意到由 CRAC 单元产生的旁路空气对系统的影响。旁路空气导致 CRAC 单元的送风温度与服务器进风口的温度不匹配，尽管理论上它们应当是一致的。此外，旁路现象还可能导致服务器出现气流不足的现象。数据中心的实际测试表明：为了提高冷却效率，应当尽量减少旁路和再循环气流的现象。传统的数据中心冷却性能指标，如 CIC 和 CI，虽然有应用价值，但不足以全面描绘数据中心的冷却性能。因此，BHAGWAT 等^[8]提出了热影响指标，它是量化热源与冷却设备之间相互作用的指标，它为 IT 管理人员提供了一种实时监控数据中心冷却性能的方法。

尽管空气分布指标如 SHI、RHI 和 β 能够描述数据中心内的空气分布情况，它们都依赖于机架平均进气温度来进行评估。但这个平均温度实际上是由不同气流混合后的结果，它可能掩盖了在温度较低区域内部分高温气流的存在，这些高温气流可能导致局部热点问题的出现。鉴于这些指标的准确性有限，它们并不足以预测 IT 设备的失败风险。为了更精确地评估机架的空气动态和潜在的热风险，田浩等^[9]提出了混合指标（Index of Mixing, IOM）和

热加权混合指标（Heat-weighted Index of Mixing, HIOM）。这些指标旨在量化机架空气的混合程度，以及混合气流中热量分布的均匀性，从而提供更为详细的数据中心冷却效果评估。

$$I_{OM} = \frac{T_{in-max} - T_{in-min}}{T_{out} - T_{in}} \quad (14)$$

$$H_{IOM} = \sum_i^N \frac{Q_i}{Q_N} I_{OMi} \quad (15)$$

式中， T_{in-max} 为机架进口处空气的最高温度，K； T_{in-min} 为机架进口处空气最低温度，K； T_{out} 为机架出口空气的平均温度，K； T_{in} 为机架进口处空气的平均温度，K； Q_i 为第 i 个机架的 IT 设备散热量，kW； Q_N 为一定范围内（共包括 N 个机架）所有 IT 设备总散热量，kW； I_{OMi} 为第 i 个机架的掺混指标。

1.2 数据中心常见冷却技术

与传统建筑空间相比，数据中心散热密度大，单位面积散热量可达传统办公区域的 40 倍以上，且越来越呈现集中化、大型化的趋势。其运营成本中电力成本占比一般在 50%左右，而散热成本则达到电力消耗的近 40%，对运营商也形成较大考验。

目前发展的散热冷却技术当中，风冷和液冷仍占主要部分，近几年因为热管独特的技术优势，在数据中心的制冷系统节能和节水方面收到良好的效果。热管技术利用室内、外温差通过热管将室内热量交换到室外，从而降低室内温度的系统设备。原理为对热管的一端加热后，由于管内压力很低，工质吸收热量变为蒸气，在压差作用下流向另一端，向外界释放热量后再凝结成液体，依靠吸液芯的毛细抽吸力流回加热段，再次受热汽化，如此往复循环，可连续不断地将热量从一端传到另一端。

冷板式液冷近年来发展迅速。其原理主要基于热传递的方式。在现有风冷数据中心改造需求的推动下，冷板冷却是数据中心行业中占主导地位的液体冷却解决方案。传统上，冷板直接安装在热源（例如芯片组、中央处理器等）的顶部，中间有一层热界面材料以增强传热。在冷板内部，液体流过微观结构并流出到某种形式的热交换器。与浸入式冷却不同，冷板冷却允许数据中心集成商和服务器供应商以相对较低的前期成本将液体冷却部分纳入其设施，并能够随着时间的推移逐渐过渡到全液冷数据中心。冷板液冷的年收入预计将在未来 16 年以

10%的复合年增长率增长,冷板硬件的快速增长也推动了泵和冷却液分配单元等组件市场的增长。

常见水冷系统形式为:水冷冷水机组+板换+末端精密空调+冷却塔,机房热量通过精密空调换热经冷冻水传递到板换/冷机,冷却水将热量带到冷却塔传到室外。该系统最大特点为系统成熟,是目前数据中心最为常用的冷却系统,数据中心居高不下的能耗使用户愈发关注节能问题,因此数据中心冷冻水温度也逐步可提高到18~24℃,随着冷水机组及冷塔、板换材质工艺和换热效率的提升,目前水冷系统的年平均PUE部分地区可低于1.3;冷水系统最大制约因素是对水资源的消耗较为严重,水蒸发量很大,A级机房常规设计考虑12h储水量,需相应配套水处理设备。

风冷系统形式主要为以下两种:1)风冷冷水机组+末端精密空调;2)直膨式精密空调+室外机。如上所述,当数据中心建设制约于水资源的影响时,通常会选择风冷形式,风冷冷水机组对占地面积有一定要求,大规模数据中心其实并不适用此种方式,一是此种方案成本较高,二是目前数据中心单机柜IT功率普遍都达到了5kW、8kW左右,高密机柜甚至超过20kW,机组的制冷量要求多,为了增加设备摆放空间而扩大建筑面积并不适用于数据中心建设;此外大规模放置于建筑外围会造成用地浪费,因此,国内大规模数据中心基本不采用风冷冷水机组方案。

对于一些无法接受水进入机房的用户而言,直膨式精密冷却系统一直是最佳选择。但此种制冷系统的高能耗一直是各方关注的问题,PUE甚至可达2.0以上。随着技术的发展,氟泵空调替代了传统直膨精密空调,从系统结构上,通过增加一个节能模块,延长了自由冷却使用时长,缓解了直膨精密空调PUE过高的问题。该系统受管路长度限制,目前国内外风冷直膨精密空调制冷剂管路由长度在65~75m,超过此长度将会影响设备的制冷效果。

间接蒸发冷却机组从原理上讲也是属于风冷的一种形式,是国内近两年较为关注的制冷系统之一,不少大规模数据中心园区也使用了间接蒸发机组。间接蒸发冷却机组是将室外空气新风和房间空气经过换热器直接换热,较传统水冷系统减少了换热环节,换热效率高。近年部分厂家推出了“冰川”

相变冷却系统,该系统可理解为风冷系统的一种形式,本系统融合了闭式冷却塔、多联机和氟泵精密空调的特点,高度模块化,管路简单,末端形式灵活多变,可搭配热管、列间空调、风墙和精密空调。就精密空调而言,常规风冷直膨精密空调机组制冷量最大到110kW左右,而“冰川”系统由于外置了压缩机,室内机冷量可达150kW。该系统还采用了磁悬浮压缩机,进一步减少了能耗,提高能效比。该系统采取闭式冷却塔结构,有效减少了水资源的使用。

液冷技术作为近些年备受关注的冷却方式,其特点为液体的比热远远大于空气,有利于提高传热效率、降低传热耗能。但也有弊端:初期成本高、系统复杂、有泄漏风险、维护成本高、安全性尚未完全验证、技术标准空缺等,因此目前还未大规模应用。液冷主要有两种形式:浸没和冷板。

浸没式通过把设备浸泡在绝缘制冷剂中,器件和制冷剂直接热交换完成散热。利用制冷剂自身温差对流或增加动力强化对流。如果使用相变制冷剂,制冷剂在受热后汽化,在机柜顶部凝结再流回机柜。

直接液冷优点:散热能力强、覆盖面大、低噪声、能效高、设备无防尘防腐问题。直接液冷缺点:卧式机柜空间利用率低、可维护性差(取出设备需清理)、仅能用于中小型设备、存在相似相溶风险、部分器件不能接触制冷剂(如光模块、机械硬盘、线圈电感)、制冷剂消耗大成本高(相变制冷剂)。

冷板式液冷热量传输媒介通常是流体,与传统方式不同,冷板式液冷将热量由热区先传至远处再进行冷却。工作过程中液体不与被冷却物体接触,从而大大提升了安全性及稳定性。

间接液冷优点:散热能力强、能效高、低噪声、空间利用率高、热能可回收。间接液冷缺点:设计复杂难度大、技术标准化不足且有盲点、设备成本高、寿命只有5~7年、存在凝露/泄漏/腐蚀风险、商用时间短安全性可靠性未充分验证。

结合对2019年到2025年中国液冷数据中心市场规模的测算,预计随着互联网、金融和电信行业业务量的快速增长,2025年互联网行业液冷数据中心占比将达到24.0%,金融行业将达到25.0%,电信行业将达到23.0%。而能源、生物、医疗和政务等将行业需求将加快融入通用数据中心新业态,整

体上规模有所下降, 预计 2025 年能源行业液冷数据中心占比将达到 10.5%, 金融行业将达到 8.5%, 电信行业将达到 6.5%, 以政务为代表的其他业务将下降至 2.5%^[11]。

1.3 数据中心冷却技术发展

数据中心是互联网的基础设施, 随着新一代信息技术的发展, 传统数据中心正加速向高算力、高效能、高安全特征的新型数据中心转型, 对于绿色低碳的需求不断提升。转型过程中散热冷却技术发展至关重要, 绿色高效数据中心散热冷却技术发展主要有制冷系统效率提升, 冷热流体通道优化, 新型液冷材料应用, 热回收系统推广等^[11]。

制冷效率提升是在数据中心冷却系统已有设备的基础上, 合理进行工况参数选择并优化调控策略, 提升设备能效比。使用高效不间断电源、泵和冷却频率随负荷季节性转变能够有效提升能源利用效率。随着人工智能的快速发展, 利用数据驱动方式进行冷却设备能耗预测及节能优化的应用越来越广泛, 通过分析大量数据, 智能系统能预测冷却需求, 自动调节冷却设施, 实现能效最优化。数据驱动方法不依赖于系统内部结构与机理, 具有精度高、速度快的优点^[12]。

冷热流体通道优化技术通过优化数据中心设备内部构造, 其原理为相邻机架入口或出口相对, 形成间隔的冷热通道。将输入数据中心设备的冷空气和换热后的热空气区分开, 分别由冷、热通道输送^[13]。冷热流体通道技术实现了不同温度冷却介质分离, 从热力学原理上实现了换热效率提升。

随着液冷等技术的快速发展, 新型冷却介质材料数目不断增加。以浸没式液冷常用的氟碳化合物为例, 具有良好的化学稳定性和良好的热稳定性, 并兼具较低的沸点和较高的汽化潜热。随着材料科学和制造工艺的进步, 直接液冷技术正逐步成熟, 对液冷温控技术和冷却介质的要求不断提升。通过模拟等方式选择结构不同的材料, 丰富完善新型制冷材料数据库, 寻找绿色安全环保的高性能材料是数据中心从风冷半风冷向液冷转型升级的关键。

目前大多数的热回收技术通过与冷却液流换热来捕获余热, 余热的质量和数量由热管理系统的类型和规格决定。数据中心热回收可采用自建或合同能源管理等模式, 供数据中心项目或周边 厂房

生活热水或冬季取暖使用。另外, 在国家智慧农业的统一布局下, 数据中心余热用于北方农业蔬果大棚的供暖也是发展趋势之一^[14]。

2 国内数据中心发展方向

顺应以互联网、云计算和大数据为代表的信息经济的高速发展, 数据中心已是信息社会不可或缺的基础设施, 其需求性日益凸显, 我国对数据中心的发展将不遗余力。本节介绍了当下国内数据中心标准发展情况, 然后从行业技术发展分析数据中心未来发展趋势。

2.1 国内数据中心标准发展情况

在实际应用中, 数据中心的设计必须针对用户的具体需求来平衡可靠性与能效。不是所有的领域都必须有高度可靠的系统, 因为建设这样的数据中心成本极高。对于那些可靠性要求不是特别高、能够接受偶发性故障风险的用户, 重点应该是提高能效, 而不是无谓地追求稳定性。据此, 设计数据中心时要根据需求来适度平衡稳定性和节能性, 这样才能确保运营的经济性和效率。

国际上的 Uptime Institute 定义了一套著名的数据中心可靠性级别, 称为层 (TIER) 分类, 其中 TIER IV 代表最高级别。中国在引入这套标准后, 根据自身情况对数据中心进行了 ABC 级的分类。C 级是入门级别, B 级在基础设施上实现了一定的冗余, 而 A 级达到更高的容错或冗余标准。为了与国际标准对接, 中国进一步将 A 级细分为 A+级和 A 级, 以此来对应国际上的 TIER 级别, 使得不同标准下数据中心的级别更加清晰、易于理解和比较。

不同类型的数据中心因其可靠性和能效需求的不同而需要不同的标准。为此, 建议建立一个综合的评价指标观, 以满足现有模型的需求。在选择数据中心评价指标时, 应基于不同级别的需求。以 TIER I 级别为例, 其对可靠性的要求非常高, 因此评价指标应重点考虑可靠性。不同数据中心层面的热性能评估可采用不同指标: 对于房间级, 可以利用如 RCI、SHI、RHI 和 β 等指标来衡量热性能。对于行级, SHI、RHI 和 RTI 等指标能够评估热性能。对于机架级, RCI 和 RI 等指标适用于热性能评估。鉴于 TIER I 级别对可靠性的高要求, 还必须对服务器的热性能进行严格评估, 交叉干扰系数 (Cross

Interference Coefficient, CIC) 等指标可以用来评价热环境。该评价系统有利于更有效地匹配不同数据中心层次的特定需求。

虽然某些评价指标适用于各级别的数据中心, 它们的阈值却因对可靠性和能效关注的不同而异。以 RCI 为例, 尽管它的理想值是 100%, 不同级别数据中心的要求却有所不同。TIER IV 级别的数据中心可能需要 RCI 高于 96% 以确保极高的可靠性, 而 TIER III 级别的要求则位于 TIER IV 和 TIER II 之间。对于 TIER I 和 TIER II 级别的数据中心, RCI 阈值可能设置为 91% 或更高, 以满足较低的可靠性需求。这样的差异化阈值设置有助于构建一个更加灵活和实用的评价体系, 以适应不同级别数据中心的具体需求。

在现行的数据中心热性能评价体系中, 节能指标的覆盖不如可靠性指标广泛。TIER I 和 TIER II 级别的数据中心更倾向于节能和成本效益, 因此, 这类数据中心的评价体系应该加强节能方面的热性能指标。虽然可靠性指标较为丰富, 但它们并不是没有限制。为了更精确地衡量与可靠性相关的热性能, 需要对现有指标进行深入分析和优化。这将有助于更全面地理解数据中心的整体性能, 并为合理的运营决策提供坚实的数据支持。

在数据中心的层级上, 可以看到房间级拥有较多的评价指标, 与此同时, 服务器级和行级的评价指标则相对较少。此外, TIER IV 和 TIER III 级别的数据中心倾向于强调可靠性, 但在服务器级, 用来评估热性能的指标数量有限。这种分布反映出不同级别数据中心在关注的重点上存在差异, 这对于精确评估和比较各级别数据中心的性能是有益的。

目前, 类似 CIC 这样的服务器级评价指标主要衡量空气循环情况, 但并不足以全方位评估数据中心的性能。为实现更综合的热性能评估, 有必要采用多层次的评价指标体系。因此, 未来的研究方向应当着重于扩展服务器级别的热性能评价指标, 以便更准确地反映数据中心的性能状况。

2.1.1 能效评价指标相关性与局限性

数据中心能效评价指标如表 1 所示。xUE (x Usage Effectiveness, xUE) 家族指标, 即 PUE、CUE

和 WUE 指标, 符合生命周期思想。在未来数据中心的设计、选址和运营中, 碳排放和水的使用都将成为极其重要的考虑因素。PUE、CUE 和 WUE 的结合使数据中心运营商能够快速评估其数据中心的重要可持续性方面, 比较结果, 并确定是否需要任何能源效率和/或可持续性改进。xUE 家族指标旨在帮助数据中心社区更好地管理与构建、调试、运行和取消调试数据中心相关的能源、环境、社会和可持续性参数。

PUE、CUE 和 WUE 指标均使用 IT 设备能量值作为分母。这种结构的通用性将确保指标之间保持联系并加速它们的采用。与 PUE 不同, WUE 和 CUE 有维度, PUE 是无量纲数, 它的值为能量除以能量。另一个重要的区别是值的范围, PUE 的理想值为 1.0, 说明现场使用的所有能源都流向了 IT 设备。PUE 不存在理论上限。CUE 和 WUE 的理想值均为 0.0, 表明数据中心的运营与碳排放或水的使用无关。碳排放和水的使用将是未来数据中心设计、选址和运营的关键考虑因素。xUE 家族的指标使数据中心管理者能从节能、生态设计、安全等方面更好地管理和运营数据中心, 促进数据中心行业的良性发展。绿色网格认为整个生命周期对行业的可持续性至关重要, 在未来工作中考虑整个生命周期, 将 xUE 家族指标结合起来进行评价尤为重要。

PUE 也有其局限性。虽然 PUE 被广泛应用, 但它并不是一个“万能指标”, 它仍然存在一些缺点: 1) PUE 没有考虑数据中心所在地区的气象条件, 因此无法比较不同地区数据中心的 PUE; 2) 从理论上讲, PUE 可以促进数据中心基础设施能耗的降低。但是, 由于该指标不能对 IT 设备的能效进行评估, 因此评估结果会与数据中心的实际生产效率产生较大偏差, 这也是 PUE 被许多组织诟病的重要原因。在数据中心运行一段时间没有基础设施升级后, 由于 IT 设备老化导致功耗增加, PUE 会下降。当 IT 设备采用虚拟化等技术时, 可以大幅减少 IT 设备的数量和功耗, 有利于数据中心的发展。但是, 由于数据中心总能耗与 IT 设备能耗之间的相关性是非线性的, 因此总能耗不会有同样程度的降低; 3) PUE 的计算未考虑时间因素, 因此无法为数据中心提供具体的节能方向。

表1 数据中心能效评价指标汇总

指标名称	定义	涵盖内容	作用
PUE	用于衡量数据中心总体能源效率的指标	数据中心能源消耗的核心指标	评估数据中心能源利用效率
CUE	衡量冷却系统的能源效率	冷却系统对数据中心总体能源消耗的贡献	评估冷却系统的能源利用效率
WUE	评估用水效率	数据中心用水对 IT 设备能源消耗的影响	评估数据中心用水利用效率
SWP	描述设备的尺寸 (Size)、重量 (Weight) 和功耗 (Power)	设备的物理特性	评估设备在数据中心内部占用空间和消耗资源的效率
DCIE	衡量数据中心的能源利用效率	数据中心整体能源利用的效率	衡量数据中心能源利用的整体效率
CADE	描述空气冷却系统的分布效果	空气冷却系统在数据中心内的分布效果	评估空气冷却系统在数据中心内部的有效性
HSE	描述热应激效果	数据中心内部的热应激效果	评估数据中心内部的热环境影响
ERE	描述环境恢复能力	数据中心的环境恢复能力	评估数据中心环境适应能力
ERF	描述环境恢复时间	数据中心的环境恢复速度	评估数据中心环境适应速度
SCE	描述安全性	数据中心的安全性	评估数据中心内部的安全程度
DCCE	描述冷却效率	数据中心冷却系统的效率	评估数据中心冷却系统的工作效率
ITEE	描述 IT 设备的能源利用效率	IT 设备的能源利用效率	评估 IT 设备的能源利用效率
ITEU	描述 IT 设备的使用效率	IT 设备的使用效率	评估 IT 设备的使用效率
DCEP	描述数据中心的能源保护	数据中心对能源的保护效果	评估数据中心对能源的保护效率
GEC	描述数据中心的全球影响	数据中心对全球的影响	评估数据中心的全球影响
EEUE	描述能效单元的能源利用效率	能效单元的能源利用效率	评估能效单元的能源利用效率

其他指标也有局限性。空间、瓦特和性能综合指标 (Space, Watts and Performance, SWP) 非常重视服务器的性能, 被用来从多个方面评估服务器的性能。在注重节能环保的今天, 它很少被使用。作为 PUE 的衍生物, 数据中心基础设施效率 (Data Center Infrastructure Efficiency, DCIE) 的使用虽然与 PUE 的使用类似, 但由于无法捕捉小的变化, 因此没有被广泛使用或接受。企业平均数据中心效率 (Corporate Average Data center Efficiency, CADE) 衡量由公司、公共部门和第三方管理的数据中心的个人和综合能源效率。但这个性能指标的定义很模糊, 很容易被误解, 也很难测量和计算。指标的提出者没有解释如何测量 IT 资产效率。暖通空调系统效率 (HVAC System Effectiveness, HSE) 只关注数据中心的节能优化潜力和暖通空调系统的能耗。它与电能的有效利用关系不大, 只衡量基础设施的能耗, 而不是整个数据中心的能耗。能源再利用效率 (Energy Reuse Effectiveness, ERE) 和能源再利用因子 (Energy Reuse Factor, ERF) 仅表示 IT 设备的可回收能耗与能耗的比值, 强调能量回收。

数据中心的能源消耗会对环境产生影响, 仅考虑能源回收是片面的。服务器计算效率 (Server Compute Efficiency, SCE) 和数据中心计算效率 (Data Center Compute Efficiency, DCCE) 更注重新提高 IT 设备的效率, 而更高的效率可能导致更高的成本和温室气体和废热排放。因此, IT 能源效率不可能直接评估一个数据中心是否高效。此外, DCCE 无法在不同数据中心之间进行比较也是一个限制。两个节能指标 IT 能源效率 (IT Energy Efficiency, ITEE) 和 IT 能源利用率 (IT Energy Utilization, ITEU), 关注的是 IT 设备的能源效率, 没有考虑绿色和可持续发展。数据中心能源生产率 (Data Center Energy Productivity, DCEP) 定义了有用的工作, 但在数据中心的比较中可能导致不一致, 并且难以度量。因此尚未广泛用于 PUE 的替代方案。绿色能源系数 (Green Energy Coefficient, GEC) 的优点是, 它弥补了数据中心之间缺乏成对比较的缺点, 并允许比较具有等效 PUE 的两个站点。然而, 由于绿色能源的定义在不同地区和地区存在差异, 因此无法全面评估数据中心的能源效率。电能利用

效率 (Electric Energy Usage Effectiveness, EEUE) 在 PUE 基础上补充了安全的考虑,但其并没有从根本上解决 PUE 的缺点,目前也没有被广泛应用。

能效指标的整体评价:在能效评价指标中,只有 ERE、ERF 等少数指标考虑了数据中心供能系统的余热回收。其他指标仅评价数据中心的有用工作或能量转换效率。然而,在可持续发展的背景下,数据中心的能源来源也是一个关键的考虑因素。在绿色能源充足的情况下,优先发展绿色能源,其次才是不可再生能源。目前大多数能源效率指标都没有将绿色能源考虑在内。由于目前缺乏对上游可再生能源整合和下游余热利用的全局优化,数据中心性能提升的潜力有限。HUANG 等^[15]对此进行了综

述,以填补这一空白,并提出全球能源指标的发展是未来的方向。因此,在未来的发展中,能效指标仍存在着需要填补的空白。

2.1.2 能效评价指标可持续性层次分析

不同的组织已经建成了不同的数据中心,每个组织在建模和设计时均考虑不同的元素和因素。这些因素可能包括区域、设施或设备的比例,这便是数据中心之间差异的来源。因此,在评价数据中心的能源效率时,需要对内部构成其有充分了解。本研究中,主要将数据中心分为基础设施和 IT 设备这两个主要部分。图 1 介绍了数据中心的电力流向,分别用于基础设施和 IT 设备。

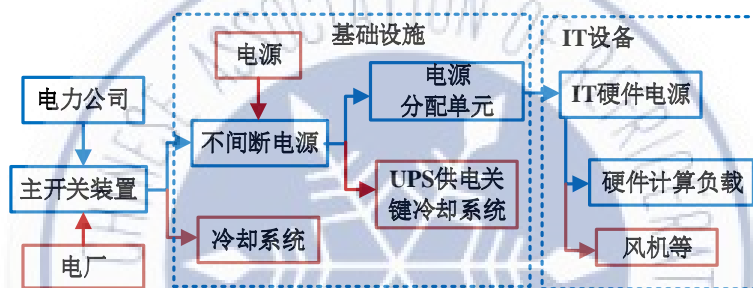


图 1 数据中心的电流流向

数据中心的总电流在主开关柜分流,一部分输入冷却系统,一部分输入不间断电源 (Uninterruptible Power Supply, UPS) 分流,一部分输入应急冷却系统,主导部分输入 IT 设备。在上面介绍的数据中心评价指标中,有的只涉及到站点基础设施的能效,有的只涉及到 IT 设备,还有的对整个数据中心进行评价。JAMALZADEH 等^[16]提出了数据中心中最有用、最适用的指标,绘制了数据中心结构模型;将每个系统分为两个关键的数据中心子系统,即 IT 设备和站点基础设施。每个指标都可能评估一个或两个数据中心子系统。因此,那些既能评价数据中心两个子系统的指标更能反映数据中心能耗的有效性。图 2 中,根据两个数据中心子系统对指标进行分类。通过对能效指标的应用范围进行分类,在对数据中心进行能效评价的时候,数据中心从业人员可以更加有针对性地对基础设施和 IT 设备的能源效率分别评价,从而更准确得知需要在哪一部分子系统作进一步节能改进。

数据中心行业严重依赖电力,而数据中心的指标传统上是基于运营效率作为可持续性的衡量标

准。最近,该行业已经开始意识到,它的关注重点需要超越能源消耗,为碳、水和 IT 设备计算效率等其他方面创建指标。然而,单一问题指标通常只考虑运行阶段,忽略了设施生命周期其他阶段的其他问题。通过回顾建筑环境评估方的使用,WHITEHEAD 等^[17]得出结论,需要应用生命周期思维来更全面地评估数据中心的环境影响。目前以及未来的发展都需要以生态为基础,良好的生态是可持续发展的地基。此外,《巴黎协定》也提出了将全球气温上升控制在 2 °C 以内,努力控制在 1.5 °C 以下的目标。

在这一系列一目标下,生态建设是人类共同目标,符合生态设计的指标是首当其冲。基于生命周期思维的建筑环境评估方仍在开发中。同样,要实现数据中心的可持续发展,数据中心的能效评价指标也应该朝着这个方向进行评价。本研究对当前常用能效评价指标的层级分析,如图 3 所示。指标根据可持续性分为五个级别。级别越高,指标越符合可持续发展趋势。

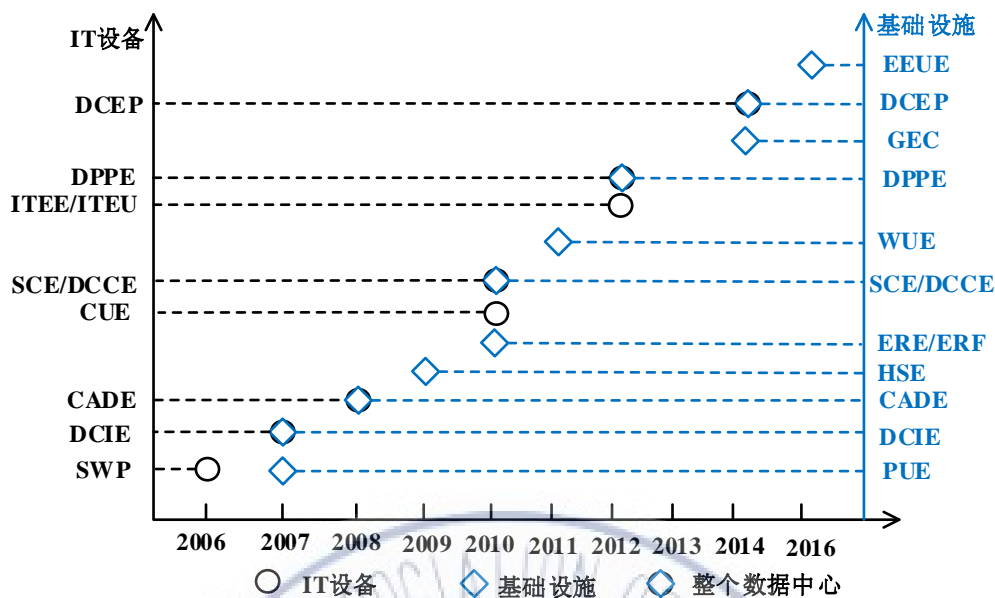


图2 数据中心能效性能评价指标发展

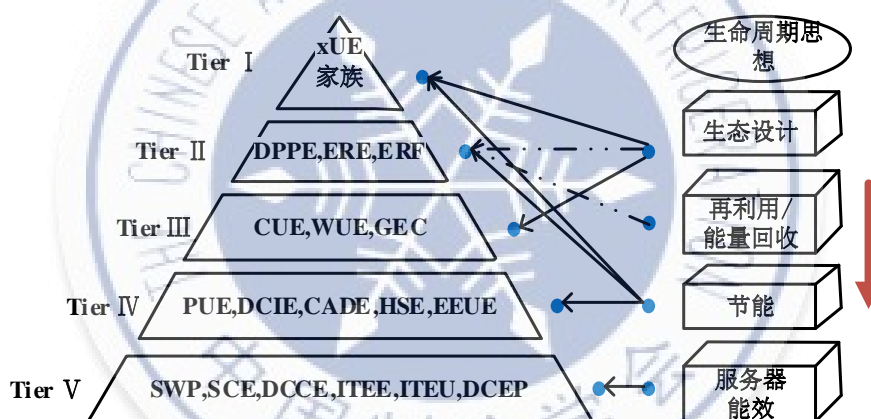


图3 能效指标之间的层级关系

xUE 族指标，即 PUE、CUE 和 WUE 指标。建立一个综合评价指标，将 CUE、WUE 和 PUE 这三个指标综合考虑在内。可以采用加权平均的方式，根据数据中心的特点和重要性，给予不同指标不同的权重。在综合评价指标的设计中，要考虑到数据中心的整个生命周期，包括设计、建设、运营和维护等各个阶段。在不同阶段，可以根据不同的需求和目标调整指标的权重和计算方法。综合考虑数据中心的能源、水资源和环境方面的效益，评估其对整个生命周期的影响。通过综合评价指标，可以更全面地了解数据中心的综合性能，包括能源利用效率、水资源利用效率和环境影响等方面。根据综合评价指标的结果，制定相应的改进和优化措施，持续改进数据中心的性能，符合生命周期思想。三者结合是未来发展的主要方向，因此 xUE 家族被置于

I层。数据中心单位能源性能（Data center Performance Per Energy, DPPE）不仅是一种节能指标，也是一种环境保护指标。相对于 CUE、WUE 和 GEC 等只考虑生态设计，DPPE 也增加了一个节能的角度。指标 ERE 和 ERF 同时考虑了节能和能量回收，非常符合生命周期思维和生态发展的方向。因此，它与 DPPE 一样归于II层。第四层指标与目前应用最广泛的 PUE 一样，都只在节能角度评价数据中心。SWP、SCE、DCCE、ITEE、ITEU 和 DCEP，根据定义，主要评估服务器的效率，计算机所做的有用工作和节能，因此被放在V层。

层级分析的目的不是减轻底层指标的重要性，而是指出这些指标与可持续发展目标以及全球气温控制在 1.5 °C 增幅内的目标之间可能存在不一致性。为了全面衡量数据中心的能效，不同层次的评

价指标是必要的。根据数据中心的类型，各评级评价指标的重要性有所不同。这些问题需要在未来的研究和实践中得到进一步的探讨和完善。

2.2 国内数据中心与新技术融合趋势

2.2.1 低碳节能

通过加大清洁能源利用促进低碳节能。数据中心建设和消纳在不断创历史新高的同时，也正在遭受不少的抨击，因为它们消耗大量的电力和水、排放温室气体、产生垃圾填埋场的垃圾，却不产生有形的产品。但实际上现今人们的生产生活均离不开数据中心，关乎线上的所有活动背后都离不开数据中心的输出。数字化世界需要相当数量的处理和存储能力，这是数据中心呈指数级增长的动因。而低碳节能仍是必要面对和解决的问题。

柴油发电机产生的碳排放是在数据中心投入使用过程中希望尽量避免的，对此，目前氢燃料电池技术越来越被行业重视并采用。2022年3月，国家发改委、能源局联合印发了《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》，明确了氢的能源属性，是未来国家能源体系的组成部分，充分发挥氢能清洁低碳特点，推动用能终端和高耗能、高排放行业绿色低碳转型。氢能成为战略性新兴产业的重点方向，是构建绿色低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点。此外，2023年1月，《关于推动能源电子产业发展的指导意见》指出，面向新型电力系统和数据中心、算力中心、电动机械工具、电动交通工具及充换电设施、新型基础设施等重点终端应用，开展能源电子多元化试点示范。大力发展可再生能源电力消费。随着光伏、风电和水电等清洁能源更普遍地应用于数据中心，从源头上实现绿色低碳的概念逐渐落地化。同时，配合采用新型节能解决方案，如余热资源回收应用等，可进一步大幅提升能源使用效率和能源回收利用率，持续推动数据中心走向低碳化。

液冷技术的发展促进了低碳节能。经过多年相对静态的机架密度，数据中心运营商越来越多地要求更高密度的机架。据调查，超过三分之一的数据中心运营商的机架密度在过去三年里迅速增加。机架功率密度的提高带来的问题之一就是散热问题，对单位体积散热能力的更高要求推动着液冷技术

的发展与应用。并且作为节能节水技术，液冷技术被越发广泛地考虑进数据中心的绿色化设计中。液冷技术在近年来备受关注，并且已经有在实际的高密度环境中完成部署并高效工作，但是由于其高成本、后期维护复杂等应用门槛并未替代风冷技术成为主流方案^[18]。毋庸置疑的是，现有问题不会阻碍液冷技术的进步，相反，高密场景的只增不减将促进液冷技术的不断发展。

2.2.2 安全可靠

应用新型电力系统，保证配电网稳定。随着更多分布式清洁能源光伏、风电等的应用，数据中心的用能成本和碳排放量均有明显降低，但新能源发电由于仍存在间歇性和随机性，使得相比传统电网面临供电稳定性不佳的问题^[19]。一方面，部署储能系统的重要性日益凸显，可配合其他类型的能源（如核电、风能和太阳能等）进行“削峰填谷”从而降低电力成本，也可帮助不连续的能源实现稳定的输出。

部分数据中心企业将锂电池不间断电源系统部署在5G边缘计算中。如利用不间断电源（Uninterruptible Power Supply, UPS）的电池存储容量来提供频率平衡服务，是数据中心充当生产者和消费者的一种方式。频率调节功能可以很容易地添加到UPS。这使电网能够使用数据中心未使用的电力储备来响应波动的负载需求，从而降低停电的危险。不间断电源系统的使用为对配电稳定性要求较高的设备提供了坚实的后备力量，无论是应对主电源故障或其他紧急情况均效果显著。

对应对极端高温提出了要求。英国2022年出现的极端高温天气导致Google和Oracle服务器崩溃，这说明了现有数据中心冷却策略仍然存在缺陷，也引起了数据中心运营商们的重视。极端高温天气的出现将导致整个冷却系统包括压缩机、泵和风扇在内的部件比正常情况下更为长期地处于高强度工作状态甚至“超负荷”状态，此时系统也将比正常工况下更脆弱，更易发生故障。因此，应该预先为极端高温天气准备好应对方案，包括预留或补充一定制冷能力、合理分配冷却系统工作重点等措施。

在未来数据中心更为普遍的情况下，仍会有更多潜在风险考验着数据中心的安全性与可靠性，这需要更全面的风险预估与考虑。预制化、模块化产

品将成为数据中心的新常态。根据 Omdia 最近的一项调查, 99%的企业数据中心运营商表示预制、模块化的数据中心产品设计将是他们未来数据中心战略的一部分。这不仅仅是一种趋势, 它是一种新的常态, 更为标准化的过程可实现数据中心的快速部署或是分期按需部署, 这一能力也可增加数据中心运营商的核心竞争力。

数据中心产业市场规模扩张、产业结构优化与高质量发展的趋向将推动数据中心向产业基地绿色化、生产模式预制化、产品标准化及模块化、销售模式定制化发展。此外, 预制、标准式的模块化构建方式还可以帮助数据中心实现弹性扩容。传统数据中心通常是一步到位, 未考虑扩容需求, 这使得基础设施的升级周期难以应对数据量的扩张速度。正如 2023 年 2 月华为举办的数据中心能源十大趋势^[20]发布会上指出的, IT 设备的生命周期一般为 4~5 年, 其功率密度基本每 5 年翻番, 而数据中心基础设施的生命周期为 10~15 年。因此, 未来数据中心应具备弹性升级能力。

2.2.3 智慧赋能

系统故障给数据中心运营商带来的损失是巨大的, 未来随着数字化领域的快速发展, 数据中心规模随着快速扩张, 系统不健康运营带来的影响将难以估量。设备本身的安全性与可靠性主要依赖设备厂家在设计阶段对设备进行充分的失效模式影响分析实验, 以及在生产制造阶段严格把控产品的品质。人工智能的加持可以促进运营与管理系统的持续改善, 实现数据中心全周期监控、智控、管理等功能, 保证故障预警与及时维护, 有效提升数据中心资源的利用率。

一方面, 人工智能的稳定、高速发展依托于数据中心基础设施的保障; 另一方面, 数据中心的升级享受人工智能等技术发展的福利。和传统行业类似, 数据中心面临着数字化、智能化转型问题, 单纯的人力运营难以满足提高能源利用效率和运维效率的要求。通过传感器等布点收集到的数据被应用起来提供不同系统状态分析与反馈、节能优化、配置方案选择等服务, 真正实现产业的智慧赋能。

3 全球数据中心新变化

在国内数据中心规模不断提升, 政策不断完善

的同时, 全球数据中心也处于飞速变化当中。北美洲、西欧和东亚等成熟的数据中心市场持续保持稳定增长, 而东南亚、非洲南部等市场则逐步加强对数据中心的政策支持和产业投入, 全球数据中心市场将迎来新的发展阶段。本节将从全球范围内, 介绍当前世界上数据中心的发展现状, 并举例展示一些具有代表性国家的有关数据中心的标准、政策, 最后将数据中心分为高温与低温两类分别介绍对应的冷却技术。

3.1 全球数据中心发展现状

近年来, 全球数字经济的蓬勃发展对经济的贡献不断加强, 在数字化浪潮下, 数据的存储、分析和处理需求呈现出高速增长的趋势, 推动了全球数据中心市场的快速发展。各国均在积极出台政策, 促进数据中心蓬勃发展, 规范数据中心标准。本小节将从全球数据中心的发展现状角度出发, 对全球数据中心未来市场规模增长情况及服务器增加量等情况进行介绍, 并介绍全球数据中心发展的主要趋势。在全球数据中心支出方面, 受疫情影响, 2022 年全球数据中心支出超过 2 120 亿美元, 较 2021 减少 1.9%。但预计 2023 年市场收入将达到 2 220 亿美元, 后续全球数据中心支出将呈平稳增长态势, 具体见图 4。

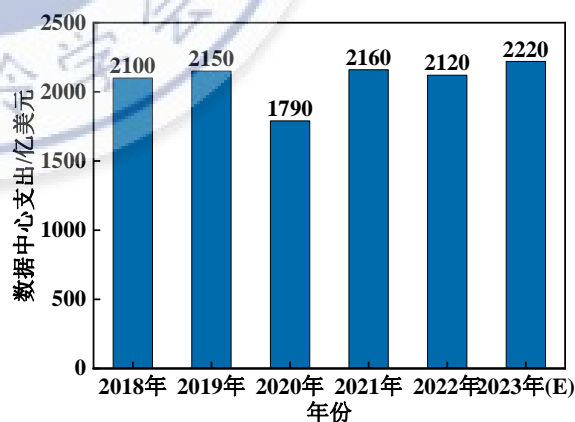


图 4 全球数据中心支出

数据中心数量最多的 5 个国家为美国、德国、英国、中国和加拿大。美国数据中心数量为 2 750, 在这五个国家中占比多达 61.6%, 德国占比 10.8%, 英国占比 10.3%, 中国占比 10%, 加拿大占比 7.3%。

单机架功率的提升与高密度服务器规模部署和应用密切相关, 2019—2022 年全球数据中心平均单机架功率具体情况见图 5。虽然平均单机架功率

超过 50 kW 的数据中心占比没有增加^[21],但由于数据中心的总数量增多,这部分数据中心的数量增多。随着摩尔定律变缓,芯片算力与功耗同步大幅提升。2022 年英特尔第四代服务器处理器单 CPU 功耗已突破 350 W,英伟达单 GPU 芯片功耗突破 700 W,最高平均单机架功率在增大,风冷散热技术面临极大的挑战,液冷越来越受到关注与采用。

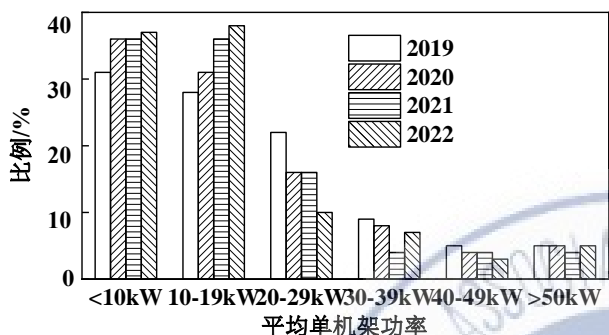


图 5 2019—2022 年全球数据中心平均单机架功率

目前,数据中心的增长没有放缓的迹象。相反,对更多数字数据访问、处理和存储的需求正在不断上升。然而,数据中心数量与规模增长预示着能源需求将大幅增加,管理与降低数据中心能源消耗将会成为数据中心行业重点关注的问题。

全球范围内,资源短缺和能源危机越来越引起人们的广泛关注,可持续发展已经成为全球各行各业的一个重要议题,包括数据中心行业。数据中心是高能耗的设施,对能源、水资源和其他自然资源的需求巨大,因此,如何减少能源消耗和碳排放,实现可持续发展成为数据中心行业的一个重要挑战。全球范围内的数据中心运营商都在积极推动可持续发展,运营商采取了使用绿色能源、减少碳排放和废物管理循环利用等措施,为可持续发展作出了贡献,推动数据中心行业更加可持续、环保和高效。2022 年,全球领先的互联网企业 Microsoft 在荷兰建设的数据中心使用地热能源供电,利用地下的地热能源来为数据中心提供电力和冷却,实现了绿色能源的使用。Google 公司于 2022 年在美国新建的一个数据中心实施了循环水冷却系统,将废水进行处理并再用于冷却系统中,减少了对自然水源的依赖;中国电信和中国移动于 2022 年在数据中心建设过程中推广可持续采购政策,他们优先选择可回收和可再利用的设备和材料,减少对有限资源的消耗。随着越来越多的知名企业持续发展的

重视,对减少碳排放政策的积极响应,对降低对环境的压力,保护自然环境,减少数据中心对生态系统的负面影响产生了巨大作用。对企业本身而言,重视可持续发展,可以降低能源消耗和运营成本,为数据中心运营商带来经济效益,同时,拥有可持续发展的数据中心可以提升企业的品牌形象,增加市场竞争力,并吸引更多的可持续投资。

除此之外,在过去的几年中,智能化和自动化在数据中心领域已经取得了显著的进展。许多数据中心运营商已经开始利用人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、机器学习 (Machine Learning, ML) 和自动化技术来提高运行效率,降低成本,提高服务质量,并提高能源效率,智能化和自动化的发展将继续改变数据中心的运行方式。2021 年,美国数据中心公司 Equinix 与新加坡政府投资公司合作,共同投资 95 亿美元在欧洲建设超大型数据中心,这些数据中心采用了先进的自动化技术和人工智能,能够自动进行故障排除和系统优化;阿里云于 2020 年发布了其全新的智能运维平台,该平台使用 AI 和 ML 技术自动识别和解决数据中心的问题,以提高数据中心的运行效率和服务质量;Microsoft 于 2021 年发布了 Azure Arc,可以将 Azure 的管理功能扩展到任何基础设施,包括其他云服务、边缘设备或者数据中心,使得用户能够更高效地管理他们的资源和应用。随着 AI 和 ML 技术的进步,数据中心可能会变得更加智能和自动化,并且该趋势在未来几年中将继续增强,数据中心运营商必须紧跟这些发展,才能在竞争激烈的市场中保持领先地位。

3.2 全球数据中心发展政策

本小节将立足于全球范围,挑选一些主要国家,包括美国、日本、欧洲各国等发达国家,以及东南亚两个典型国家,来介绍近年来其数据中心的政策与标准。

3.2.1 美国数据中心政策和标准

由于数据中心产业在美国早期就已经开始发展,美国已经在全球数据中心市场中占据了极其重要的地位。无论是在市场份额、技术创新还是行业标准的制定等方面,美国都处于全球领先的地位,使其成为全球数据中心分布的首要区域。美国各地都有数据中心,覆盖面广泛,要集中在人口众多、

经济发达和互联网业务发达的地区,包括北弗吉尼亚州、得克萨斯州、加利福尼亚州和伊利诺伊州等。《联邦云计算战略》^[22]是美国政府在 2011 年发布的一项全面的政策,旨在为美国联邦政府提供了一个框架,以便更好地利用云计算以实现数据中心效率和效益的提升。这一战略的主要内容主要包括以下几个方面:美国政府通过使用云服务,减少了对硬件设备的购买和维护,从而节省了大量成本;利用云计算得到更高级别的数据保护和恢复能力,美国国防部将其部分数据和应用迁移到了由批准的云服务提供商管理的安全云环境,提高了数据的安全性;通过云计算的灵活性和开放性推动新技术和新应用的发展,美国国家卫生研究院使用云环境来支持其基因组学研究,使研究人员能够分享数据和资源,促进了医学研究的创新。

同时,当个人数据被上传到数据中心时,如何确保这些数据的安全、保密性以及个人隐私权的不受侵犯,成为了亟待解决的问题。2022年6月3日,美国参议院和众议院发布了《美国数据隐私和保护法》^[23]的草案,将为数据隐私保护引入一个美国联邦标准。该法案确立了美国联邦对州隐私法的优先权,这意味着其规定将取代许多现有的州隐私法;其次,该法案为违法行为制定了私人诉讼权;此外,该法案要求公司尽量减少其数据收集行为,只收集业务运作所需的数据。对于数据中心产业来说,该法案意味着更严格的数据保护要求,以确保存储和处理的数据安全,并尊重用户的隐私权。数据中心需要据此进行一些技术和政策的改变,例如加强数据加密,提高系统安全性,以及制定和实施数据访问和使用的政策等。

3.2.2 日本数据中心政策和标准

日本是亚洲数据中心最发达和最成熟的市场之一。日本的数据中心分布主要集中在东京和大阪两个主要的经济和科技中心。东京的位置优越,网络基础设施完善,而且是日本的金融、科技和商业中心,因此吸引了众多的数据中心运营商;随着东京市场的饱和,大阪正在快速成长为一个重要的数据中心集群地区,大阪的网络基础设施也非常完善,而且地震风险相对较低,是数据中心运营商的理想选择。近年来,日本的数据中心市场正在持续增长,这主要得益于日本政府的云计算和数字化战略,以

及 5G、人工智能和物联网等新技术的发展。但日本的数据中心市场也面临着一些挑战,其中最严峻的挑战便是能源短缺问题。针对此问题,日本政府提出建设低能耗数据中心,提出要通过加大研发投入,促进绿色科技和可再生能源在数据中心领域的发展和应用。日本政府目标将数据中心市场规模从 2019 年的 1.5 万亿日元提升到 2030 年的 3.3 万亿日元,并实现数据中心的能耗降低 30%。日本企业对该政策做出积极响应:富士通等 7 家日本机电和材料企业将合作,在 2030 年度之前开发出可使数据中心的耗电量减少 40% 的服务器技术,将确立节能化所需技术,包括半导体的新电路设计和材料等。

3.2.3 法国数据中心政策和标准

法国作为欧盟中的核心国家,是欧洲最大的数据中心市场之一,具有许多世界级的数据中心设施。这些数据中心主要集中在法国的主要城市,尤其是首都巴黎。法国的数据中心市场受益于其优秀的基础设施、稳定的能源供应,以及法国政府对数字经济的强烈支持。法国的数据中心与欧盟的数据中心紧密联系,法国是欧盟的重要成员国之一,因此法国的数据中心必须遵守欧盟的数据保护法规。除此以外,为摆脱美国情报机构对法国数据的监控,法国政府于 2021 年 5 月宣布将建立名为“可信云”的云服务认证体系,为法国用户数据提供技术、法律双重严格保护。“可信云”主要继承了法国官方早先制定的安全标准 SecNumCloud,“可信云”还对想要获得认证的云服务商提出一系列要求,比如服务器须部署在欧洲,运维也须在欧洲,并由欧洲主体实施等。但直到目前,满足“可信云”的数据中心运营商仍未投入运营,主要原因在于:担忧美国数据霸权,又离不开美国技术;强调数据主权,又缺乏足以担纲的本土公司。法国乃至欧洲想要保证数据安全还有很长的一段路要走。

3.2.4 东南亚数据中心政策和标准

从全球范围来看,在各国多项信息化政策和互联网产业的带动下,东南亚数据中心市场保持稳定增长。新加坡是东南亚地区最主要的数据中心市场,其规模约占东南亚数据中心的 50% 以上,而印度尼西亚数据中心起步较晚,但增长最为迅速^[24]。新加坡的数据中心市场发展最为成熟,政府目前主要针

对数据中心的能耗出台鼓励绿色数据中心发展的计划，而马来西亚则明确定位本国数据中心行业的发展目标，提出一系列发展规划和鼓励政策。新加坡的数据中心能源效率标准，帮助数据中心提高能源效率，节约能源并降低碳排放。在数据中心设计方面，鼓励数据中心在设计阶段就考虑能源效率，例如优化数据中心的布局和空气流动，降低冷却能耗。在数据中心运营方面，鼓励数据中心在运营中实施能源效率措施，例如定期进行能源审计，监控和优化能源使用。印度尼西亚政府则提出“印尼制造 4.0”计划，推进数据中心建设，普平数据，万国数据等第三方数据中心运营商将在印尼建设数据中心，印度尼西亚通信和信息部也宣布建设国家数据中心。

3.3 先进数据中心冷却技术

数据中心冷却是数据中心运行中的关键环节，因为它确保了设备能在适宜的环境下稳定运行。随着技术的发展，提高数据中心服务器的室内环境温度正在逐渐变得可行，将室内环境温度超过 27 °C 数据中心称为高温数据中心，高温数据中心服务器进风温度也比较高，一般在 25~40 °C^[25]。高温数据中心有诸多优点，但同时仍有技术难题亟待解决；低温数据中心技术成熟可靠，仍是目前广泛采用的数据中心。本小节将数据中心分为高温数据中心与低温数据中心分别展开介绍。

3.3.1 高温数据中心

随着信息服务需求的不断扩大，全球对数据中心的的需求在过去的几十年里急速攀升。然而，随之而来的是数据中心引发的能源消耗问题，该问题已经逐渐引起了全球的关注。相对于传统结构，数据中心是一种能源密集型的建筑。新建数据中心预计的能量耗散通量为 6 458~10 764 W/m²，而传统商业建筑中的空调系统的冷负荷仅为 40~86 W/m²。由此可见，新一代数据中心的冷负荷密度几乎是传统商业建筑的 100 倍。而提高数据中心的室内温度（即建造高温数据中心）可以通过采用自然冷却来显著降低冷却能源需求。

低温数据中心的温度通常被设置为 20~21 °C，为维持数据中心的低温，需要消耗大量能源，但实际上并非所有类型的数据中心都需要这么低温温

度。2011 年，美国供暖、制冷和空调工程师协会进一步扩大了 IT 设备的允许环境条件范围，并根据 IT 制造商提供的最新关键信息（IT 设计和故障数据），在其更新的指南中采用了两个新类别（A3 类和 A4 类）。更新的 A3 类环境的温度上限为 40 °C，A4 类环境的温度上限甚至达到 45 °C。

高温数据中心有以下优点：1) 高温数据中心可以采用更长的自然冷却时间，具有巨大的节能潜力；2) 数据中心温度越高，制冷机效率越高；3) 高温数据中心有更广泛的选址选择；4) 高温数据中心可以改善废热回收。后面将分别从房间级、机架级、服务器级和芯片级介绍实施高温数据中心的当前技术和可行解决方案。

房间级：提升数据中心冷却效率的有效方法之一就是优化气流管理，这样可以减少热空气的再循环和冷空气的旁通。大部分数据中心都存在热点问题，也就是某些局部区域的温度显著高于整个计算室的平均温度，这些热点的温度可能比计算室的平均温度高 8~10 K。因此，受到“短板效应”的影响，为了保证所有服务器的稳定运行，就需要更多的冷却能量和更低的供气温度。因此，房间级的改进方法主要是优化气流管理和消除热点。良好的气流管理允许服务器在较高的环境温度下运行。凭借良好的气流管理，来自计算室空气处理器的 24 °C 冷空气可使数据中心某处的服务器入口的最高温度为 25~26 °C，并且不存在热点问题。

下面将介绍几种改进方法。

1) 遏制策略：通道遏制策略，包括冷通道遏制和热通道遏制，是改善数据中心气流分布的有效手段，已被广泛使用。冷空气通过活动地板的穿孔瓷砖流入房间，被前侧的机架吸入，吸收机架产生的热量，并在每个机架的后部排出。随后，热空气被计算机室空调机组吸入，并被排到外部环境中。在占地面积为 52 m² 的数据中心进行的一项实验表明，相较于传统的开放式通道布局，冷通道的密封能显著消除机架入口处的热点问题。通过采用冷通道密封，机架入口的温度可以降低 40%，而且不需要改变房间的布局。其他研究发现，供气温度通过使用过道安全壳提高 3 K，或从 18 °C 升至 22 °C。研究还发现，与冷通道安全壳相比，热通道安全壳可节省 43% 的年度冷却系统能源成本。

2) 房间布局: 房间布局主要涉及房间形状优化、机架布局和机房空气处理器的位置。SCHMIDT 等^[26]研究了高架/活动地板供气系统, 并发现活动地板设计可以实现更高的供气温度。另一项研究结果显示, 在四个不同的系统中, 配备高架回流系统的活动地板送风系统展现出最优的冷却性能。这是因为该系统能以最低的送风流量, 在相同的热密度和送风温度下, 实现相同的平均温度。

3) 结构尺寸优化: 尺寸优化后的结构允许计算室空气处理器向计算室提供更高温度的冷空气。有研究表明, 通过优化增压室深度、天花板高度和冷通道位置, 可实现服务器入口温度下降 12 K。瓷砖方向也会影响气流分布, 已有文献研究了不同瓷砖方向的整体流速敏感性和流量分布变化: 穿孔砖的几何形状也对过道中的气流特性有相当大的影响。

机架级: 机架设计和服务器在机架内的布置方式会对热性能产生影响。在相同的冷却基础设施下, 针对机架级别的修改和优化可以将散热效率提升 50%, 同时将温度的可变性降低 60%。

针对机架级别冷却的创新技术也被视为提升冷却效率的有效措施, 详细介绍如下。

1) 机架设计和优化: 研究发现, IT 设备产生的热量, 如果孔隙率更高, 可以更有效地进行排放。通过将机架门的孔隙率从 25% 提升到 50%, 可以明显改进机架内部的热环境状况。服务器的放置会显著影响机架的热性能。一种抽屉式货架设计, 其热通道空间大, 冷通道空间小。该设计可减少热空气再循环和冷空气旁路, 并将机架最高入口温度降低至 13.3 K。CHU 等^[27]研究人员对服务器布置和热交换器布置对垂直气流均匀性产生的影响进行了研究。研究结果揭示, 服务器和热交换器的位置对于服务器入口处的气流分布有着重大影响。为了得出理想的服务器布置方式, 他们进行了一系列的类似测试, 以探究服务器布置和气流分布之间的关联性。对于低负载的情况, 研究建议将服务器从机架的中部到上部进行均匀地安装。

2) 创新的机架冷却技术: 采用固体吸附热管和直接空气冷却技术结合的机架级冷却方法应用于数据中心, 研究发现这种冷却方式可以将服务器的峰值温度从 75.8 °C 降至 68.8 °C, 服务器峰值温度的下降也意味着数据中心可以容纳更高的环境温

度。LI 等^[28]研究者提出了机架级的多分割背板冷却系统, 在一个可靠的运行控制策略下, 该系统最多能节省 12% 的能源消耗。

服务器级: 如今数据中心冷却系统是源自传统建筑的暖通空调系统的演变。区别在于, 数据中心冷却系统的主要服务对象为服务器, 而传统的办公室和住宅楼的服务对象则主要是人类。人的舒适温度范围相对较窄, 但服务器是人造的, 可以在结构和材料方面进行改良。重新设计服务器被认为是实现高温数据中心的一种可行且有效的策略。

重新设计服务器布局是提高散热效率的有效途径。对混合空气/液体冷却服务器的数值研究表明, 基本的服务器布局优化(如改变存储模块角度和间距)可以提高冷却效率和从气流中回收废热的潜力。服务器布局优化还可以将熵生成降低 15%。

SARMA 等^[29]对两机架单元高计算服务器的热设计进行了 CFD 模拟, 并总结了发现的问题以及合适的热设计方案。他们提出了为服务器配置混合冷却系统的建议。该系统将低功耗元件(如电源、存储磁盘驱动器和印刷电路板)的空气冷却以及高功耗元件(如微处理器和双列直插式内存模块)的水冷却集于一体。这类服务器可以接受 45 °C 的水和高达 50 °C 的空气进入节点, 总体上节省了 25% 的能源消耗。

为了研究服务器的内部设计对其性能和冷却效率的影响, 已在烟囱式排气架中对服务器进行了实验。由于设计不当导致的内部再循环可能会使热空气从服务器中泄漏至冷通道, 从而对邻近服务器的性能产生影响。由于这种泄漏, 相邻服务器的能耗提高了大约 20%。

芯片级: 芯片级冷却对象通常包括处理器、硬盘和存储器。通常, 芯片级的方案可分为先进芯片材料和芯片冷却两类。

1) 芯片材料: 具有宽带隙的第三代半导体, 如 GaN/SiC 设备被认为具有高性能, 这进一步提高了能量效率。更宽的带隙允许材料在更高的温度、更强的电压和更快的开关频率下工作。当应用于数据中心时, 这种先进的硅材料将显著提高数据中心行业的能源效率。

2) 创新的芯片冷却技术: 芯片冷却增强技术主要包括高导热性热界面材料和创新芯片冷却技术。

类技术能有效地提升热源（主要是处理器）的散热效能。纳米流体，例如 TiO₂ 纳米流体和 SiC 纳米流体，被发现具备高效冷却的潜力。相较于具有圆柱形槽散热器的去离子水，它们能将 CPU 表面温度下降约 3.3 K。

芯片级制冷技术适用于热限制应用，如热电冷却器和小型制冷循环。DENG 等^[30]研究了用于高热流密度芯片阵列热管理的两级多通道液态金属冷却系统。实验结果表明，所提出的液体金属冷却系统可以容纳 50~200 W/cm² 的热通量，对流传热系数超过 20 000 W/(m²·K)。NAPHON 等^[31]研究了带有蒸气室的硬盘驱动器冷却，发现带有蒸气室冷却系统的硬盘驱动器平均温度比没有蒸气室冷却的硬盘驱动器低 15.21%。

3.3.2 低温数据中心

虽然高温数据中心有诸多优点，但目前技术仍不够成熟，存在高温对服务器可靠性的影响、高温对服务器性能的影响、服务器成本溢价和运营成本节约之间的权衡等诸多限制，低温数据中心目前仍被广泛采用。在低温数据中心冷却技术中，液冷技术因为高散热密度等技术优势而得到广泛推广，液冷技术包括间接液体冷却与直接液体冷却两个部分。间接冷却技术的核心利用多种间接接触的方式达到冷却的效果，通过液冷散热器来控制温度目标。

4 结论

本文研究了中国数据中心在新型基础设施建设等策略下的市场规模与发展趋势，并对比了中外数据中心发展特点及政策导向，分析了近年来中国数据中心耗电量、算力规模、机架数等关键指标的变化趋势，重点解读了当前中国数据中心政策情况和发展趋势，得出如下结论：

1) 我国数据中心市场规模将保持持续增长态势，增长率将保持在 20%以上；“东数西算”政策驱动下，未来数据中心将朝着高效化、大型化、绿色化的新兴数据中心发展；冷却技术的高速发展将助力数据中心能效不断提升，使电能使用效率降至 1.1 左右；

2) 通过总结行业技术发展，我国数据中心将进一步与新技术融合，低碳节能、安全可靠、智慧赋能是未来数据中心技术发展趋势；

3) 全球数据中心也处于飞速变化当中，预计全球数据中心市场规模 2023 年市场收入将达到 2 220 亿美元；美国、日本、欧洲各国等发达国家以及发展中国家纷纷出台政策促进数据中心标准化与发展；在数据中心先进冷却技术方面，高温数据中心有诸多优点，但目前技术仍不够成熟，低温数据中心目前仍被广泛采用。

参考文献:

- [1] 中商产业研究院. 2023 年中国智算中心产业链上中下游市场分析[R]. 深圳: 中商产业研究院, 2023-06-01.
- [2] SHARMA R, BASH C, PATEL C. Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large-scale data centers[C]// 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. St. Louis, Missouri: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [3] SCHMIDT R R, CRUZ E E, IYENGAR M. Challenges of data center thermal management[J]. IBM Journal of Research and Development, 2005, 49(4/5): 709-723.
- [4] HERRLIN M K. Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices: The rack cooling index (RCI)[J]. Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2005, 111(2): 725.
- [5] VANGILDER J W, SHRIVASTAVA S K. Real-time prediction of rack-cooling performance[J]. ASHRAE Transactions, 2006, 112(2): 151.
- [6] VANGILDER J W, SHRIVASTAVA S K, VOGEL M. Capture Index: an airflow-based rack cooling performance metric/discussion[J]. ASHRAE Transactions, 2007, 113: 126.
- [7] HERRLIN M K. Improved data center energy efficiency and thermal performance by advanced airflow analysis[C]// Digital Power Forum. San Francisco, CA: Darnell Group, 2007.
- [8] TOZER R, SALIM M. Data center air management metrics-practical approach[C]// 2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas, NV, USA: Bangladesh Academy of Sciences, IEEE, 2010.
- [9] BHAGWAT H, SINGH A, VASAN A, et al. Thermal influence indices: causality metrics for efficient exploration of data center cooling[C]// 2012 International Green Computing Conference (IGCC). San Jose, CA, USA: IEEE Computer Society, IEEE, 2012.
- [10] 田浩, 李震, 刘晓华, 等. 数据中心热环境评价指标研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(5): 5-9.
- [11] 陈心拓, 周黎昀, 张程宾, 等. 绿色高效数据中心散热冷却技术研究现状及发展趋势[J]. 中国工程科学,

- 2022, 24(4): 94-104.
- [12] NASREEN S. A survey of feature selection and feature extraction techniques in machine learning[C]// Science and Information Conference. London, UK: IEEE, 2014.
- [13] Joshi Y, Kumar P. Energy efficient thermal management of data centers [M]. Boston: Springer, 2012.
- [14] 国家互联网数据中心产业技术创新战略联盟.《绿色节能液冷数据中心白皮书》[R]. 北京: 国家互联网数据中心产业技术创新战略联盟, 2023-08-05.
- [15] HUANG P, COPERTARO B, ZHANG X, et al. A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating[J]. Applied energy, 2020, 258: 114-119.
- [16] JAMALZADEH M, BEHRAVAN N. An exhaustive framework for better data centers, energy efficiency and greenness by using metrics[J]. Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSSE), 2012, 2(6): 2231-3850.
- [17] WHITEHEAD B, ANDREWS D, SHAH A, et al. Assessing the environmental impact of data centres part 2: Building environmental assessment methods and life cycle assessment[J]. Building and Environment, 2015, 93: 395-405.
- [18] 中国通服数字基建产业研究院.《中国数据中心产业发展白皮书(2023年)》[R]. 北京: 中国通服数字基建产业研究院, 2023-04-03.
- [19] 施耐德电气数据中心全球研发中心.《2023 看得见的未来:数据中心行业十大发展趋势》[R]. 北京: 施耐德电气, 2023-02-06.
- [20] 华为数字能源.《数据中心能源十大趋势白皮书》[R]. 深圳: 华为数字能源. 上海: 上海华为数字能源技术有限公司, 2023-03-23.
- [21] UpTime.《Global Data Center Survey 2022》[R]. NewYork: UpTime, 2022-09-14.
- [22] U.S. Federal Chief Information Officer. Federal cloud computing strategy[Z/OL]. (2019-01-24) [2024-03-04]. <https://www.whitehouse.gov/wpcontent/uploads/2019/06/Cloud-Strategy.pdf>.
- [23] United States House of Representatives. American Data Privacy and Protection Act [Z/OL]. (2022-01-21) [2024-03-04]. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/8152/text>.
- [24] 科智咨询.《东南亚 IDC 产业发展研究报告》[R]. 北京: 科智咨询, 2018-08-15.
- [25] ZHANG Y, SHAN K, LI X, et al. Research and Technologies for next-generation high-temperature data centers-state-of-the-arts and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171: 112-119.
- [26] GONDIPALLI S, BHOPTE S, SAMMAKIA B, et al. Effect of isolating cold aisles on rack inlet temperature[C]// 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IEEE, 2008.
- [27] CHU W X, WANG C C. A review on airflow management in data centers[J]. Applied Energy, 2019, 240: 84-119.
- [28] LI X, ZHANG C, SUN X, et al. Experimental study on reliable operation strategy for multi-split backplane cooling system in data centers[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118-124.
- [29] SARMA A N S V S, AMBALI V D. Cooling solution for computing and storage server[C]// 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE, 2017.
- [30] DENG Y, ZHANG M, JIANG Y, et al. Two-stage multichannel liquid-metal cooling system for thermal management of high-heat-flux-density chip array[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 259: 115-119.
- [31] NAPHON P, WONGWISES S, WIRIYASART S. Application of two-phase vapor chamber technique for hard disk drive cooling of PCs[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 40: 32-35.

敬请关注我们!



制冷技术期刊资讯
微信订阅号



制冷技术期刊
微信服务号



上海市制冷学会
微信公众号



中国制冷学会
微信公众号

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2024.z1.102

中小型数据中心冷却系统末端气流组织问题分析和优化

黄冬梅¹, 郑品迪^{*1}, 郑竺凌², 韩泽磊¹, 杨超¹, 龚红超¹, 钟志鲲³

(1-北京瑞思博创科技有限公司, 北京 100036; 2-上海建科节能技术有限公司, 上海 200032;
3-普洛斯企业发展(上海)有限公司, 上海 200023)

[摘要] 本文针对中小型数据中心冷却系统末端气流组织形式问题、机房渗透风问题和末端空调设定问题提出优化建议。末端气流组织问题分析了不同的气流组织形式, 如弥漫式送风形式、间接蒸发冷侧送风形式、列间空调送风形式、背板空调送风形式、顶置空调送风形式和地板下送风形式的通用问题及解决方法。机房渗透风问题, 主要表现为 IT 机房或空调机房通过门窗、电缆井、新风机与外部联通后导致的气流冷热掺混; 末端空调参数设定问题, 表现为空调参数设定不合理引起的空调控制问题, 从而导致空调不能正确地送出 IT 设备所需要的冷量和风量等问题。分析结果展现本文提出的分析和优化建议可以应用到实际数据中心改造实施中, 可以有效改善机房的热点和能效问题。

[关键词] 中小型数据中心; 末端; 气流组织形式; 机房渗透风; 空调参数设定

中图分类号: TB61⁺¹; TQ051.5

文献标识码: A

Problem Analysis and Optimization of Airflow Field at Cooling System Terminal in Small and Medium-sized Data Centers

HUANG Dongmei¹, ZHENG Pindi^{*1}, ZHENG Zhuling², HAN Zelei¹,
YANG Chao¹, GONG Hongchao¹, ZHONG Zhikun³

(1-Beijing Rainspur Technology Co., Ltd., Beijing 100036, China; 2-Shanghai JianKe Building Energy Service Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3-Global Logistic Properties (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200023, China)

[Abstract] The analysis methods and optimization suggestions for small and medium-sized data center cooling system end airflow organization problems, machine room infiltration air problems and end air conditioning setting problems are proposed in this paper. The general problems and solutions of different airflow organization forms are analyzed based on the end airflow organization problem, such as diffuse air supply form, indirect evaporative cooling side air supply form, in-row air conditioning air supply, backboard air conditioning air supply, overhead air supply, and underfloor air supply. The problem of air infiltration in computer rooms mainly manifests as the mixing of cold and hot airflow caused by the connection of IT or air conditioning rooms to the outside through the windows and doors, cable wells, new air conditioners and external links. The problem of setting parameters for terminal air conditioning is manifested as air conditioning control issues caused by unreasonable air conditioning parameter settings, resulting in air conditioning not being able to correctly deliver the required cooling and air volume for IT equipment. The analysis results show that the analysis methods and optimization suggestions proposed in this paper can be applied in the implementation of the actual data center transformation, which can effectively improve the hot spots and energy efficiency problems in the server room.

[Keywords] Small to medium-sized data center; End of cooling system; Airflow; Room infiltration ventilation; Air conditioner unit parameter settings

*郑品迪 (1983—), 男, 高级工程师, 硕士。研究方向: 数据中心 CFD 能耗与热点管理。联系地址: 北京海淀区复兴路 61 号恒欣商务大厦 302, 邮编 100036。联系电话: 010-68277400。E-mail: zhengpindi@rainspur.com。

0 引言

中小型数据中心冷却系统末端冷却问题表现为多种形式，如多样的冷却系统气流组织类型^[1-2]，复杂的机柜、IT 设备结构，不规范的设备布局，不合理的冷量冗余与不均匀的机柜负载，不合理的冷却控制方式与控制值，以及现场对改造优化的限制都会导致冷却系统末端的高耗能，低效率，并危及 IT 设备运行安全。本章首先说明末端冷却的分析范围和要求，然后对提出的这些问题进行了梳理和总结，分类规整并提出了改造方法，以案例的形式进行陈述。

末端问题诊断和改造的价值体现：数据中心的能耗^[3-7]主要包括各类 IT 设备能耗、冷源末端等制冷系统能耗、供电系统能耗，及其他部分能耗。其中各类 IT 设备能耗超过整个系统能耗的 40%以上，这些 IT 设备包括核心交换机，服务器、存储、监控系统等。制冷系统是数据中心能耗最高的辅助系统占比可能超过 35%。

如表 1 所示，当制冷系统对应的能耗占比分别为 38%、33%、22%和 12%时，对应的能源使用效率（Power Usage Effectiveness, PUE）可以分别为 2.0、1.7、1.4 和 1.2。因此，在数据中心能耗组成中，空调系统的能耗是数据中心的 PUE 是否能降低到合理水平的关键因素之一。

表 2 所示为某典型数据中心冷冻水制冷系统能

耗占比，其中末端能耗占比为制冷系统总能耗的 33%。因此，对制冷系统末端进行合理的诊断与改造可以有效降低数据中心 PUE。

表 1 不同系统能耗占比对应的 PUE

PUE	能耗占比/%		
	IT 设备	制冷系统	其他用电
2.0	50	38	12
1.9	53	37	10
1.8	56	35	9
1.7	59	33	8
1.6	63	31	7
1.5	67	26	7
1.4	71	22	6
1.3	77	17	6
1.2	83	12	5
1.1	91	5	4

表 2 典型工况下数据中心制冷系统能耗占比

设备	制冷能耗占比/%
冷机	27.65
冷冻水泵	18.20
冷却水泵	16.90
冷却塔	4.16
末端	33.10

末端冷却分析范围：末端冷却问题分析主要集中在机房包间内，由空调末端、机柜和 IT 设备等其他发热设备构成的热环境。末端冷却分析范围为图 1 所示的黑色虚线框包含的设备，分析讨论因为设备布局不合理、气流组织设计不佳导致的热点与冷却能效问题。

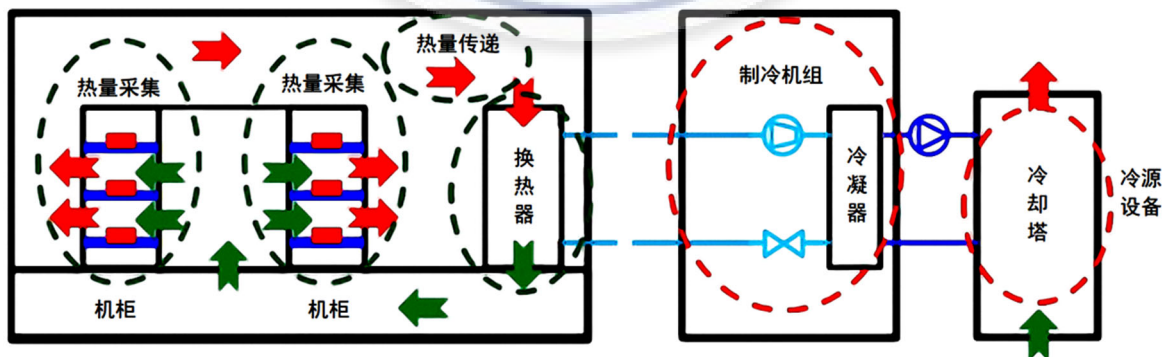


图 1 末端冷却分析范围

末端空调气流组织与机房温度要求：良好的机房热环境能够保证机房内的通信设备的正常运行，精密空调是数据中心关键基础设施。机房空调通过多种多样的控制方式，比如送风温度控制，回风温度控制，温差控制等，实现对机房温湿度，洁净度

的控制，保证机房热环境满足设备运行要求，保证机房无热点，并且能够节能运行，不断挖掘机房空调的最大节能潜力，安全与高效节能协调进行。

机房温度、湿度、洁净度和气流速度可以统称为空调系统的四度，因为机房湿度范围要求较宽，

洁净度对机房的热点与能耗影响较小，所以如下将主要讨论温度和气流速度相关的气流组织的影响。

末端机房环境温度的规范和标准方面，在 GB50174—2017^[8] 中要求机房推荐温度范围为 18~27 °C。从空调四度看通信机房节能^[9]中提出对不同业主的多样性的要求，该多样性体现在机房的类型，如一级数据中心、二级数据中心、三级数据中心，或者企业机房、互联网机房、运营商机房等，机房虽然多样但如果是相同的 IT 设备，则对温度的要求相同，不同的是末端的运行控制方式，但是上述多样性的机房仍然有不同的温度要求，所以为了节能可以放宽 IT 设备进风温度要求范围。

对于机房末端的气流组织，在 T/NIISA 003—2019 数据中心气流组织技术规范^[10]做了详细的要求，在确定数据中心气流组织方案时，在无其他限定条件的情况下，首先应考虑地板送风系统的可行性；随着功率密度的提升，考虑将制冷终端引入列间，采用近端供冷系统；当功率密度进一步提升，应考虑采取液冷系统。

冷却系统末端冷却问题按照气流组织类型可以归为：弥漫式送风，静压室侧送风，列间空调气流组织，背板空调气流组织，顶置空调气流组织，以及地板下送风气流组织等。下面将分别说明不同类型的气流组织存在的问题与解决方法。

1 常见末端气流组织形式问题分析与优化

1.1 弥漫式送风气流组织

弥漫式气流组织可以根据回风的不同方式分为：无组织回风、风管上回风、吊顶回风以及封闭热通道吊顶回风。

1) 弥漫式送风、无组织回风

在传统机房内，机房受限于房间高度的原因，无法采用架高地板或者吊顶等，机房容易出现气流组织的问题。一些老旧机房，由于机柜功率密度相对偏低，常采用弥漫式送风、自由回风的方式，没有合理的气流组织。机房采用弥漫式送风无组织回风的布局时，其结构简单、安装便利、建筑成本低。但是容易出现冷风送风不均匀，冷热气流掺混的现象，造成局部区域过热，出现局部热点。因此，其适用于发热量较低的机房或者对气流组织要求

不严的空间。目前常用于机房配电室中。

图 2 机房包含为 32 台机柜分 4 排进行布置，采用 3 台空调进行送风。机房整体采用弥漫式送风，自由回风的方式。机柜采用“面对面，背对背”的方式进行布置，空调送风方式为下送风，上部回风。冷风从空调送出后，进入机柜后冷却 IT 设备，温度升高成热风从机柜后门流出，再流到机房上部回风回流进空调回风口完成循环。

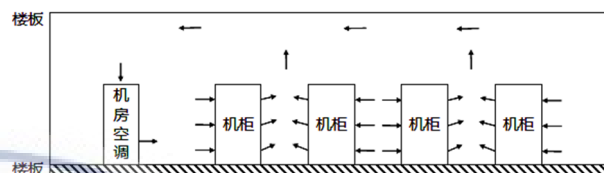


图 2 弥漫式送风气流组织

机房的分析方法主要是通过计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模拟^[10-13]的方法来分析机房温度分布和是否存在热点问题。

图 3 所示为机房半高 1 m 处温度分布，空调使用下送风的方式时，空调正对机柜前门处温度较低，机房整体温度分布不均匀。热通道处有冷气流流进热通道的现象，会出现冷热掺混的问题。

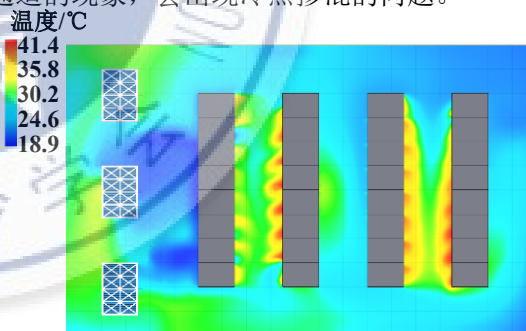


图 3 弥漫式机房半高 1 m 处温度分布

存在的问题：机房采用弥漫式送风的方式，送风方式无组织，空调冷风无法均匀送到机柜前门。

机房有冷热通道布置，没有进行封闭处理，冷气流会回流进热通道，存在冷热掺混的现象。空调送风气流碰到机柜阻挡后，部分气流直接回流进了空调回风口。

优化方法：调整空调送风方向和机柜布置方向，使空调下送风能够送到机房冷通道内。在空调底部采用风箱进行连接，采用风管送风，在机柜通道处设置送风口。

优化方案：在空调底部采用风管进行送风，图 4 所示，优化空调送风方式。

机房优化送风方式采用风管送风后，空调冷气流能够通过风管送到每个冷通道内，能够使每个冷通道都得到冷空气，能够有效降低远离空调的机柜的进口温度。由图 5 温度分布可知：风管把冷气流送到每个冷通道处，冷通道中部温度较低，远离空调的机柜也能得到充足的冷空气。

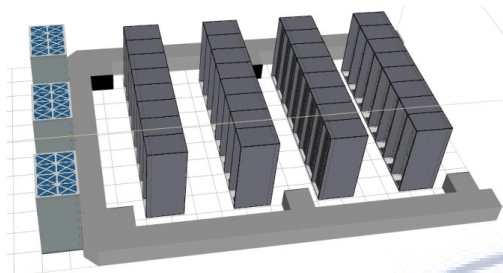


图 4 弥漫式机房 3D 模型图-优化

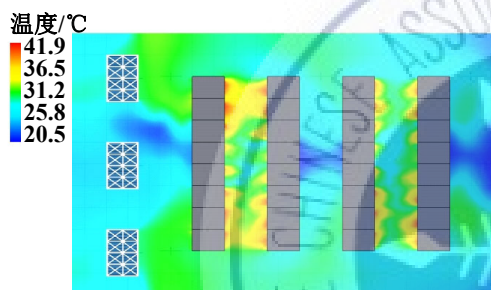


图 5 弥漫式机房半高 1 m 处温度分布-优化

2) 弥漫式送风、风管上回风

在传统机房内，机房受限于房间高度的原因，无法采用架高地板或者吊顶等，机房内易出现气流组织的问题。该模型在传统机房弥散式送风自由回风的基础上，对回风进行优化，采用风管进行回风。

图 6 所示为机房布置，包含为 32 台机柜分 4 排进行布置，采用 3 台空调进行送风。机房整体采用弥散式送风，风管回风的方式，风管回风口设置在热通道上部。机柜采用“面对面，背对背”的方式进行布置，空调送风方式为下送风，上部风管回风。冷风从空调送出后，进入机柜后冷却 IT 设备，温度升高成热风从机柜后门流出，经过上部风管回风流进空调回风口完成循环。

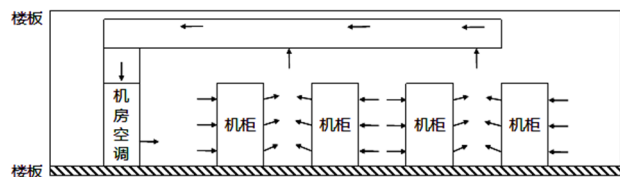


图 6 弥漫式机房风管布置

通过 CFD 模拟的方法来分析机房温度分布和

是否存在热点问题。

由图 7 机房半高处温度分布可知：空调使用下送风的方式时，空调正对机柜前门处温度较低。热通道处也存在房间冷气流流进热通道的现象，会出现冷热掺混的现象。

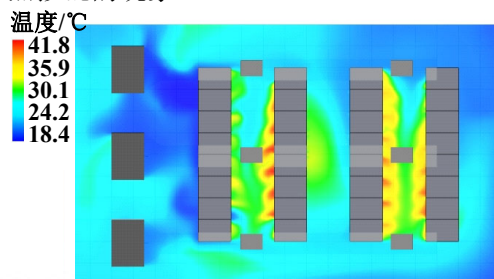


图 7 弥漫式风管送风机房半高 1 m 处温度分布

主要存在的问题：机房采用弥漫式送风的方式，送风方式无组织，空调冷风无法均匀送到机柜前门。机房有冷热通道布置，没有进行封闭处理，热气流会回流进热通道，存在冷热掺混的现象。

优化方法：调整空调送风方向和机柜布置方向，使空调下送风能够送到机房冷通道内，如图 8 所示。

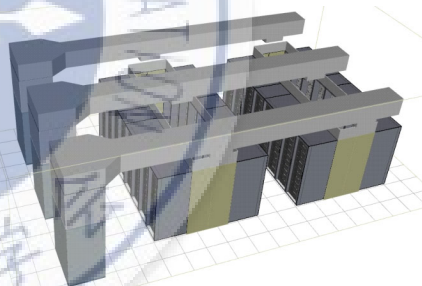


图 8 弥漫式风管送风机房 3D 模型-优化

采用半封闭热通道，只封闭热通道四周，通道顶部不封闭，用空调回风管回风。

机房封闭热通道四周，顶部不封闭后，能够有效解决热通道处的冷热掺混问题。由图 9 温度分布可知：机房热通道位置不存在冷热掺混问题，机房整体区域温度保持在偏低水平，空调冷气流能够冷却整个机房区域。

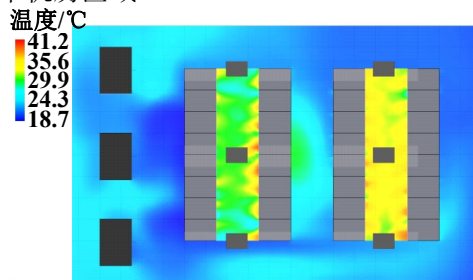


图 9 弥漫式风管送风机房半高 1 m 处温度分布-优化

3) 弥漫式送风、吊顶上回风

在传统机房内，机房受限于房间高度的原因，无法采用架高地板或者吊顶等，机房容易出现气流组织的问题。该模型在传统机房房间高度足够时，可以在机房上方布置吊顶，空调回风通过吊顶进行回风。

图 10 所示为机房布置。机房包含为 32 台机柜分 4 排进行布置，采用 3 台空调进行送风。机房整体采用弥漫式送风，吊顶回风的方式。机柜采用“面对面，背对背”的方式进行布置，空调送风方式为下送风，吊顶回风。冷风从空调送出后，进入机柜后冷却 IT 设备，温度升高成热风从机柜后门流出，热风经过吊顶格栅从吊顶回风进入空调。

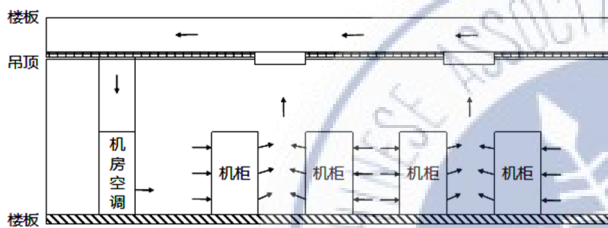


图 10 弥漫式吊顶回风机房布置

以下包括两种吊顶回风方式：弥漫式送风、吊顶回风。机房的分析方法主要是通过计算流体动力学模拟的方法来分析机房温度分布和是否存在热点问题。

由图 11 机房半高处温度分布可知：空调使用下送风的方式时，空调正对机柜前门处温度较低。热通道处也存在房间冷气流流进热通道的现象，会出现冷热掺混的现象。

主要存在的问题分析：机房采用弥漫式送风的方式，送风方式无组织，空调冷风无法均匀送到机柜前门。

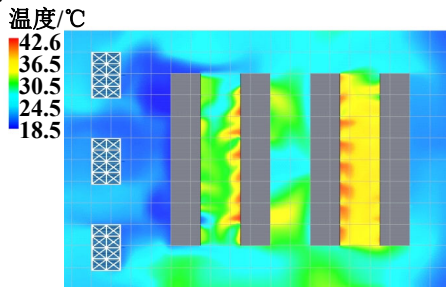


图 11 弥漫式吊顶回风机房半高 1 m 处温度分布

机房有冷热通道布置，没有进行封闭处理，热气流会回流近热通道，存在冷热掺混的现象。

优化方法：调整空调送风方向和机柜布置方向，

使空调下送风能够送到机房冷通道内。

采用高架地板下送风，吊顶回风的方式，能够优化机房气流组织。能够减弱冷热掺混产生的热点问题。由图 12 机房半高处温度分布可知：空调使用地板下送风时，机房高架地板出口处温度保持在较低水平，冷气流向四周扩散，机房温度也处在低温水平。

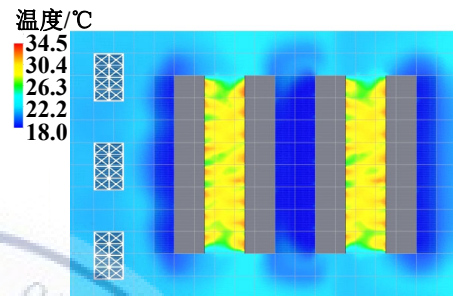


图 12 弥漫式吊顶回风机房半高 1 m 处温度分布-优化

4) 弥漫式送风、封闭热通道吊顶回风。如图 13 所示。

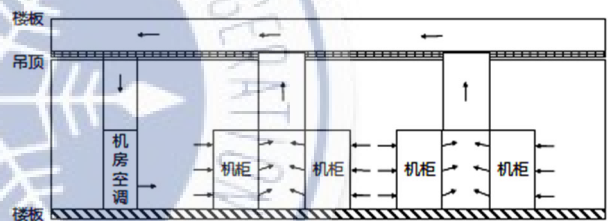


图 13 弥漫式封闭通道吊顶回风机房布置

机房包含为 32 台机柜分 4 排进行布置，采用 3 台空调进行送风。机房整体采用弥漫式送风，吊顶回风的方式。机柜采用“面对面，背对背”的方式进行布置，空调送风方式为下送风，吊顶回风。冷风从空调送出后，进入机柜后冷却 IT 设备，温度升高成热风从机柜后门流出，热风经过吊顶格栅从吊顶回风进入空调。

由图 14 机房半高处温度分布可知：机房采用下送风、封闭热通道吊顶回风时，机房整体温度处于较低水平，温度分布较均匀。封闭热通道完全隔离了冷热气流，不存在房间冷气流流进热通道的现象，解决了冷热掺混的问题。

主要存在的问题分析：机房采用弥漫式送风的方式，送风方式无组织，空调冷风无法均匀送到机柜前门。

优化方法：调整空调送风方向和机柜布置方向，使空调下送风能够送到机房冷通道内。调整空调送风方式，采用地板下送风的形式，使空调冷风能够

送到机柜处。

优化方案：采用地板下送风，优化空调送风方式。图 15 所示为机房 3D 模型图。

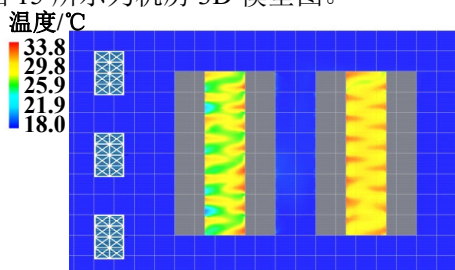


图 14 弥漫式封闭通道吊顶回风机房半高 1 m 处温度分布

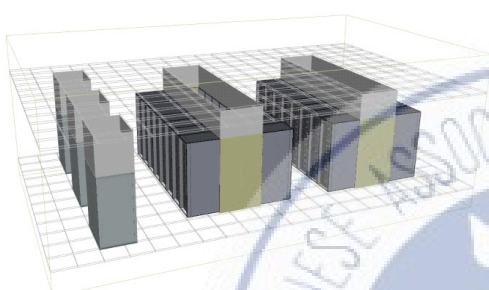


图 15 弥漫式封闭通道吊顶回风机房 3D 模型图-优化

采用高架地板下送风，封闭热通道吊顶回风的方式，能够优化机房气流组织。封闭通道使冷热气流得以隔离，能够有效解决冷热掺混问题。

由图 16 温度分布可知：机房热通道位置无冷热掺混问题，机房整体区域温度保持在较低水平。

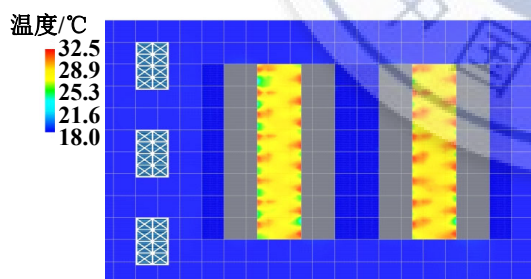


图 16 弥漫式封闭通道吊顶回风机房半高 1 m 处温度-优化

1.2 间接蒸发冷侧送风气流组织

静压室侧送风、吊顶上回风形式的气流组织主要应用于间接蒸发冷却空调。如图 17 所示，空调送风进入静压室，随后通过静压室的风口将冷风送入机房内。

间接蒸发冷却 (Indirect Evaporative Cooling, IEC) [14-17] 是蒸发冷却技术中的一种。在《工业和信息化部 国家机关事务管理局 国家能源局关于加强绿色数据中心建设的指导意见》中明确提出，要加快先进适用绿色技术产品推广应用，在对高效制

冷系统的利用方面重点强调了间接蒸发冷却技术的应用。

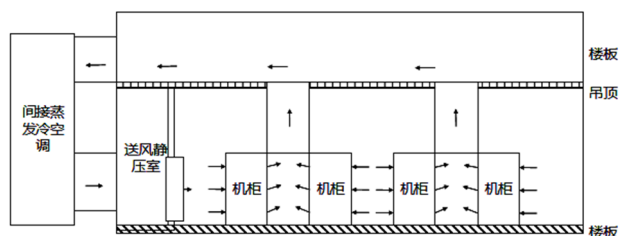


图 17 静压室侧送风和吊顶上回风形式气流组织

主要存在的问题分析与优化：

1) 由于间接蒸发冷却空调单体风量较大，送风口风速普遍较高。如果静压室送风口开口率较高，容易导致静压室静压效果不佳。图 18、图 19 所示为不同风墙开口率的静压室静压效果对比。可知空调均处于相同工况，改变静压室送风风墙的开口率后，可以发现随着开口率的降低，静压室内压力分布更加均匀。更好的静压效果意味着更均匀的出风速度以及更远的空气输送距离；

2) 更低的风墙开口率可以带来更好的静压室静压效果，但过小的开口面积同样会导致一些问题。如图 20 所示空调机外余压不足，或风墙出风速度过高；

3) 如图 21 所示，由于间接蒸发冷却空调体积较大，部分机房难以做到出风口与通道布局完全匹配，此时会产生送风与机柜侧的碰撞，送风方向快速变化，流速加快，同样也会导致机柜前门处存在小范围的负压区，导致热空气回流。

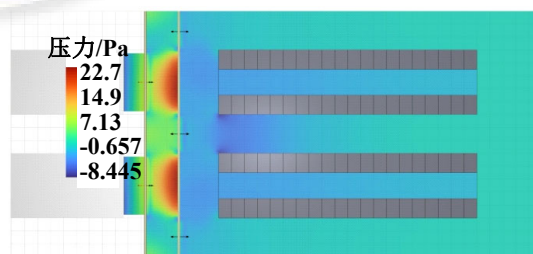


图 18 机房压力分布-静压室静压效果不佳

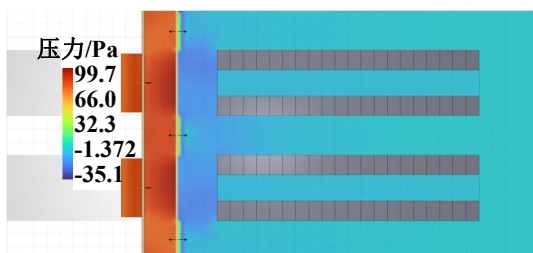


图 19 机房压力分布-静压室静压效果良好

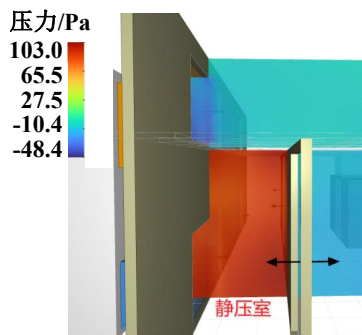


图 20 极小的风墙开口率导致空调机外余压不足

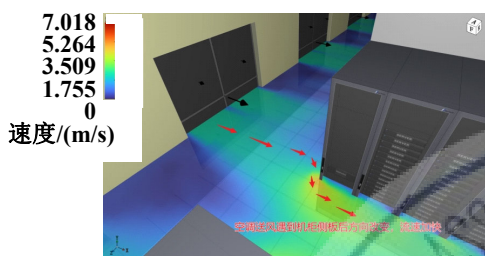


图 21 出风与机柜碰撞形成局部负压区

优化方法：可以通过仿真模拟软件进行静压室风口开孔面积寻优，通过软件模拟，提前分析不同的开口率的静压室压力分布及风速分布情况，找到针对目标机房的最优风墙开口率。

图 22~图 23 所示为不同风墙开口率模拟速度寻优。80%风墙开孔率的时候风速降低到 3.9 m/s，可以有效提高局部负压区的压力。

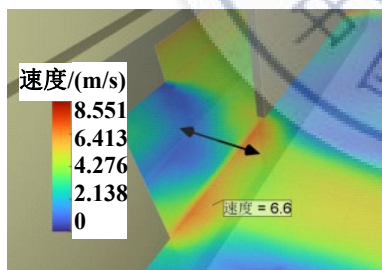


图 22 30%风墙开口率

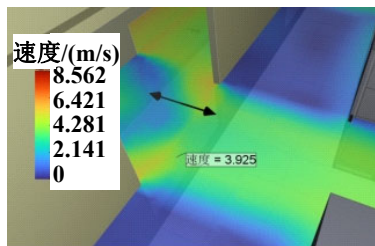


图 23 80%风墙开口率

1.3 列间空调气流组织

列间空调是放在服务器机柜列间，用于近端直接供冷的设备，主要应用于高热密度数据中心或高密机柜局部冷却。图 24 所示为冷通道封闭列间空调

调气流组织。

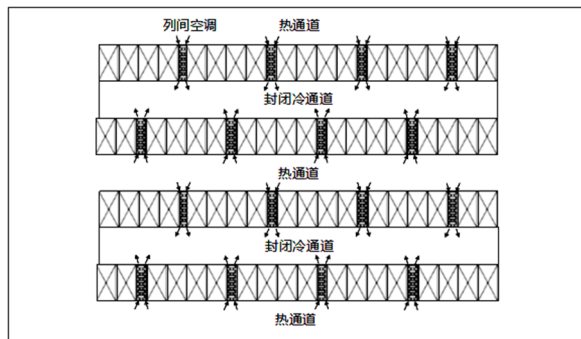


图 24 冷通道封闭列间空调气流组织

列间空调布置在机柜中间，实现就近制冷，可有效解决高密度功率服务器，消除局部热点。图 25 所示为房间级空调+列间空调气流组织。

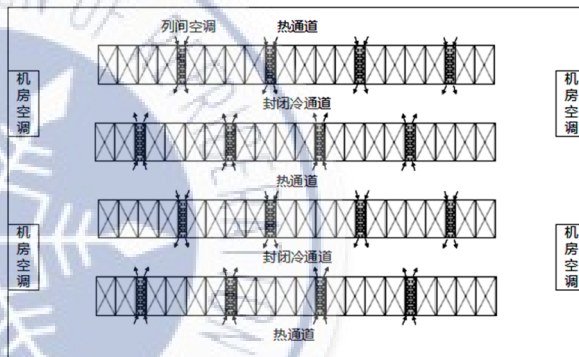


图 25 房间级空调和列间空调气流组织

冷冻水型列间空调具有以下几个特点：1) 冷冻水型列间空调距离热源更近，送回风距离更短，降低了送回风过程中的损耗；2) 冷冻水型列间空调与机柜并排安装，送风口位于冷通道、回风口位于热通道，采用了水平送风方式，安装位置灵活；可有效解决机房局部功率密度过高或存在局部热点的问题，提高了服务器的运行可靠性；3) 因冷冻水直接进入机房，且位置靠近服务器机柜，导致服务器的安全系数有所降低，因此需做好漏水检测及相应的应急措施，确保设备安全运行。

主要存在的问题分析与优化：

1) 列间空调在大多数的应用场景下会采用封闭通道的形式进行气流遏制，但是部分机房存在通道或者机柜密封性不佳的问题，密封性对比如图 26 和图 27 所示；对于采用列间空调制冷形式的机房，相比于其他区域，列间空调出风口对侧的机柜密封性不佳时，由于受到空调直吹的影响导致冷量浪费明显更大；

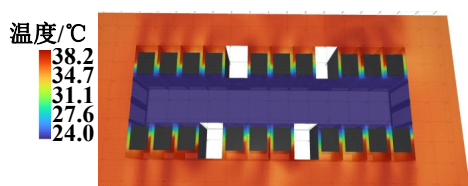


图 26 密封性较好的通道温度分布

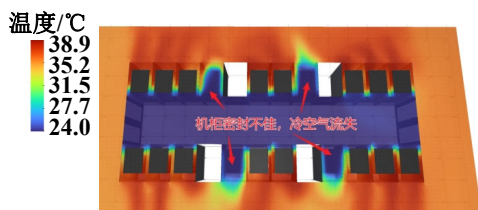


图 27 密封性较差的通道温度分布-大量冷风流失

2) 列间空调在处理局部热点问题时布局不合理, 当机房内新增大功率机柜时, 运维人员经常会重点关注大功率机柜自身的散热情况, 但除此之外, 同时也应当考虑大功率机柜带来的高进风量与高排热量对机房内其他设备的影响; 如图 28 和图 29 所示, 增加大功率机柜后, 温度上升最明显的机柜并不是大功率机柜所在区域, 因此如果需要额外增加列间空调处理大功率机柜的热负荷时, 需要慎重考虑列间空调的安装位置。

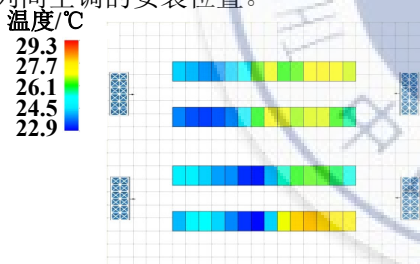


图 28 机柜温度现状图

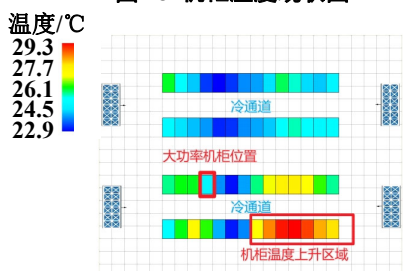


图 29 增加大功率机柜后机柜温度分布

优化方法: 通过计算流体动力学气流组织仿真模拟, 详细分析增加大功率机柜后的后影响区域, 进行更加合理的列间空调布局, 可以有效消除机房内的局部热点。图 30 所示为在大功率机柜对侧增设列间空调。图 31 所示为根据仿真模拟结果增设列间空调。通过模拟验证结果可知: 在大功率机柜

对侧设置列间空调后, 机房内仍有多个局部高温区域, 而通过模拟分析后设置的列间空调, 可以有效消除局部热点, 机柜整体温度也普遍较低。

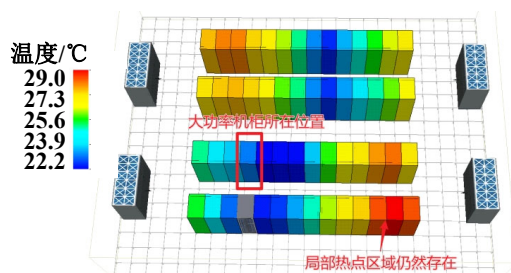


图 30 在大功率机柜对侧增设列间空调机柜温度分布

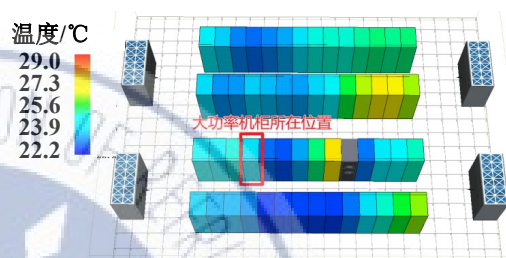


图 31 根据仿真模拟结果增设列间空调机柜温度分布

1.4 背板空调气流组织

制冷背板空调的换热盘管一般位于机柜的前门或后门。如图 32 所示, 换热盘管位于前门时, 机房内大环境为高温热环境, 热空气进入机柜后, 经过盘管冷却后用于 IT 设备散热。如图 33 所示, 换热盘管位于机柜后门时, 机房内大环境为冷环境, 冷空气吸收 IT 设备的热量后, 先经过换热盘管降温后再排出机柜。

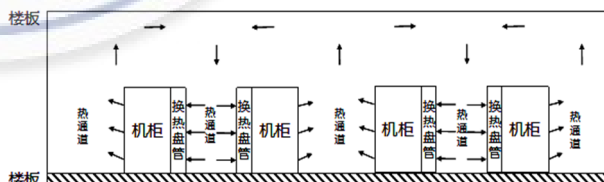


图 32 换热盘管位于机柜前门的气流组织

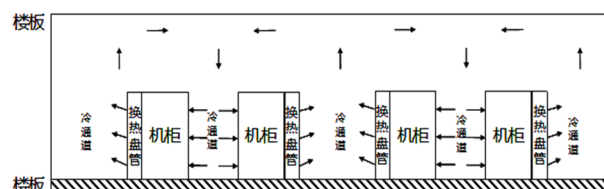


图 33 换热盘管位于机柜后门的气流组织

主要存在的问题分析与优化包含以下两个方面的内容。

- 1) 柜密封性不佳导致的冷热空气掺混
制冷背板空调通过缩短设备至空调的距离降

低风机能耗，同时也将设备的热排风遏制在机柜内部。但密封不佳的机柜会有热空气回流的问题，导致设备进风温度高。如图 34 所示，由于机柜密封性降低，部分热空气会从机架安装导轨位置回流至冷区导致设备温度上升。

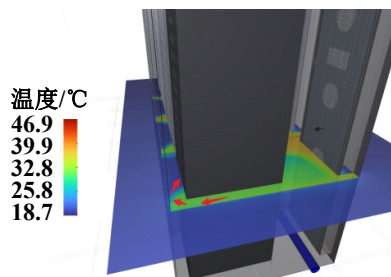


图 34 机柜内热风回流

2) 风机风量与 IT 设备风量不匹配导致的机柜内部压力过大/过小问题

由于 IT 设备本身具有主动散热风扇，因此需要确保 IT 设备的散热循环风量与制冷背板的风扇散热风量一致，才能确保机柜内部的压力始终处于合理范围。

通常机房空调采用定温差的方式控制风机转速，但如上文所述，机柜内多台 IT 设备复合安装的情况下，难以确定其综合散热温差，因此容易出现空调风机的控制温差与 IT 设备的散热温差差异较大的情况，导致机柜内部压力过大或过小。

优化方法：增加机柜密封性降低空气渗漏风险，传统机柜一般仅对机柜正面进行密封措施，对于制冷背板空调，可以在 IT 设备排风口位置额外设置一圈密封结构，达到前后双层密封效果，提升气密性。图 35 所示为机柜内良好密封。

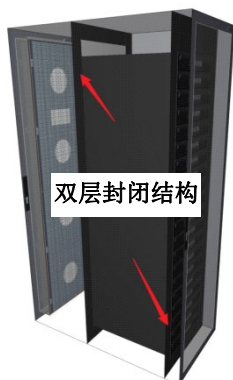


图 35 机柜内良好密封

图 36 所示为机柜内良好密封温度分布。密封良好的机柜热空气被遏制在机柜内部，只能经由制

冷背板冷却，IT 设备温度较低，且冷热空气的低掺混度提升了空调送回风温差，从而提升空调能效。

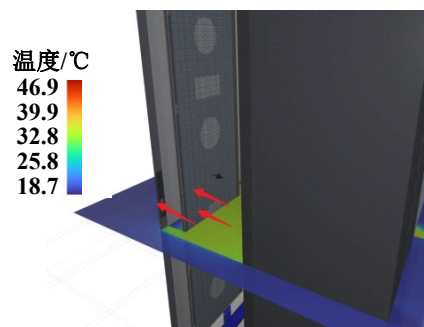


图 36 机柜内良好密封温度分布

1.5 顶置空调气流组织

顶置热管空调系统是一种高效、环保、节能的数据中心冷却方式。该系统将热管技术应用于数据中心，通过顶置的热管空调设备，实现对服务器机柜的精确制冷，有效地解决了传统冷却方式存在的效率低下和能耗高的问题。

顶置空调通常有两种形式，一个是灵活性较强，对机房层高要求较低的机柜顶部安装形式。该种方式可以灵活地进行空调布局，便于有效针对局部热点区域进行局部冷却，同时不占用地面空间，便于安装改造。适用于有局部热点问题的低层高机房或机房改造。图 37 所示为机柜顶部安装方式的顶置空调气流组织。另一种为冷通道顶部安装方式，该方式通常会配合冷通道封闭，进一步对气流组织进行遏制，避免冷热空气掺混。该方式对层高要求较高，但同样有着不侵占地面空间的优势，同时，将空调置于冷通道顶部也可降低由空调漏水带来的安全隐患。图 38 所示为机柜顶部安装方式的顶置空调气流组织。

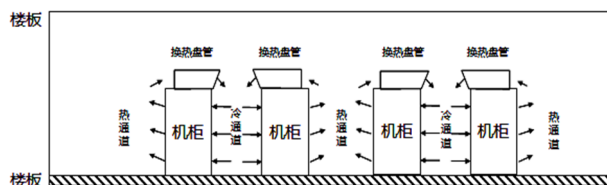


图 37 机柜顶部安装方式的顶置空调气流组织

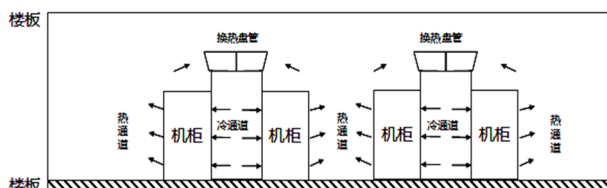


图 38 机柜顶部安装方式的顶置空调气流组织

主要存在的问题：机柜密封不良导致的冷热空气掺混。问题分析：对于置顶空调而言，机柜的顶部和底部是最易产生空气泄漏的区域，由于置顶空调的气流组织特性，机柜顶部空气流速快，静压更低，是易产生热空气回流的区域；空调送风与地板碰撞后向两侧扩散，因此机柜底部容易发生冷空气流出的问题；顶部的热空气回流导致顶部 IT 设备气流短路，而底部冷空气流出会导致冷量浪费，降低回风温度从而降低空调换热效率，不利于节能。图 39 所示为通道温度剖面图。

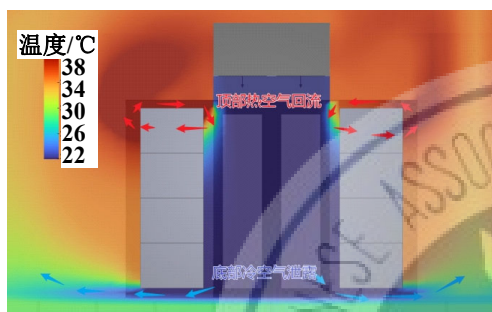


图 39 通道温度剖面图

实际机房中由于机柜顶部常用于安装交换机等设备，走线杂乱，经常不进行盲板封闭，底部由于机柜制造误差或便于走线也会空余 1~2 U 的高度，此类习惯在传统空调机房中对气流组织影响相对较小，但置顶空调的气流组织形式则会放大这部分的影响。

优化方法：对于未进行盲板封闭的槽位进行盲板封闭，部分机房由于既存设备冲突无法安装盲板时，可以利用挡风垂壁结构，防止回流的热空气进入 IT 设备，从而有效降低设备温度。图 40 所示为机柜顶部挡风垂壁安装。



图 40 机柜顶部挡风垂壁安装

优化前后的模拟结果如图 41 和图 42 所示。模拟结果显示，原本泄漏较严重的位置，经过密封性优化后顶部热空气回流现象消失，底部仍有少量冷风泄漏，但泄漏量明显降低。

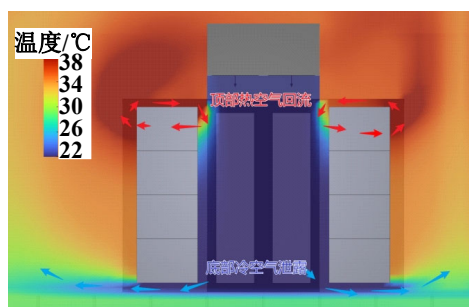


图 41 温度剖面（顶部底部无盲板）安装

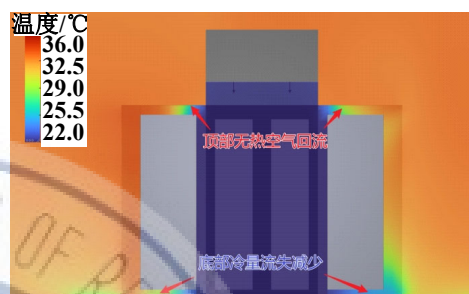


图 42 温度剖面（底部盲板封闭，顶部挡风垂壁）

1.6 地板下送风气流组织

地板下送风一般采用房间级精密空调将冷却的空气送入到高架地板，高架地板形成静压腔，然后通过通风地板送到机柜入口附近，部分空气被 IT 设备吸入，用于冷却 IT 设备，部分直接返回空调回风口或者在数据中心内循环。对于高架地板下送风，不同空调回风设计，决定了冷却空气的利用效率不同，对于节能至关重要。因此有必要研究不同回风设计下，气流组织的特点，存在的问题及如何进行优化。

1) 地板下送风、自然回风

该形式的机房：高架地板送风、自然回风一般是指冷却空气从通风地板出来，进入冷通道，机柜内的 IT 设备吸入空气冷却 IT 设备后从机柜排出，排出的热空气通过空调隔间回到空调回风口降温。图 43 所示为一种典型的形式。

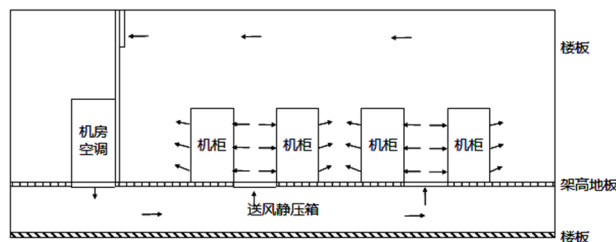


图 43 高架地板下送风和自然回风典型结构

主要存在的问题及诊断方法：这种形式的气流组织形式典型的问题是通风地板的出风量比较难

控制，从机柜出来的热风在回到空调隔间的过程中，与各个冷通道的冷风进行掺混，导致进入机柜的空气温度升高，尤其是端部机柜，甚至产生局部热点。

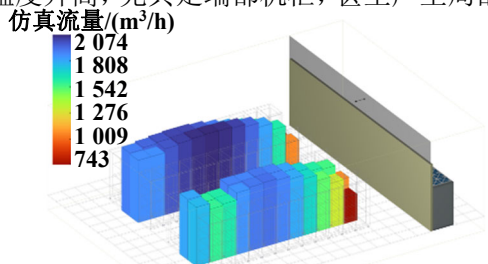


图 44 通风地板风量分布 (柱坐标越高, 风量越大)

由图 44 可知：距离空间隔间最近的通风地板出风风量相比中间的通风地板出风风量要小得多，最远的通风地板出风风量也略有减少，因此通道端部通风地板提供的风量可能无法满足 IT 设备的需求风量，端部的机柜将从周边获得风量，从而导致热风回流，如图 45 端部和中间机柜气流流线所示。

端部机柜，从下往上，进入机柜的空气温度受到热风回流的影响逐渐增大，因此在部署 IT 设备的时候，可以优先部署在机柜底部，避免部署在机柜顶部。

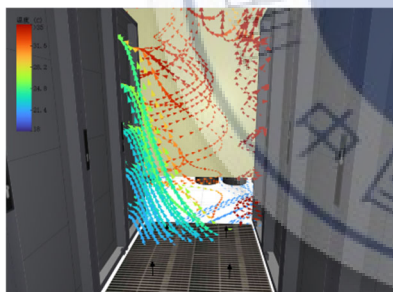


图 45 端部和中间机柜气流流线

优化方法：从以上分析可知由于通风地板出风风量的不均匀性，无法满足 IT 设备风量的需求，导致了热风回流，从而导致机柜进风温度不同程度的升高。可以将机柜冷通道进行隔离（图 46），从而在冷通道内形成冷池，冷风在冷池内为各个机柜共享，同时隔离了冷过热空气掺混。图 47 所示为冷通道封闭前后机柜最高温度对比。

2) 地板下送风、风管上回风

该形式的机房：风管回风是空调隔间采取风管的方式，将机柜排出的热风通过风管回到空调回风口。这种回风方式，可以就近将机柜的热风吸到风管，风管起到冷热空气隔离的效果。图 48 为风管上回风的典型结构。

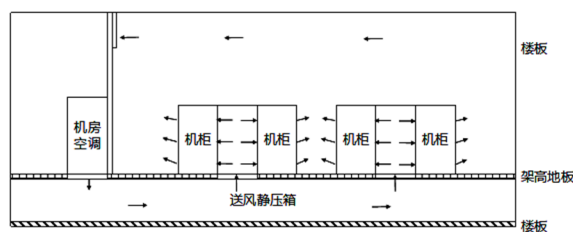


图 46 隔离示意图

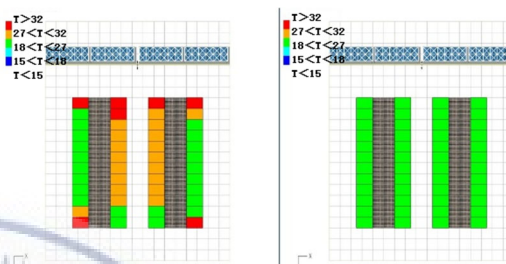


图 47 冷通道封闭前后机柜最高温度对比

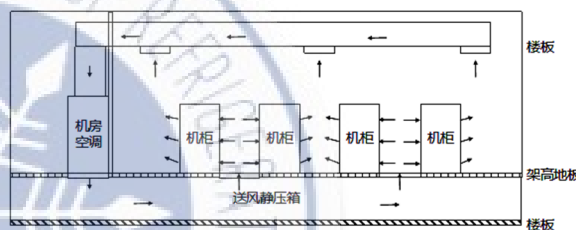


图 48 风管上回风的典型结构

主要存在的问题及诊断方法：风管上回风的关键是及时地将机柜排出的热风吸走，避免热风回流。风管上的回风口位置、大小以及距离机柜的位置都会影响吸风的效果，需要进行优化设计。

图 49 的风管回风口均匀布置，靠近空调隔间的风管回风口虽然将热风吸入了部分，但是同时也有很大一部分机柜的热风回流了，说明端部的回风口位置和尺寸大小需要优化调整。另外在风管中部的回风口有大量的冷风被吸入，产生了冷量浪费，说明风管距离机柜的位置也需要优化。

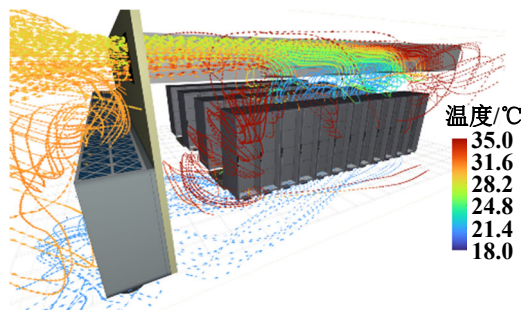


图 49 风管回风口均匀布置

图 50 所示为优化风管风口位置和尺寸的效果，可知近端第一个机柜热风回流现象有较大的改善。

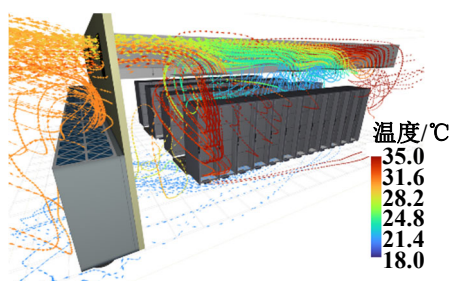


图 50 优化风口位置和尺寸

图 51 所示为优化风管风口位置、尺寸和风管距离机柜顶部的高度 0.3 m 的效果,对比两图气流,可知端部机柜的热风回流改善效果明显,中部机柜的冷量浪费有一定的改善。

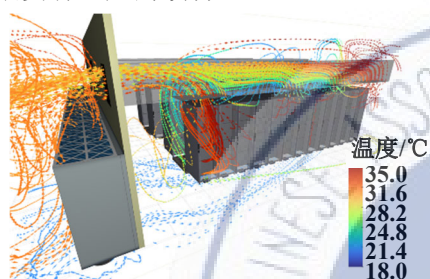


图 51 优化风管风口位置、尺寸和风管距离

综上所述,对于风管自然回风,通过优化风管回风口位置和尺寸、风管高度能对气流组织起到较好的改善,实际工程中需要综合考虑管路布线等,借助计算流体动力学软件进行多工况的优化设计。

3) 地板下送风、吊顶上回风

该形式的机房:吊顶上回风通过吊顶回风口将来自机柜的热风吸回,吊顶回风口根据机柜功率密度需要部署,热风通过吊顶返回到空调隔间内的精密空调进行冷却。图 52 所示为典型吊顶上回风。

主要存在的问题分析:吊顶上回风风管回风类似,功率密度对机柜局部热点分布的数量有比较大的影响。图 53 所示为机柜功率,从左到右分别为 4 kW、5 kW 和 6 kW。图 54 所示为 6 kW 的气流流线,大量的冷空气通过吊顶回风口回到吊顶,产生了冷量浪费,靠近空调隔间的端部机柜,仍存在着热风回流的现象。

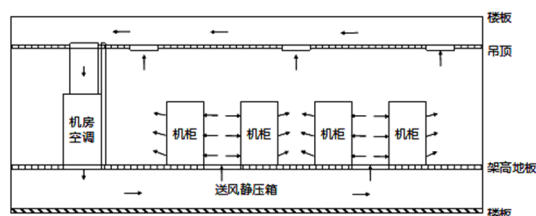


图 52 典型吊顶上回风

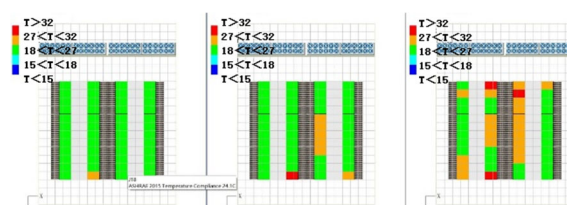


图 53 机柜功率 (从左到右分别为 4 kW、5 kW 和 6 kW)

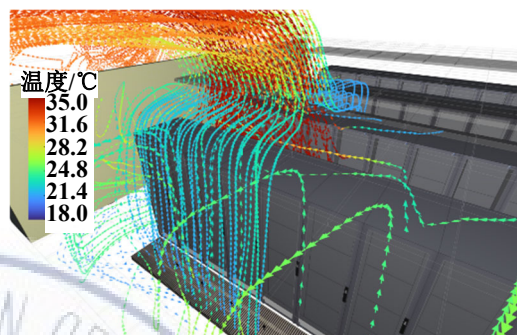


图 54 6 kW 的气流流线

优化方法:吊顶整体上限制了热风流动的空间,优于风管回风的效果。吊顶的高度、回风口分布的位置、回风口通风率对气流的排风路径影响很大,可以借助计算流体动力学工具优化设计改善气流组织。对于单机柜功率密度特别大的机房,可以通过封闭冷通道或者热通道对气流组织进行优化。

图 55 所示为典型封闭冷通道,图 56 所示为典型封闭热通道。

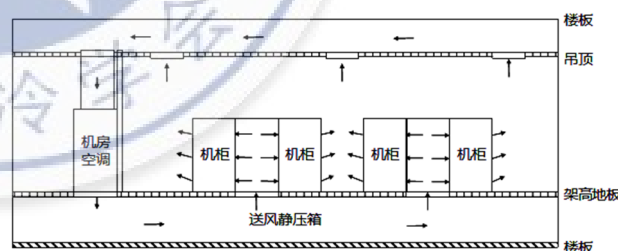


图 55 典型封闭冷通道

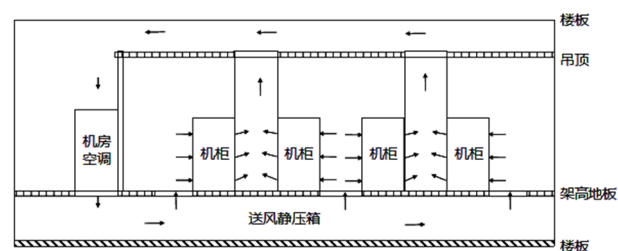


图 56 典型封闭热通道

对于封闭冷通道,冷热形成了比较好的冷热隔离,冷通道相比热通道而言,冷通道一般是微正压,可以从图 57 为 1 m 处温度截面图看出会有少量的冷量从冷通道向热通道泄漏。

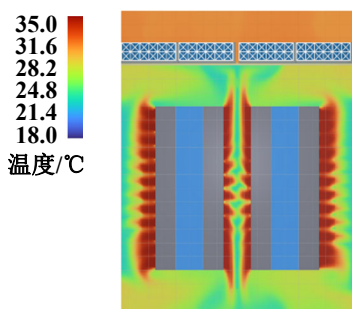


图 57 1 m 处温度截面图（封闭冷通道）

对于封闭热通道，冷热形成了比较好的冷热隔离，冷通道形成大冷池，冷量可以在冷池内共享，热通道一般是微负压，图 58 所示为 1 m 处温度截面，仍然有少量冷量从冷通道向热通道泄漏。

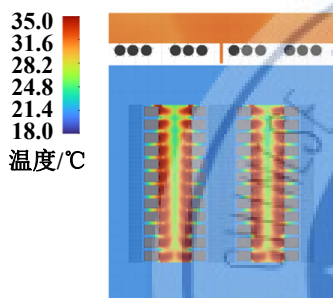


图 58 1 m 处温度截面图（封闭热通道）

2 机房渗透风问题分析与优化

渗透风问题可以归为：1) 机房的围护结构无组织渗透风问题。问题的表现是 IT 机房或空调机房通过门窗、电缆井、新风机与外部联通后，由于门窗不关或关不严、电缆井拔风、新风机过量开启等原因，导致大量新风进入机房区域，由此带来大量的额外显热、潜热负荷和灰尘；2) IT 机房和空调机房内的冷热风掺混问题。问题的表现是 IT 机柜无序布置、未形成冷热通道、盲板未封堵、送回风气流与 IT 布局不匹配等原因，导致服务器进风温度大大高出空调出风口温度、服务器出风温度远高于空调回风口温度，由此导致空调设备进出风温差远小于服务器进出风温差，造成火积的损耗。

2.1 围护结构无组织渗透风分析

分析中小型数据中心是否存在无组织渗透风的问题，可通过定性甄别、现象甄别和结果甄别等，机房无组织渗透风的若干形式如图 59 所示。

从定性甄别的方式，机房内存在任何的并非通过新风机进入机房内的进风，都算无组织渗透风。

新风机进入机房内的风量应与合理送风要求一致。

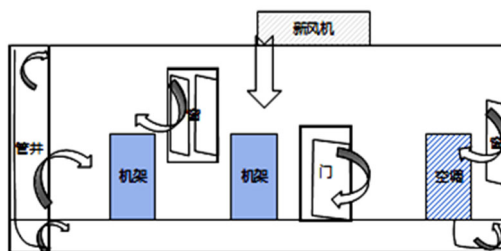


图 59 机房无组织渗透风的若干形式

从现象甄别来看，可以分为几类情况。一类是围护结构构件的不合理设置。如 IT 机房安装窗户甚至安装连接室外的门导致渗透风。如空调机房设置了可开启外窗，同时未采用回风风管的系统形式，导致空调机房负压，从室外吸入大量未处理的新风。另一类是施工收尾不完善。如管井与室外的封堵口未封堵完全、管线连接机房外区域的封堵口未封堵完全、新风机等设备穿墙位置漏风等。一类是运行管理不合理。如门窗未关严、新风设定风量过大等。图 60 体现了机房现场无组织漏风的现象。



图 60 机房现场无组织漏风现象

从结果甄别来看，若机房内有大量从室外进入的无组织新风，则机房内必然有积灰，手擦后能明显看到灰尘，严重的甚至在机柜门板上能看到明显的灰尘。若机房新风设定过大，则可根据新风机运行能耗来判断，如其全年能耗除以 8 760 h 后的平均功率值过大，则送风量过高。

2.2 围护结构无组织渗透风优化

机房围护结构无组织渗透风的优化遵循两个原则。一是应堵尽堵，二是新风合理。

应堵尽堵，就是把不该有的缝隙、孔洞全部堵上。不仅仅要对穿墙的管道口进行封堵，还应封堵外窗、外门。若外窗、外门为必需设置的，如逃生门等，则应增加一层密封门窗实现封闭。如有可能，最好用防火保温板将不需要的门窗进行封闭，实现密封的同时提升保温性能。部分空调机房的房间内为负压，导致室外新风从空调机房的门窗缝隙内流

入，带来无组织的新风。可通过合理的优化，封闭回风管道配合门窗封堵，减少无组织新风。

新风合理，就是要适度送新风。新风的送风量满足房间微正压的需求即可。由于在机房围护结构封闭妥当后，送风风量需求很小。因此新风机应进行降频运行、变频优化甚至更换新风机。

2.3 冷热风掺混问题分析

冷热风掺混问题也可以通过定性甄别、现象甄别、结果甄别等方式来诊断。例如，通过定性的方式，可以认为只要服务器排出的热风与空调送出的冷风有混合，就是冷热掺混。从结果角度，只要看到服务器的进出风温差比空调送回风温差大得比较多，就是冷热掺混。当然，也可以用现象甄别的方式。以下是一个冷热风掺混的典型现象。

应用计算流体动力学技术可以评价冷热风掺混问题，通过创建机房及末端设备模型，评价机房气流组织和冷却效率^[18-20]，在《数据中心能效提升适宜技术》中提到了计算流体动力学气流组织模拟技术，包括定义，校正，方法，应用场景等。

冷热风掺混主要地板孔隙导致静压箱冷空气泄漏、机柜四边泄漏、封闭通道泄漏和备用空调旁通泄漏现象。

地板孔隙导致静压箱冷空气泄漏包括地板砖缝隙，设备周围缝隙，线缆穿孔，消防等管道、立柱穿过地板缝隙，如图 61 所示。图 62 所示为通过这些缝隙泄漏的冷空气的模拟结果。

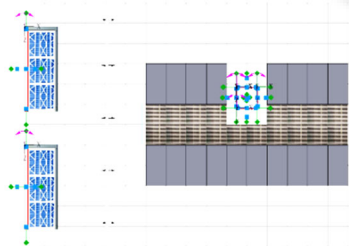


图 61 机房地板泄漏位置

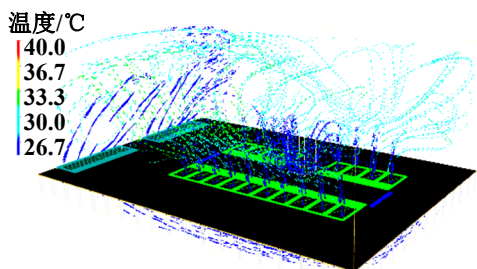


图 62 机房地板泄漏流线

图 63 用实际模拟数据说明了不同风机转速下各种位置泄漏率对送风效率的影响，可知架高地板上的开孔泄漏率最高，随着风机转速增大所有对象的泄漏量都增大，到这空调的送风效率越来越低。

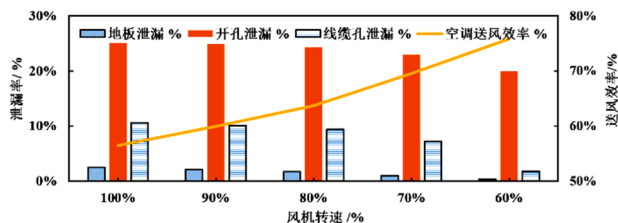


图 63 风机转速与泄漏率

机柜四边泄漏位置出现在空插槽处、无侧板，顶部底部线缆穿孔，安装导轨与侧板、顶板、底板的缝隙，机柜支脚缝隙。

图 64 所示为机柜 5% 泄漏与 100% 泄漏，图 65 所示为两种条件下机柜进风温度分布。可以看出，机柜泄漏增加后，部分机柜进风温度超过 32 °C。

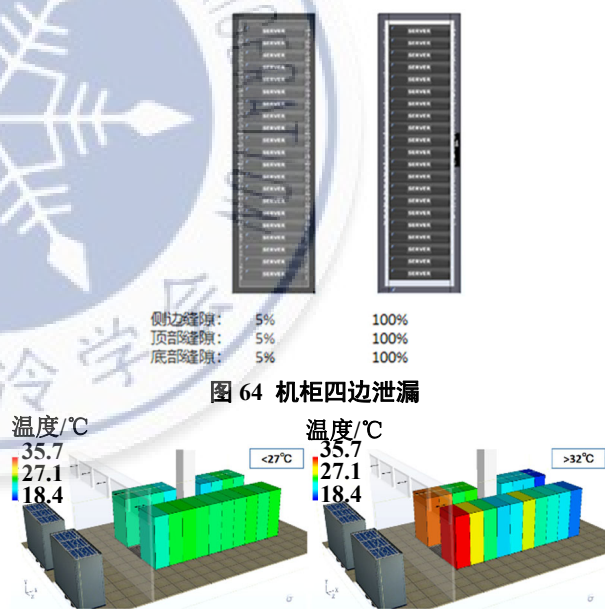


图 65 机柜泄漏模拟结果对比

图 66 显示机柜泄漏流线图及由此导致的红色区域 IT 进风温度过高。

封闭通道泄漏问题。机柜间，机柜顶没有封闭导致冷风渗透，或冷风通过通道门缝隙等渗透。图 67 显示了封闭通道泄漏情况下机柜进风温度分布，红色机柜顶部 IT 设备进风温度高，顶部出现部分热空气回流。

备用空调旁通泄漏问题。备用空调停机的时候，成为了联通冷通道和热通道的带阻力连接部件。存

在渗透冷风的现象，这种现象往往是很容易被忽略的。接下来以案例说明这种泄漏实际上是不应被忽略的。机房内共 6 个模块，每个模块 28 台机柜，一台列头柜，一台网络柜，封闭冷通道，单机柜功率 3 kW；空调采用 2N 冗余方案，5 台运行（空调编号 A），5 台备用（空调编号 B）。机房设有空调间，采用地板下送风，顶部回风的送回风形式。图 68 为机房布置。

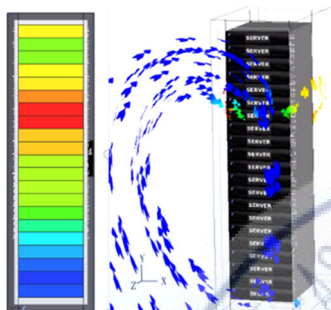


图 66 机柜温度分布与流线

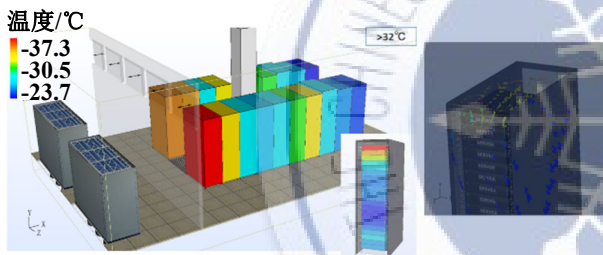


图 67 封闭通道顶部泄漏与模拟结果

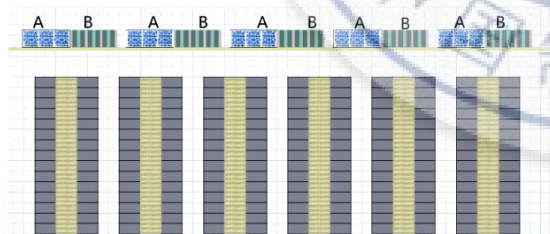


图 68 机房布局平面图

运行空调采用简化模型（图 69），备用空调采用详细模型，其中盘管的局部阻力损失服从平方定律，则根据空调风量 25 000 m³/h 时，风阻 450 Pa，定义盘管的阻力曲线如图 70 所示。

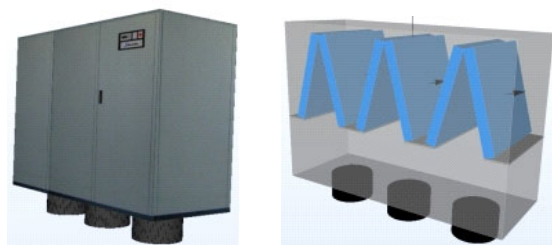


图 69 简化与详细空调

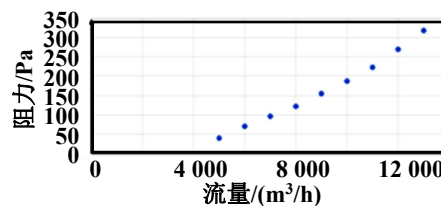


图 70 换热器阻力曲线

根据模拟结果，备用空调泄漏量及泄漏率（泄漏量/单台空调额定风量）如图 71 所示。

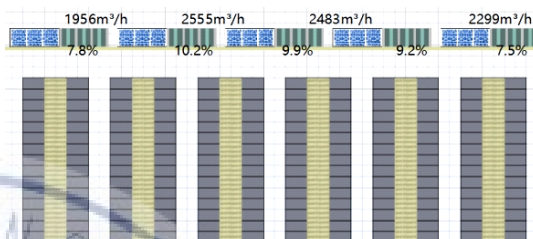


图 71 备用空调停机导致的泄漏率

可知备用空调总泄漏量为 11 167 m³/h，平均泄漏量为 1 861 m³/h，平均泄漏率为 7.4%，因此备用空调旁通泄漏时应引起重视。

2.4 冷热风掺混优化

冷热风掺混的优化方式，主要以封堵为主，包括直接用防火材料封堵、冷热通道隔断、盲板封堵等。部分情况下，还需要进行空调运行的优化，这部分在下节描述。这里以一个案例机房为对象，分析优化后的效果。

提出了 3 个优化方案并进行了分析：1) 为了减少冷量浪费，调整出风地板布局，屏蔽热通道出风地板；2) 为了减少列间气流短路，在局部机柜列增空机柜；3) 为了避免冷热气流短路，补充机柜空 U 盲板。

图 72 和图 73 所示为优化前后的温度场对比。模拟结果显示，完成优化后机柜进口温度没有升高，机柜最大进风温度为 20.5 °C；空调平均送风效率为 69.6%。

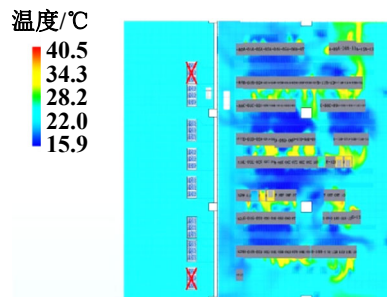


图 72 空调 6 用 2 备方案

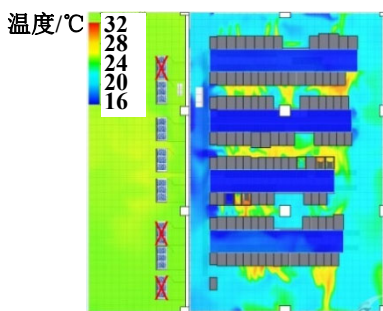


图 73 空调 5 用 3 备方案

优化后的各项指标如表 3 所示。表中可评价的效率指标分别为空调送风效率指数 (ASE)、空调回风效率指数 (ARE)、机柜内循环指数 (MCRI)、机柜冷气指数 (RCI)、回流温度指数 (RTI)、送风热指数 (SHI) 与回风热指数 (RHI) 等。

表 3 内的指标可以看出改善后的机房情况, 空调的送风效率指数 (ASE) 与回风效率指数 (ARE) 提高表明有更多的冷空气进入 IT 设备, 并且空调送风被热空气混合 (SHI) 与回风被冷空气混合 (RHI) 程度减小; 机柜内部热空气回流减少 (MCRI), IT 设备进口温度均没有超过 27°C (RCIHI), 而且 IT 设备进口温度低于改善前的机房 (RCILO), IT 设备所处的环境温度更低, 设备更安全; 机房内的气流不平衡减小 (RTI), 空调冷气旁通减小。

表 3 改进前后效率指标对比

参数	数值	
	改善前	改善后
ASE/%	40.4	48.9
ARE/%	39	43
MCRI/%	2.989	1.472
RCIHI/%	99.9	100
RCILO/%	96.7	93.1
RTI/%	53.8	64.6
SHI	0.194	0.181
RHI	0.797	0.810

在实际实施中, 冷热通道的隔断的效果体现有一个重要的前提就是机柜内气流通道的封闭。只有完善了机柜的封闭, 冷热通道才能切实发挥作用, 解决冷热风掺混的问题。下面的案例来说明机柜内气流封堵的解决。

案例机房采用空调控制回风温度的控制方式, 模型机柜根据实际运行功率设置机柜功率, 高 48 U, 架高地板下送风房间回风。

图 74 所示为机柜热点分布。有两个机柜超过

32°C, 还有 48 台机柜进风温度超过 27°C。经分析确定高温机柜的进口没有地板出风口, 导致机柜进风量不足。

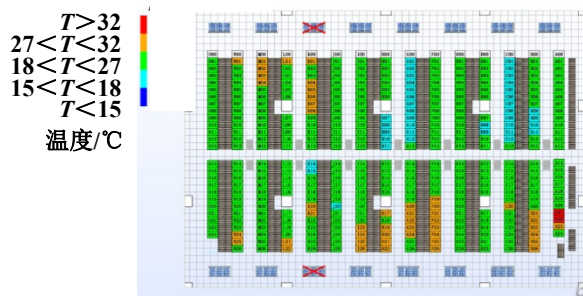


图 74 机柜进风温度分布

图 75 机柜的短路气流图显示, 机柜内有热空气流入进风口。

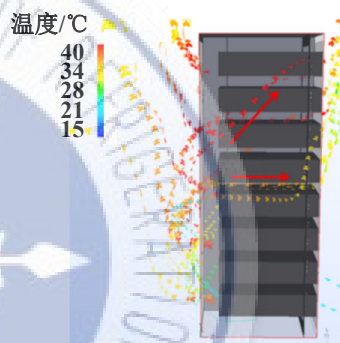


图 75 机柜短路气流

根据问题做优化方案, 为了整体解决 50 台过热机柜问题需要增加气流遏制系统, 封闭冷通道, 机柜空 U 位安装盲板。优化后, 所有机柜的进风温度均在 18~27°C。如图 76 所示。

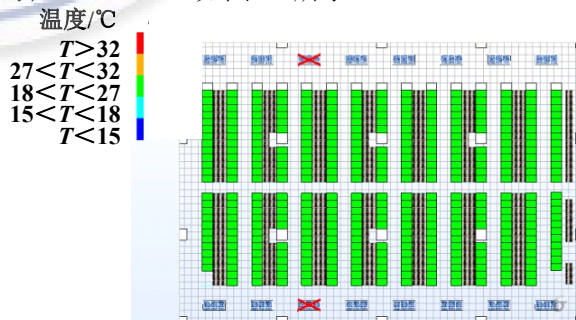


图 76 机柜进风温度分布

除以上三个案例的方法外, 针对冷风泄漏问题, 还有针对性的优化方法如下。

1) 针对活动地板与开口的冷空气泄漏

地板砖缝隙: 地板砖之间的缝隙与施工工艺有关, 在施工的时候注意安装精度。当送风量小, 架高地板下的压力较低的时候, 地板砖间的缝隙泄漏

减小。这个不是必须优化的位置。

设备周围缝隙：选型的设备尺寸尽可能为600 mm的倍数，减少活动地板砖上的开孔，如果不能避免开孔，应在缝隙处进行密封处理。

线缆穿孔：可以用毛刷封堵线缆穿孔。消防等管道、立柱穿过地板砖形成的缝隙：可以用毛刷，或者定制组件封堵。

2) 针对机柜泄漏

空插槽处：封闭盲板。无侧板：安装侧板。顶部底部线缆穿孔：毛刷封堵。安装导轨与侧板、顶板、底板的缝隙：在选择机柜的时候采用安装导轨与侧板无缝隙的机柜，顶板与地板的缝隙安装定制的盲板，或者毛刷封堵。机柜支脚缝隙：在选择机柜的时候采用无支脚机柜，当不能用无支脚机柜的时候需要在机柜底部支脚缝隙处安装挡板或者毛刷封堵。

3) 针对封闭通道泄漏

机柜间缝隙：机柜间的柱子导致的缝隙，当柱子没有在通道内，机柜位置可以调整时，移动机柜位置，将机柜与柱子封闭在通道之外，再通过挡板封闭通道。当机柜位置不能调整时，柱子在通道内时，根据现场情况确定相应的天窗的尺寸及密封件尺寸，定制封闭隔板组件。

机柜顶没有封闭：在机柜顶部设置定制角钢框架和挡风板使机柜高度一致。

通道门缝隙：包括通道门缝隙和门与机柜侧板的缝隙，可以用密封胶条或者毛刷封堵缝隙。

列中的机柜不完整：把机柜补齐，并且封闭盲板，定制封闭组件，封堵机柜缺失区域。

4) 针对机房门缝隙

机房门底部缝隙：可以用密封胶条或者毛刷封堵缝隙。机房门扇之间的缝隙：可以用密封胶条或者毛刷封堵缝隙。

5) 针对备份空调旁通泄漏：备份空调设置旁通阀，或者空调送风口加导风罩。

3 末端空调参数设定问题分析与优化

3.1 末端空调参数设定问题分析

1) 冗余空调选择方案的问题

空调的冗余是大量数据中心在设计是必须要考虑的。空调的冗余是为了保障机房运行安全，在

部分设备故障条件下依然可以向IT设备提供充足的冷量。因此，需要合理配置冗余设备。在设计之初就确定合理的备份空调数量，可减少空调的投资成本。在运营阶段设置合理数量的待机运行的空调备机可以提高机房整体的空调系统能效。如下是某机房应用计算流体动力学模拟的方法分析关闭部分空调后是否能提升末端空调能效。

该案例的机房空调为两侧布置。设计了两个空调关闭的方案进行计算流体动力学模拟分析。第一个方案关闭同一侧的相邻两个空调，第二个方案是两侧空调各关闭一台。

图77所示为机柜最大进风温度分布，可以看出方案一机柜最大进风温度达到26.4℃，高温机柜出现在关闭的空调附近，两台相邻空调关闭对附近的机柜进风温度有较大影响。



图77 同侧空调关闭

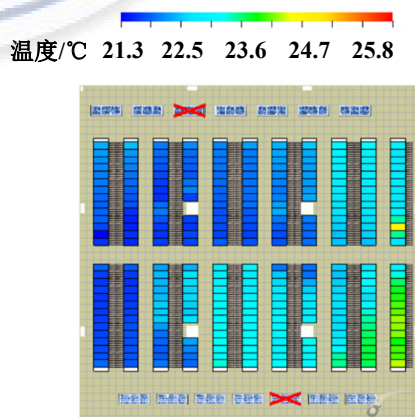


图78 对侧空调关闭

图78中机柜最大进风温度为24.4℃，优于第一种方案。所以对于现场运维人员，在制定备份空调轮巡方案时要避免相邻的两台空调关闭。

2) 不同空调控制方式、控制值产生的问题

空调通过回风温度控制时，通常会根据空调回风口传感器的温度值进行控制。然而空调回风口本身就存在很明显的温度梯度。

图 79 所示为某机房空调回风口处的温度分布，高温区域 26.5℃，低温区域 20.9℃。如果传感器在 20.9℃ 处，空调控制回风 21℃ 时，控制的结果就会导致该空调输出很少的冷量，而空调大部分区域回风温度都较高，从进而造成空调出风温度提高，影响设备安全。因此，只有当空调回风口平面的温度梯度变化很小，则回风温度控制有效。

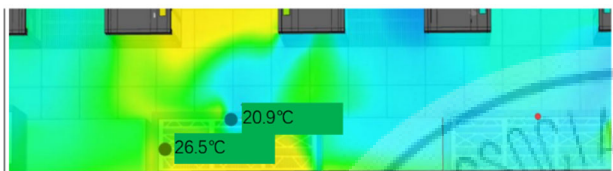


图 79 回风口温度分布

3) 非闭合回路送风

空调控制器假设调节的水阀，压缩机或者风机与它们测量的空气温度、速度、温差或者压差之间存在直接关系。图 80 中的模拟案例说明非闭合回路送风的影响：某空调的回风被来自不同空调的送风混合，所以控制器的能力已经被减弱了，当左侧空调降低送风温度时，由于冷空气旁通右侧空调实际上会提高送风温度。而这类非闭合回路经常存在于中小型数据中心环境中，是末端空调控制管理的一个常见问题。

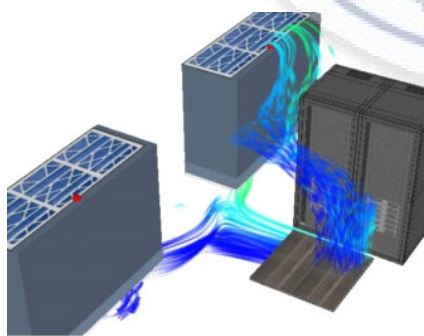


图 80 空调送风流线

4) 温差控制方式的问题

温差控制可能导致空调送风量与 IT 设备需求风量不匹配，即使封闭冷通道还是出现热点。案例机房是一个某企业运营机房，机柜顶部与中部没有用盲板封闭空槽位，有热空气回流；冷通道的压力低于热通道，热空气会从热通道流回冷通道。通过模拟分析，发现机柜前门顶部温度高，冷通道里面

的温度不均匀，且有热点；IT 设备进风温度分布如图 81 所示，机柜顶部 IT 设备进风温度都超过 30℃，超出 GB 50174 推荐值（18~27℃）。

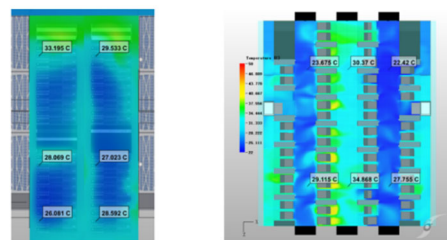


图 81 机柜前门温度分布与截面温度分布

根本原因是现场空调的控制逻辑存在问题，空调的控制温差为 10℃，高于服务器的进出风温差，导致空调输出风量不足，不能满足服务器的冷却风量需求。

3.2 末端空调参数设定问题优化

1) 温差控制优化的优化案例

对温差控制方式的问题，开展优化实施的模拟分析。优化采取以下两个措施：1) 机柜的空槽位全部封闭；2) 空调控制送回风温差从 10℃ 调整为 5℃，从回风控制改为送风控制，控制的温度值为 27℃。优化前机柜顶部 IT 设备进风温度大部分超过 30℃。优化后空调送风提高到 27℃，IT 设备最大进风 28.9℃。对比图 82 和图 83。

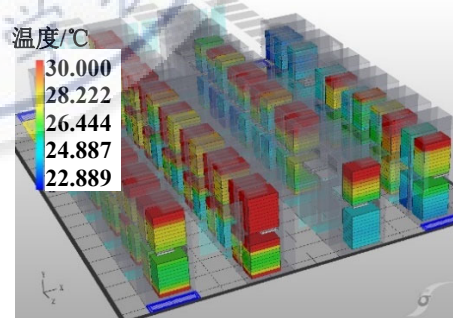


图 82 空调温差控制与机柜安装盲板优化前机柜进风温度

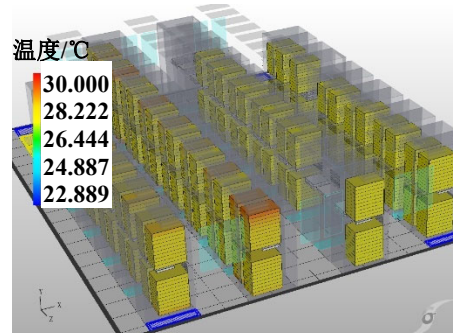


图 83 空调温差控制与机柜安装盲板后机柜进风温度

优化前空调提供的风量只有 IT 设备需求风量的 63.42%，IT 设备进风超过 30℃。优化后空调提供的风量比 IT 设备需求风量多了约 3.5%，空调送风量满足 IT 设备需风量要求；若在 23℃送风设定温度下，满足 IT 冷风需求，IT 设备进风低于 27℃。对比图 84 和图 85 所示，风量单位为 m³/h。

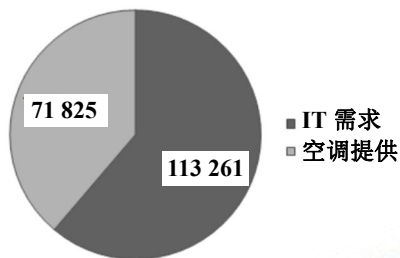


图 84 空调温差控制与机柜安装盲板前风量平衡图

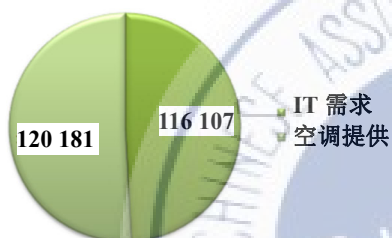


图 85 空调温差控制与机柜安装盲板后风量平衡图

2) 回风温度控制改为送风温度控制

送风温度控制相对于回风温度控制来说有较大的优势，可以消除传感器位置的影响，还可以实现闭合的控制回路。对案例机房采用回风温度控制和送风温度控制分别进行模拟分析。分析后得出，采用送风温度控制条件下，机房内不容易出现过冷过热的情况，温度分布更为均匀，机柜进风温度更低。从而可以进一步提高送风控制温度，在允许条件下提高冷冻水温度，实现节能。

送风温度控制可以在数据中心内提供受控的最低温度。能够控制最低温度意味着它可以远离露点。不运行冷却处理的除湿器将进一步降低运行成本。在温带气候条件下，很少需要加湿，因此在这些地区新建数据中心可以不使用任何加湿/除湿设备，从而降低投资成本。

送风温度控制还可以稳定服务器进风口温度，减少温度波动，从而提高 IT 设备使用寿命。

当然，在将回风温度控制改为送风温度控制之前，首先要通过优化方案（例如封闭冷通道的某些气流遏制措施）减少有过热风险的机柜，进一步提高送风温度。事实上，在设计良好的数据中心中，

所有服务器入口的温度控制都应落在控制温度的一到两度范围内，并且可以实现 24℃或更高的送风温度设定点，并节省相应费用。

3) 冗余调整的优化案例

案例为对某个空调冗余较多的机房进行了优化分析。根据现场采集的数据（地板出风口风速、温度，冷通道监控温度，空调监控温度）建立模型。

机房基本情况：机房无吊顶，采用地板下送风。机房有 119 个机柜，配置六台精密空调（3 用 3 备），采用回风温度控制。加湿机与新风机关闭。机房布局如图 86 所示。

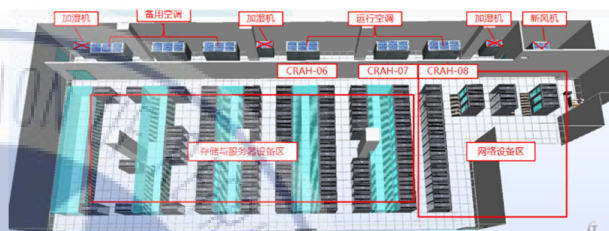


图 86 机房设备布局

因为当前 IT 设备负载率只有 9.5%（图 87），三台开启的空调中，其中一台空调（CRAH-07）的利用率 37.4%，送回风温差为 4℃；另外两台空调（CRAH-06/08）的实际输出冷量为近乎为 0。

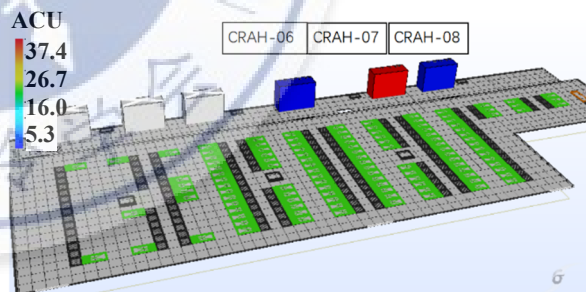


图 87 空调利用率

优化方案：当前机房设备负载较小，开启的三台空调只用了一台，且利用率只有 39.4%，建议关闭一台空调。

4 结论

本文研究了中小型数据中心冷却系统末端冷却问题现象，分析了全面的末端气流组织形式存在的问题以及优化方法，气流组织不合理存在的主要问题就是密封性不佳导致风机风量与 IT 设备风量不匹配导致的机柜内部压力过大/过小出现冷热空气掺混问题，主要优化方法：

1) 调整空调送风方向和机柜布置方向,使空调下送风能够送到机房冷通道内;

2) 调整空调送风方式,采用地板下送风的形式,使空调冷风能够送到机柜处;

3) 通过仿真模拟进行静压室风口开孔面积寻优,提前分析不同开口率的静压室压力分布及风速分布情况,找到针对目标机房的最优风墙开口率;

4) 解决冷热风掺混以封堵为主,包括直接用防火材料封堵、冷热通道隔断、盲板封堵等;

5) 末端空调设定温度过低、湿度设定不合理、多台空调联合启停设定不合理,导致除湿加湿能耗过高、空调压缩机运行效率低、免费冷源利用率低、单台空调负荷率低、冷热风掺混等各类问题。

解决末端空调设定和运行不合理问题需要先结合现状提出若干优化方案,并通过数值模拟分析,验证优化方案的可行性和效果。结合运维工作,妥善完成末端空调设定和运行的优化。

参考文献:

- [1] 数据中心气流组织技术规范: TNIISA 003—2019[S]. 北京: NIISA, 2019.
- [2] 钟志鲲. 通信机房的气流组织[J]. 邮电设计技术, 2012(9): 14-18.
- [3] 张泉, 李霞. 数据中心节能技术与应用[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [4] 黄赟. 数据中心能效提升适宜技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2023.
- [5] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2022[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [6] 傅烈虎. 数据中心冷却技术的发展与演进[J]. 制冷与空调(北京), 2020, 20(12): 7-16.
- [7] 郑品迪. 数字孪生数值模拟平台实现数据中心节能降耗分析[J]. 现代信息科技, 2022, 6(12): 78-82.
- [8] 数据中心设计规范: GB50174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [9] 钟志鲲. 从空调四度看通信机房节能[EB/OL]. (2019-04-19) [2024-02-01]. <https://www.doc88.com/p-4969174078398.html>.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] PAULA P, PABLO V J, ANDRES P, et al. CFD modelling of the air conditioning system for a Tier 2 data centre[J]. *Advances in Building Energy Research*, 2022, 16(2): 231-261.
- [12] CHO J, WOO J. A comparative CFD study of two air distribution systems with hot aisle containment in high-density data centers[J]. *Energies*, 2020, 13(22): 6147-6147.
- [13] FULPAGARE Y, JOSHI Y, BHARGAV A. Rack level transient CFD modeling of data center[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2018, 28(2): 381-394.
- [14] 田哲宁, 黄翔, 屈名勋. 蒸发冷却技术在数据中心液冷系统中的应用探讨[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(1): 120-126.
- [15] 黄翔, 徐方成, 武俊梅. 蒸发冷却空调技术在节能减排中的重要作用[J]. 制冷与空调(北京), 2008, 8(4): 17-20.
- [16] 李志军. 蒸发冷却空调技术在低碳经济下节能减排中的作用[J]. 中国机械, 2014(11): 230-231.
- [17] BOGDAN P, PAULA U, LUCIAN F T, et al. A review of indirect evaporative cooling technology[J]. *Energy Procedia*, 2016, 85: 461-471.
- [18] HERRLIN M K. Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices: the rack cooling index(RCI)[J]. *ASHRAE Transactions*, 2005, 11(2): 1-11.
- [19] SHARMA R K, BASH C E, PATEL C D. Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large-scale data centers[C]// 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Louis Missouri: IEEE, 2012.
- [20] HERRLIN M K. Airflow and cooling performance of data centers: two performance metrics[J]. *ASHRAE Transactions*, 2008, 114(2): 182-187.

在线投稿网址: zljs.cbpt.cnki.net

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2024.z1.103

中小型数据中心冷却系统节能诊断与改造方案

邵双全^{*1}, 刘晴晴¹, 王宁波¹, 郑竺凌², 吴成斌³, 黄翔⁴, 褚俊杰⁴, 周峰⁵, 孙海峰⁶, 姜鏊⁷, 王飞⁸, 李震⁹, 姜宇光¹⁰, 王泽青¹⁰, 罗海亮¹⁰, 李钊¹¹, 周文杰¹², 陈孝元¹³, 陈功林¹⁴, 赵国君¹⁵, 张晓宁¹⁵

(1-华中科技大学, 湖北武汉 430074; 2-上海建科节能技术有限公司, 上海 200032; 3-优刻得科技股份有限公司, 上海 200090; 4-西安工程大学, 陕西西安 710048; 5-北京工业大学, 北京 100124; 6-中国移动通信集团上海有限公司, 上海 200060; 7-中国电信股份有限公司上海分公司, 上海 200120; 8-钧能(宁波)电源科技有限公司, 浙江宁波 315609; 9-清华大学, 北京 100084; 10-中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080; 11-上海理工大学, 上海 200093; 12-杭州电子科技大学, 浙江杭州 310018; 13-四川师范大学, 四川成都 610066; 14-武汉辰庆科技有限公司, 湖北武汉 430064; 15-中国制冷学会, 北京 100142)

[摘要] 本文重点针对中小型存量数据中心的高能耗问题, 进行调研和分析, 首先进行能耗问题诊断, 造成高能耗的主要因素为冷却系统架构、湿度控制、低外温下设计和运行、自然冷能利用以及长期运行性能衰减; 其次从压缩机和换热器等核心部件, 并从室内末端、冷水机组系统、直膨系统、输配系统等系统架构方面探讨系统能效提升方案, 然后从湿度控制技术、自然冷却技术、蒸发冷却技术、智能控制技术等探讨了节能改造技术方案, 为存量数据中心节能改造提供参考。

[关键词] 数据中心; 冷却系统; 节能; 自然冷却; 智能控制

中图分类号: TB61⁺¹; TQ051.5

文献标识码: A

Diagnosis and Renovation on Cooling System for Energy Saving in Small and Medium-sized Data Centers

SHAO Shuangquan^{*1}, LIU Qingqing¹, WANG Ningbo¹, ZHENG Zhuling², WU Chengbin³, HUANG Xiang⁴, CHU Jinjie⁴, ZHOU Feng⁵, SUN Haifeng⁶, JIANG Liu⁷, WANG Fei⁸, LI Zhen⁹, JIANG Yuguang¹⁰, WANG Zeqing¹⁰, LUO Hailiang¹⁰, LI Zhao¹¹, ZHOU Wenjie¹², CHEN Xiaoyuan¹³, CHEN Gonglin¹⁴, ZHAO Guojun¹⁵, ZHANG Xiaoning¹⁵

(1-Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2-Shanghai Jianke Jieneng Technology Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3-UCloud Technology Co., Ltd., Shanghai 200090, China; 4-Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 5-Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 6-China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200060, China; 7-China Telecom Shanghai Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 8-GS (Ningbo) ESS technology Co., Ltd., Ningbo 315609, Zhejiang, China; 9-Tsinghua University, Beijing 100084, China; 10-China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China; 11-University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 12-Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 13-Sichuan Normal University, Chengdu 610066, Sichuan, China; 14-Wuhan Chenqing Technology, Co., Ltd., Wuhan 430064, Hubei, China; 15-Chinese Association of Refrigeration, Beijing 100142, China)

[Abstract] The high energy consumption of small and medium-sized inventory data centers is focused in this paper. With survey and analysis for energy-saving diagnosis, it's the main aspects of the cooling system architecture, humidity control, design and operation under low ambient temperature, free cooling, performance decrease for long

*邵双全(1975—), 男, 教授, 博士。研究方向: 热湿高效控制理论与关键技术研究。联系地址: 湖北省武汉市洪山区珞喻路 2037 号华中科技大学清洁能源大楼 S506 室, 邮编 430074。联系电话: 13051252727。E-mail: shaoshq@hust.edu.cn。

term operation. Then the performance improvement is discussed from the main components such as compressor and heat exchanger, and the cooling system architecture such as the indoor terminals, water-cooled chiller system, direct-expansion refrigeration system, distribution system. At last, the energy-saving transformation technology schemes are proposed as the humidity control, free cooling, evaporative cooling, intelligent control. The above provides reference for energy-saving transformation of inventory data centers.

[Keywords] Data center; Cooling system; Energy saving; Free cooling; Intelligent control

0 引言

冷却系统是保障数据中心内部温度稳定的核心设备，同时是数据中心能耗中占比最大的辅助设备^[1-3]。当前新建数据中心能效要求越来越严格，而存量数据中心能效低能耗高，其节能改造更是重中之重^[4-6]。存量数据中心冷却系统是节能改造问题尤为突出^[7-8]，一方面由于设计建设时的技术与产品水平所限，其能效偏低，而近些年新的技术与产品的能效水平不断提升；另一方面，存量数据中心冷却系统随着使用年限的增加，其能效也在不断降低。

本文分析了存量数据中心冷却系统的高能耗问题，并从整个冷却系统的设计与各个环节进行节能改造讨论进行分析，为存量数据中心的节能改造提供参考。

1 能耗问题诊断

1.1 冷却系统架构问题

数据中心冷却系统收集数据中心内部的热量并移除到室外冷源中，保障数据中心内部 IT 设备、电源设备等的高效稳定运行。不同于传统的建筑用空调系统主要是为了实现人的舒适性热湿环境的营造，数据中心冷却系统首要任务是保证 IT 设备运行的可靠性。

图 1 所示为存量数据中心冷却系统的主要形式，室内取热侧采用风冷冷却，制冷机组制取冷水或者直接低温低压制冷剂送到室内末端，制冷机组最终通过冷却塔向室外环境放热。这样的系统传热环节多，能量损失大^[9]。

一方面每一级传热都会产生一定的温差损失，从而需要制冷机组降低蒸发温度或提升冷凝温度，制冷机组的能效降低，能耗增加；另一方面，各个传热环节两侧的流体流动也需要足够的流速以提升传热效率，从而各级传热介质流动产生的能耗也相应增加，造成系统的输配能耗过高。

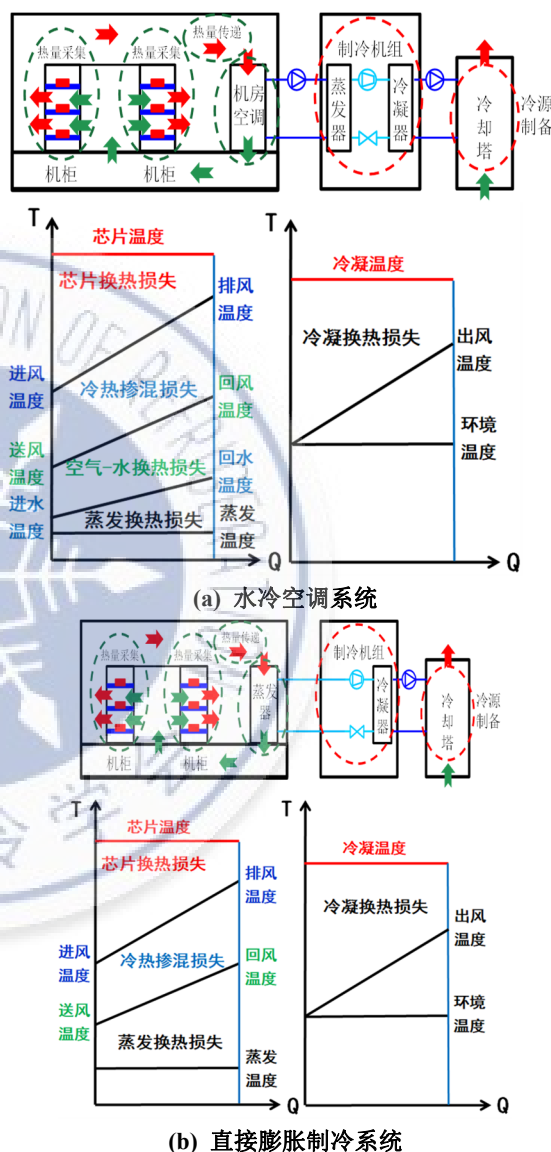


图 1 典型数据中心冷却系统架构与传热过程分析^[9]

图 2 所示为某数据中心冷却系统的能耗分布，室内末端的风扇能耗占比 32.98%，接近三分之一；而输送冷冻水和冷冻水泵的能耗分别占 17.77%和 16.89%合计超过三分之一；制冷机组和冷却塔能耗分别为 27.75%和 4.61%，合计约三分之一。

1.2 湿度控制问题

数据中心环境要求比较恒定的温度和湿度，环

境温湿度参数控制不当会造成机房设备运行不稳定：温度过高会造成服务器设备故障率升高，可靠性下降，甚至宕机；较高的相对湿度会使数据中心设备短路、磁带介质出错和元器件及电路产生腐蚀现象，在极端情况下，高湿度导致设备冷表面出现凝露现象，较低的相对湿度将产生影响设备运行的静电，造成元器件击穿、短路等故障，甚至可能损坏设备^[10]。因此，数据中心精密空调除了调节空气温度之外，普遍集成了湿度控制的部件和功能。

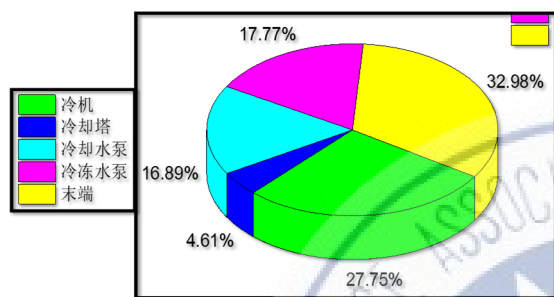


图2 某数据中心冷却系统能耗分布^[3]

精密空调中，湿度控制主要是通过两个部分进行调节，一是除湿：空气通过蒸发器表面时，由于蒸发器表面温度低于水蒸气的露点温度，空气中的水蒸气会液化被析出，降低空气的绝对含湿量，从而降低了空气中的湿度；二是加湿：当制冷过程中湿度低于设定值后，会开启加湿器进行加湿，保证湿度在设定范围内。

当机房处于除湿工况时，精密空调会降低风量，并降低蒸发温度，以实现除湿的目标。除湿过程中，蒸发温度通常会低于处理冷负荷所需的温度，导致出风温度偏低。

蒸发温度过低，会给精密空调运行造成很多不利影响，主要体现在以下几个方面：1) 制冷循环效率下降，根据逆卡诺循环原理，蒸发温度越低，制冷系统的效率就越低。蒸发温度每降低1℃，制冷效率会降低3%。因此，过低的蒸发温度会极大地增加空调系统的能耗；2) 除湿后再热能耗高，在机房除湿工况下，精密空调通过降低风量和蒸发温度，促进水蒸气的凝结，达到除湿的目的；但是空调除湿的同时伴随着显热制冷量，导致送风温度降低；若空调送风温度过低，制冷量超过机房冷负荷，系统将无法稳定运行，导致压缩机频繁启停，影响除湿效果；另外，过低的空调出风，还可能导致服务器及机柜凝露，影响服务器可靠运行。因此，空调

需要增加额外的电加热补热，以达到合适的送风温度，这样就存在冷热抵消的情况，大量能量被浪费；3) 过度除湿，空调蒸发器温度过低，会导致空气过度除湿。即使在不需要除湿的工况下，如果蒸发器温度低于回风的露点温度，空气流经低温的蒸发器盘管时，仍然会有冷凝水流出，机房内空气含湿量降低。为了保障机房湿度满足要求，精密空调启动加湿模块对回风进行加湿。这就导致机房空调一方面对机房回风降温冷凝除湿，另一方面又同时对其加湿，这种不合理的设备工作方式会导致大量不必要的能量浪费^[11]。

1.3 低外温下系统设计与运行问题

由于数据中心需要全年不间断运行，即使室外温度很低时，冷却系统仍需制冷运行。室外温度越低，制冷系统的冷凝温度就越低，向外界传热也越容易，制冷系统的效率也越高。

但是，对于制冷系统的核心部件压缩机而言，当冷凝温度较高时，腔内最高压力与排气压力接近，无明显过压缩损失。然而，当冷凝温度较低时，腔内最高压力已明显高于排气压力。 $p-V$ 图中多出的近似三角形部分的面积，即对应过压缩损失造成的额外压缩功。冷凝温度越低，过压缩损失越大，如图3所示。

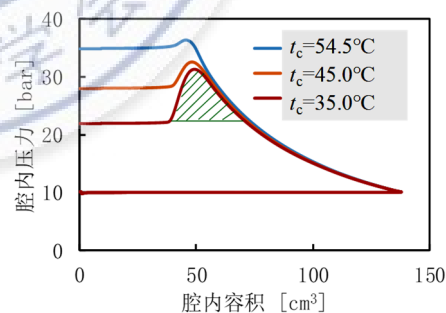


图3 压缩机压缩过程 $p-V$ 图

制冷系统和压缩机都是按照高室外环境温度设计的，在运行过程中制冷系统的蒸发温度基本保持不变，冷凝温度过低或压缩比（冷凝压力与蒸发压力之比）过小，还会造成制冷系统回油和压缩机冷却等一系列问题。因此，数据中心用制冷机组及压缩机也需要考虑全工况范围内的设计和运行控制，以提升低环境温度下的系统能效。

1.4 自然冷源利用问题

随着互联网的快速发展以及云计算的广泛应

用,数据中心作为信息技术必要的基础设施,其在规模上和数量上都不断发展,导致能源消耗迅速增加,这给我国的自然环境和人类的生产活动都带来了沉重的压力。目前,我国数据中心能耗普遍较高,平均能源使用效率(Power Usage Effectiveness, PUE)在 2.0 以上,针对于此国家发布了相关政策,要求 2021 年新建大型、超大型数据中心 PUE 不超过 1.3,到 2025 年,数据中心 PUE 普遍不超过 1.5^[12]。节能减排已成为未来数据中发展重要方向。统计结果显示,暖通空调相关能耗约占数据中心总能耗的 40%,因此,通过合理的方案和技术,降低空调系统的能耗已经成为数据中心节能的首要任务^[13]。

目前降低数据中心冷却系统能耗的主流方法主要有空调系统/设备节能、气流组织优化和自然冷源利用。由于数据中心温度相对稳定,而全国不同气候分区下室外温度低于室内环境温度的全年时间较长^[14],因此,自然冷却技术是该场景下非常适宜的高效节能技术。自然冷却是指在一定条件下直接或间接地利用室外天然冷源供冷,从而使机械制冷系统停止或以低负荷运行^[15]。由此,合理利用室外自然冷源、有效延长自然冷却时间是冷却系统整体能效提升的重点。

目前,在中小型数据中心中,有关自然冷却利用不足的现象较为明显,主要体现在以下两方面:1) 在中小型数据中心中仍有较大比例的冷却系统仍采用常规精密空调冷却,未采用任何自然冷却设备或实施任何自然冷却技术改造;2) 部分中小型数据中心冷却系统虽采用了自然冷却技术,但自然冷却的技术匹配程度、设备能效能力、自然冷却有效利用时长等均存在不同程度的欠缺,处于自然冷却较为粗放的利用阶段,主要突出体现为自然冷却设备能效不高、自然冷却利用时长较短两大方面问题。特别是,国际上对于数据中心室内环境参数要求的放宽,又进一步拓宽了自然冷却可利用时间的范围。《数据中心设计规范》将数据中心室内主机房运行温度进行了调整,不再是多数 A、B 级数据中心所用到的(23±1) °C,而是不需要考虑级别,冷风道或机柜的进风温度均为 18~27 °C^[16]。拓宽温度控制范围使得每年可利用自然冷却的时间更长,利用自然冷源对数据中心进行冷却的方式更为灵活,适用范围更广,因此也反过来进一步凸显了当前中小型数

据中心自然冷却利用不足的问题。

具体来说,根据是否采用自然冷却技术,目前应用于中小型数据中心的冷却系统主要有两大类,一类是无自然冷却系统即传统的蒸气压缩制冷系统,包括风(水)冷直膨式系统和风(水)冷冷水系统;另一类是自然冷却与蒸气压缩制冷集成的复合制冷系统^[17]。对于无自然冷却系统即传统的蒸气压缩制冷系统,其利用电力驱动压缩机做功制造低温冷源,通过冷热通道送回风的方式将机房内产热排出室外,由于压缩式制冷自身的限制,数据中心机房难以借助自然冷源排热,导致在室外温度低于数据中心室内控制温度的时候不能及时有效利用自然冷却^[18]。对于自然冷却与蒸气压缩制冷集成的复合制冷系统,由于自然冷却技术在数据中心的应用受多方面因素的限制,如自然冷却技术本身与数据中心所在地的气候的匹配度以及数据中心的节能效果与投资经济性之间的比较,导致部分数据中心自然冷却利用不足。

1.4.1 未采用自然冷却系统

数据中心需全年连续稳定运行且持续向外散热,传统的机械制冷的全年制冷技术可及时冷却服务器运行时产生的热量,确保数据中心常年稳定运行,但常规的蒸气压缩制冷技术全年电能消耗大,在冬季及春、秋过渡的低温季节,尤其在低环境温度、小负荷工况下,制冷系统工作能效低,而自然冷却技术可降低机组在过渡季节及冬季时压缩机运行功耗,实现制冷系统节能运行^[19]。采用自然冷却技术,利用室外自然冷源为数据中心降温,可以减少空调制冷的使用时间,有效降低耗电量。因此,降低数据中心制冷系统能耗的措施主要是提高压缩机的运行效率和延长自然冷源的利用时间^[20-21]。

关于未采用自然冷却的影响方面,如江苏南京某数据中心,其于 2009 年建成投产,独立建筑,建筑面积 8 912 m²,机房面积 8 000 m²,设计电力总功率 23 500 kW,机柜 1 434 个。采用两路市电接入,配有柴油发电机组。空调采用风冷加水冷系统,应用冷热通道隔离技术,配有用能监控系统,未采用自然冷却技术措施。

该数据中心各季节 PUE 如表 1 所示。可以看出,未采用自然冷源的数据中心 PUE 相对较大,一般高于 1.5,年平均 PUE 接近 1.6,系统全年能源消

耗较大。因此，对于未采用自然冷却资源且数据中心所在地气候与自然冷却技术较匹配的数据中心，为了降低能耗，可以考虑增加改造自然冷却系统。

表 1 某数据中心各季节能源使用效率 (PUE)

季节	PUE
春季 (3月~5月)	1.58
夏季 (6月~8月)	1.65
秋季 (9月~11月)	1.58
冬季 (12月~2月)	1.53

1.4.2 简单采用自然冷却系统

为实现空调系统节能，需要充分利用室外自然冷源，并提高空调系统低负荷率下的运行效率^[22]。自然冷却技术的应用可降低数据中心的能耗，但也存在局限性。对于风侧自然冷却技术而言，直接式虽然节能效果好，但是无法避免室外空气对设备的危害，且难以对室内湿度进行控制，因此必须在空气品质条件合适的地区使用^[23-24]。间接风侧自然冷却系统的节能效果较好，然而由于系统的设备体积较大，初始投资和维护成本都较高，因此该系统目前的应用较少。对于水侧自然冷却技术而言，需要考虑周围可供冷却的水资源是否丰富、冷却塔是否结冰以及污水处理是否合理等问题。因此，目前自然冷却系统应用于数据中心时还存在着自然冷却技术与数据中心实际情况是否匹配的问题。而在满足机房内温度的前提下，尽可能地提高自然冷却设备的能效和自然冷源的利用率，也是当下数据中心自然冷却研究要解决的主要问题^[14]。

关于自然冷却设备能效不高问题，如北京某网络科技公司小型数据中心，其于 2017 年 12 月建成，建筑面积 22 000 m²，实际机房面积 6 264 m²，负荷率 57.27%。制冷系统在每年 3 月至 11 月由冷水机组供冷，12 月至次年 2 月由板换自然冷源供冷。空调系统采用冷水机组加板换结构，可调节 2 种模式，分别为冷机模式、板换自然冷模式，制冷总功率 14 400 kW。制冷系统采用高效磁悬浮变频冷水机组，循环泵、冷却塔使用变频调节技术，同时拥有 BA 自控系统随需求自动调节制冷量。

该数据中心各季节能源利用效率如表 2 所示。可以看出，该数据中心采用了自然冷却技术，但自然冷却能力利用不足，各季节的 PUE 相对来说较高，特别是冬季自然冷却的 PUE (1.34) 与过渡季

节非自然冷却的 PUE (1.42/1.46) 差异不明显。根据节能监测结果，该数据中心尚具有一定节能潜力，特别是室外环境温度较低时，冬季自然冷却模式的系统运行效率有待提高。

表 2 某数据中心各季节能源使用效率 (PUE)

季节	PUE
春季 (3月~5月)	1.42
夏季 (6月~8月)	1.45
秋季 (9月~11月)	1.46
冬季 (12月~2月)	1.34

关于自然冷却利用时长较短的问题，如北京某公司小型数据中心，于 2015 年 07 月建成，建筑面积 15 146.97 m²，实际机房面积 7 083 m²，负荷率 47.5%。目前，该数据中心已实施的节能措施有板换自然冷源、照明和制冷系统变频控制。空调系统采用水冷冷水机组加自然冷源方式，可调节 3 种模式，分别为冷机模式、冷机加自然冷模式、自然冷模式，制冷总功率 13 855 kW。室内机采用水冷型精密空调，地板下送风。IT 设备及供配电系统全年运行，制冷系统在每年 5 月至 10 月由冷水机组供冷，11 月至次年 4 月由板换自然冷源供冷。该数据中心各季节能源利用效率如表 3 所示。

表 3 某数据中心各季节能源使用效率 (PUE)

季节	PUE
春季 (3月~5月)	1.37
夏季 (6月~8月)	1.49
秋季 (9月~11月)	1.39
冬季 (12月~2月)	1.28
全年平均	1.38

相比之下，除冬季外，该案例在春季 (3 月~4 月)、秋季 (11 月) 部分时段利用了自然冷源，其 PUE 虽降至 1.40 以下，但与冬季 PUE 1.28 之间的差距仍较大，未能覆盖全部过渡季节，过渡季节仍有 3 个月左右时间未能利用自然冷源，在时长方面还有明显可以进一步优化设计、提升 PUE 的空间。

1.5 长期运行性能衰减问题

数据中心冷却系统需要全年不间断运行，随着运行时间的不断累积，运行能效也会不断下降，主要是由于下列原因造成的：1) 压缩机、水泵、阀门等运动部件长期运行造成的磨损会使这些主要部件和系统的性能下降；2) 制冷剂中一般含有一定比

例的润滑油，会在换热器内表面形成油膜，从而导致换热器的性能下降，传热温度增加，进而降低系统的能效；3) 风冷换热器外表面积灰、冷却塔填料表面结垢以及水质下降等原因造成的换热能力不断下降。

2 核心部件的节能技术

针对上述存量数据中心冷却系统的节能改造，很多问题都需要从新型高效部件的设计与制造加以接近，如压缩机高蒸发温度、变压比、无油设计等，换热器高传热、低阻力和易清洗等。

2.1 新型高效压缩机

数据中心的负荷特征不同于传统建筑，它冷负荷大、湿负荷小，普通建筑空调系统都是为了除湿

才用 7℃ 的冷冻水，在数据中心就可以采用高水温实现冷却；内部负荷大，围护结构负荷小，全年负荷变化小；全年制冷室外温度变化大，因此压缩比变化会比较大。因此，在数据中心领域，磁悬浮变频离心压缩机、高温变频离心压缩机、高温变频螺杆压缩机、带提前排气的涡旋压缩机等形式不断出现（如图 4 所示）。

一方面针对高蒸发温度工况进行专门设计，实现高温工况的能效显著提升；另一方面，针对室外温度变化范围大的应用特点，都针对压缩比工况进行设计，提升了全工况范围内的运行效率；此外，磁悬浮、气悬浮、液浮等形式的离心压缩机也不断推出，都能够实现压缩机无油润滑，简化了制冷系统为了回油设计，也避免了润滑油在换热器内表面聚集造成的传热能力下降和系统的制冷能效下降。

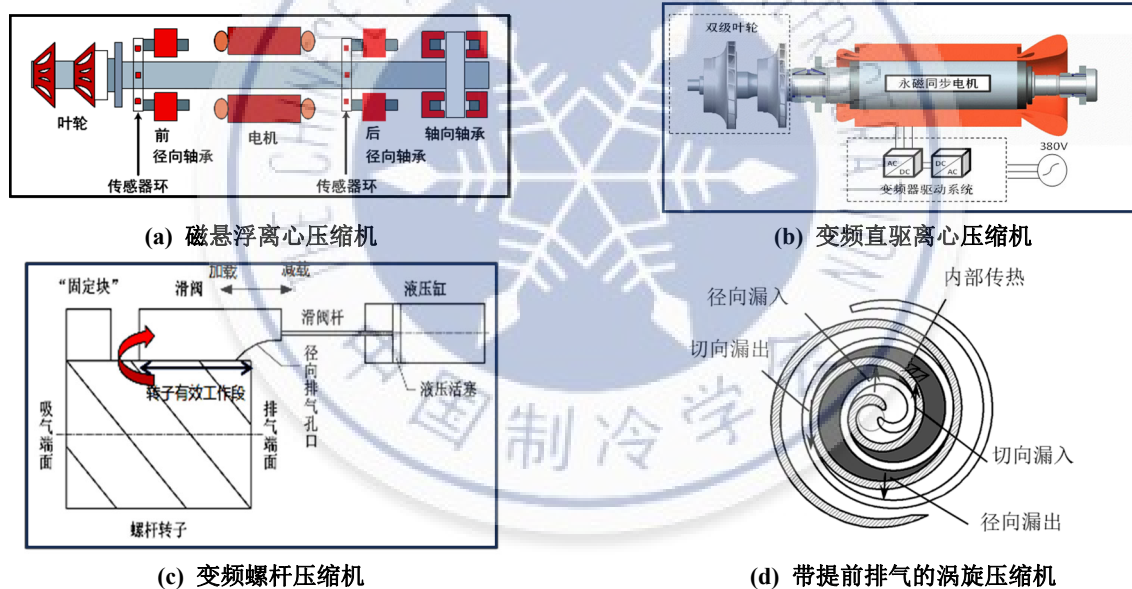


图 4 数据中心制冷机组用压缩机

2.2 制冷换热器耐腐蚀和不易清洗的改造方法

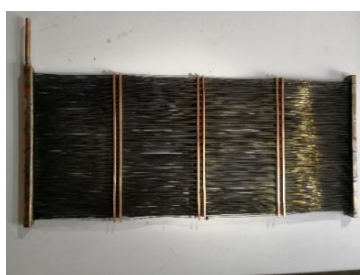
数据中心基站用制冷系统的室外机所处环境比较严峻，通常存在室外机冷凝器长时间工作容易积灰导致换热性能急剧下降的问题，而传统的平行流微通道换热器由于密集的翅片存在，导致其除霜和清洁较为困难。因此，市面上最新出现的无翅片微管换热器技术可以有效解决制冷系统换热器耐腐蚀和不易清洗的问题。

2.2.1 不锈钢微管换热器技术原理

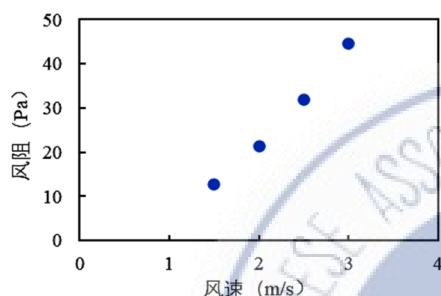
传统的管翅式换热器性能优化主要集中在优化翅片的结构和表面处理增加流体扰动进而强化

换热；或者优化管路流程使得工质分布更均匀，内部增加内螺纹增大内表面积同时强化流动换热等方面。近年来流行的平行流微通道换热器利用微尺度效应增强换热并采用翅片技术来弥补空气侧的换热能力不足。其翅片的引入占用额外的空间，同时增加空气侧的阻力，提高风机的能耗。不锈钢微管无翅片换热器技术采用内径为 0.3~1 mm 左右的不锈钢管束焊接而成的换热器进行换热。其不仅利用流体的微尺度效应高效换热，而且在有限空间中安置千万根微通道圆管，大大提高了管内和管外对流换热面积。管子数量的增加也能减小管内压降，

圆管的合理布置减小管外风阻, 节省压缩机和风机的能耗, 是一种高效、紧凑、高热流密度、低充注量的新型节能环保换热器, 如图 5 所示。



(a) 换热器实物图



(b) 风阻曲线

图 5 不锈钢无翅片微管换热器实物图及风阻曲线

数据中心冷却系统常用的冷凝器和蒸发器常用的管片式换热系统普遍存在着体积大、质量重, 整个产品耗材多、能重比高的问题。由于对换热器体积、性能及经济性的考虑, 目前数据中心基站室外机多采用二排管片式, 迎风面每平方米换热量约在 15~20 kW 左右, 而不锈钢微管无翅片换热器则可以提升至每平米 30~40 kW 左右。也就是说可以用五匹机的钣金件和风机做十匹机的性能, 这对减小体积和重量具有重大的意义。

换热器是数据中心空调系统中的重要部件, 其性能的好坏直接影响产品的能效比。采用铜管翅片的换热器经过数十年的改进, 都在增加翅片面积和性能上下功夫, 在增加换热管面积和性能上下功夫, 但由于其结构的局限性, 提升的空间非常有限。而不锈钢微管无翅片换热器在相同的迎风面上, 散热管面积的布置可以做到管片式和全铝微通道换热器散热管面积的 2~8 倍, 去掉了翅片, 性能还可以翻倍。有了如此高性能的换热器, 为匹配出更高能效比系统的空调提供了坚实的物质基础。

更进一步地, 翅片积灰和损伤也是数据中心冷却机组长时间高效运行的阻碍。常规的管片式或全铝微通道换热器都需要翅片来强化换热, 翅片的面积

大小和窗口的形式成了影响换热性能的关键点。但在整个产品的实际使用过程中, 翅片增加积尘机会, 一旦清洗和保养容易倒片, 影响换热性能且增加能耗。而不锈钢微管无翅片换热器结构本身不采用翅片, 完全可以满足系统对换热器的需求量。无翅片对改善积尘状态具有一定优势, 即使积尘, 由于不锈钢微管无翅片换热器优秀的刚性经得起清洗, 能够有效解决制冷系统换热器长期工作结垢后的换热性能下降问题。同时, 无翅片微管换热器也能够满足数据中心蒸发器不用除湿的工况, 适合制冷系统的长寿命高效率稳定运行。

数据中心基站若采用二氧化碳 (CO₂) 作为制冷剂, 由于其工作压力高, 对换热器及其系统提出了更高的要求。如果换热器按照系统的爆破压力 34 MPa 为标准, 全铝微通道换热器和薄壁铜管恐怕难以承受。而不锈钢微管无翅片换热器完全可以承受 34 MPa 的爆破压力, 甚至更高, 这对推广 CO₂ 制冷剂在空调系统中的应用提供可靠的保障。

2.2.2 室外机高效不锈钢微管冷凝器结构优化

以往的换热器大多考虑通过改变管排数和管间距的大小来改善换热器的性能。通过改变管束直径组合来提高换热效果的结构类型鲜有报道。大多数换热器产品都是在相同管径的情况下计算换热器的性能。目前还没有明确的证据或方程来预测微管换热器在变管径结构下的流体动力性能。传统制造换热器的管束前、后排的铜管的直径是相同的。在实际使用中, 制冷剂在大部分管程中是处于两相流动状态, 在这种状态下, 整个管内两相制冷剂的温度恒定, 反映在前、后排管的管壁上的温度是相同的。当空气流过不锈钢微管进行换热时, 前排的换热温差往往大于后排的换热温差, 这样, 后排的换热量就小于前排的换热量。为了解决这个问题, 就要增大后排的换热温差, 后排的管壁温度不能变化, 可以考虑通过改变流过后排的空气温度来增大换热温差。要改变流过后排的空气温度, 可以通过改变前排的不锈钢微管直径使其换热量产生变化来实现^[25]。

针对以上分析, 该产品可采用一种管束直径逐渐变化的微管换热器结构, 第一排采用较大直径的铜管, 后续几排铜管的管径依次减小, 管径在中间的位置达到最小, 随后几排铜管的管径依次增大。

空气在流过前半部分结构与铜管换热时候,随着管径的减小,换热面积减少,空气的温度降低得较缓慢,空气与每一排铜管的温差比较趋近,换热温差始终处于一个较高的状态,提升了整体的换热量。

目前,在换热器性能研究中,对不同直径金属管组合的管束结构研究较少。针对这一方向的研究空白,提出了一种管束直径逐渐变化的换热器结构,并对其热工性能进行了研究,如图6所示。

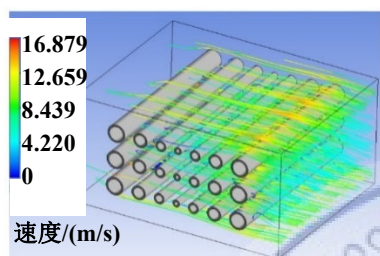


图6 变管径无翅片微管换热器流场模拟

基于数值结果,建立了传热性能因子和流动摩擦因子之间的经验相关性,以反映设计范围内热工水力性能的变化。在流场数值模拟的基础上,确定了直径从0.4~1.0 mm逐渐变化的直列管束的相关关系。设计范围还包括7~29排管,外壁间距从0.2~1.0 mm,空气速度从1~10 m/s。同时,利用提出的相关经验公式结合NSGA-II算法对换热器结构进行了关于流动摩擦因子和传热性能因子的多目标优化。

数据中心冷却系统由制冷机组、高位能输配系统、低位热能采集系统和制冷分配系统四部分组成。通过制冷系统能将热源中不可直接利用的冷能变为用户可直接利用的再生能源。当制冷循环的驱动能源是可再生能源(水能、风能、太阳能等)时,制冷机组是100%可再生、100%无排放的解决方案。

制冷机组的组成部件主要有压缩机、冷凝器、蒸发器、节流机构和辅助设备等,如图7所示。制冷的基本原理是蒸气压缩式制冷循环,压缩机排出的高温高压蒸气,进入冷凝器,制冷剂蒸气向高温热源放热后被冷凝成液态制冷剂(液化),液态工质经节流装置降压膨胀后进入蒸发器,气液混合制冷剂在蒸发器中吸收低温热源(空气、水或土壤等)的热量而蒸发形成蒸气(汽化),制冷剂蒸气重新被压缩机吸入完成一个循环,周而复始制备冷量。无翅片微管换热器既可以用于数据中心冷却系统的冷凝器,也可用作蒸发器使用。



(a) 机组照片



(b) 机组外观

图7 采用无翅片微管冷凝器的数据中心冷却机组

2.2.3 不锈钢微管冷凝器应用优势与创新点

数据中心基站冷却系统采用不锈钢微管换热器主要有如下优势。

1) 可以节省金属材料:传统换热器加工和制造需要大量的铝和铜等金属,在换热器的生产制造过程中损耗较多的能源,不利于全球节能减排的环保氛围。不锈钢微通道圆管换热器采用不锈钢薄壁管生产换热器,能够节省金属材料的使用,进而达到节能环保的要求;

2) 节省体积和重量:采用不锈钢微通道圆管换热器可以在有限体积下获得较大的制冷量,由于金属材料使用较少,能够节省换热器重量,减少油耗,为节能环保作出贡献;

3) 极低制冷剂充注量:根据《关于消耗臭氧层的蒙特利尔议定书》国际公约和《中华人民共和国大气污染防治法》(主席令第31号)关于减少空调和冰箱制冷剂使用量的规定,减少现有氟利昂充注量和采用新型自然工质制冷是空调冰箱领域的发展趋势。不锈钢微通道圆管换热器由于管内径只有0.5 mm左右,是传统管翅式换热器5~9 mm内径的5%~10%左右,因此,能够在换热性能相同的条件下,达到更低的充注量实现环保的目的;

4) 适用于高压环保制冷剂:二氧化碳作为一种环保的制冷剂受到越来越多的重视。然而由于其较高的冷凝压力对换热器的设计有较为严苛的要求。采用微通道金属圆管换热器能够很好的解决这

一问题。由于圆管内径只有 0.5 mm 左右,且管内空间较小,能够承受极高的压力,为二氧化碳制冷系统提供安全稳定的换热器。因此,微通道金属圆管换热器适用于二氧化碳环保制冷剂的。

3 冷却系统架构节能改造

冷却系统架构的节能改造涉及室内末端、输配系统和冷源系统。

3.1 室内末端节能改造

空气是最容易获得且和 IT 设备相容性最高的冷却介质。数据中心发展至今,IT 设备主要采用空气进行冷却。如图 8 所示,风冷取热技术主要包括房间级冷却(含封闭冷热通道)、行间级冷却和机柜级冷却等形式。

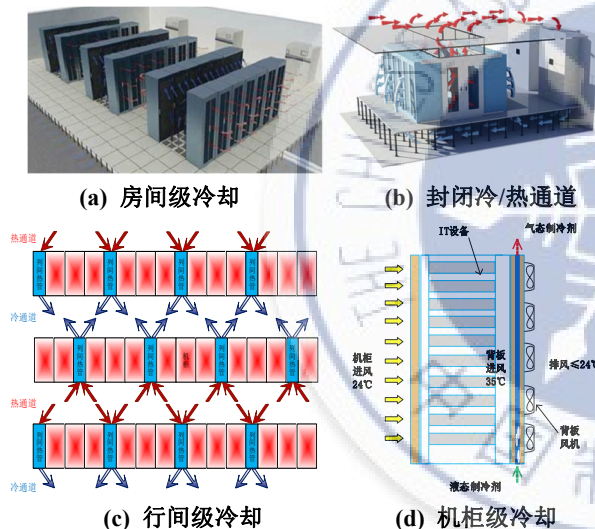


图 8 风冷取热技术

由于房间级冷却技术存在冷热气流掺混(冷风短路、热风回流等)造成的冷量损失大,且容易导致数据中心内部局部热点的存在,冷/热通道封闭是冷热气流管理的两种方法,已被数据中心行业所接受作为标准化的设计。为了进一步优化冷热气流组织和让冷却末端接近 IT 设备等发热元件以减少空气的运输能耗,进一步发展为行间级冷却和机柜级冷却等形式。机房级空调能效最优,能效比可达到 100 以上,列间空调能效比可达到 50 以上,房间级空调送风距离最远,能效比可达到 20 以上。

3.1.1 列间级空调末端节能改造

(1) 技术原理与创新技术

顶置冷却空调属于行级空调,空调利用水或制

冷剂为冷源,将室内机设计成机柜或通道顶置形式,可将机柜散出的热量通过顶置冷却空调直接排出室外,替代常规精密空调给机房降温,实现按需制冷,就近冷却,较房间级空调和列间空调能效更高;顶置冷却空调与 IT 机柜紧密结合,安装在机柜或通道上方,冷却机柜排风。图 9 中,顶置冷却空调分为热管型、水冷动力型和水冷非动力型。

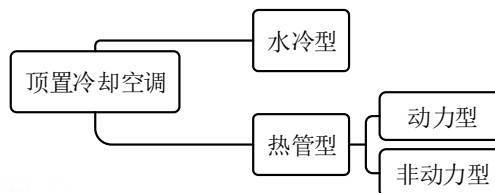


图 9 顶置冷却空调分类

水冷型顶置冷却空调根据是否设置循环风机可分为有风机动力型和无风机非动力型,外观大致如图 10 所示。水冷型顶置冷却空调室内机配有冷冻水盘管、二通水阀、温湿度传感器和漏水检测等,其中动力型设置循环风机。水冷型顶置冷却空调采用了水作为载冷剂,较制冷剂成本大大降低;水冷型顶置冷却空调较热管背板,减少了制冷剂与水换热环节,效率更高,适用于更高的冷冻水供回水温度,但冷冻水直接进入机房,且水冷盘管和冷冻水管道设置在机柜上方,机房漏水风险较高。从而采用水冷型顶置冷却空调,进入数据中心机房内所有的水管一般采用焊接,并设置严格的防漏水措施,以降低水患的风险^[26]。

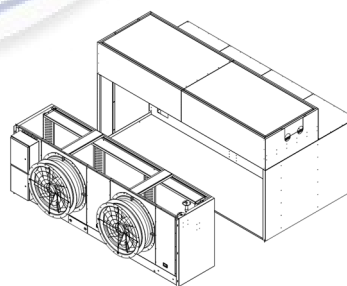


图 10 水冷型顶置冷却空调

顶置热管空调系统由热管空调制冷末端、冷量分配单元(CDU)、制冷剂管道等组件组成。如图 11 所示,空调系统工作时,机柜内服务器排出的热风通过安装通道顶部的制冷末端进行冷却降温,并将冷空气送至冷通道。制冷末端内循环工质受热由液态变成气态,气体由管路将热量带到 CDU,在 CDU 内与数据中心冷源系统提供的冷冻水进行换热,循

环工质受冷由气态变成液态，并依靠自身重力沿制冷剂管路回流至制冷末端完成一个完整的热力循环，机房热量通过顶置热管空调系统传递至数据中心冷源系统，并最终传递至室外^[27]。

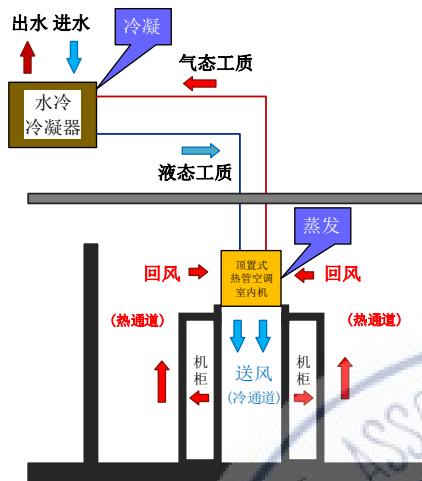


图 11 顶置热管空调原理

(2) 产品主要性能指标

顶置冷却空调有效利用了机房高度空间，增加换热盘管面积，降低换热盘管面速，从而减少循环风阻力，如贵安新区某数据中心项目顶置冷却空调盘管面速仅为 1 m/s，较冷冻水精密空调换热盘管 2.5 m/s 面速大大降低，空调循环风机全压仅为 60 Pa，末端空调能效比达到 83。综上顶置冷却空调可有效降低末端冷量输配能耗。

(3) 产品应用

设置在机柜上方的顶置冷却空调对机房高度要求较高，顶置冷却空调盘管高度一般在 1 米左右，同时需设置约 0.6 m 高的管道阀门接管空间，较采用传统空调的机房，净高需增加 1.6 m 左右。

设置在通道上方的热管空调，空调水冷冷凝器下沿与室内机上沿高差一般要求最低为 0.6 m，再加上室内机高度，较采用传统空调的机房，机房净高需增加约 1.6 m（水冷冷凝器走廊梁窝布置）。顶置冷却空调节省了空调平面安装面积，但对机房层高要求较高，一般仅应用于新建机房，且水冷型顶置冷却空调爆管对 IT 设备影响较大，几种类型的顶置冷却空调在国内数据中心应用较少。

3.1.2 背板空调末端节能改造

(1) 技术原理与创新技术

背板空调属于机架级空调。背板空调是利用水

或制冷剂为冷源，将室内机设计成机柜背板形式，可将机柜散出的热量通过背板空调直接排出室外，替代常规精密空调给机房降温，实现按需制冷，就近冷却，较房间级空调和列间空调能效更高；背板空调与 IT 机柜紧密贴合安装，设置在机柜后门，背板空调与机柜之间自成封闭热环境，空调直接对机柜内的 IT 设备进行降温，机柜外部为开放冷环境。背板空调的分类如图 12，可分为冷冻水型、重力热管型、动力热管型 3 种。

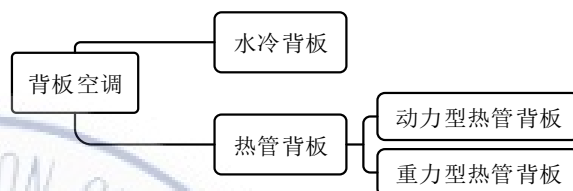


图 12 背板空调分类

水冷背板，又称水冷门，室内机配有冷冻水盘管、EC 风机、二通水阀、温湿度传感器、地板漏水检测，选配水位开关等。水冷背板采用水作为载冷剂，较制冷剂成本大大降低；且水冷背板较热管背板减少了制冷剂与水换热环节，效率更高。但冷冻水会直接进入机房，机房的漏水风险更高^[26]。

重力型热管背板空调由热管背板制冷末端、冷量分配单元（CDU）、管路等组件组成。空调系统工作时，服务器排出的热风通过安装在机柜背后的制冷终末端进行冷却。

动力热管型背板空调，制冷剂在氟泵的驱动下强迫流动，吸收 IT 设备散热后，循环至水冷制冷剂分配单元（RDU）中，在 RDU 中的水冷冷凝器和冷冻水换热后冷却为液态并回流至热管背板。RDU 出液管及背板上安装有视液镜，用以人工巡检。若机房内发生制冷剂泄漏，可通过开启机械排风机（如气灭后排风机）将气态制冷剂及时排出机房。制冷剂管路承压不小于 3.0 MPa。优点是制冷半径大，流速高，换热效果较好，适用于机房层高受限或输送距离较远的场合。

(2) 产品主要性能指标

末端空调能耗主要为风机能耗，背板空调较房间级空调和列间空调，有效缩短了送风距离，房间级空调机外余压一般要求 100~150 Pa，采用风管送风送时，一般选择 150 Pa 机外余压房间级空调，列间空调一般要求机外余压 10 Pa，背板空调机外余

压一般要求为 0 Pa；增量换热盘管迎风面积，降低换热盘管迎面风速，降低换热盘管阻力；同时房间级空调为增加换热面积，现房间级空调产品一般采用 3~4 排换热盘管，列间空调产品一般采用 3 排换热盘管，而背板空调一般采用 2 排换热盘管，进一步减少了背板空调内部盘管局部阻力。背板空调有效减少了风机全压，空调能效更高，如下表所示背板空调能效比可达到 100，较房间级空调能效比 20 和列间空调能效比 50，综上背板空调可有效降低末端冷量输配能耗。

(3) 产品应用

水冷背板与其他水冷空调类似，可设置双路供水，从而实现水冷背板空调末端管路系统的在线可维护性，水冷背板空调设置 N+1 的设备备份，即可实现整个末端空调系统的在线可维护功能，达到《数据中心设计规范》A 级数据中心末端空调系统要求^[5]。

热管背板空调按系统设置备份，热管空调故障时考证整个热管空调系统故障，如管道损坏系统失压，整个热管空调失去制冷能力。每列机柜设置 2 套热管背空调系统，一般按 2 列考虑空调备份，考虑 1 套热管背板空调系统故障，另外 2 列机柜中 3 套热管背板空调系统仍然满足 N 的制冷能力，按平均功率考虑，每台背板空调应满足机柜发热的 4/3 倍制冷量选型，考虑建筑负荷等其他负荷，热管背

板一般按单机柜功率的 1.35 倍制冷量选型，达到《数据中心设计规范》A 级数据中心末端空调系统要求^[5]。

背板空调制冷剂管或冷冻水管、凝水管可布置在机柜正下方，如图 13 所示，无须设置通道封闭、架空地板等常用机房设施，机房整体造价较传统列间空调略有提升，但背板空调能效较高，在双碳与越来越严格的 PUE 政策背景下，背板空调在实际数据中心工程项目中应用较多。

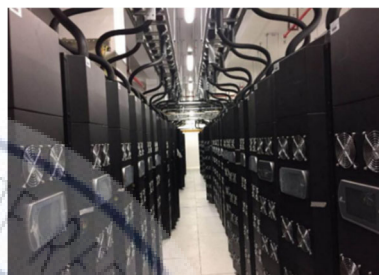
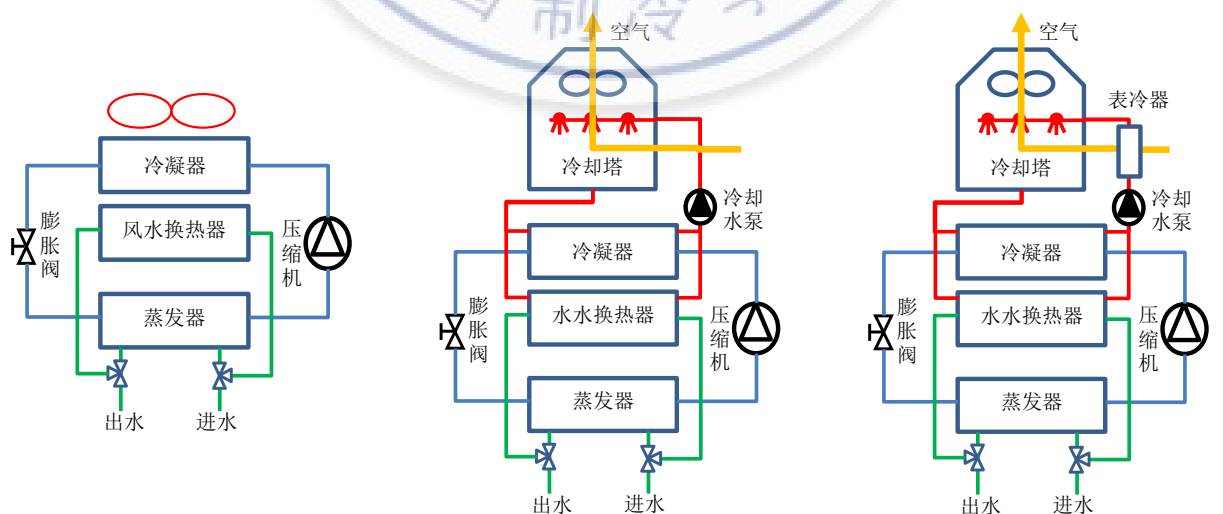


图 13 某项目背板空调实景

3.2 冷水机组系统节能改造

在大型和超大型数据中心的冷却系统，通常采用冷水机组。如图 14 所示，风冷机组通常加入风-水换热器，而水冷冷水机组一般是在冷却水与冷冻水之间加入换热器。在空气温度或者冷却水温度足够将冷冻水温度降低到数据中心冷却要求时，则开启完全自然冷却模式；否则，开启蒸气压缩制冷机组，独立或与自然冷却相结合为冷冻水进行降温。



(a) 风冷冷水机组自然冷却方案

(b) 水冷冷水机组+直接蒸发冷却塔

(c) 水冷冷水机组+露点蒸发冷却塔

图 14 冷水机组+自然冷却系统方案

3.3 直膨系统节能改造

对于中小型数据中心的冷却系统，通常采用直

膨式制冷系统，与其匹配的主要是回路热管自然冷却技术。图 15 给出了三种典型的蒸气压缩/回路热

管一体式冷却系统，分别采用重力回路热管、液泵辅助驱动回路热管和气泵（压缩机）辅助回路热管与蒸气压缩制冷系统进行集成，均可以实现在高温时主要依靠压缩机带动的蒸气压缩回路进行主动

制冷，在低温时分别依靠重力回路热管、液泵/气泵辅助回路热管实现自然冷却，在过渡阶段实现主动制冷与自然冷却的联合运行，全年都可以实现良好的节能减排效果。

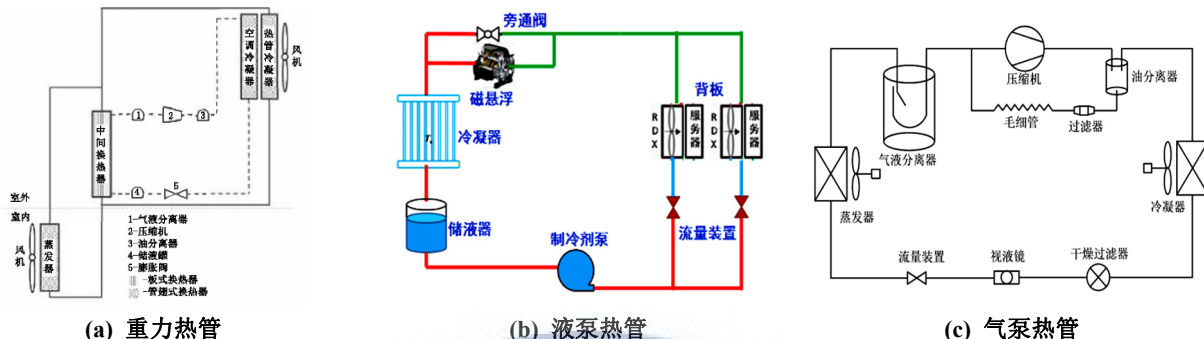


图 15 直膨系统+自然冷却方案

3.4 输配系统节能改造

冷源设备制冷的冷量需要通过空气、水或者制冷剂送到室内，特别是以空气和水作为输送介质时，由于只靠介质的温差（显热）输送，所需的流量大，会在输配系统（管路、阀门等）中产生比较大的阻力，为了克服这些阻力，风机和水泵也会产生比较大的能耗。

输送的能耗。在高差或系统结构受限，重力所产生的驱动力不足时，可以采用液泵或气泵作为辅助动力，如图 16 所示。

3.4.1 输配介质及系统遴选

数据中心常用的冷却介质包括空气、水或其他非相变液体冷却液、相变制冷剂等。从表 4 可以看出，输送相同的热量，采用相变介质依靠其相变潜热不仅不产生介质的供回温差，而且其单位质量的携带冷量约为水和空气（均以供回 5℃温差）的 9 倍和 35 倍，即相变介质的质量流量仅为水的 1/9 或空气的 1/35，质量流量大幅降低。并且相变介质的黏度也远低于水，输送阻力远远小于水。因此采用相变介质的输配系统能耗会远远小于单相介质。

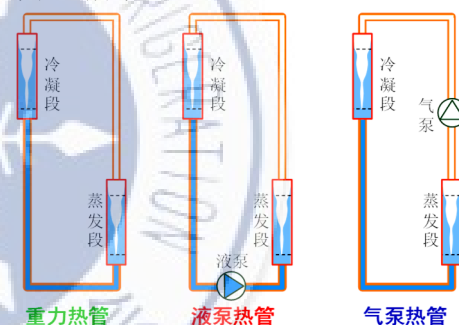


图 16 三种形式回路热管

表 4 常用冷却介质主要物性参数 (20℃)

物性参数	空气	水	R22	R134a	CO ₂
比热/(kJ/(kg·℃))	1.01	4.2	—	—	—
潜热/(kJ/kg)	—	—	192	186	176
温差/℃	5	5	0	0	0
比冷量/(kJ/kg)	5.05	21	192	186	176
液相密度/(kg/m ³)	—	1 000	1 229	1 243	821
液相黏度/(uPa·s)	—	1 138	183	221	74

此外，采用相变介质时，还可以充分利用其气相和液相的密度差和内外高差所产生的压力差驱动介质的流量，形成回路热管的方式，降低了介质

3.4.2 高效输配设备节能改造

作为气体介质的输送设备（风机或气泵）和液体介质的输送设备（水泵或氟泵）是输配系统的主要耗能设备，高效输送设备的研发及在系统中的匹配是数据中心输配环节的关键。

以氟泵为例，氟泵供液是利用泵的机械作用，向蒸发器输送制冷剂。泵是一种专门用于输送制冷剂或使制冷剂增压的流体机械。随着变频技术的日趋成熟，根据负载冷却需求实时调控泵的频率，可以实现更好的节能效果。

氟泵流量、扬程参数在选取时不宜过大超出系统的特性参数，流量/扬程只要能克服系统中管路、换热器及阀件的压降损失完成制冷剂输送即可，扬程过大反而导致蒸发器出口至冷凝器入口的气态管压降过大影响传热性能。同时流量过大氟泵会出现气蚀风险，因为氟泵流量过大在启动时需要大量

制冷剂, 储液器容量如果过小会导致氟泵吸不到液态制冷剂出现气蚀风险, 实际运行时结合蒸发器出口过热度的调节, 以及氟泵入口过冷度状态, 氟泵具备变频调节转速功能保障系统冷量输出稳定。

3.4.3 输配设备的运行匹配

输配设备的运行匹配也是输配环节节能降耗的关键问题。虽然数据中心内部的 IT 设备运行较为稳定, 但是室外环境随时在发生变化, 输配环节的各个设备很难处于设计的运行状态。但是作为输配环节的调节设备既包括阀门等阻力设备, 也包括泵和风机等动力设备。特别是在大型或超大型数据中心中, 输配环节的阻力设备和动力设备数量非常庞大。因此, 针对变化的运行负荷与运行条件下输配介质的输送要求, 优化匹配输配环节的阻力设备和动力设备的运行状态, 也是输配环节节能减排亟需解决的关键技术。

3.4.4 上海某机房风系统节能改造

以上海移动松江分公司 6 楼机房为例, 介绍了机房空调冷量输配能耗过高的现象分析和解决办法。该机房位于上海市松江区人民北路 3506 号, 通过收集该机房的环境温度、功率能耗和制冷系统等运行数据, 利用 Phoenics CFD 软件对其进行了专业诊断分析, 并针对机房空调冷量输配存在的问题提出了相应解决办法。

(1) 机房整体情况

如图 17 所示, 上海移动松江分公司 6 楼机房, 面积约 443 m²(长为 30.3 m, 宽为 17 m), 层高 3.8 m (含 48 cm 高架地板), 该机房采用地板送风+机柜内底部进风设计。机房内共设 181 台 IT 设备机柜 (含 10 台网络配线机架), 其中运行 137 台 (IT 设备的总功率约为 173 kW)。机房内共有 9 台海信 HED-F080B2 和 1 台美的 MAD2060T2N1S4 下送风精密空调, 全部运行。空调名义总制冷量为 810.1 kW, 名义总风量为 208 000 m³/h。

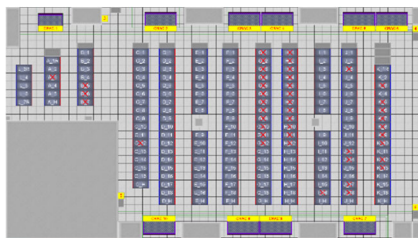


图 17 机房平面图

依据机房现场实际测量情况, 并结合客户提供的相关资料, 对机房内各要素的详细信息进行了确定。同时, 根据所确定的信息对该机房建立了精准的 CFD 三维模型, 如图 18 所示。



(a) 地板上



(b) 地板下

图 18 机房三维模型

(2) 机房空调冷量输配现状与问题分析

1) 机柜进风温度

通过专业环境测量平台, 按 0.75 m 和 1.5 m 两种高度获取了机房内 724 个温度数据点 (如图 19 所示), 并统计分析了运行机柜的 274 个 IT 设备入口温度数据。

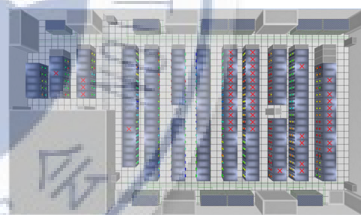


图 19 不同高度下实测温度点

统计结果如图 20 及图 21 所示。可以看出, 机柜 IT 设备的入口温度主要集中在 12.48~27.61 °C 范围内, 最大温差为 15.13 °C, 存在冷热不均现象。

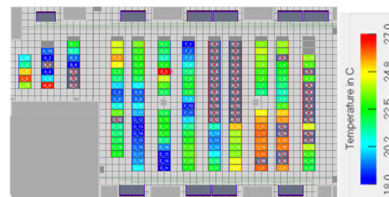


图 20 机柜 IT 设备入口温度分布

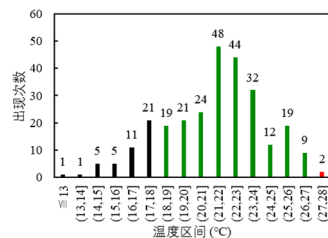


图 21 机柜 IT 设备入口温度统计图

热点（入口温度 $>27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）有两个；冷点（入口温度 $<18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）：44个；最高入口温度： $27.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；最低入口温度： $12.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；平均入口温度： $21.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

借鉴其他文献研究^[28-29]，对机柜的冷却指数进行了分析统计。统计分析发现，该机房的IT设备入口温度基本无过热现象，但存在局部过冷现象。

2) 空调运行风量

采用高精度热线风速仪，对每个运行空调回风进行测量，获取其循环风量，并进行了统计分析，如表5所示。

表5 每台运行空调实测回风风量

机组编号	实测风量/(m^3/h)
1	18 238.7
2	20 808.1
3	20 010.7
4	17 836.3
5	20 254.0
6	18 578.4
7	18 757.5
8*	6 622.0
9	19 819.9
10	19 879.0

注：*指8号空调的两个系统模块中存在单个系统模块故障，风量异常。

由表5可知，所有运行状态下空调的总实测循环风量约为 $180\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$ ；通过现场实测和CFD模拟，得出IT设备理论总需求风量约为 $62\ 925\ \text{m}^3/\text{h}$ 。借鉴其他文献研究^[28-29]，对空调送风效率进行了分析，经分析得出该机房在未进行气流组织优化下的空调送风效率为34.8%。

空调送风效率为空调所送的冷空气中直接用于冷却IT设备的流量占总送风量的比值，这个值越大表示冷空气利用率越高^[28-29]。因此由上述数据可知，即使考虑环境负荷对循环风量的额外需求，该机房的冷空气利用效率仍不高。

3) 机房空调风机能耗测量

鉴于该机房内空调主要为海信HED-F080B2，因此针对该型号空调进行了风量与风机能耗的测量，结果如表6所示。

表6 风机能耗实测结果

风机输出百分比/%	实测风量/(m^3/h)	实测功率/kW
69	19 879.0	3.23
65	17 379.9	2.81
60	16 017.4	2.39
50	11 955.5	1.70

4) 诊断分析结果

根据现场勘察和CFD模拟分析，发现该机房气流组织主要存在以下问题。

运行空调提供的额定制冷量和风量均大于IT设备的实际散热需求。目前该机房在用IT设备的总功率为173 kW，理论总需求风量约为 $62\ 925\ \text{m}^3/\text{h}$ 。而运行空调的额定总制冷量为810.1 kW，实测循环风量约为 $180\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$ ，模拟计算风量为 $172\ 850\ \text{m}^3/\text{h}$ ，大于在用IT设备的散热需求，因此表明在当前未进行气流组织优化下的机房冷空气利用率较低。

结合现场机房空调的设定和实测数据，本机房用于冷量输配的总风机功耗约为29.8 kW，机房空调用于冷量输配的风机能耗相对偏高。

(3) 解决办法

1) 空调节能调节

根据CFD仿真计算结果以及机房实时温度场情况，在实施机房气流组织改造的前提下，对各空调设定回风温度，同时精细化其风机转速，并根据实际需求调配精密空调的输出制冷量，均匀温度场，从而达到有效提升机房空调整体能效的目的。

表7中，根据CFD仿真计算结果，关闭一定数量的空调，并通过调节不同空调的风机风速设定，在满足IT设备散热要求的前提下，可有效降低机房空调用于冷量输配的风机能耗。根据现场调测验证结果，实际方案与模拟方案可能有所不同。

表7 机房空调轮值设定

空调	方案1	回风温度设定/ $^{\circ}\text{C}$	风速比例设定/%
1	ON	24.5	80
2	ON	23.0	70
3	ON	25.0	60
4	OFF	—	—
5	ON	24.0	65
6	ON	25.0	50
7	OFF	—	—
8	ON	25.0	50
9	OFF	—	—
10	ON	25.0	65

2) 优化结果预计

如图22和图23所示，优化后，不仅能够消除部分机柜进风温度过低的现象，使机柜冷却指数大于95%。还可在满足机柜进风温度要求的前提下，优化调整气流通路，均匀机柜进风量；同时满足运

营要求,达到提升空调运行能效、降低能耗的目的,并满足机房节能指标^[28-29]。

按上述方案 1 测算,机房空调用于冷量输配的风机功耗预计可降至约 16.4 kW,下降幅度近 45%。

从温度云图及计算统计可以得出,上述各方案中服务器机房各机柜进风温度范围均控制在 18~27 °C 以内,满足项目要求。

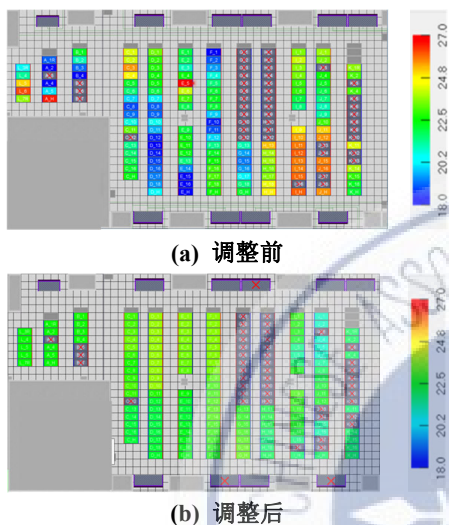


图 22 机柜最高进风温度 (单位: °C)

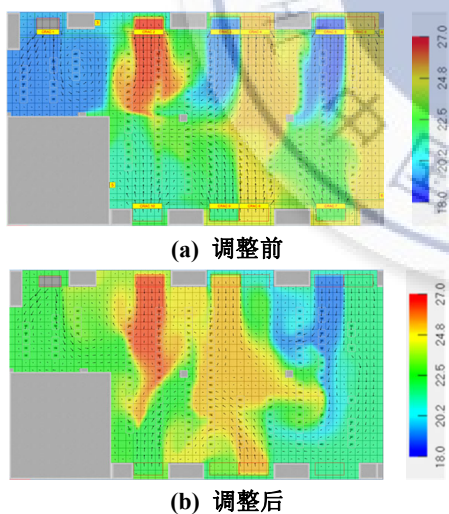


图 23 高架地板下温度云图 (单位: °C)

4 除湿问题节能改造

数据内部主要为电力电子设备自身只产热不产湿也不吸湿,但是需要在一定的湿度范围内安全高效工作。但是由于数据中心内部为了维持室内的微正压环境、室内污染物的排放以及保证运维人员的工作环境等因素,会向数据中心内部提供一定的新风,从而需要进行一定的加湿/除湿。因此,数据

中心的除湿应尽量采用热湿独立控制系统,在中小型数据中心需要采用低负荷除湿技术以避免出事后的再热,并避免降低整个制冷系统的蒸发温度。

4.1 采用热湿独立控制措施

常规空调系统的热湿处理过程是耦合的,会产生能量损失,而温湿度独立控制的空调系统可以有效避免这类问题,有效提高能源利用效率。根据相关研究,采用温湿度独立控制空调系统的建筑节能约 35%^[11, 30]。

数据中心空调系统的温度控制和湿度控制相互独立后,精密空调只负责调节温度,可以采用较高的蒸发温度,避免冷却过程的过度除湿,使制冷性能明显提高。

湿度控制采用独立的设备,通过制冷除湿、湿膜加湿的方式进行湿度调节。加湿时,其工作原理是:通过风机抽风,机内产生负压,空气穿过湿膜,同时水箱中的水流向湿膜的布水管,水均匀地湿润整个湿膜的接触面,使通过湿膜的空气加湿降温,而未蒸发的少量水落回底盘,形成水路循环。相较于精密空调通常采用的电极加湿器,湿膜加湿的能耗非常低。除湿时,其工作原理是:潮湿的空气经过空调蒸发器后露点温度大幅度下降,空水汽以冷凝水的形式析出,流到水盘中将水量排出。低温低湿的空气通过冷凝器后温度上升,再送入室内,使室内环境在湿度下降的情况下保持温度相对恒定。

数据中心采用温湿度独立控制,既可以使被控环境的温湿度同时满足要求,又可以使精密空调的蒸发温度提高,制冷效率提升,完全避免了精密空调除湿后再加热、除湿后再加湿造成的浪费。

4.2 采用高蒸发器温度末端设备

为了避免精密空调在除湿后需要进行电加热的情况,部分精密空调厂家开发了低载除湿的技术方案,实现在除湿的同时,不会发生过度冷却。

(1) 低载除湿方案 1

精密空调除湿的过程中伴随着显热制冷量的产生,如果此时显热负载相对较小,且除湿过程不进行补热,必然会带来室内温度的下降。轻载除湿技术 1 通过引入精密空调室外冷凝器的高温排气,利用其散热量作为除湿后空调送风的热补偿可以解决此问题。这种补热方式不需要额外耗能,是一种相对节能的恒温除湿方案。

轻载除湿技术 1 的制冷系统, 由压缩机、位于压缩机下游的室外冷凝器、位于压缩机上游的室内蒸发器、蒸发器进口和中间的流量调节装置 1、2 和制冷剂管路连接构成, 如图 24 所示。

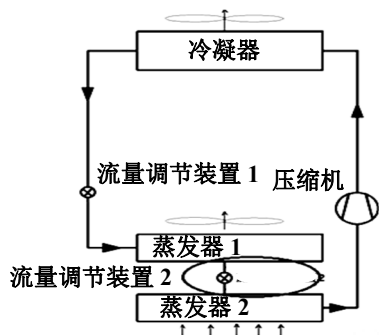


图 24 轻载除湿技术 1

当正常制冷时, 由流量调节装置 1 进行节流, 蒸发器中间的流量调节装置完全打开, 不起节流作用, 从压缩机里排出的制冷剂为高温高压的气态, 经过冷凝器时, 对室外空气放热, 变成了高压高温的制冷剂液体, 通过流量调节装置 1 之后, 变成了低压低温的两相制冷剂, 温度低于室内温度, 进行吸热, 从而降低了通过蒸发器的室内空气温度, 实现了制冷的功能, 制冷剂吸热后变成了低压气态, 流回压缩机进行下一个循环。

当需要恒温除湿时, 流量调节装置 1 完全打开, 不进行节流, 蒸发器中间的流量调节装置 2 进行节流。对于制冷剂, 从冷凝器里流出的高温高压液态制冷剂经过流量调节装置 1 之后, 依然是高温高压液体, 流进蒸发器 1 之后高于室内环境温度, 进行放热, 降低了温度; 然后液态制冷剂流过两个蒸发器中间的流量调节装置 2, 变成了低压低温的两相制冷剂, 流进蒸发器 2, 温度低于环境温度, 进行吸热, 温度升高, 变为气态后流回压缩机进行循环。因此, 对于制冷剂, 在通过蒸发器 1 和蒸发器 2 后, 由高压高温的液态变为低压低温的气态; 而对于室内空气, 空气先经过蒸发器 2 温度降低, 再经过蒸发器 1 温度升高, 室内空气经过空调后整体温度基本上保持不变。此时, 蒸发器 2 可以持续进行除湿, 不断降低室内温度, 就实现了恒温除湿的功能。

(2) 低载除湿方案 2

另一种低载除湿方案通过调节电子膨胀阀的运行状态, 满足轻载模式下的恒温除湿, 如图 25。当正常制冷时, 流量调节装置按照正常过热度

控制进行节流; 当正常除湿时, 流量调节装置按照较高的过热度控制进行节流, 降低蒸发温度, 提高除湿量; 当在制冷或除湿时, 负载低于压缩机最小转速对应的正常输出冷量时, 逐步降低流量调节装置开度, 逐渐降低蒸发温度, 减小制冷剂进、出蒸发器的焓差及流量, 从而降低压缩机制冷输出, 以实现轻载除湿功能。

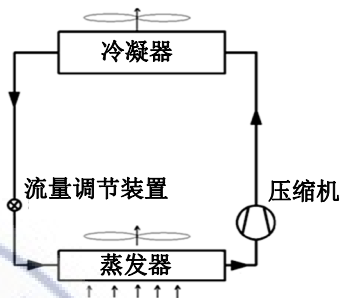


图 25 轻载除湿技术 2

5 基于回路热管的自然冷却技术

目前, 自然冷却技术被认为是实现数据中心节能的最有效方法之一, 有着广阔的发展潜力^[18]。在设计合理的情况下, 自然冷却在数据中心冷却中具有良好的节能效果和经济性, 但同时它也存在一定局限性。自然冷却技术是数据中心冷却系统节能的关键技术, 但自然冷却技术在数据中心的应用受多方面因素的影响^[31]: 1) 数据中心所在地的气候和地理位置条件; 2) 相关标准和规范对数据中心热环境的限制; 3) 自然冷却技术本身与数据中心、气候地理条件的匹配和适用性; 4) 自然冷却技术节能效果、初投资增加值之间的经济性。

因此, 针对目前室外自然冷却系统利用仍然不足, 为了更好地利用自然冷源, 本节提出四种自然冷却利用不足的改造方法, 包括应用制冷剂液泵实现免费供冷、应用气泵(小压比压缩机)实现自然冷却、采用加热热管等自然冷却利用设备等。

5.1 重力型回路热管技术

5.1.1 重力型回路热管技术原理

图 26 所示为重力型回路热管结构及工作原理, 简称重力热管、回路热管、热虹吸管, 它是通过重力回流和压力差作用在管道中实现制冷工质的自然相变流动的气液循环将热量从室内排到室外, 不需要外部动力。主要由冷凝器、液体下降管(液管)、

蒸发器以及气体上升管（气管）组成，制冷工质气体上升与冷凝液体回流分别设置了独立的流通管道，上升气体与回流液体同时流动，互不干扰^[32]。

系统运行时，液态制冷剂在蒸发器中蒸发吸热，吸收热源热量，然后变成饱和或过热气态，压力升高，通过气管进入冷凝器并在冷凝器冷凝成液态工质，在重力的作用下，液态工质沿着液管回到蒸发器，如此循环，实现热量的连续传递。重力型分离式热管的冷凝器位置必须高于蒸发器才能实现系统顺利运行^[33]。当重力型分离式热管稳定运行时，为克服管路中的流动阻力，液管与蒸发器液面之间会形成一定的液位差以保证重力型分离式热管正常运行^[33]。

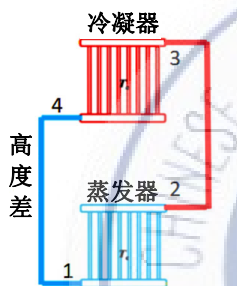


图 26 重力型热管原理

重力型分离式热管传热性能好，能够在近似等温的条件下输送高密度热量，且传热距离远、启动温差小、布置灵活、结构简单紧凑、可靠性高，非常适用于数据中心这类对环境和安全性要求很高的场合。

5.1.2 重力型回路热管背板技术

如图 27 所示，重力热管背板工作原理：系统由多个重力热管背板、制冷剂冷凝单元（RCU）、控制系统和相关管路系统组成^[34]。背板空调的循环系统由空气循环系统和热管循环系统^[34]组成。

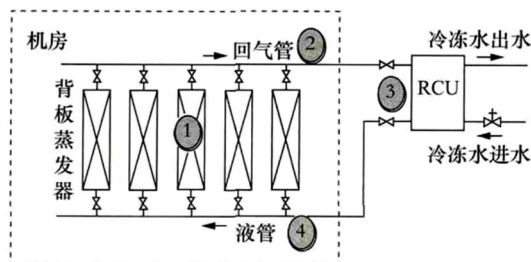


图 27 基于重力回路热管的机房空调系统

5.1.3 重力型回路热管复合空调

图 28 给出了双冷源一体化机房空调+热管背板

的原理，包括一个制冷系统和一个自然冷却系统，两个系统在重力热管背板处进行融合，可分别切换运行制冷+热管背板模式以及自然冷却+热管背板模式。

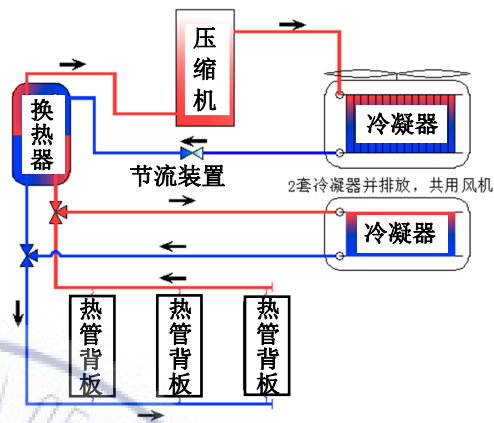


图 28 双冷源一体化机房空调和热管背板

热管（自然冷却）模式：当室内外温差超过设定上限时采用热管模式，此时压缩机停止运行，仅开启室内外风机。制冷模式：当室内温度达到设定温度上限时，开启压缩机，进入制冷模式。制冷系统由制冷冷凝器、板式换热器、压缩机、膨胀阀等组成，通过制冷系统运行将中间板换中热管系统的制冷剂冷凝成液态，通过液管进入热管蒸发器蒸发成气态^[35-36]。

技术特点^[35]：1) 具有热管循环换热和压缩制冷循环换热两种换热方式，热管换热循环与压缩制冷循环中的制冷剂完全隔离，仅通过中间换热器进行热交换，不掺混，能够有效解决两个循环共用制冷剂而引起的流量调节难和冷冻油降低热管循环效率的问题；2) 自然冷却模式和制冷模式两者可以同时运行，互不影响；3) 制冷部分加装中间换热装置，能够有效地控制室内末端蒸发温度在露点温度以上，杜绝了因为露点温度低而产生冷凝水；4) 室内末端多元化（热管背板、热管列间、顶置式热管等）。

如图 27 利用带自然冷却型冷水机组时，该系统原理另外一种运用方案，适用于大型数据中心，提高了换热器效率，降低了机房初投资，可实现节能 30%~50%。其中带自然冷却冷水机组可以是多种类型，如风冷型、水冷型或蒸发冷却型，同时压缩机既可以运用螺杆式压缩机，也可以利用离心式压缩机，包括磁悬浮或气悬浮压缩机。

5.2 液泵驱动回路热管技术

5.2.1 液泵驱动回路热管

(1) 液泵驱动回路热管原理

液泵驱动型分离式热管，简称液泵热管，其原理如图 29 所示，系统主要由冷凝器（室外侧）、蒸发器（室内侧）、液泵、储液器组成，系统运行时，由液泵将储液罐中的低温液体制冷剂输送到蒸发器并在蒸发器中吸热相变汽化，之后进入冷凝器中放热，被冷凝成液体，回流到储液器中，如此循环，从而将室内的热量源源不断转移到室外，达到为数据机房冷却散热的目的^[20, 37]。

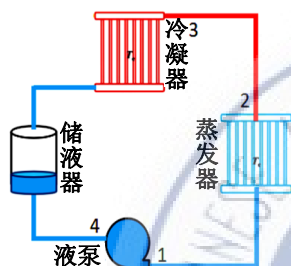


图 29 液泵驱动型回路热管原理

(2) 液泵驱动回路热管背板

针对高发热密度机房的局部热点问题，提出类似于重力热管背板方案，其原理与传统重力热管背板类似，只不过系统中增加液泵、储液器部件，化解了重力热管背板水平方向上多联式结构分液不均问题。同样动力热管背板既不需要改变现有机柜的布局情况，也不会产生冷凝水，具有制冷能耗小、无凝露、制冷容量大、占地面积小和运行安静的优点，并且支持机房自由扩容和升级，是新一代高密度数据中心值得推荐的新型空调产品^[34]。

整个动力热管背板空调系统由多个动力热管背板、RCU（制冷剂冷凝单元）、液泵、储液器、控制系统和相关管路系统组成^[34]，如图 30 所示。

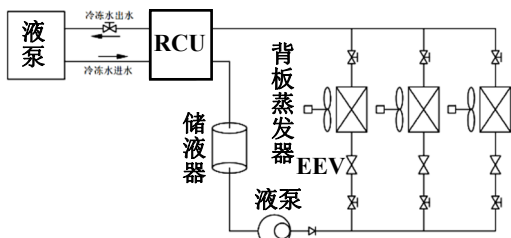


图 30 基于液泵热管背板的空调系统

5.2.2 液泵驱动回路热管复合空调

(1) 液泵驱动回路热管复合空调原理

为了避免使用两套独立的系统来实现全年供冷所造成的资金和空间上的过多占用，将液泵驱动热管与蒸气压缩制冷系统进行复合，构成一体式液泵热管复合空调^[20, 37]。简称“氟泵空调”，原理如图 31 所示，液泵串联在制冷系统回路内。

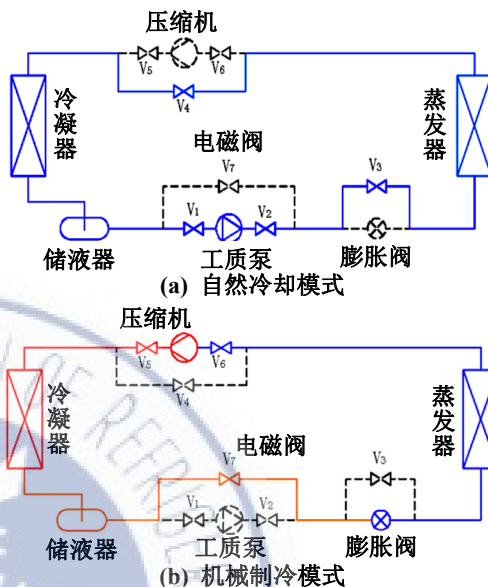


图 31 液泵驱动回路热管复合空调

冷凝器可以是风冷、水冷或蒸发冷却/凝等形式，压缩机采用变频转子、变频涡旋、变频螺杆以及变频离心压缩机时，需要配置油分离器，设置回油回路。其中流量装置具有宽幅调节流量功能，系统根据室外环境温度以及室内负荷需求分别切换运行制冷模式、混合模式及液泵热管模式^[20, 38-39]，即在室外温度较高时压缩机运行，制冷剂泵关闭，单纯利用蒸气压缩制冷模式为数据中心提供制冷量，自蒸发器出来的气态制冷剂被压缩机吸入进行压缩、冷凝、节流进入末端蒸发器进行蒸发吸热，实现制冷。此时节流装置进行节流降压，将从冷凝器出来的高压液态制冷剂节流降压成低温低压状态的制冷剂，在蒸发器中进行蒸发制冷。

当具备一定自然冷源时，压缩机与液泵同时运行，通过调节压缩机运行转速、室外风机转速以及流量装置开度，适当进行冷凝侧增压，补偿传热温差，实现按需制冷，再通过液泵增压作用，保护压缩机以及系统安全运行，实现系统过冷度增加，进而带来能效提升，此时液泵运行目的是实现压缩机在安全范围内稳定可靠运行，或实现压缩机回油、电机冷却功能^[39]；在室外自然冷源足够时以液泵驱

动热管循环替代压缩制冷循环,此时由蒸发器、冷凝器、储液器、液泵以及流量装置构成液泵热管系统,控制冷凝器的换热能力和液泵转速使冷量与热负荷相匹配,以充分利用自然冷源实现节能运行,并突破室内、外机组安装位置的限制瓶颈^[39]。三个循环在同一套系统内运行,不存在控制死区。

(2) 变频转子压缩机+液泵复合空调

对于采用变频转子压缩机的氟泵空调研究,设计一款制冷量 10 kW 的小型风冷机房/基站氟泵空调样机,压缩机排量为 22 cm³,制冷剂泵流量为 0.1~0.25 m³/h 可调,功率 0.15~0.25 kW,采用 R410A 制冷剂,室内干球/湿球温度为 38 °C/20.8 °C,测试样机制冷性能与能效,并计算全年能效 AEER。

样机在全国典型城市全年能效 AEER 情况如图 32 所示,在哈尔滨地区 AEER 达到 6.9,在北京地区 AEER 超过 6.0,相较于常规小型定速机房空调节能率超过 50%,相较于常规小型变频空调节能率超过 30%,而在广州地区 AEER 仅为 4.29,此时可通过利用水冷或者蒸发冷却(凝)的技术手段实现全年能效 AEER 达到 6.0~7.0 的目标^[39]。

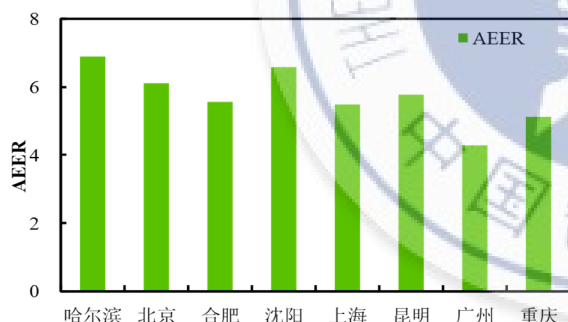


图 32 变频转子压缩机+液泵复合空调 AEER

故而小型机房/基站空调运用变频转子压缩机+液泵复合空调具有很好的节能效益。

(3) 变频涡旋压缩机+液泵复合空调

对于采用变频涡旋压缩机和液泵复合的氟泵空调研究,设计一款 40 kW 风冷变频列间机房空调,采用 R410A 制冷剂、变频涡旋压缩机,排量 78 cm³,制冷剂泵流量为 0.5~3.0 m³/h 可调,功率为 0.4~0.55 kW,控制室内干球/湿球温度为 37 °C/21.5 °C,测试样机制冷性能与能效,并计算全年能效 AEER。

计算样机在全国典型城市全年能效 AEER 情况,通过图 33 可知,在哈尔滨地区 AEER 接近 11,在

北京地区 AEER>9,相较于常规中小型定速机房空调节能率超过 50%,相较于常规中小型变频空调节能率超过 40%,即使在广州地区 AEER 达到 5.18,若利用水冷或者蒸发冷却(凝)的技术手段实现全年能效 AEER 达到 7.0~9.0 的目标^[39]。

(4) 磁(气)悬浮压缩机+液泵复合空调

对于采用低压比磁(气)悬浮压缩机&液泵驱动热管复合空调研究,设计一台制冷量为 240 kW 的风冷磁悬浮主机以及一台制冷量为 120 kW 的风墙末端,压缩机采用丹佛斯天磁 TT300 系列,制冷剂采用 R134a,测试蒸发温度 18 °C 的机组性能;末端采用室内 37 °C/21.5 °C 回风温度的风墙末端,在实验室进行蒸发温度 18 °C 的性能试验^[39]。

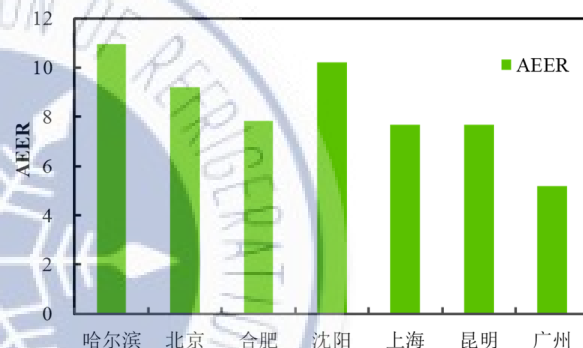


图 33 变频涡旋压缩机+液泵复合空调 AEER

计算样机在全国典型城市全年能效 AEER 情况,通过图 34 可知,在哈尔滨地区 AEER 接近 12,在北京地区 AEER>10,相较于常规大型定速冷水机组节能率超过 50%,相较于常规大型变频冷水机组节能率超过 30%,即使在广州地区,AEER 仍然可以达到 6.62,此时可通过利用水冷或者蒸发冷却(凝)的技术手段实现全年能效 AEER 达到 10.0~12.0 的目标^[39]。大型数据中心运用液泵驱动热管复合型不仅具备优异的节能效果,同时具备低成本优势,产品更具推广前景。

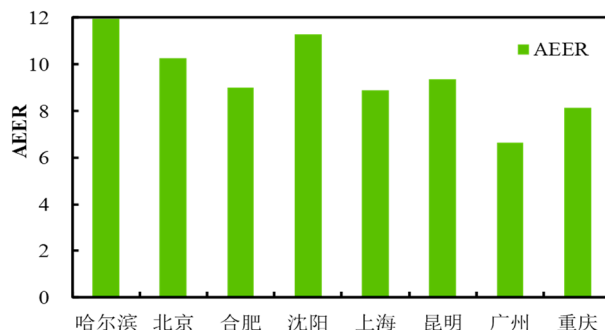


图 34 磁悬浮压缩机+液泵复合空调 AEER

5.2.3 气泵（小压比压缩机）驱动回路热管

(1) 气泵驱动回路热管原理

气泵驱动型分离式热管，简称气泵热管，其原理如图 35 所示，系统主要由气泵、冷凝器（室外侧）和蒸发器（室内侧）组成，系统运行时，气体制冷剂被气泵吸入，经过气泵绝热增压，变为过热气体，从气泵出口进入冷凝器与冷源发生热交换，被冷凝成过冷液体，从冷凝器出口进入到蒸发器与室内空气换热产生制冷，为防止气泵液击一般会在气泵吸气口前安装气液分离器，制冷剂气体经过气液分离器实现气液分离，气态制冷剂再次被气泵吸入，完成一个循环，从而将室内的热量源源不断转移到室外，达到为数据机房冷却散热的目的。

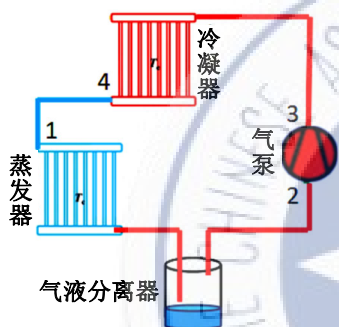


图 35 气泵驱动分离式热管原理

故而液/气泵驱动型分离式热管有以下优点^[37]:

1) 蒸发器、冷凝器位置更加灵活，不再局限于冷凝器高于蒸发器场合；2) 泵的强制驱动力可以克服工质在管内的流动阻力，因而适用于更远距离的热量输送，同时传热量不受流动传热极限的限制；3) 液泵驱动液态工质，气泵驱动气态工质，主要作用是克服冷凝器、蒸发器因高度差产生的静压差以及工质在管内的流动阻力，功耗很小，液泵 COP 很高，气泵 COP 较高；4) 液/气泵可采用变频控制，调节工质循环流量，实现传热量与热负荷相匹配；5) 气泵可与压缩机进行融合，实现压缩制冷与气泵驱动型分离式热管两种功能，满足室外宽温区高效运行。

所以，液/气泵驱动型分离式热管环境适应性更强，且具有可调控性，因而更加适用于数据中心空调系统中。

(2) 动力型分离式热管对比

如图 36 所示为两类动力型热管循环压焓图，液泵驱动型热管采用液泵强制驱动循环；气泵驱动型热管采用气泵驱动循环。

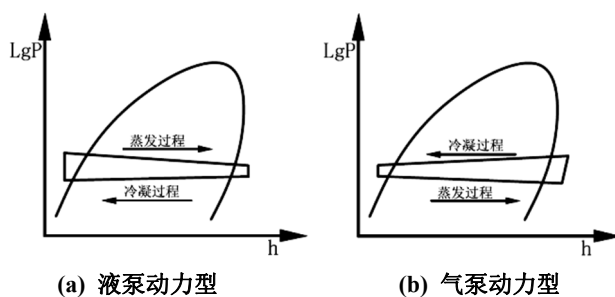


图 36 两种动力型分离式热管压焓图

动力型热管克服了重力型分离式热管在安装位置等方面的缺陷，改善了制冷剂在系统的分布状态，优化了系统换热，其中液泵增压作用在蒸发侧，提高了蒸发压力、减小了室内换热温差，降低了冷凝压力，减小了室外冷凝温差，弱化了理想热管循环，不适用于长配管、高落差等阻力较大的工况；而气泵增压作用在冷凝侧，增大了冷凝温差，强化系统冷凝效果，强化了理想热管循环，使得性能比液泵驱动型分离式热管性能更为优越。

对两类动力型热管驱动装置 COP 进行分析，液泵驱动型热管采用液泵强制驱动循环，输送液态工质，COP 较高，若忽略内、外风机功率，只计算动力输送装置（液泵）的性能，一般 COP 可达到 40~80，如运用到磁悬浮或气悬浮等大冷量离心机中，COP 可超过 500；气泵驱动型分离式热管中采用气泵强制驱动循环，气泵一般指为具备变频变容变压比的压缩机，具备提前排气功能，输送介质为气态工质，由于气态工质密度远小于液态工质，受压缩机气缸排量限制，并且压缩机本身泄漏率的存在，故而在同等制冷量前提下，COP 较低，不考虑内、外风机功率，只计算动力输送装置（气泵）的性能，COP 一般为 15~30，常规压缩机也可考虑采用双缸或多缸结构，增加排量，提高 COP^[23]，如转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机以及离心压缩机，其中磁悬浮或气悬浮离心压缩机由于具备无油运行能力，其作为气泵使用时性能效果更佳，COP 更高，甚至可以达到 50。故而可以得出数据中心空调系统动力装置能效 COP 中，重力型分离式热管最高、其次是液泵驱动型分离式热管，最后是气泵驱动型分离式热管，而气泵驱动型分离式热管的动力装置（气泵）就是制冷系统用压缩机在目前效率下能效最高的情况。

(3) 变频转子压缩机（气泵）复合空调系统

气泵驱动热管复合空调（如图 37），它包括蒸气压缩制冷循环和气泵驱动热管循环，由压缩机、油分离器、冷凝器、流量装置和蒸发器等构成，其中流量装置具有宽幅调节流量功能，并且两个循环共用压缩机、油分离器、冷凝器、储液器、蒸发器和气液分离器。系统可根据室外环境温度以及室内负荷需求分别切换运行制冷模式、过渡模式以及热管模式。即利用可变转速低压缩比压缩机的变转速特性，在室外温度较高时以中高转速运行制冷循环或过渡循环，而在室外温度较低时以低转速低压比运行气泵驱动热管循环，压缩机只提供气体流动所需要的动力，以充分利用自然冷源实现节能运行，并突破室内、外机组安装位置的限制瓶颈^[40]。

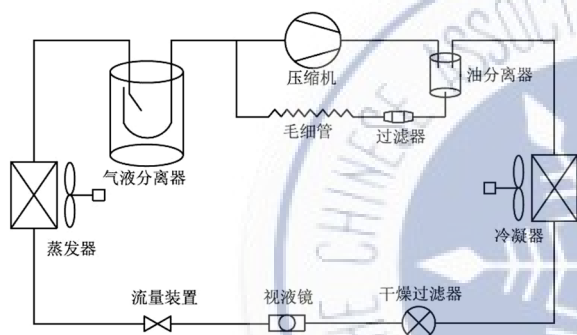


图 37 气泵驱动热管复合空调系统

气泵驱动热管空调系统执行分区运行控制模式，将环温带分解为制冷区、过渡区和热管区。制冷区循环模式：制冷系统工作，自蒸发器出来的气态制冷剂被压缩机吸入进行压缩、冷凝、节流进入末端蒸发器进行蒸发吸热，实现制冷，此时流量装置为节流装置，进行节流降压作用，将从冷凝器出来的高压液态制冷剂节流降压成低温低压状态的制冷剂；过渡区循环模式：根据室内负荷以及室外温度，调节压缩机运行转速、室外风机转速以及流量装置开度，最大化利用自然冷源，构造出具有节能效益的过渡系统，实现按需制冷，此时流量装置进行适当节流降压，将从冷凝器出来的中压液态制冷剂节流降压成低温低压状态的制冷剂；热管循环模式：流量装置完全打开，由蒸发器、压缩机、冷凝器以及流量装置构成一个最简单动力型分离式热管系统，控制风冷换热器的换热能力和压缩机转速使冷量与热负荷相匹配^[41]。目前变频转子压缩比低至 1.0，压缩机具备变频变容变压比特性，具备提前排气功能，当变频转子压缩机作为气泵使用时，

压缩机单体 COP 可以超过 20，说明变频转子压缩机作为气泵使用具有较高的节能效益^[39]。

分析风冷气泵驱动（转子压缩机）热管空调全年能效 AEER，与常规机房空调相比，如图 38 所示，以北京地区为例，常规定速风冷直膨式机房空调 AEER 为 4.0，而气泵驱动热管空调 AEER 为 5.8，全年能效比 AEER 提高 40%以上，纵然在广州地区，机组节能率也达到 19.4%。尤其的，该机组在部件配置上与常规机房空调基本相同，故而具有显著的成本优势，同时相较于液泵驱动热管空调系统，不含制冷剂泵、板式换热器和阀门等部件。空调系统部件少，整体故障率降低，即系统越简单，可靠性越高。如果采用水冷或蒸发冷，其能效会更进一步提升，因为风冷在标况下冷凝温度一般要 48℃左右，而水冷则只有 38℃左右，而采用间接蒸发冷凝会更低，使得系统更趋近热管循环，拓宽了气泵驱动型热管空调系统热管模式的运行温区，提高了整机能效^[42]。

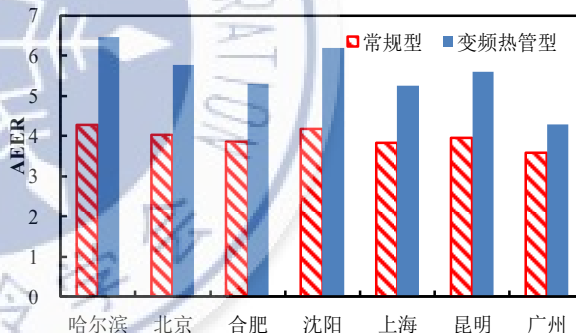


图 38 变频转子压缩机热管型系统 AEER

(4) 涡旋压缩机（气泵）热管复合空调系统

将现有变频涡旋压缩机进行技术升级，压缩机采用油泵供油，如图 39 所示为低压缩比变频涡旋压缩机 MAP 图，纵然在 15 r/s 转速下，压缩机也可以正常回油^[38]，压缩机可在压缩比 $\epsilon \geq 1.1$ 下安全运行，压缩机具备变频变容变压比特性，具备提前排气功能，压缩机单体 COP 可以超过 20，利用此类变频涡旋压缩机可以设计出变频涡旋驱动型热管复合空调系统。

如图 40 所示，以北京地区为例，常规风冷直膨式机房空调 AEER 为 4.4，而气泵驱动（涡旋压缩机）热管空调 AEER 为 6.7，全年能效比 AEER 提高 50%以上^[41]，纵然在广州地区，机组节能率也达到 31%。尤其该机组在部件配置上与常规机房空调

基本相同，未增加成本，故而具有显著的成本优势，相较于液泵驱动热管空调系统，不含制冷剂泵、板式换热器、阀门等部件，部件少，整体故障率降低，即系统越简单可靠性越高。系统如果采用水冷或蒸发冷，其能效会更进一步提升。

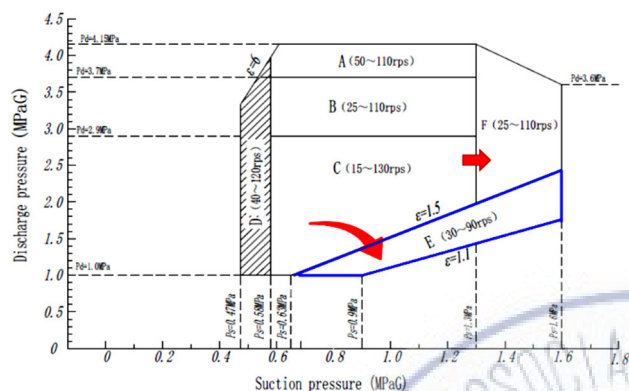


图 39 变频涡旋压缩机及 MAP 图

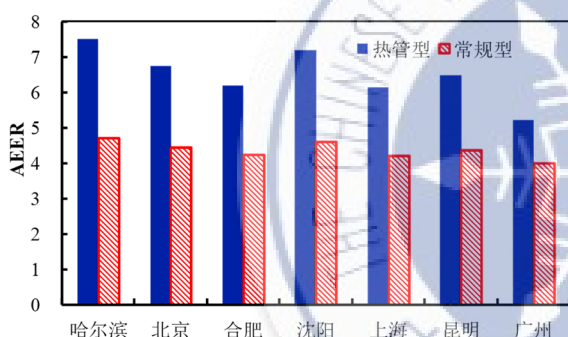


图 40 变频涡旋压缩机复合空调系统 AEEER

从整机能效 EER、成本以及可靠性来看，中小型机房空调可以优先运用气泵驱动热管技术，因为压缩机能耗在低温工况下限制机组能效比 EER 因素中占比较低，即使提高压缩机 COP 对整机 EER 提升不大，而分析成本可知，另外配备一台液泵的中小型机房空调成本将提升 15%~30%。从可靠性来看，部件的增加导致整机故障率提高，因为系统应当越简单越可靠，故而综合成本、能效、可靠性等多方面考虑，在此类中小型机房空调中，优先运用气泵驱动热管与制冷一体技术，并运用补偿温差换热原理，实现空调系统在全工况下节能运行，具有很好的效益^[38]。另外可以考虑加大在变频转子、涡旋压缩机领域关于低压比、高效能技术提升，甚至采用多缸弥补排量不足，提高整机能效以及技术优越性。

对于中小型机房空调系统在冬季以及春、秋过渡季节工况时，只要将冷凝温度适当抬高（合适的

冷凝温度）即可，不仅可以充分利用自然冷源，还能提高制冷系统效率，在满足制冷量前提下控制较低的冷凝压力，使得系统冷凝/蒸发压差较小，将气泵（气体增压泵，压缩比 $1.0 \leq \epsilon \leq 1.4$ ）与压缩机（ $1.4 \leq \epsilon \leq 8.0$ ）合二为一，在具备足够温差时采用气泵驱动热管循环替代常规制冷循环，降低系统能耗损失，提高系统的能效^[38]。故而对于机房精密空调系统在满足制冷量与显热比前提下，需要根据具体室外环境温度调控制冷系统循环流量与压缩比，从而实现制冷系统全工况效率和能效水平的提升。

同时采用该技术也对变频压缩机以及电子膨胀阀提出新的需求^[38]：1) 转子、涡旋压缩机压缩比需要实现 1.0~8.0 无限可调，并且具备良好的可靠性以及较高的效率，压缩机本体回油、制冷系统回油无碍；2) 现有转子、涡旋压缩机排量小，故而压缩机可具备两个或者多个气缸，在制冷工况时单缸或小缸运行，热管模式时低频双缸运行，低转速，低功率，大流量，提高 COP；3) 电子膨胀阀最好本身具备宽幅调节流量功能，既能节流降压，也具备液管管径相当流量。

(5) 磁悬浮压缩机（气泵）复合空调系统

如图 41 所示为一种可运行多种模式的气泵驱动型热管/磁悬浮压缩一体式冷水系统原理，气泵驱动型热管/磁悬浮压缩一体式系统采用磁悬浮或者气悬浮压缩机，具备小压比、变容量、无油运行，拓宽自然冷却工作温区与工作时间，降低数据中心 PUE^[23]。系统由压缩机、冷凝器（冷凝器可以是风冷、水冷或者蒸发冷却）、节流装置（如电子膨胀阀等，需要具备宽幅调节流量功能）、蒸发器以及旁通阀构成（若冷凝器与蒸发器具有足够的高度差，可实现重力热管循环），实现系统节能运行^[42]。以室外风冷冷凝器为例，系统根据室外环境温度以及室内负荷大小，分别切换不同的运行模式^[23, 42]：1) 制冷模式，此时旁通阀关闭，制冷系统工作，自蒸发器出来的气态制冷剂进入压缩机进行压缩、冷凝、节流成低温低压气液混合态制冷剂进入末端蒸发器进行蒸发吸热，将制冷量传递给水侧换热器中的载冷剂，实现制冷；2) 过渡模式，旁通阀关闭，此时室外具备一定自然冷源，由于压缩机具备了低压压缩比运行能力，此时通过压缩机增压作用，最大化构建出近似气泵驱动热管循环，实现按需制冷；3)

气泵驱动热管模式（或重力热管模式），当室内负荷较小时，并且系统具备实现重力热管循环能力时，此时旁通阀打开，系统运行重力热管循环模式，压缩机停止运行，由冷凝器、节流装置、蒸发器、旁通阀构成重力热管系统，控制冷凝器的换热能力使冷量与热负荷相匹配；当不具备重力循环条件或重力热管制冷量无法满足室内负荷时，运行气泵驱动热管模式时，控制冷凝器的换热能力使冷量与热负荷相匹配。为保障压缩机在低压缩比下（气泵热管模式）下电机冷却，需要在压缩机电机冷却回路上设置一个很小的制冷剂泵。同时由于磁悬浮压缩机价格仍然较高，系统也可以采用小压比变频螺杆压缩机、小压比变频离心压缩机以及小压比大排量涡旋压缩机替代，当然能效方面也存在一定程度衰减，但却实现成本大幅降低。

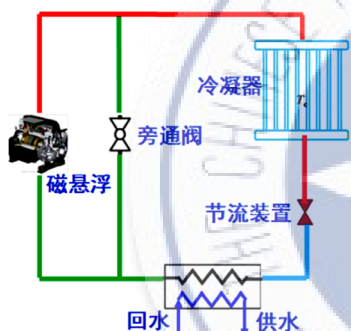


图 41 磁悬浮（气泵）+冷水系统原理

系统综合应用了“气泵驱动热管技术”和“压缩机调容调压技术”。同时压缩机“一机两用”，简化了管路设计同时节省了成本。不仅解决了重力热管循环高差不足，管路设计要求高的问题，而且避免了重力热管循环可能出现的不稳定性以及压缩机频繁启停问题。同时磁悬浮压缩机无油运行的特性，避免了复杂的回油设计同时提高了机组的可靠性。综上所述，此复合机组不仅能充分利用自然冷源，具有良好的节能效果，而且可靠性高、初投资少、占地面积小，在大型机房全年供冷领域具有良好的应用前景。

通过图 42 分析风冷三模式冷水系统可知，当冷冻水出水温度从 7℃升高到 14℃时，三种冷机的全年能耗都有所降低，其中磁悬浮复合冷机降低最为明显，普通磁悬浮冷机次之，普通螺杆机组降低最少。

因此，当出水温度从 7℃升高到 14℃时，相比

于普通螺杆机组，磁悬浮复合冷机的节能率从 22% 上升到 36%；相比于普通磁悬浮机组，磁悬浮复合冷机的节能率从 15% 上升到 18%。当出水温度越高，意味着机组有更多时间可以运行在重力热管循环模式下，蒸气压缩循环模式运行时间越短，因此节能率越高。

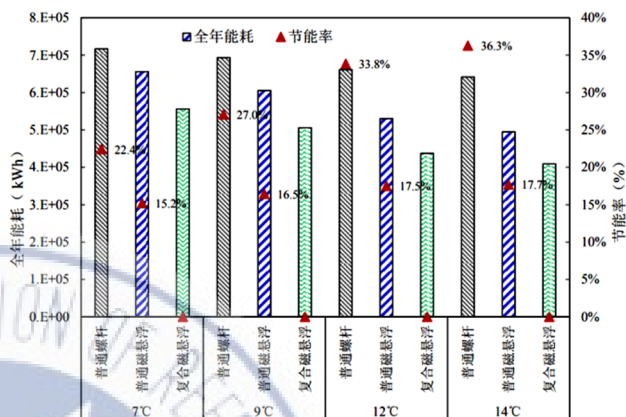


图 42 三模式冷水机组节能分析

5.2.4 磁（气）悬浮+氟泵多联机组

(1) 冷冻水末端

如图 43 所示为冷冻水末端的复合空调（通过水侧换热器与末端连接），该系统独特设计使其具有“无电动阀门切换”的特点，即系统模式之间转换顺畅、无控制死区，当压缩机关闭时，机组便自动进入液泵热管模式，而当液泵关闭时，自动进入压缩制冷模式，即使在气泵+液泵的复合模式下，也不需要电动阀门调节。

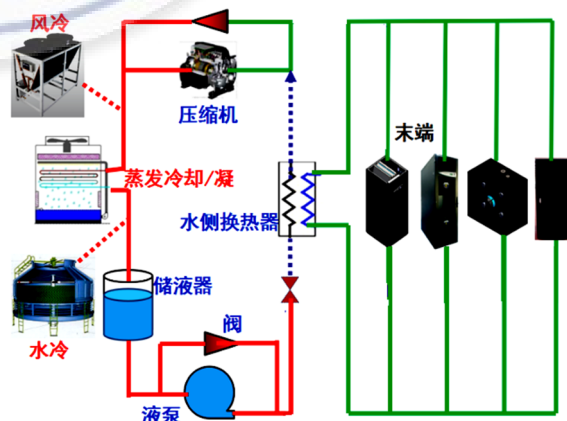


图 43 磁（气）悬浮多联冷冻水末端系统

由于系统采用低压比磁悬浮无油压缩机，系统在复合模式下压缩机压缩比低，相当于气泵，实现按需增压补偿冷凝温差，液泵则补偿系统安全运行时所需总压差的不足部分，实现系统顺畅运行、良

好电机冷却，以最低能耗方式运行，充分利用自然冷源，这是传统变频离心、转子、涡旋以及螺杆压缩机 ($\xi \geq 1.5$) 无法实现的功能。同时复合空调还具备可靠性、运行节能性和投资经济性的平衡，由于减少了电动阀门切换，系统在多种模式下均能够长期可靠运行，确保数据中心内部空间的冷却要求；在运行节能性上，复合空调的液泵驱动热管模式能够充分利用室外自然冷能，通过低能耗的热管循环/补偿温差控制的复合循环模式将室内热量排出，相比于机械制冷能耗大幅度减小；在投资经济性上，复合空调将液泵驱动热管技术、磁悬浮气泵驱动热管技术和蒸气压缩制冷技术有机地融合于同一台设备中，以同一个设备载体实现了三种模式，其成本相比传统空调并未明显提高，对于节能、节材、节约投资具有重要意义，并且整套系统可设计成模块化集成冷站结构形式，迎合当前数据中心快速安装、快速运维、整体交付、产品工程化特点。综合来看，机组全年运行产生了巨大的节能效果。

为适用于全国各地以及充分发挥各地区自然冷源优势，上述系统可具体根据使用地区采用优异的节能手段，如采用蒸发冷却技术；GB50174—2017《数据中心设计规范》^[5]中提出了温控目标为封闭的冷通道内温度或者机柜送风温度推荐值为18~27℃，提高水温如20℃甚至更高，配合蒸发冷却，机组全年几乎都运行在热管模式下，能效很高，PUE 低于 1.3；或在水源充足地区，尤其是低温水源丰富地区，采用水冷方式，使得机组全年几乎运行在热管模式下，大幅减少制冷循环模式时间，甚至在某些地区，可完全不需要运行压缩机^[23, 42]。而对于自然条件不具足的地区仍需要这类多模式运行的机组实现节能。其中系统末端可根据具体情况选择使用房间级模块化冷冻水末端、列间级冷冻水末端或者风墙等，可以具体灵活调整。

当系统采用磁悬浮压缩机时，压缩机作为气泵使用时 COP 可达 20~25，而采用液泵运行时，COP 可以超过 300，液泵高性能被完全发挥，远远高于气泵^[42]。对比中小型机房空调与大型数据中心用空调综合成本分析可知，对于 20~50 kW 的中小型机房空调而言，液泵成本占比大，甚至达到 15%~30%，推广运用难度较大；而对大型数据中心冷水机组而言，液泵成本占比很小，故而推广较容易^[38, 42]。

计算风冷系统全年能效比 AEER，在全国七个典型城市进行分析，如图 44 所示。

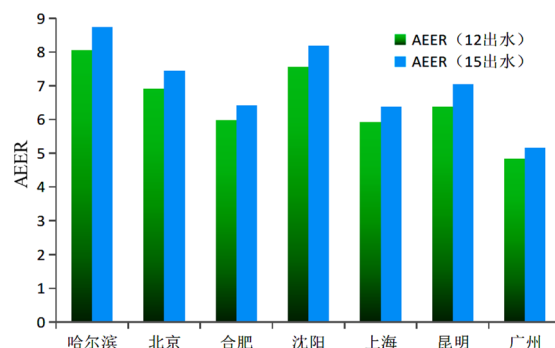


图 44 风冷+冷冻水末端系统 AEER

整机在北京地区采用 12℃/17℃ 进出水温时 AEER 达到 8.05，而采用 15℃/20℃ 进出水温时 AEER 达到 8.74^[42]。在全国七个典型城市综合分析来看，冷冻水型空调系统节能效果显著，非常适用于大型数据中心冷却散热。如果采用水冷或蒸发冷，能效会更进一步提升。图 45 所示为冷冻水出水温度/回水温度 20℃/25℃，采用蒸发冷凝的系统。由图 45 可知：系统在北京地区采用 20℃/25℃ 进出水温时 AEER 达到 10.39，平均 PUE 低至 1.18，最小 PUE 可低至 1.13，蒸发冷凝大幅强化了系统的节能效率^[42]。

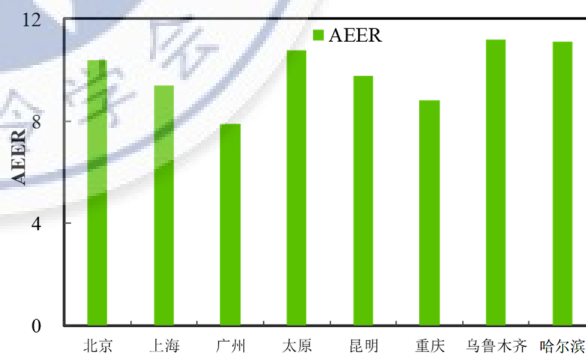


图 45 蒸发冷凝+冷冻水型末端 AEER

(2) 制冷剂末端

为防止水直接进入数据中心带来安全隐患，设计如图 46 所示。可运行多种模式的磁（气）悬浮多联系统-制冷剂末端系统，并通过引入制冷剂泵补偿压缩机压头不足，强化系统循环以及电机冷却，解决重力热管无法实现多个背板蒸发器在水平方向上分液均匀的问题，还化解了传统冷水机组中间换热的不足^[23, 38, 42]。其中制冷剂泵可以放置在高压侧与低压侧两种情况。

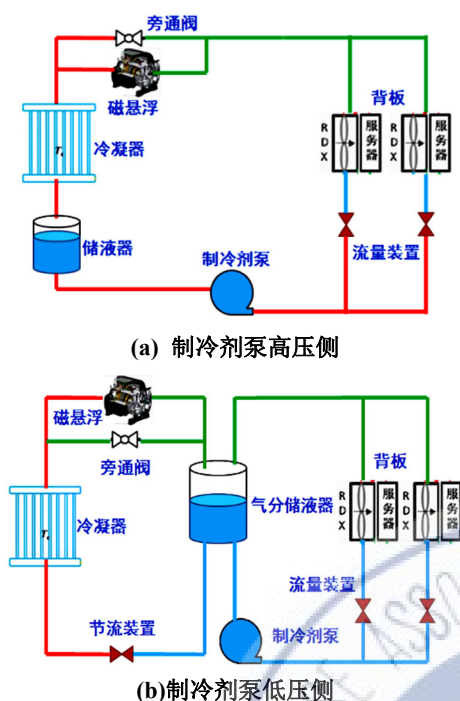


图 46 磁（气）悬浮多联系统-制冷剂末端

图 46(a)所示为制冷剂泵设置在高压侧系统原理图，系统由压缩机、冷凝器、储液器、制冷剂泵、节流装置、背板蒸发器以及旁通阀构成，系统可切换运行液泵驱动热管模式（或重力热管模式）、复合循环模式以及制冷循环模式，高压侧制冷剂泵克服管路阻力，适用性更强^[23, 42]。其中系统末端可根据具体情况选择使用房间级模块化制冷剂末端、列间级制冷剂末端或者风墙、热管背板等，可以具体灵活调整。以室外风冷冷凝器、制冷剂泵在高压侧为例，当系统运行制冷模式，此时旁通阀关闭，由压缩机、冷凝器、储液器、制冷剂泵、节流装置、背板蒸发器构成制冷循环为末端提供制冷量；当系统运行复合模式，旁通阀关闭，压缩机、液泵同时工作实现按需制冷；系统可根据室内负荷运行液泵驱动热管模式（或重力热管模式），当室内负荷较小时，并且系统具备实现重力热管循环能力时，旁通阀打开，系统运行重力热管循环模式；当重力驱动力不足或重力热管制冷量无法满足室内负荷时，运行液泵驱动热管模式时，控制冷凝器的换热能力使冷量与热负荷相匹配^[23, 42]。

如图 47 所示为采用制冷剂末端的复合空调，复合空调为室内完全无水运行，具有“无电动阀门切换”的特点，即系统模式之间转换顺畅、无控制死区，当压缩机关闭时，机组便自动进入液泵热管

模式，而当液泵关闭时，自动进入压缩制冷模式，即使在气泵+液泵复合模式下，也不需要电动阀门调节。

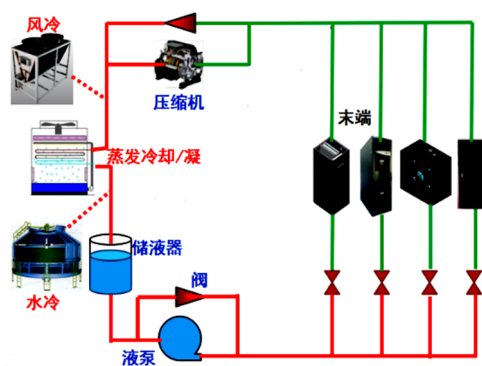


图 47 磁（气）悬浮多联系统（制冷剂末端）

当系统采用磁悬浮压缩机并作为气泵使用时，其 COP 最大也仅仅达到 20~25；而采用液泵运行时，其 COP 可以超过 300，远远高于气泵。从成本角度分析可知，对大型数据中心冷水机组而言，液泵成本占比很小，故而推广较容易^[42]。

计算整机全年能效比 AEER，在全国七个典型城市进行分析，结果如图 48 所示，风冷型整机在北京地区采用 15℃蒸发温度时 AEER 达到 8.47，相较于常规机房空调而言，节能率大幅提升，而采用 18℃蒸发温度时 AEER 达到 9.54^[42]。综合分析来看，液泵驱动型热管/磁悬浮压缩一体式制冷剂末端空调系统节能效果显著，非常适用于大型数据中心冷却散热^[42]。

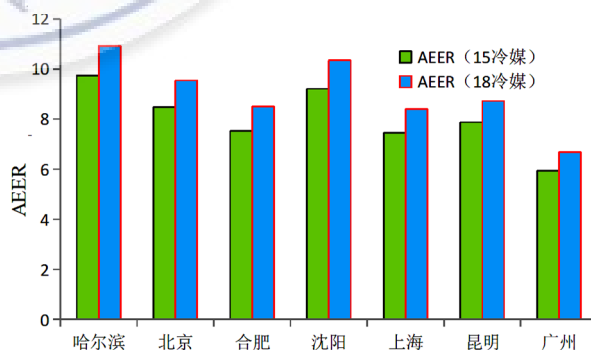


图 48 风冷+制冷剂型系统 AEER

如果采用水冷或蒸发冷，其能效会更进一步提升，而采用蒸发冷凝会更低。如图 49 所示为采用蒸发温度 22℃背板（风墙）末端、蒸发冷凝冷却的系统，系统在北京地区 AEER 达到 13.83，平均 PUE 低至 1.15，最小 PUE 可低至 1.1，蒸发冷凝大幅强化了系统的节能效率。

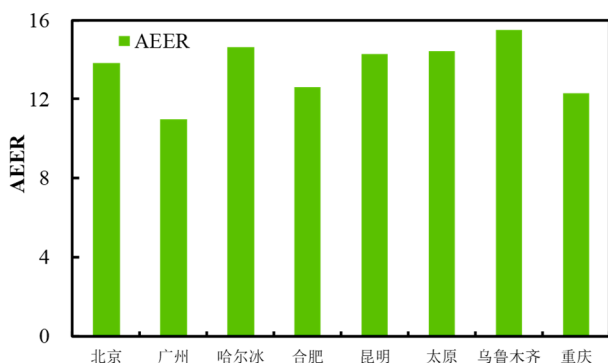


图 49 蒸发冷凝+制冷剂型 ($T_c=22\text{ }^\circ\text{C}$) 系统 AEEER

6 蒸发冷却技术助力自然冷却应用

干燥空气由于处在不饱和状态而具有制冷、制热或者发电的能力。其中，通过蒸发冷却技术使空气降温是目前可实现的干空气能利用效率最高的方式。在我国，早在 20 世纪 60 年代就有将蒸发冷却技术作为自然冷源替代人工冷源的研究。蒸发冷却技术作为自然冷源替代人工冷源的研究。蒸发冷却空调技术利用水蒸发吸热达到制冷目的，是一项健康、节能、经济和低碳的通风空调技术。蒸发冷却不使用压缩机，相比传统电制冷空调可节能 70% 左右。蒸发冷却技术可分为直接蒸发冷却与间接蒸发冷却两种形式。

6.1 直接蒸发冷却技术

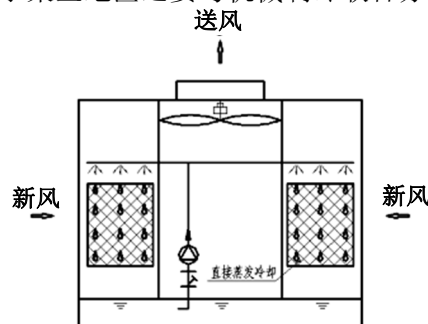
6.1.1 直接蒸发冷却技术制取冷空气

理想的直接蒸发冷却过程是绝热等焓的，在直接蒸发冷却过程中，喷淋循环水均匀地淋在填料表面，该处理过程路径沿等焓线变化，如图 50 所示。

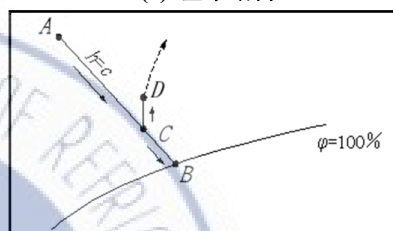
图 50 中 A 点代表进入直接蒸发冷却器的室外空气，B 点代表进口空气的湿球温度。大部分空气与水接触并沿着从 A 到 B 的等焓线被降温加湿。少部分空气从填料或水滴的空隙间漏出，仍然保持在状态点 A。在离开加湿段时，两部分空气混合得到状态为 C 的空气。C 状态空气在通过风机和风管时，产生摩擦并吸收从外界得到的显热，状态变化到 D 点。D 状态的空气送入数据中心，沿热湿比线吸收数据中心机房的设备散热量。大多数进水温度低，水再循环速度快，且遮光良好的直接蒸发冷却器可接近这个理想过程。

数据中心利用直接蒸发冷却技术降温可采用蒸发式冷气机或直接喷雾的形式。采用直接蒸发冷

却系统，需要对空气进行过滤处理，同时还需要处理直接蒸发带来湿度增加问题，如配置除湿装置。并且对于某些地区还要与机械制冷联合分区供冷。



(a) 基本结构



(b) 空气处理过程焓湿图

图 50 直接蒸发冷却原理

6.1.2 直接蒸发冷却技术制取冷水

直接蒸发冷却技术制取冷水与制取冷风的原理相同，但获得的冷量形式不同，它是根据水蒸发冷却原理，采用直接蒸发冷却手段制取冷水的技术，通过该技术制取的冷水极限温度可以达到空气的湿球温度。对于大型数据中心冷源设备相对较集中的要求，直接蒸发冷却制取冷水技术能够降低设备空间占用率且能耗较低。

直接蒸发冷却制取冷水，其热湿处理过程在焓湿图上的表示，如图 51 所示。当从用户回来的状态为 E 的循环水喷淋到填料与空气发生热质交换，水温被降到状态 G，空气实际情况下发生增焓降温过程，从状态 A 降温增焓到状态 C，喷淋循环水温度降低，最终获得的冷水温度高于进口空气状态点 A 的湿球温度。

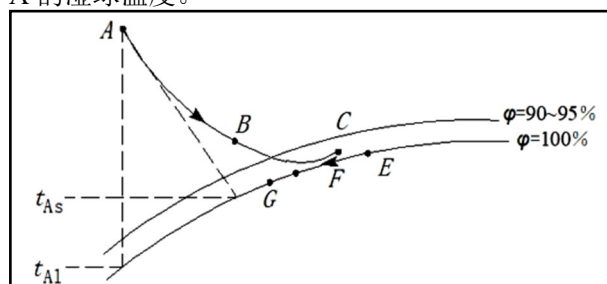


图 51 直接蒸发冷却制取冷水原理

直接供冷系统通过旁通管连接冷却水与冷冻水系统进行直接供冷。当室外空气的湿球温度低于设定值时，打开旁通管的阀门实现冷却塔供冷模式为室内提供冷量。直接供冷式系统有巨大的潜力，但其缺点是水质不易得到保证，在冷冻水系统内循环时极易堵塞和腐蚀空调末端装置。因此，在实际工程中，大多数此类直接供冷式系统都必须设有专门的水处理设备和专门的水过滤器。

间接供冷形式可分为两种系统。其中间接供冷系统中冷却水环路与冷冻水环路相独立的形式中，两个环路中的水在中间的换热器进行热交换。另外一种形式则是采用水-水板式换热器进行并联。

直接蒸发制取冷水技术的节能效果受诸多因素的综合影响，且冷却塔随着室外温度降低逼近度越来越大，制取出的冷水温度高于湿球温度的差值越大，同时冷却塔飘逸率高，水利用效率有所升高。

6.2 间接蒸发冷却技术

6.2.1 间接蒸发冷却制取冷空气

间接蒸发冷却技术原理如图 52 所示，被处理空气（数据中心回风）流经干通道与水膜不发生直接接触，而在与水膜换热温差的驱动下，其将自身显热通过壁面传递至湿通道，发生等湿冷却过程。工作空气（室外空气）与湿通道中的水膜发生热湿交换发生增焓加湿过程。间接蒸发冷却所制取空气温度的极限可以达到工作空气的湿球温度。

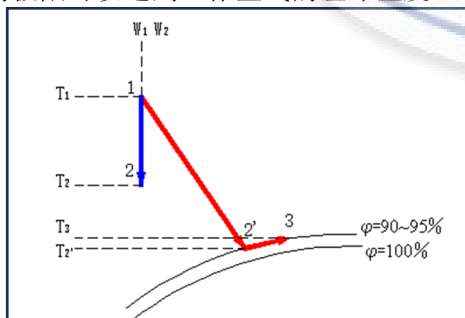
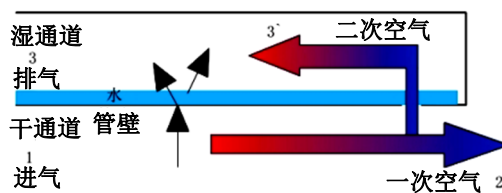


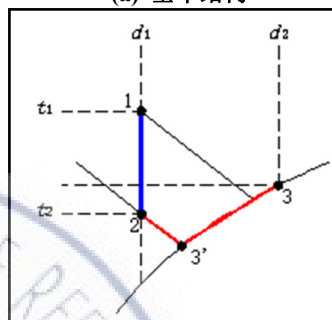
图 52 间接蒸发冷却原理及热湿处理过程

为了提高间接蒸发冷却的效率，“M-循环”的提出使间接蒸发冷却可实现露点间接蒸发冷却^[43]。在干通道的末端部分有一些小孔，进入干通道的空气在通道末端分成两部分，一部分沿着通道流动降温后送入需要供冷的空间；另一部分在干通道中被等湿冷却后进入湿通道成为二次空气，其干球温度和湿球温度均降低。二次空气进入湿通道后与被水

湿润的换热面接触，露点式间接蒸发冷却空气处理过程见图 53。



(a) 基本结构



(b) 空气处理过程焓湿图

图 53 露点间接蒸发冷却器

状态为 1 的空气进入设备，通过换热面向湿通道传热，温度降低且没有水蒸气传入，空气状态达到点 2。一部分空气送入房间，余下的则进入湿通道，在那里首先吸收了湿通道的水蒸气达到饱和，然后继续吸收由于干通道传递的显热。这部分显热使湿通道中更多的水蒸发形成蒸汽进入空气中。最终，3 状态点湿热的饱和空气排到室外。露点间接蒸发冷却一般通过露点效率来描述被处理空气温度的降低程度，其影响因素与间接蒸发冷却相似，而根据资料显示，露点蒸发冷却换热器的湿球效率可达到 94%~122%。

露点间接蒸发冷却通过利用干通道对工作空气进行预冷处理，使得被处理空气湿球温度进一步降低进而逼近露点温度。根据干通道和湿通道之间气流配置的不同，其又可以分为叉流式露点间接蒸发冷却和逆流式露点间接蒸发冷却。图 54 所示为叉流式露点与逆流式露点间接蒸发冷却原理。

叉流式露点间接蒸发冷却，如图 54(a)所示，干通道分为了上下两部分，下部分干通道沿程存在小孔与湿通道进行连通，并在干通道末端进行封堵，而上部分干通道不存在沿程小孔，也不进行末端封堵。被处理空气流经上部分干通道与水膜不发生直接接触，而在与水膜换热温差的驱动下，通过壁面进行换热，发生等湿冷却过程。工作空气首先进入

下部分干通道，同样在与水膜换热温差的驱动下，将自身显热量通过换热壁面传递给相邻湿通道侧的水膜，然后通过小孔进入湿通道与水膜直接接触，促使水膜表面水分子蒸发进入工作空气流而被不断带走，下部分干通道相邻湿通道侧的水膜表面水分子蒸发过程从水膜内部所吸收的汽化潜热来自于干通道内工作空气的传热，从而达到了对工作空气在进入湿通道前的预冷效果，上部分干通道相邻湿通道侧的水膜表面水分子蒸发过程从水膜内部所吸收的汽化潜热来自于干通道内被处理的传热，工作空气发生增焓加湿过程。

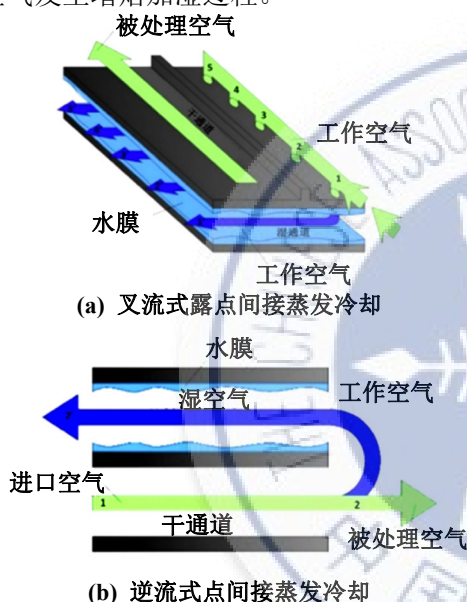


图 54 叉流式露点与逆流式露点间接蒸发冷却原理

逆流式露点间接蒸发冷却，如图 54(b)所示，在干通道末端存在小孔与湿通道进行联通，被处理空气和工作空气一同流经干通道与水膜不发生直接接触，而在与水膜换热温差的驱动下通过壁面与水膜进行换热，从而使自身干球温度降低，被处理空气和工作空气所发生的热湿处理过程均为等湿冷却过程；预冷后的工作空气在干通道的末端通过小孔进入湿通道与水膜发生直接接触，促使水膜表面水分子蒸发进入工作空气流而被不断带走，水膜表面水分子蒸发过程从水膜内部吸收汽化潜热，此时工作空气发生增焓加湿过程。在露点间接蒸发冷却中，被处理空气和工作空气通常为同一股气流。

6.2.2 不同形式的间接蒸发冷却空气处理机组

内冷式间接蒸发冷却空气处理机组主要由空气-空气换热器、送/排风机、换热芯体喷淋布水系

统以及 DX 系统组成，换热芯体喷淋布水系统主要由储水箱、循环水泵、输水管路以及喷嘴等组成。如图 55 所示。其中，机组换热芯体所采用的材料可以为铝箔等金属材料或者高分子材料，当高分子材料芯体厚度达到 0.13 mm 时其换热效率与金属材料相当；根据机组中换热芯体结构的不同，内冷式间接蒸发冷却换热器有板翅式、卧管式、立管式以及板管式等不同形式^[44]，如图 56 所示。

在内冷式间接蒸发冷却空气处理机组中，通过换热芯体喷淋布水系统作用，使湿通道内换热表面形成均匀的水膜。机房热回风流经换热芯体的干通道，被等湿冷却降温后，由送风机送入数据中心机房。外界环境空气进入湿通道与水膜发生热湿交换，吸收相邻干通道内机房热回风所携带的热量，最后被排风机排入大气环境中^[45]。

外冷式间接蒸发冷却空气处理机组主要由空气-空气换热器、直接蒸发冷却填料、送/排风机、填料喷淋布水系统或喷雾系统以及 DX 系统组成，如图 57 所示。根据外界环境空气与水直接接触方式的不同，外冷式间接蒸发冷却换热器存在湿膜型和喷雾型两种形式，如图 58 所示。在外冷式间接蒸发冷却空气处理机组中，机房热回风流经换热芯体的干通道，被等湿冷却降温后，由送风机送入数据中心机房。外界环境空气首先经过直接蒸发冷却填料换热单元或者喷雾系统换热单元，与水膜或小水滴直接接触发生蒸发冷却的过程，使其自身温度降低，同时携带一部分小水滴进入空气-空气换热器的湿通道内，吸收相邻干通道内机房热回风所携带的热量，其中携带的部分小水滴会在换热芯体湿通道内进行二次蒸发增强换热效果，最后被排风机排入大气环境中。值得注意的是，在外冷式间接蒸发冷却空气处理机组中，换热芯体湿通道表面不在喷淋系统作用下形成均匀的水膜。

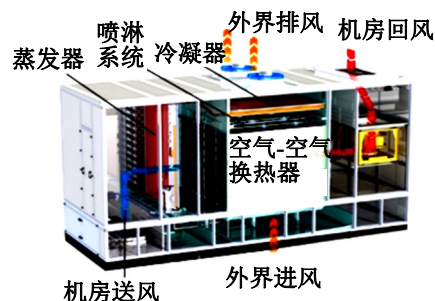


图 55 内冷式间接蒸发冷却空气处理机组结构

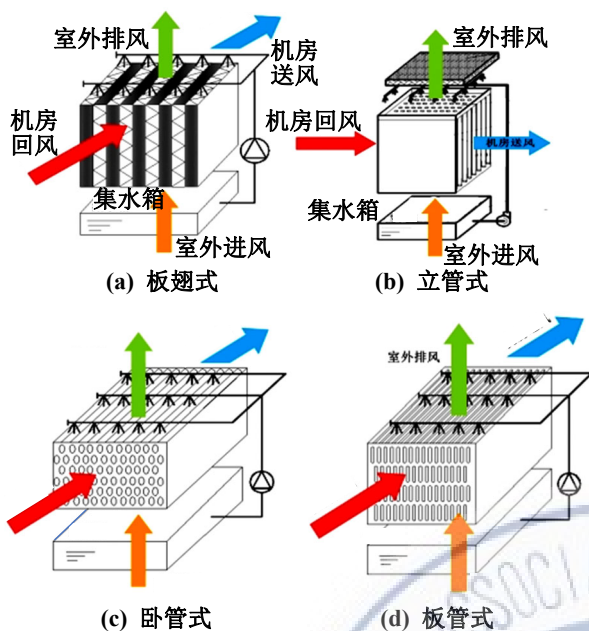


图 56 内冷式间接蒸发冷却空气处理机组不同换热芯体形式

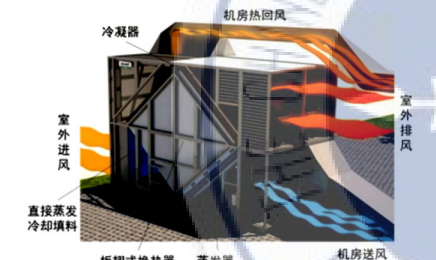


图 57 外冷式间接蒸发冷却空气处理机组

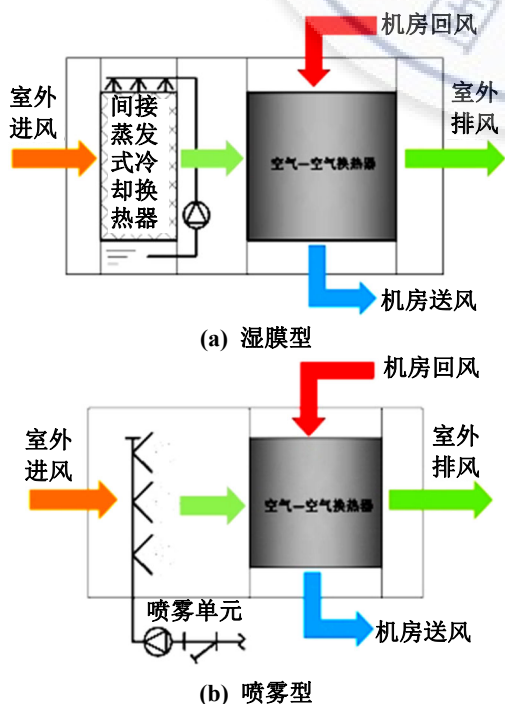


图 58 外冷式间接蒸发冷却空气处理机组不同形式

混合式间接蒸发冷却空气处理机组主要由两个空气-空气换热器、送/排风机、换热芯体喷淋布水系统以及 DX 系统组成，如图 59 所示。

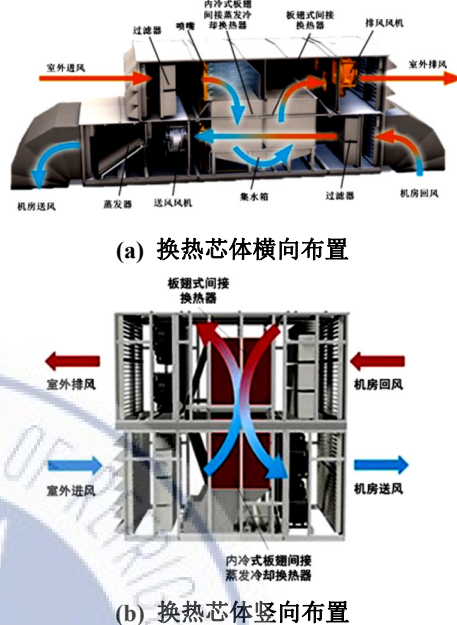


图 59 混合式间接蒸发冷却空气处理机组结构

在混合式间接蒸发冷却空气处理机组中，机房热回风首先经过外冷式间接蒸发冷却换热芯体干通道等湿冷却初步降温后，再经过内冷式间接蒸发冷却换热芯体干通道进行二次降温送入机房。外界环境空气首先经过内冷式间接蒸发冷却换热芯体的湿通道，与换热表面的水膜直接接触发生蒸发冷却的过程，吸收相邻干通道内机房热回风所携带的热量。再通过外冷式间接蒸发冷却换热芯体湿通道，吸收相邻干通道内机房热回风所携带的热量，最后被排风机排入大气环境中。

6.2.3 间接蒸发冷却制取冷水

间接蒸发冷却制取冷水，工作空气与被处理水发生直接接触，促使被处理水表面的水分子蒸发进入工作空气流中而被不断带走，被处理水表面水分子蒸发过程中所吸收的汽化潜热，大部分或全部来源于被处理水内部所携带的热量，从而实现对被处理水进行冷却降温的效果，此时工作空气通常为外界环境空气。

为了能够在冷水式蒸发冷却过程中使被处理水达到更低的出水温度，一般需要对工作空气在与被处理水直接接触前进行预冷处理降低其湿球温度，如图 60 所示。

外界环境空气首先经过间接预冷段的处理，使湿球温度和干球温度同时降低，此时外界环境空气所发生的热湿处理过程为等湿冷却过程；预冷后的环境空气进入淋水填料内进行热湿交换，此时预冷空气所发生的热湿处理过程为增焓加湿过程。一般而言，预冷式间接蒸发冷却出水温度低于环境空气湿球温度 2~3 °C^[44]。因此，一般可通过露点效率来描述外界环境空气能够使被处理水温度降低的程度，间接蒸发冷却冷水机组的露点效率与机组回水温度、水流量，环境空气条件、空气流量以及换热芯体结构特征等因素有关，数值一般在 30%~50%。

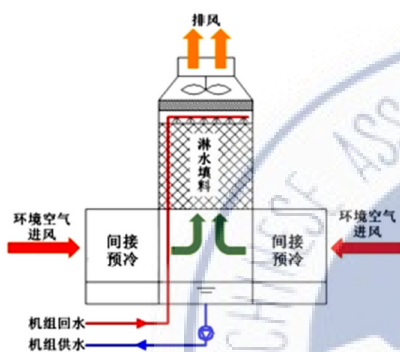


图 60 空气预冷型间接蒸发冷却冷水机组

环境空气与机组回水的热湿处理过程如图 61 所示。机组回水经淋水填料换热器处理后，从状态点 H 被冷却至状态点 G。外界环境空气经过机组预冷段空气间接蒸发冷却器后从状态点 O 等湿预冷至状态点 C。预冷后的空气进入填料发生直接蒸发冷却过程，从状态点 C 增焓加湿至状态点 D，最后从机组顶部被排入大气环境中^[45]。

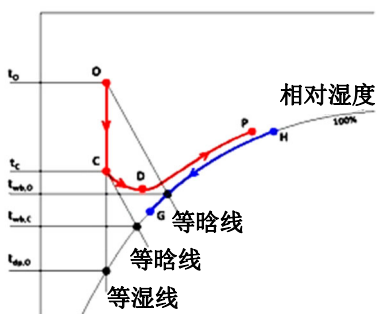


图 61 环境空气与机组回水的热湿处理过程

6.2.4 不同形式的间接蒸发冷却冷水机组

目前，间接蒸发冷却冷水机组存在多种结构形式：表冷间接蒸发冷却冷水机组、卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组、表冷器+卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组以及露点间接蒸发冷却冷水机组等。

表冷间接蒸发冷却冷水机组，如图 62 所示，分为带自循环式表冷和不带自循环式表冷两种。

带自循环式表冷，机组回水经淋水填料换热器处理后被分为两部分，一部分被输送至用户室内空调末端，另一部分则被输送至机组预冷段表冷器中，吸收热量后的室内空调末端回水和机组预冷段表冷器回水经过混合后返回到机组淋水填料顶端进行喷淋。不带自循环式表冷，机组回水首先经过表冷器，以此来预冷外界进风，之后回到机组淋水填料顶端进行喷淋，所获得机组供水全部被输送至机房内空调末端。表冷间接蒸发冷却冷水机组，外界环境空气经过表冷器进行等湿冷却降温，预冷后的空气进入填料发生直接蒸发冷却过程，最后从机组顶部被排入大气环境中^[44]。

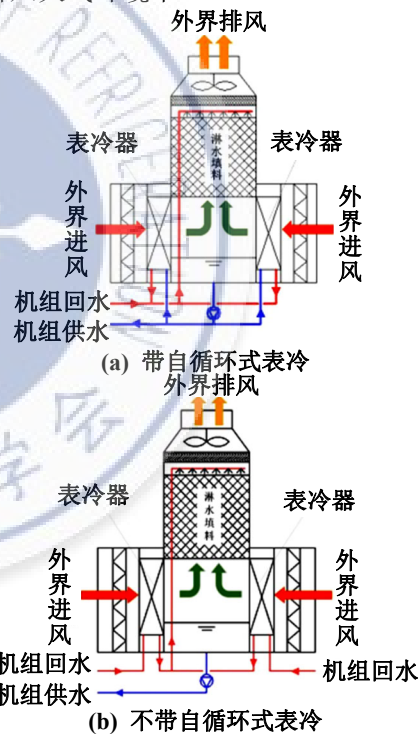


图 62 表冷间接蒸发冷却冷水机组

卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组，如图 63 所示。回水经淋水填料换热器处理后，全部被输送至机房内空调末端吸收机房热量，如此循环往复。外界进风一部分进入卧（立）管间接蒸发冷却器干通道发生等湿冷却过程进行预冷，之后进入填料进行换热后排至室外。另一部分进入湿通道发生等焓冷却过程后排至室外。

表冷器+卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组，如图 64 所示，回水经淋水填料换热器处理后，所获得

的机组供水全部被输送至机房内空调末端。吸收热量后的机房内空调末端回水需要先经过机组预冷段表冷器进一步吸收热量后再返回到机组淋水填料顶端进行喷淋。外界环境空气首先经过机组预冷段表冷器进行初步的等湿冷却。被表冷器处理后的外界进风一部分经过卧（立）管间接蒸发冷却器干通道等湿冷却，再进入填料进行换热，最后排至室外。另一部分则经过湿通道与水膜直接接触发生蒸发吸热的过程，再直接排至室外。

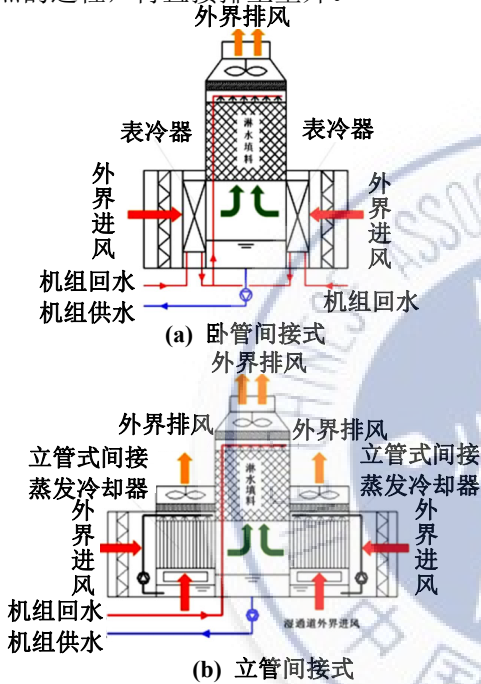


图 63 卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组

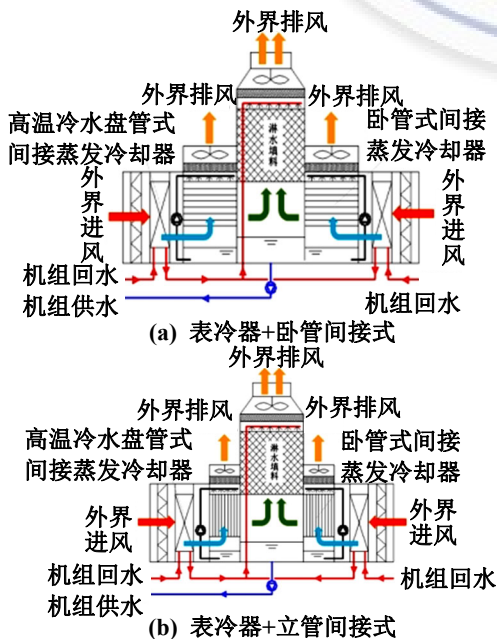


图 64 表冷器+卧（立）管间接蒸发冷却冷水机组

露点间接蒸发冷却冷水机组，如图 65 所示，回水经淋水填料换热器处理后，所获得的冷水直接通入机房空调末端进行换热，随后回到机组内部进行喷淋，如此循环往复。外界进风一部分经过露点间接蒸发冷却器上部无沿程小孔的干通道不断地被等湿冷却；另一部分则进入露点间接蒸发冷却器下部有沿程小孔的干通道，该部分环境空气沿程温度不断降低并通过沿程小孔通道全部进入露点间接蒸发冷却器的湿通道中与水膜直接接触进行蒸发冷却换热过程，再排至室外。预冷后的空气进入填料进行换热，再排至室外。

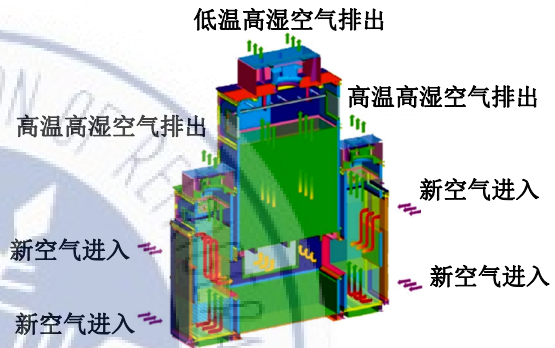


图 65 露点间接蒸发冷却冷水机组

间接蒸发冷却冷水机组以制取冷水为主要目的，对于数据中心全年多数时间都可以为机房空调末端提供高温冷水。但是，蒸发冷却冷水机组的应用会受到气候环境的限制，与直接蒸发冷却制取水（冷却塔）一样，随着室外温度降低制取的冷水与湿球温度（逼近度）差距越大；随着室外相对湿度越高，间接蒸发冷却与直接蒸发冷却效果差距越小。故而非干燥地区需要辅助机械制冷，才能实现数据中心全年高效冷却。

6.3 蒸发冷凝技术（制取制冷剂）

在对冷凝器进行设计和改造时，采用蒸发冷凝技术可以提高换热效率。蒸发冷凝技术以空气和水作为冷却介质，兼顾了风冷和水冷的优点，能有效解决传统水冷空调冷却塔在北方冬季结冰的问题，而且降低了风冷冷凝空调在夏季效率低下甚至宕机的风险。

根据布水方式以及填料位置，可分为直接喷淋、湿膜预冷、喷淋/喷雾预冷三种形式。

6.3.1 直接喷淋

原理如图 66 所示，水箱中的喷淋水在水泵的

作用下自上而下地喷淋，形成一层均匀的水膜附着至换热盘管表面。室外空气在风机的作用下强迫掠过换热盘管。空气与水膜接触，发生蒸发冷却过程，降低水膜温度。随后，水膜通过换热盘管表面与管内制冷剂传热，管内制冷剂蒸气冷凝成制冷剂液体，冷凝热通过水膜与管外侧空气传递至外界。

此种方式换热效率最高，结构紧凑。但为了尽量避免换热器结垢腐蚀和保证换热效果，采用此种蒸发冷凝方式的换热器一般采用光管式换热器；并且当室外气温较低，关闭喷淋采用风冷冷凝时，无翅片的情况下由于换热面积较小因此换热效率会受到影响。

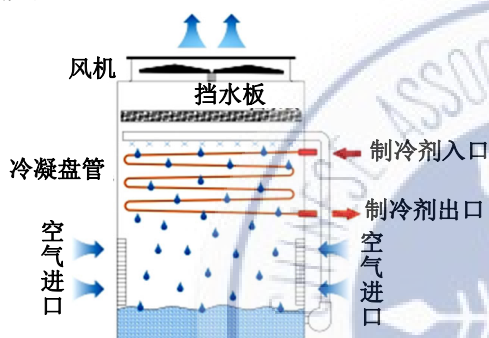


图 66 直接喷淋原理

6.3.2 湿膜预冷

原理如图 67 所示，在换热器进风前方设置有湿膜填料，将水喷淋至填料表面，空气和填料表面的水膜发生蒸发冷却过程，空气经过降温之后再送入换热器中吸收制冷剂热量之后排出室外。此种方式由于水不直接喷淋在换热盘管表面，因此对水质的要求降低，并且换热盘管可以采用翅片管式换热器，当采用风冷形式时不影响换热效果。由于填料段的存在，风机阻力更大，对风机能耗有一定影响，且对于换热器而言，本质仍为采用空气冷却，因此换热效率比采用直接喷淋方式的换热效率更低。

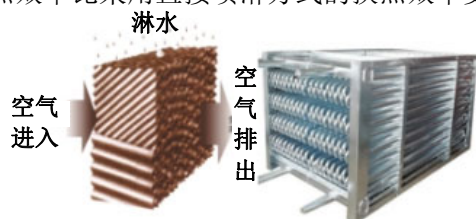


图 67 湿膜预冷原理

6.3.3 喷淋/喷雾预冷

如图 68 所示，在换热器进风之前设置有喷淋/喷雾段，不设置填料。空气直接与水滴进行热质交

换，发生蒸发冷却过程，经过降温后再与换热盘管进行换热，吸收制冷剂热量之后排出室外。这种方式的换热效率在三种方式中最低，但是此种方式由于不设置填料，因此对风机阻力影响较小，而且操作简便，因此此种方式也常在室外机组节能改造和解决高外温启动问题中得到广泛应用。通过水量、风量、喷淋段至填料段距离等各方面因素的综合考虑，可以达到空气在喷淋段换热之后以及抵达换热盘管之前完成蒸发冷却，空气中不携带水滴，因此能够降低换热盘管结垢腐蚀的影响；但要想达到这种效果，一般需要采用高压微雾的形式冷却空气。



图 68 喷淋/喷雾预冷原理

由于高压微雾的喷嘴孔径很小，水中有杂质或出现结构后，容易堵塞喷嘴，因此水质要求和水路压力的要求更为严格。另一方面，高压微雾喷出的速度较大，且和空气流动方向一致，扩散角度不够，因此，水雾极易通过室外侧换热器造成水的不必要浪费。图 69 中给出了一种离心式雾化装置及改造后的室外机组，该装置可以喷出的水雾，水雾是垂直于空气流动方向向四周扩散，水雾扩散角度大，可以与空气进行充分接触，有效提升水雾和空气的传热效率，并降低水雾的飘逸，因此具有良好的节能节水效果，并且可以有效防止喷嘴的堵塞，提升产品和整个系统的长期运行可靠性。

综上所述，在对冷凝器进行设计和改造时，应综合考虑改造目标、位置布局、成本造价等多方面因素，选取最合适的方式提高冷凝器的换热效率。



图 69 离心雾化装置与改造后的机组室外机

7 智能控制技术节能改造

7.1 AI 控制优化原理

7.1.1 总体设计思路

目前大部分数据中心的冷源侧与精密空调末端仍采用传统的控制模式，造成冷源与末端无法交互协同控制、系统动态调节性差、自然冷却利用不充分等一系列问题，使得数据中心平均 PUE 始终处于较高的位置。而传统系统的优化节能改造方案往往伴随着实施周期长、风险大等弊端，基于 AI 算法的数据机房节能优化控制平台的研发旨在利用高新技术，提升数据中心制冷系统能效，达成节能减排和降低 PUE 的目标，促进绿色可持续发展，相较传统方案更加科学高效，同时不相冲突，二者结合节能效果更佳。

设备综合联动自控系统旨在利用大数据技术和 AI 智能算法，分析机房全局能耗数据，通过 AI 建模预测设备发热量和温度场趋势，动态生成空调设备控制参数，并通过软件实时下发，以达到最佳节能效果。

大数据技术和 AI 智能算法的主要目标包括：

- 1) 根据机房历史温度数据建立温度场模型，查找机房冷热点，结合机房发热量预测模型，生成最优的空调控制参数；
- 2) 实现前端数据采集、数据存储、数据分析以及设备控制全流程。智能设备开箱即用，支持主流连接控制协议，兼容指定环境的空调型号，不需要改变机房内部结构；
- 3) 实现对空调、温感数据的采集，和空调控制指令的自动下发，减少人工干预；
- 4) 基于冷站数据进行建模，并且动态输出优化策略，通过现场群控系统执行指令控制冷站参数。智能节能系统运行期间，可根据实时能效反馈数据，持续优化算法和模型，提升节能效果；
- 5) 实现对末端空调的风机、温度设定等参数的实时控制，在保障安全生产的同时，达到节能效果。

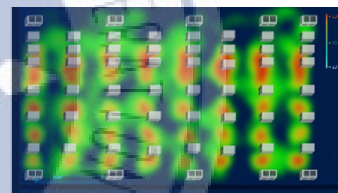
7.1.2 主要应用场景

为各类数据机房管理者提供一站式、标准化、高智能的室内环评监测、温控管理、节能降耗一体化解决方案，为客户提供智能降耗调度策略及可视化数据监测能力，在优化 IDC 数据中心能源效率 (PUE) 的同时，最大程度提升制冷设备能效比 (EER) 。

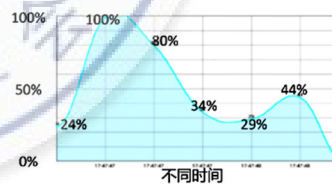
适用于有恒温恒湿要求场所的空调系统优化和节能场景，可全天候对设备进行节能调控，且适用于风冷/水冷式精密空调、风冷/水冷冷冻水系统以及末端风柜、背板空调等设备，地理位置、气候条件、部署规模不限。

7.1.3 节能原理

采用大数据、AI、物联网和自动控制技术，针对制冷设备全局调优，调节冷量供需平衡，消除过多冗余，结合气象信息，合理利用自然冷源，实现制冷能耗精细化运营，并与传统节能方案相辅相成。基于历史数据预测机房区域温度趋势，确定制冷需求，如图 70 所示。根据热平衡方程计算所需冷量大小及时刻，动态匹配发热预测曲线，如图 71 所示。通过制冷设备能效建模，将仿真推理制冷设备输出所需冷量的参数组合，得到能耗全局最优，见图 72。动态调节制冷设备运行参数，通过动环和 BA 对制冷系统进行全局控制，如图 73 所示。



(a) 预测的机房区域温度场冷热点



(b) 预测的制冷需求

图 70 机房发热及制冷需求预测

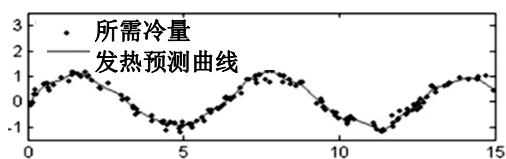


图 71 所需冷量与发热预测的匹配

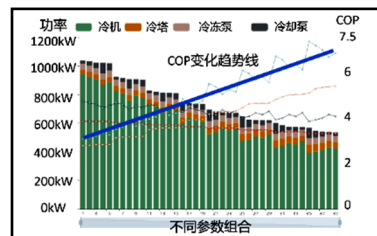


图 72 不同参数组合下的全局能耗情况



图 73 动力环境监控系统及楼宇自动化控制系统

7.1.4 核心功能

设备节能：基于大数据和机器学习技术，利用 AI 智能算法建立数据中心能耗与 IT 负载、气候条件、设备运行数量等参数的模型，对数据中心制冷设备运行状况进行分析，推理并生成最优控制策略，实时调节参数以降低能耗^[46]。

基于机房发热预测的自动控制：基于历史数据预测机房区域温度趋势，仿真推理制冷设备输出所需冷量的参数组合，如图 74 所示。制冷设备能效建模，寻找全局最优能效工况，动态调节制冷设备运行参数，防止机房高温。

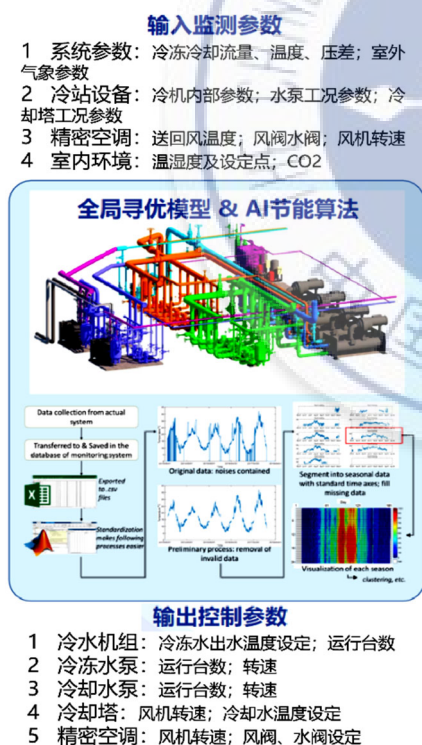


图 74 最优控制策略流程

数据采集：系统支持通过 Modbus/MQTT/B 接口/S7/BACnet/SNMP 等协议获取数据中心机房的静态和性能数据，结合机房和设备物理分布情况，构建静态点位数据和动态信号量测点数据的关联数据集。

数据处理：基于云计算和云边协同服务体系，

采用流式数据处理引擎，结合业务规则，将各类源数据结构及数据格式一致化，最终转化为平台标准数据，为后续数据监测、趋势分析、算法策略等业务应用提供基础能力支撑。

数据可视化：将数据中心能耗、PUE、节能率、调控策略、监控告警等信息具象化、直观化展示在可视化大屏中，实现端到端的 IT 可视性，为用户提供信息共享、决策支持、态势显示的功能。

7.2 设备综合联动控制系统

7.2.1 系统架构设计

本系统架构设计如图 75 所示，主要功能包括数据采集、数据存储、算法训练、算法模型输出、算法模型应用输出节能策略、节能成效分析和安全检测等。支持对接动环平台采集机房末端空调及温度数据、对接能耗平台采集 IT 和制冷能耗数据、对接群控系统采集冷站设备数据，将采集数据存储至时序数据库从而形成完整的数据管理体系。采集数据可支撑 AI 节能算法的模型训练和发布，训练后的 AI 节能模型可支持线上部署并动态输出相关节能策略。支持对冷站、机楼、机房侧节能成效进行分析和展示。同时为保证机房服务器的运行安全，可对机房环境及冷站侧设备参数变化情况进行动态监测，从而保证可及时发现异常并采取相应安全保障措施。

7.2.2 系统与制冷系统部署架构

如图 76 所示，在现网动环、群控等系统上层，构建数据采集、分析建模、策略输出的 AI 节能系统兼容动环 B/C 接口、Modbus、S7 和 BACnet 等多种协议，开放 Restful API。

7.3 改造效果

改造后 AI 系统可支持对制冷设备动态调参、自动控制，可实现无人值守运行；相关改造实施不需要改造制冷设备和机房结构，不影响设备维保；施工安全、周期短见效快；系统可抑制如压缩机等部件频繁启停来降低设备运行损耗，有效延长设备使用寿命；以大屏可视化、3D 建模等多种方式，充分展示节能相关数据、能耗随时间变化趋势、制冷设备运行状态和关键指标、调控策略和告警输出等以及支持自定义展现元素。

改造后可达到以下效果：

- 1) 算法驱动降低空调能耗：算法针对机房环境、能耗和空调运行数据进行建模，通过分析制冷负载、环境和气象变化、设备性能曲线，输出针对末端和冷站的最佳调控策略，以此降低制冷耗电；
- 2) 远程自控减轻维护压力：可针对空调设备设置一键策略，当出现高温或设备故障等异常情况时，通过一键远程批量调节空调的运行参数来快速干预，还可自定义多种定时执行的空调运行工况；

- 3) 温感监控减少动环告警：根据温感历史数据、通过时序模型预测机房各区域温度变化趋势，当发现机房局部高温并可能触发动环告警时，及时调节对应空调运行参数自动处理，减少告警事件；
- 4) 空调联动延缓宕机温升：感知机房温度对制冷系统进行群控，当出现空调故障或机组停机时，可自动调节其他空调补偿、或通过调节末端风机/水阀来减缓机房升温速度，从而抢修争取时间。

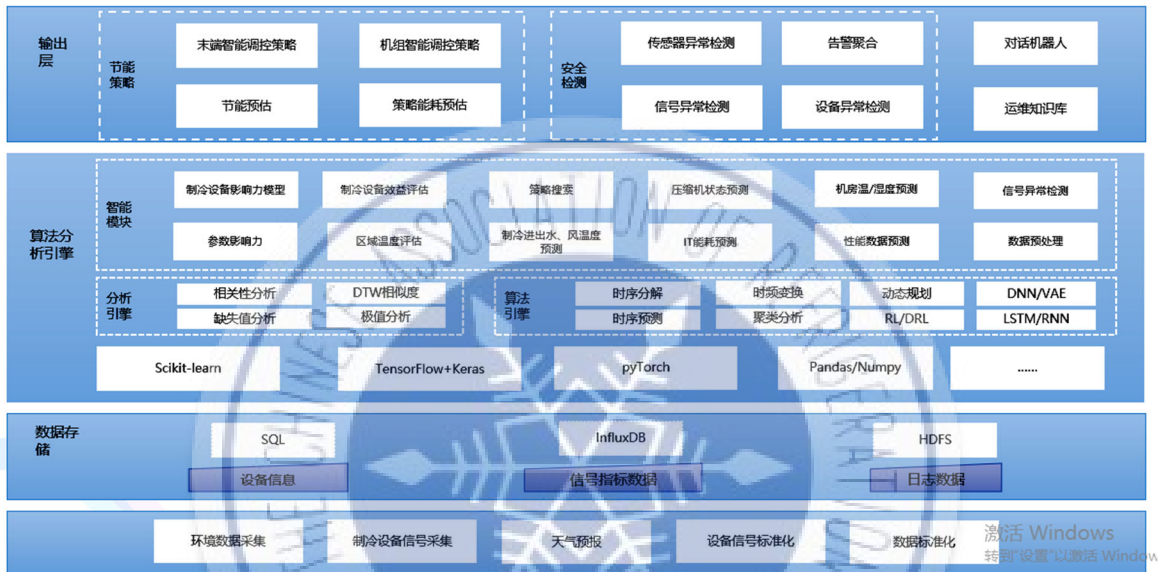


图 75 设备综合联动控制系统架构设计

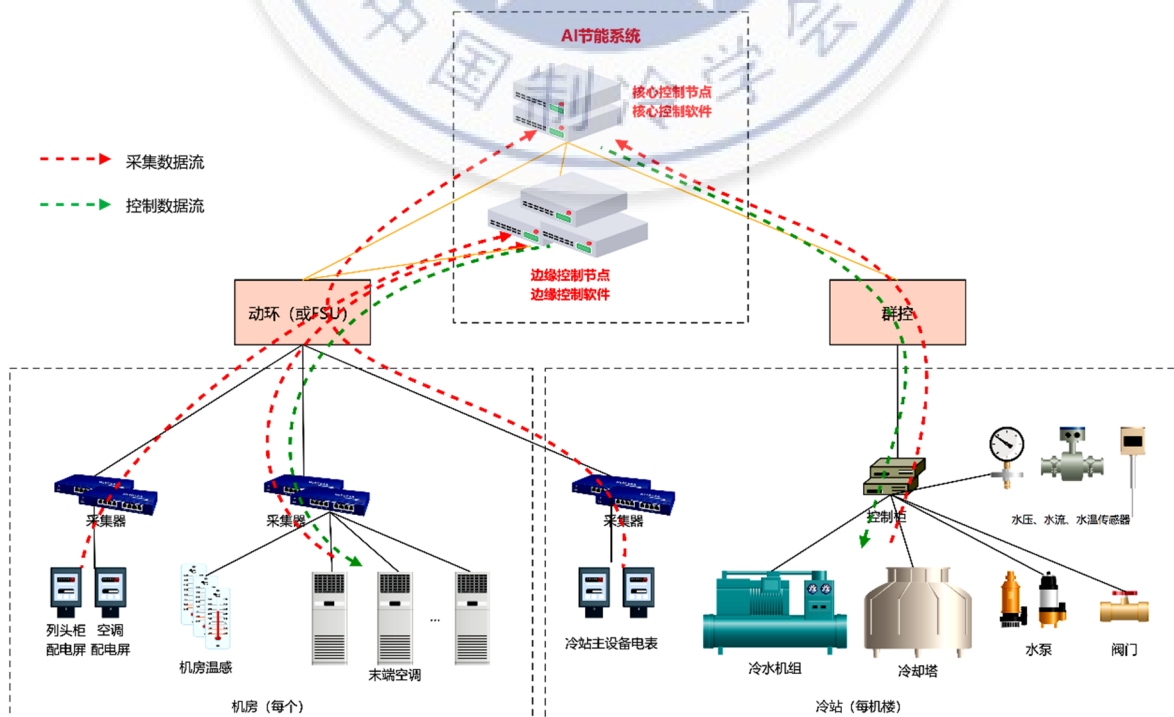


图 76 系统与制冷系统部署架构

8 结论

数据中心是数字经济发展的基石,支撑了人工智能、大数据等新兴行业的快速发展,其能耗快速增长,存量机房的节能改造非常紧迫,主要包括以下几个方面:

1) 数据中心冷却系统包括室内末端、输配系统、冷源系统等主要环节,都是节能降耗的重要环节。由于系统设计选型时的性能水平以及长期运行造成的性能衰减都是存量数据中心冷却系统能效不高的主要原因;而多级传热、系统过度除湿、变压比调节性能不良以及自然冷能利用不充分也是当前冷却系统节能改造的主要方向;

2) 数据中心节能改造要基于高性能压缩机、换热器等核心部件的性能提升和功能改进;在系统架构上尽量减少传热级数以降低传热温差损失和介质输配能耗;在室内末端环节应采用近端取热末端设备以提升取热效率和末端风机能耗;在输配环节采用高比冷量传输介质外还要配合高性能风机/泵的输配部件;在冷源环节的大型冷水机组和直膨系统中应重点提升小压比性能并强化自然冷源利用,通过蒸发冷却进一步提升自然冷源的利用率;

3) 数据中心冷却系统的节能改造还需要引入智能运维技术,针对IT设备的运行情况和室外环境的变化情况,优化冷却系统运行控制,切实保证运行能耗的降低。

参考文献:

[1] MASANET E, SHEHABI A, LEI N, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates[J]. *Science*, 2020, 367: 984-986.

[2] ZHANG H N, SHAO S Q, TIAN C Q, et al. A review on thermosiphon and its integrated system with vapor compression for free cooling of data centers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 789-798.

[3] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[4] 王博, 郭焱华, 邵双全, 等. 数据中心冷却系统相关能效评价指标综述[J]. *制冷学报*, 2023, 44(2): 18-27.

[5] 国家住房和城乡建设部. 数据中心设计规范:GB 50174-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

[6] ZHANG Q, MENG Z, HONG X, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption

modeling and control strategy optimization[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2021, 119: 102253.

[7] 王飞, 王博, 邵双全. 不同室内末端对磁悬浮压缩机与液泵驱动冷却系统性能的影响[J]. *制冷与空调(北京)*, 2024, 24(2): 1-8.

[8] 黄翔, 邵双全, 何锁盈, 等. 绿色数据中心高效适用性制冷技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.

[9] 王飞, 王建民, 邵双全. 数据中心冷却系统多级传热温差分析[J]. *化工学报*, 2021, 72(增刊 1): 348-355.

[10] 刘宇, 陈文鑫, 高书辰, 等. 数据中心环境管理和能源管理研究[J]. *信息技术与标准化*, 2015(11): 29-33.

[11] 钱晓栋, 李震. 数据中心空调系统节能研究[J]. *暖通空调*, 2012, 42(3): 91-96.

[12] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 生态环境部, 市场监管总局, 国家能源局. 关于严格能效约束推动重点领域节能减碳的若干意见[EB/OL]. (2021-10-18) [2024-03-06]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211021_1300583.html?code=&state=123.

[13] 张双, 马国远, 周峰, 等. 数据机房自然冷却用泵驱动回路热管换热机组性能实验研究[J]. *土木工程*, 2013, 35(4): 145-150.

[14] 刘章. 基于高热流密度数据中心水冷的仿真模拟与实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019.

[15] 倪加成. 重庆地区数据中心风侧经济器节能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[16] 吴一凡. 数据中心自然冷却技术的现状探讨[J]. *节能*, 2018, 37(7): 103-105.

[17] 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能分析[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 113-118.

[18] 张海南, 邵双全, 田长青. 数据中心自然冷却技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2016, 37(4): 46-57.

[19] 王飞. 自然冷却技术在机房空调中的应用现状[J]. *制冷与空调(北京)*, 2018, 18(10): 1-7.

[20] 卢大为, 王飞, 王建民, 等. 数据中心用热管空调系统研究进展[J]. *流体机械*, 2022, 50(1): 75-84.

[21] 刘明亮, 王娟, 郭丰. 蒸发冷却技术在数据中心应用[J]. *现代信息科技*, 2020, 4(12): 51-53.

[22] 许梦玫, 翟晓强, 李国柱, 等. 数据中心冷却技术的研究进展[J]. *建筑科学*, 2018, 34(8): 124-132.

[23] 王飞. 自然冷却技术应用于数据中心的方案分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2020, 20(2): 25-30.

[24] 陈广闯, 张军. 数据中心自然冷却技术研究综述[J]. *建筑热能通风空调*, 2020, 39(7): 46-51.

[25] 张智, 金培耕, 刘志刚, 等. 不同管径组合的冷凝器换热数值研究[J]. *热科学与技术*, 2002, 1(2): 104-108.

(下转第 94 页)

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2024.z1.104

数据中心冷却系统运维技术研究进展

黄贇^{*1}, 陈强¹, 葛鸽¹, 黄璜², 沈佳², 王松利³, 陈腾飞³, 杨泽业³

(1-中国移动上海公司, 上海 200333; 2-上海建科建筑节能技术股份有限公司, 上海 200032;

3-南京佳力图机房环境技术股份有限公司, 江苏南京 211111)

[摘要] 本文对中国数据中心冷却技术的发展进行了综合分析和研究。回顾了当前中国数据中心的冷却技术应用情况, 并分析了其中存在的问题和挑战。针对这些问题, 提出了一系列的解决方案和发展趋势。介绍了新兴的冷却技术, 如液冷技术、间接空气冷却技术和自然风冷技术, 这些技术在提高冷却效率、节能减排和空间利用方面具有巨大潜力, 为中国数据中心冷却技术的创新和优化提供了有益的参考和指导。

[关键词] 数据中心; 冷却技术; 能源消耗

中图分类号: TB61⁺¹; TQ051.5

文献标识码: A

Research Progress on Operation and Maintenance Technology of Data Center Cooling System

HUANG Yun^{*1}, CHEN Qiang¹, GE Ge¹, HUANG Huang², SHEN Jia²,

WANG Songli³, CHEN Tengfei³, YANG Zeyue³

(1-China Mobile Communications Group Shanghai Co., Ltd., Shanghai 200333, China;

2-Shanghai Jianke Building Energy Saving Technology Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

3-Nanjing Jialitu Computer Room Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing 211111, Jiangsu, China)

[Abstract] A comprehensive analysis and research on the development of data center cooling technology in China in 2023 is provided in this paper. The current application of cooling technology in data centers in China is reviewed, and the existing problems and challenges are analyzed. In response to these problems, this paper proposes a series of solutions and development trends. The emerging cooling technologies, such as liquid cooling, indirect air cooling and natural air cooling is introduced, which have great potential in improving cooling efficiency, energy saving, emission reduction and space utilization, and provide useful reference and guidance for the innovation and optimization of cooling technology in China's data centers.

[Keywords] Data center; Cooling technology; Energy consumption

0 引言

数据中心内的信息与通信技术(Information and Communications Technology, ICT)设施设备一旦上线运行, 往往需要常年不停, 持续发热; 支持其环境控制的数据中心冷却系统一旦发生中断或供冷不足就有可能导致 ICT 设施设备宕机。因此数据中心冷却系统需要满足各类电子信息设备的散热要

求, 需要保证供冷系统的长期运行的可靠性。

与此同时, 数据中心能耗巨大, 能源成本对整个项目的运行维护影响重大, 需要采取必要的方式、方法, 尽可能降低能耗。特别是近年来, 随着国家“双碳”目标的提出, 国家层面对节能降碳的要求越来越严苛, 数据中心对节能运维重视程度也越来越高。

依照《数据中心冷却系统运维管理规范》^[1]、

*黄贇(1977—), 男, 高级工程师, 硕士。研究方向: 传统能源的高效利用, 新能源技术的开发与应用。联系地址: 上海市浦东新区迎春路 670 号, 邮编 200135。联系电话: 13402110195。E-mail: huangyun@sh.chinamobile.com。

《数据中心冷却系统运维与优化》^[2]、《TIA942—2005》^[3]等国内外文献标准，梳理数据中心制冷系统基础运维方法，包括制冷设备选择、运行参数调整、故障排查处理等内容；从运营商实际运维案例出发、结合冷却系统制造商项目经验，介绍了制冷系统的检修、保养和运行监测等方面的要求，重点分析数据中心冷却系统运维的重点环节及其与节能降碳目标结合后的运维要点。

1 数据中心冷却系统运维目的和特点

1.1 数据中心冷却系统运维目的

数据中心冷却系统设备是为各种数据计算、处理和存储设备提供稳定运行环境的关键设备。它们承担着确保数据中心内各项设备以及配套网络通信设备正常运行的重要任务。数据中心冷却系统维护管理的目标是保障系统的稳定性、可靠性、低碳性、高效性和节能性，以确保数据中心的正常运行。

数据中心冷却系统运行管理有多个主要任务：

1) 需要保证数据机房环境能够满足各种数据计算、处理和存储设备以及相关的网络通信设备的各项环境要求。数据中心内部的温度、湿度和空气流通等因素都需要达到特定的标准，以确保设备的稳定运行；

2) 数据中心冷却系统的电气性能、机械性能和维护技术指标必须符合国家或行业的相关标准。这意味着在维护管理过程中，需要严格检查和控制电气设备的运行状态，确保其安全可靠。同时，对于机械设备的维护保养也应当按照规范进行，避免因机械故障而影响数据中心的正常运行；

3) 能耗管理与控制是数据中心冷却系统运行管理中的关键环节。根据国家和行业的相关要求，需要采取低碳节能的工作措施，提高设备的运行能效，实现节能减排的目标。通过有效地管理和优化，不仅可以降低运营成本，还能对环境产生积极影响；

4) 及时排查安全生产隐患也是数据中心冷却系统运行管理的重要任务之一。通过定期的安全检查和隐患排查，可以预防意外事故的发生，确保数据中心内部的安全稳定；

数据中心冷却系统的维护管理是确保数据中心正常运行的基础工作。通过保障环境要求、符合标准、控制能耗、排查安全隐患、采用创新技术和

优化配置，可以实现数据中心的高效稳定运行，并为数据计算处理存储设备提供可靠的运行环境。

1.2 数据中心冷却系统运维特点

数据中心冷却系统运维相对于常规冷却系统具有一些独特的特点和要求。这些特点主要体现在冷却要求的不同、温度设定的不同以及对能源效率的追求上。数据中心冷却系统的冷却要求与常规冷却系统存在一定差异。运维人员需要根据数据中心的需求和最佳实践，制定相应的运维策略和措施，保证冷却系统的正常运行和优化能效。

数据中心冷却系统的运维强调对能源效率的追求。数据中心是大型能源消耗者，其运行成本和环境影响都与能源效率密切相关。为了降低运行成本和环境负荷，数据中心冷却系统的运维需要采用一系列措施来提高能源效率。这包括优化冷却设备的选择和配置、改进冷热通道布局、采用节能控制策略、使用高效的制冷剂等。定期的设备检查和维护，及时清洁和更换滤网以及排除漏风等问题，也是提高能源效率的重要步骤。

数据中心冷却系统运维具有与常规冷却系统不同的特点。在冷却要求、温度设定和能源效率等方面，数据中心冷却系统需要特别关注，以确保设备的稳定运行和数据中心的高效运营。

2 IT 设备运维对冷却系统运维的影响

服务器上架不合理的布局和配置可能导致一系列问题，包括部分服务器特别集中、部分服务器空置和服务器倒装等。为了改善这些问题，可以采取相关措施。

2.1 服务器部分特别集中的问题

在数据中心中，服务器的合理上架布局对于冷却系统的运行至关重要。然而，由于一些原因，可能会出现服务器特别集中的情况，这会给冷却系统带来一系列问题。下面将详细讨论这些问题，并提出改善措施。图 1 所示为服务器集中上架。

通过监控温度、湿度和空气流速等参数，及时发现和解决冷却问题，确保服务器在适宜的工作温度下运行。

2.2 部分服务器空置的问题

不合理的服务器上架布局会导致部分服务器

空置,这种情况不仅会浪费服务器资源,还会增加数据中心的维护和管理成本。为了解决这个问题,需要采取一系列改善措施,以确保服务器资源得到充分利用并降低维护成本。



图1 服务器集中上架

2.3 服务器倒装的问题

在服务器上架过程中,如果不小心中将服务器倒装(即背面朝向前面),会导致服务器散热不良,影响性能和可靠性。

3 数据中心水冷冷却系统运维的隐患

由于数据中心的迅速发展,节能减排的压力,对数据中心的电源使用效率要求,这使得在设计和考虑大型数据中心的空调时,一般优先选用水冷空调系统方式,水冷空调系统由大量的设备和大量的管网组合而成,建设和运维过程中稍有不慎,就会存有隐患,如果不能及时处理和改进,就会影响到空调系统的安全,常见问题归纳如下。

3.1 运维空间隐患问题

数据中心在设计时,要有足够的运维空间和通道,这是由数据中心空调系统的特点决定的,如数据中心冷站冷量大,机组体积大、高度高,数量多,又有板换等自然冷却设备,管网构成复杂,需要多层管网布置。因此数据中心冷站的高度和空间要求明显要高于民用标准,直接采用民用标准的冷冻机房高度,会导致建设和维护的不便。

案例:冷机房层高不够。某数据中心冷机房民用标准设计,冷机房选取高度偏低,水系统管网安装后,发现预留扩容位置的冷机无法搬运进入;只能把空调管线拆除,全部冷机一起采购,统一搬运安装,最后重新安装管线。但是这样给运维遗留了一个重要隐患,一旦冷机发生故障,由于没有足够的检修维护空间,冷机的检修和维护难以实现,给系统留下隐患。

原因:设计未考虑数据中心冷机冷量大、体积大、设备多和管路复杂等特点,土建专业和暖通专

业未进行充分沟通,没有根据具体情况具体分析,标准应用有误,导致冷机房层高过低,给后期运维工作带来困难。

对策:冷机房必须考虑冷机的运维空间和管道安装空间,确保同时满足管线安装和冷机维护检修的需要。

3.2 冷却塔冷却能力隐患问题

冷却塔设计时余量不够,运行中维护不到位,当数据中心负荷增加到一定时,发现冷却塔冷却能力不够,冷却水出水水温偏高,冷机运行耗能,夏季冷机发生喘振,无法达到设计负载率,这种情况在冷却水系统设计时采用单机对单泵对单塔方式时尤其明显。

案例:冷却塔冷却能力不够。某个数据中心采用单机对单泵对单塔设计,其中冷却塔仅满足数据中心大部分时间,高湿球温度时,发现冷却水冷幅不够,趋近度过大,由于冷却塔出水温度偏高,造成冷机效率低,冷机负荷达到70%就喘振频频,运行安全性严重下降。

原因:冷却塔选型时冷却能力选择偏小,冷却塔使用过程中,由于水质影响、风机风量和填料老化等因素影响,冷却能力会衰竭下降,加上部分冷却塔在制造过程中缺斤短两现象明显,如故意减少填料片数和尺寸,导致水量和冷幅无法满足设计要求,额定工况下冷却塔散热量不够,冷却塔出水水温偏高,冷机能耗增加明显,严重情况下发生冷机喘振,浪费冷机的投资并影响冷却系统安全。

对策:由于数据中心全年制冷,可用性要求高;在整个冷却系统中,冷塔的投资占比并不高,但是降低冷却水的水温可以带来明显的节能效果,延长自然冷却的时间,对水系统的安全有着很大的帮助。故建议数据中心业主和设计院在进行设计选型时,冷却塔设计需要预留一定的余量,正常运行时间甚至建议按照20年最极端气候选择冷却塔。

3.3 末端管路隐患问题

水系统未设置有效的旁通,或者局部管道堵塞,导致水系统部分管路循环不正常。

案例:某数据中心新机房启用,末端空调调试不成功,经查为末端管路没有进行有效连通,水路无法正常循环。

原因:新机房启用,末端空调调试时,由于末

端管路没有旁通管路，管路无法有效沟通，水路无法循环，导致水平支路缺水，末端设备调试失败，事后才发现由于管路中存在大量空气，导致该管路中冷冻水未能正常循环。

对策：对于支路管路，最远末端管路需要短接或者进行旁通，并在支路高位安装排气阀，确保管路中冷冻水循环，并及时排出气体确保管路充满水。现场对支路用旁通管连通，开启旁通阀和排气阀后，水路循环正常，末端设备运行正常。

3.4 后备水源问题

数据中心设计时，后备水源不充分，蓄水池备用时间不够，市政停水后导致恐慌。

案例：数据中心停水。某数据中心发生市政停水，导致水系统补水中断，只能利用蓄水池补水，由于蒸发量大，蓄水池在连续 8 h 补水后，即将用完，后果不堪设想；后来由政府出面协调应急用水才得以解决。

原因：数据中心需要多水源设计考虑，考虑停水影响，需要设计 12 h 的水源储备，考虑到市政停水可能会超过这个时间，影响整个中央空调系统的使用，数据中心中央空调水源储备要求更长的时间，南方水源丰富区域可以考虑深井水或附近水源取水等应急方案，北方可以考虑蓄冷罐作为第三路后备水源的方案。对策：水系统的补水以市政给水为主，蓄水池作为第一后备水源，深井水源、蓄冷罐作为第二路后备水源。在南方可考虑江河湖水源和深井水作为后备；缺水地区需要和消防、环卫签订应急供水合同，特殊情况安排他们配合送水。另外蓄冷罐的蓄水功能也可以充分发挥出来，停电时放冷，停水时放水，在蓄冷罐进出配置截止阀、排水阀和独立补水装置，当长期停水时可以关闭蓄冷罐进出截止阀，放出蓄冷罐的冷水进行应急，市政给水恢复后及时进行补充水后，再重新投入系统进行蓄冷。

3.5 泄漏问题

案例：管路泄漏。某数据中心使用几年后，发生管路泄漏的问题。

原因：管道设计安装过程中，为赶工期和降低造价，部分主管管材选用不合适，直接使用螺旋管，管网施工过程中存在焊接工艺问题，管材和法兰连接处采用单缝焊接，使用中防腐方案不完善，焊接

部位使用中逐渐被腐蚀，导致管路在使用过程中发生泄漏或爆管，严重危及机房安全。

对策：考虑数据中心生命周期长，尽可能采用无缝钢管并有良好防腐处理；只能采用螺旋钢管的管道，施工焊接必须符合要求，主管道需要完全探伤，并有完善的防腐手段，管道安装完成进行保压和气密实验，确保系统可靠。如果已经发生管路泄漏情况，视管路结构和漏水情况进行抢修，如果管路有冗余和备份，建议停水修补；如果管路无冗余，就需要采用带压补漏技术，同时确保系统足够的补水防止系统失压，补漏过程还要保证排水通畅，防止数据中心发生水淹事故。

3.6 其他细节问题

系统管网最低处要设计和安装一个比较大的排污阀，确保排污效果，排污阀太小会影响排污效果；排污口不在最低处，会造成排污不够彻底。经常操作的排污阀门或者排水阀门也需要采用双阀门设计，一个阀门用来减压，一个阀门关闭，这样可以确保阀门可靠工作。

考虑调试和维护的方便性，建议近端和远端都需要设计水路旁通，高位设排气阀，便于系统完工和检修时水路循环的建立和排除空气，水路循环建立后，这些阀门则必须尽快关闭。在水管系统的建设中，选择合适的法兰垫圈材料至关重要，这直接影响到整个系统的密封性和耐用性。例如，在某个水管工程中，最初使用橡胶垫圈时，出现了持续的微量渗漏问题。这表明橡胶垫圈可能无法完全满足该系统的密封要求。后来，改用了聚四氟乙烯(PTFE)垫圈，结果成功解决了漏水问题。这次更换表明，聚四氟乙烯垫圈在耐温性、化学稳定性和机械强度方面可能更适合该工程的需求，从而确保了水管系统的良好密封性和长期稳定运行。另外在室外部分的仪器仪表，如温度计和水压表，普通表盘的仪表很容易腐蚀，故需要选用不锈钢材质的，经久耐用。

4 水冷冷却系统节能运维工作要点

4.1 手动控制缺乏自控的问题

如果冷源系统的控制过程主要依赖人工手动操作，并缺乏自动化控制系统的支持，会导致控制策略不稳定、容易受人为因素影响，并增加运维人

员的工作负担^[1-2]。

引入自动化控制系统：通过安装自动化控制设备和传感器，实现对冷源系统的自动控制和监测，减少对人工干预的依赖，提高控制精度和稳定性。

设定合理的控制策略：根据数据中心的冷却需求和环境条件，制定科学合理的控制策略，包括温度、湿度和流量等参数的设定和调整，以满足冷却要求和节能目标。

定期检查和维护自动化控制系统：确保自动化控制系统的正常运行，及时修复故障和更新参数，以提高控制系统的可靠性和准确性。

4.2 自控系统参数错误和控制差的问题

自控系统参数错误和控制差可能导致冷源系统无法有效地响应数据中心的冷却需求，影响冷却效果和能耗。**定期校准参数：**对自控系统中的传感器、执行器和控制器进行定期校准，确保参数的准确性和一致性。**数据分析和反馈：**利用数据分析技术，监测和分析冷源系统的运行数据，及时发现参数异常和控制差异，进行反馈调整，以提高系统的稳定性和性能。

4.3 自控技术提升不足

冷源系统自控的功能和能力可能不足，无法满足数据中心复杂的冷却需求和动态变化的条件。

引入智能化控制技术：利用人工智能和机器学习等技术，实现冷源系统的智能化控制和优化，根据实时数据和预测模型进行自适应调整，提高系统的灵活性和适应性。

远程监控和管理：利用云平台和物联网技术，实现对冷源系统的远程监控和管理，随时随地监测系统的运行状态和性能，并进行远程操作和调整，提高运维效率和响应能力。

不断学习和改进：持续学习和改进冷源系统的自控功能，关注行业最新技术和趋势，与供应商合作，及时更新和升级控制设备和软件，以提升自控水平和系统性能。

5 数据中心冷却系统运维细化要求

5.1 冷水机组运维技术

5.1.1 离心式水冷机组的运行环境优化

冷水机组的基本运维要求^[1-5]包括设备的常规

检查、维护、故障排除和性能优化等多方面工作，目的是确保机组的高效和稳定运行。性能优化方面，需要持续监控机组运行效率，实施节能策略，并根据需要对系统进行升级。此外，要定期进行安全性检查，确保机组运行不会对操作人员或设施造成安全风险，确保所有操作和维护活动均符合当地的法律法规和行业标准。通过这些综合性的运维措施，可确保机组的高效、安全运行，并延长其使用寿命。

5.1.2 冷水机组日常检查

设备外观检查：1) 清理机组表面灰尘；2) 检查所有电器控制元件有无明显故障或损坏；3) 检查机组外部各接口及连接件有无漏液等情况；4) 检查机组屏幕时间参数，必要时定期调整。

设备运行电流检查：通过配电柜计量仪检查机组运行电流。

冷冻油检查：检查冷冻油的油温是否正常，检查压缩机润滑油油位是否正常，运行时油位应在上油视镜和下油视镜之间，缺油时联系供应商加注润滑油，压缩机冷冻油在机组首次开启的 500 h 后更换，冷冻油应定期更换，一般每 1~2 年更换一次。机组长时间停机时需定期需要运行油泵。

在冷水机组平时不需开启导致运行时间短，无法确定冷冻油油质是否满足使用要求时，需对冷冻油油质进行检测与分析，如油量、含湿量、酸性等级、所含磨损金属成分等。

水冷机组水管路过滤器检查与清理：检查冷水机组水管路过滤器（冷冻侧与冷却侧），定期检查过滤器两端压力表压差，若压力表压差变大，需清洗过滤器。

冷凝器检查与维护：空调系统采用开式冷却塔时，冷水机组冷凝器换热效率受冷却水水质影响较大，冷凝器铜管易结垢影响冷凝器的换热，需根据冷水机组运行参数或定期对冷凝器进行清洗，冷凝器一般每一至两年清洗一次，冷凝器的清洗维护工作应由冷水机组供应商进行。

制冷剂检查：检查制冷剂液位是否正常，检查制冷剂系统运行高、低压压力是否正常。

油过滤器与干燥过滤器检查与维护：定期检查与更换油过滤器和干燥过滤器，检查油泵、密封和油泵电机及油系统其他部件，如油冷却器、油过滤

器和电磁阀等。

设备传感器检查与校准：用经校验合格的测量仪器仪表检测蒸发器出水温度、压缩机排气温度等，根据检测数值与对应传感器探头检测的数值进行比较，偏差较大时进行更换；检查各接点是否牢固，探头插接处是否密封良好。

电机绝缘测试：设备长时间停机时，启用前应对压缩机电机进行绝缘测试。

风冷机组冷凝器检查与维护：检查风冷冷凝器散热风机叶片有无变形，冷凝器翅片脏堵时使用水枪清洗冷凝器翅片。当外界环境杨柳絮较多时，应采取防护措施防止杨柳絮堵塞翅片影响换热。

风冷机组风扇检查与维护：检查风扇运行是否存在异响，风机转动方向是否正常。使用螺丝刀拨动风扇，检查风扇转动是否存在卡顿。检查风扇扇叶是否存在损坏。

5.1.3 冷水机组运行管理

冷水机组的主要参数涉及多个方面，主要包括制冷量、功率，以及蒸发器和冷凝器的相关性能指标。制冷量是评估机组冷却能力的核心参数，而功率则直接关系到机组的能效和运行成本。蒸发器和冷凝器的进出水温度、水流量，以及最大水压降是重要的运行参数，这些指标反映了机组在热交换过程中的效率和稳定性。蒸发压力和蒸发温度、冷凝压力和冷凝温度则是冷却循环中关键的物理量，它们影响机组的制冷效果和能耗。导叶的开度反映了机组流体动力学的调节情况。油泵的油压和温度、油槽压力是保证机组润滑系统正常运行的关键指标。制冷剂的液位和冷冻油的液位则是确保制冷循环和润滑系统稳定运行的重要参数。最后，电流的监控有助于评估机组的电气负荷和运行状态。这些参数的综合监控有助于优化机组的运行效率，确保其稳定性和经济性。冷水机组常用的制冷剂有R134a、R22、R123、R410a等，其中R134a、R410a为环保制冷剂。以R123为制冷剂的冷水机组运行压力较低（低于大气压力），维护操作时空气易进入机组内，通常该类冷水机组配备排气装置，用以排出制冷剂中难以液化的空气。以R410a作为制冷剂的冷水机组运行压力最高。以R134a为制冷剂的冷水机组较多，制冷剂运行压力适中。

设备运行参数：在冷水机组的运行和维护中，

关键的运行参数包括冷凝压力、冷凝温度、冷凝器的进出水温差和压差、蒸发压力、蒸发温度、蒸发器的进出水温差和压差、电流等。这些参数的记录和分析对于评估和优化冷水机组的运行状况至关重要。

冷凝压力是反映冷水机组冷凝器散热情况的重要参数。适宜的冷凝压力能确保机组高效运行，而压力过高或过低都可能导致性能下降甚至设备故障。例如，风冷型冷水机组的冷凝压力过高可能需要清洗冷凝器，而水冷型机组则可能需要增加冷却水流量或降低冷却水温度。

冷凝温度与冷凝器进出水温差是判断冷凝器换热效率的重要指标。正常情况下，温差应在1~2℃之间。如果超出这个范围，可能意味着冷凝器的换热效率下降，需要通过增加冷却水流量或降低供水温度来改善，同时应考虑对冷凝器进行清洗。

冷凝器的进出水温差和压差能反映出冷却水流量的情况。如果这些差值较大，则可能意味着冷却水流量不足或冷凝器存在堵塞。

类似于冷凝器，蒸发温度与冷冻水出水温差是评估蒸发器换热效率的关键参数。蒸发器的效率直接影响到整个冷水机组的制冷性能。

蒸发器进出水温差是反映冷冻水流量大小的重要参数，同时也间接反映了冷冻水循环的利用效率。蒸发器进出水温差越大，冷冻水利用效率越高，机房专用空调和冷水机组换热效率越大，同时减少了冷冻泵做功，有利于空调系统的节能。

冷水机组的平均电流百分比（满载安培）是体现压缩机做功的大小的一个重要参数，也可间接反映末端负荷大小。平均电流越大，末端负荷越大，可依此管理冷水机组运行容量，从而进行设备的加减机操作。

油泵频率与油过滤压差是反映油泵运行情况的重要参数。在相似的油温下形成稳定油压记录油泵频率变化可判断油泵磨损情况或油过滤器是否堵塞。

不同的品牌或不同制冷剂的冷水机组，运行参数不尽相同详细参数咨询冷水机组厂家，作为判定运行参数是否正常的依据。

5.1.4 冷水机组能耗管理

冷水机组的能耗主要取决于压缩机电机所做

的功。冷冻水系统架构在满足设备要求的前提下,尽可能地提高冷冻水供水温度;(提高冷机 COP、降低过渡季节冷机能耗、延长自然冷却时间)。提高冷水机组的出水温度是一项有效的措施,可以提升整个冷却系统的节能效果。现代服务器比以前的密度更大。这意味着服务器的 ΔT (出口-进口)更大。在这种情况下,采用高回风温度是一件很自然的现象。IT 设备的布置(如冷通道或热通道布置)是一般数据中心遵循的最佳实践之一。此配置将 IT 设备的进气口置于冷通道上(送风侧),并将热空气排放至热通道(回风侧)。目前,很多实践中都允许冷通道温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,热通道的温度基本上都会更高。制冷装置的回风温度越高,能够使冷却盘管之间的热交换越好,冷却能力越大,整体效率越高,这几乎对所有的空调设备都有效。一些设备能够处理的最高回风温度可能有限(定频机组 $<28\text{ }^{\circ}\text{C}$),但一般来说,通过提高回风温度,能够提高所有冷却系统的容量。在这种情况下,机房空调机组的回风温度较高,这有助于在相同的压缩机电机功耗条件下提高机组的容量。因此,通过提高冷水机组的出水温度,实现系统整体温度的提升,从而提高效率,降低电源使用效率。提高冷水机组的出水温度,即提高末端空调的供水温度,还能够最大限度利用室外冷源进行自然冷却。

5.2 机房内运维

5.2.1 机房环境温湿度管理

提高数据中心温度是提高冷却系统效率的重要途径。回风温度设置过低可能导致过度冷却,浪费能源并增加冷却系统的负荷。对回风温度进行合理的设定,根据设备的要求和环境条件来调整。避免将回风温度设置过低,以减少不必要的能源消耗。使用温度传感器和监控系统,实时监测设备的温度,并根据实际需求进行回风温度的调整和优化。进行定期的温度调查和分析,评估设备的散热需求,优化冷却系统的运行参数。

IT 设备的可靠运行也很重要。标准建议将服务器进风温度设定在 $18\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通道隔离之后,非控制区的温度可以远远高于 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$;如果是高密度 IT 设备,非控制区的温度可以远远高于 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。数据中心采用 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度是一种极端情况,通过鼓励部分数据中心运营商进行深思熟虑的讨论和批判

性研究。研究之后,他们可以将机柜进风温度从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,这些变化都可以显著降低电源使用效率,而不影响其可用性 or 设备保养。同时,并非所有的数据中心都具有庞大的访客量。一些高性能/超级计算应用程序在无人值守的环境中运行,并包括一组同类硬件,这些应用非常适合较高的温度设定值。

在 GB50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中,考虑到节能与舒适性感觉,长期逗留区域空气计算参数在夏季 II 级热舒适下,温度范围 $27\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $40\%\sim 70\%$ 。所以,人们的期望值需要调整,这样他们才能理解较高的温度是“正常”的,节能的。这种变革需要平衡实际的节能需求与较少时间下人员舒适感的关系。

机房湿度可通过机房专用空调控制调节,机房专用空调可通过自带加湿器进行加湿,通过压缩机或冷冻水除湿,对于水冷空调若冷冻水的水温较高,不能达到良好的除湿效果。数据中心可单独配备有加湿机、除湿机。机房加湿器通常选用湿膜加湿机,湿膜加湿量大,相对机房空调加湿能耗较小,且可以输出一定的制冷量,故大型数据中心基本都会单独配备。

(1) 加湿机维护项目

加湿器外观检查: 1) 检查加湿器有无滴漏水; 2) 检查加湿器各部件是否完好无损坏。

加湿器水槽(箱)检查: 1) 检查水槽水位是否正常; 2) 检查水泵运行是否正常,进水口是否存在堵塞; 3) 检查浮球阀功能是否正常; 4) 检查加湿器排水功能是否正常; 5) 定期对水箱排污泄水,清理水箱水垢。

加湿器运行检查: 1) 检查加湿器风扇转动是否正常; 2) 检查加湿器运行电流是否正常。

加湿器湿膜检查与清洗: 1) 检查湿膜水流是否均匀; 2) 清洗加湿器湿膜的水垢。

传感器功能检查: 使用经检验的温湿度仪靠近传感器,检查传感器测量功能是否准确。

加湿器启停功能检查: 通过调节加湿器参数设定值,检查加湿器自动启停功能是否正常。

加湿量的测定: 使用温湿度仪测定加湿器进出口温湿度参数,再通过焓湿图计算加湿器的加湿量,并与加湿器额定加湿量对比。

(2) 除湿机维护项目

除湿机外观检查：1) 检查除湿机固定是否牢固；2) 检查除湿机过滤网是否正常，无脏堵；3) 检查除湿机运转声音、振动是否正常。

检查除湿机参数设定值：检查除湿机设定参数是否正常，无过大或过小，满足机房使用要求。

检查除湿机排水情况：检查除湿机排水是否顺畅，接管处无滴漏。

检查除湿机运行电流：检查除湿机运行电流是否在合理的运行范围内。

测定除湿机除湿量：通过温湿度仪测定除湿机进出风湿度，计算除湿机除湿量。

5.2.2 气流组织管理

能效提升所需要的机房温度提升必须有良好的气流组织保障。例如，使用密封性能好的通道（相对温度指数 $\approx 100\%$ ）或消除活动地板下的电缆障碍物，并实施某种形式的气流遏制，这些措施将有效地减少冷热空气的混合。

气流组织的关键优化目标是为末端设备供冷。IT 设备的负荷分布不均衡可能导致某些空调末端过度运行，而其他空调末端处于低负荷状态，降低整体能效。进行负荷均衡评估和规划，根据 IT 设备的性能和负荷需求，合理配置空调末端的数量和布局。使用 IT 设备管理软件或自动化工具，对 IT 设备进行监控和管理，实时了解空调末端的负荷状况，通过自动化调度和负载均衡算法，优化 IT 设备的运行状态。

不合理的温湿度和空气流动管理可能导致机房内温度不均匀、湿度过高或过低，影响设备的运行和寿命。部署温湿度传感器和监控系统，实时监测机房的温湿度情况，并设定合适的阈值进行报警。使用恰当的冷却设备，如空调系统和风扇，确保机房内的空气流动和温湿度控制在合适的范围内。合理规划机房的布局，包括冷热通道的设计和管理，以优化空气流动和热量分布。

气流组织优化不仅匹配温度控制，其自身也可以降低风机能耗。在数据中心中，部分负荷风机全开可能导致冷却系统的过度运行，浪费能源并降低冷却效率。安装风机调速器或变频器，根据实际负荷情况自动调节风机的转速，以实现能耗的优化和冷却效果的最大化。进行负荷评估和容量规划，了

解设备的实际负荷需求，并合理配置风机的数量和运行模式。使用智能监控系统，实时监测设备负荷和温度等参数，根据实际需求调整风机的开启和关闭状态。

可采取以下措施优化气流组织：

1) 针对不同型号的通信设备的显热量的不同，在不影响设备运行的状态下，进行合理的改造，有的通信设备散热部分的开孔太小，造成内部散热量不好，增加机架面板开孔数量，提高散热率，增大通风量，降低机架内部温度；

2) 根据不同设备显热量的不同，选择最优的布置排列方式，对于散热量较小的摆在距离空调较远的位置。

3) 采用冷池技术。冷池技术是一种较为先进的、针对数据中心机房气流组织现状提出的制冷技术，具体包括内冷池技术和外冷池技术两种，是指在设备的机柜内部或两台机柜中间构造专门的制冷通道，只针对所在的机柜制冷，把冷空气最大限度地控制在机柜中，只有先通过机柜才能和机房的空气实现循环，避免了冷热气流混乱造成的浪费，保证了冷空气的利用效率和利用结果，有力地解决了机柜局部过热的的问题。在实际应用中，内冷池的技术要求较高，但却代表着未来的发展方向，所以目前，应用较为普及的是外冷池技术。

4) 改变空调布置形式。空调的出风口位置很重要，会影响空调的送风量，送风距离，进而对整个机房的气流组织产生影响。一般情况下，采用下送风方式的情况较多，空调对每个设备都进行精密送风，这样的制冷效果固然好，但也会加剧能源消耗的负担和成本。因此合理设置空调的布局非常重要。空调的布置形式主要考虑以下几个方面：空调的送风口应尽量辐射最大的面积；根据空调远程送风的能力，合理安排空调的送风口的距离；空调送风口的方向要保持一致，避免造成冷热空气的混流，降低冷空气的制冷效率；空调送风的方向不能有障碍物，影响冷空气的顺畅流通。

5) 封闭冷通道。封闭通道的气流组织优化方式会提高冷量利用效率，冷热通道隔离是一种将冷气流和热气流相互分隔的布局方式，以最大限度地减少二者之间的混合。具体的原理是，在封闭的通道内冷气流会被迫经过散热设备，避免冷气流短路和

热回流,使得送进来的冷气流能够得到充分的利用。在这种布局中,冷通道用于供应冷空气至机柜前部,而热通道则用于排出机柜后部的热空气。通过隔离冷热空气流动,可以有效减少热空气对冷气流的干扰,提高冷却效果。当然,也要注意这种气流组织的优化方式可能会导致冷通道负压和防火等问题,保证封闭挡板的灵活开关和拆卸,避免安全隐患。如图2和图3所示是冷通道封闭和热通道封闭。

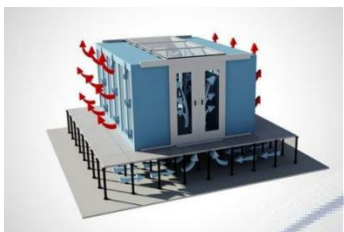


图2 冷通道封闭

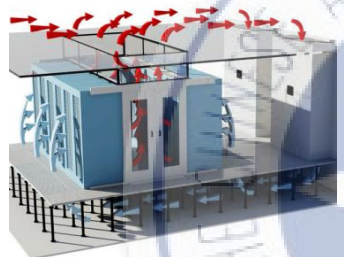


图3 热通道封闭

6) 加大送风量。数据中心机房内的气流组织本质上就是在空调系统的作用下实现冷空气和热空气的转换交流,保证机房的温湿度适合设备的运行,但是由于通信设备不间断运行会产生大量的热量,如果数据中心机房的气流组织较弱,就不能及时地将热空气送去室外,将冷空气送进机房内。因此,保证数据中心的气流组织正常、高效地运行,就要对机房内所有运行的设备产生的热量有一个全面的了解和把握,并根据这一结果设置有针对性的冷空气送风量,当然不可能送进来的所有冷空气都得到利用,因此,适当地加大空调的送风量是十分有必要的,这能更好地保证机房内部的制冷效果。

5.2.3 外窗管理

如果机房的外窗没有正确关闭或被意外打开,将导致外界空气进入机房,影响冷却效果和环境稳定性。

为确保机房的安全和稳定运行,必须对机房外窗进行严格的管理和监控。仅授权人员能够访问和操作外窗,确保只有持有适当凭证的人员才能接触

窗户。此外,提供必要的培训和指导,确保授权人员了解外窗的操作规程和 safety 注意事项。

定期检查和维修外窗是至关重要的。通过定期检查,可以确保外窗的完好无损和关闭的严密性。窗户框架和玻璃应该被检查,确保没有破损、裂纹或其他安全隐患。如果发现任何问题,应及时修复或更换,以保持窗户的完整性。

安装监控系统来实时监测外窗的状态是一项重要举措。窗户状态传感器和报警系统可以用来监测窗户的开关状态,并在窗户被意外打开时发出警报。这样可以及时采取行动,防止未经授权的访问和潜在的安全威胁。

除了监控系统,还应加强物理安全措施。在窗户上安装防护措施,如安全网格或铁栅栏,可以提供额外的防护层,防止未经授权的人员进入机房。定期巡检和维护记录对于确保机房外窗的安全至关重要。建立巡检计划,定期检查和记录窗户的状态和维护情况。这有助于跟踪窗户的维护历史,及时发现并解决潜在问题。

5.2.4 冷热通道封闭门管理

冷热通道的设计目的是将冷空气引导到设备前部,将热空气快速排出设备后部。当封闭门打开时,冷空气和热空气混合,导致冷空气无法充分覆盖设备并降低散热效果。这会导致设备温度升高,可能引发过热问题,对设备的性能和可靠性造成影响,能源会被浪费。冷热通道的设计旨在最大程度地提高冷却效果并降低能源消耗。然而,当封闭门打开时,冷空气和热空气混合,冷却效果下降,需要更多冷空气来保持设备正常工作温度。这导致冷却系统的能源消耗增加,造成能源的浪费和运营成本的增加。此外,环境温度会发生变化。封闭门打开后,冷空气和热空气的混合会导致数据中心内部的温度变化。设备周围的环境温度可能上升,影响其他设备的正常运行和散热效果。这可能导致设备之间的热互相影响,进一步加剧冷却问题和热风险。

为了确保冷热通道的封闭门管理和监控,采取以下关键措施是必要的。严格控制对冷热通道的访问权限,只有授权人员才能访问和打开封闭门,并进行相关培训和指导,确保操作人员了解封闭门的重要性和正确的操作方法。定期进行巡检和检查,确保封闭门的完整性和正确关闭。使用监控系统对

封闭门进行实时监测，并设置报警机制，一旦门被意外打开，立即发出警报通知相关人员。建立日志记录和审计机制，记录封闭门的操作和访问记录，以便追踪和监控使用情况。最后，通过安全培训和意识活动，提高运维人员对封闭门管理的重视程度，加强安全意识。通过这些综合措施，可确保冷热通道封闭门的安全管理和有效监控，提高冷却效果，降低能源浪费，并保障数据中心的可靠运行。

5.2.5 盲板封堵

在机房中，盲板是非常重要的组成部分，用于管理冷空气和热空气的流动。正确安装和密封盲板是确保冷却效果的关键。如果盲板没有正确安装或封堵不严密，将导致冷空气和热空气的相互混合，进而降低冷却效果，对数据中心的运行和设备性能产生负面影响。盲板的正确安装是至关重要的。盲板通常位于空调出风口或冷热通道间隔板的位置，用于引导冷空气或热空气的流动。如果盲板没有正确安装，可能造成冷空气和热空气的交叉流动，导致冷空气无法有效覆盖设备或热空气无法顺利排出，进而降低整个机房的冷却效果。盲板的密封性是至关重要的。盲板应该能够有效地阻止冷空气和热空气的相互混合。如果盲板封堵不严密，会导致冷空气和热空气之间的交叉流动，使冷空气无法达到设备并将热量带走。这将导致设备温度上升，增加设备过热的风险，从而降低设备的性能和可靠性。

为确保机房的冷却效果最佳化，定期检查和维修盲板必不可少。运维人员应定期检查盲板的完整性和正确安装，修复或更换松动、损坏或缺失的盲板。此外，使用密封胶或其他适合的材料封堵盲板之间的缝隙，以防止冷空气和热空气的相互混合，从而保持冷却效果。标识和记录盲板的位置和用途，使运维人员能够准确识别每个盲板，并确保正确操作。提供培训和指导给运维人员，使他们了解盲板的重要性和正确的安装方法。最后，使用监测系统实时监测盲板的状况，如温度和流量，并设置报警机制以便在盲板异常时及时采取纠正措施。通过这些措施，可以确保机房中盲板的正确安装和密封，从而提高冷却效果，并保持机房的稳定性和可靠性。

5.2.6 通风系统运维

新风系统设备防冻：新风系统进风口直接与室

外相连，冬季使用新风时，应注意设备防冻。开启新风时，水盘管应采取防冻措施。

带预热功能时，应使盘管内水流动，否则将水排净。同样加湿系统内水槽、水管段在机组停机或不启动预热时也应采取防冻措施。如需使用新风，每年入冬季节来临前，按前述要求进行操作。

新风系统设备参数设定：新风机参数有风机风量、风压、风机电流、加湿量、制冷量等。新风机参数设定主要有送风温度设定、送风湿度设定。新风机检测送风温湿度，对进风温湿度进行处理。BA自控系统中也可根据机房正压参数实现新风机开关操作，当机房对走廊正压大于 5 Pa 时风机停止，小于 5 Pa 时风机启动。该方法限于机房气密性调节约束，气密性不足可能无法实现。

新风系统维护项目中，新风机外观检查：1) 检查新风机外观是否正常，无漏液，无损坏；2) 检查风管外观，保温无破损，支架稳固；3) 检查风阀状态是否正常；4) 检查过滤网是否脏堵；5) 检查新风机各部件完好，无缺失无损坏。

新风机运行检查：1) 检查风机运行振动是否正常；2) 检查新风机运行电流是否正常；3) 检查新风机制冷加湿功能是否正常。

送风量检查：使用风速仪测量风口风速，计算各机房送风量。风机皮带检查：参见机房空调皮带维护方法。加湿系统检查：参见湿膜加湿器维护项。制冷、制热功能检查：参见机房专用空调维护项。风机电机检查：参见水泵电机维护项。

排风系统中，排风机外观检查：1) 检查排风机外观是否正常，无损坏；2) 检查风管外观，保温无破损，支架稳固；3) 检查软连接的连接情况是否正常，是否存在松动或漏风。

排风机电机检查与维护：1) 检查排风机电机接线端子是否紧固；2) 检查电机三相电路相间电阻与接地电阻是否正常。

排风机运行检查：1) 检查风机运行振动是否正常；2) 检查排风机运行电流。

排风量检查：使用风速仪，测量风口风速，计算各机房排风量。

风机皮带检查：与机房专用空调皮带检查方法一致。防火阀检查与维护：1) 检查防火阀开关功能是否正常；2) 检查防火阀与风机联动功能是否正常。

5.2.7 关键设备运维内容与维护周期

(一) 关键设备技术要求

为确保关键设备的稳定运行和安全性，设备的技术要求包括以下几个方面：首先，设备必须有独立的供电线路，以确保电力供应的稳定和安全。电压波动应控制在额定电压的(-15~10)%之内，且三相电压不平衡度不应超过4%。面对电压波动较大的情况，应配置自动调压或稳压装置。其次，设备应具备良好的保护接地，并与局(站)的接地系统可靠连接使用润滑油必须遵循相关规定，且在使用前需让其在常温条件下放置超过24 h，同时确保加油工具的干净。严格禁止混合使用不同类型的润滑油。另外，空调系统需要能够自动调控室内的温度与湿度，并保持其长期的稳定性能。此外，该系统还应具备有效的报警及自动保护机制，确保其安全且可靠地运行。这些综合性的技术要求旨在确保设备在各种条件下都能高效、安全地运行^[5]。

(二) 机房专用空调设备的维护

(1) 对空气处理机的维护

设备的表面要始终保持清洁，风机的转动部件不能有灰尘和油污，皮带在转动时也不能出现任何异常的摩擦声。过滤器要定期清洁，确保滤料完好无损，透气孔也不能被阻塞或者变形。蒸发器的翅片需要保持光亮，不能有任何阻塞或污迹^[5]。

(2) 风冷冷凝器的维护

确保风扇的支座紧固牢靠，基墩不能有任何松动或者风化的迹象。电机和风叶要保持清洁，不能有灰尘或油污，而且扇叶转动时应该平稳，没有抖动或摩擦的问题。定期用钳形电流表测试风扇的工作电流，同时检查调速机构是否正常运行。经常检查和清洁冷凝器的翅片，确保没有灰尘和油污。接线盒和风机内部绝对不能有水进入。电机的轴承需要紧密配合，如果发现扇叶有摆动或转动异常，那就得及时进行维修或更换^[5]。

(3) 制冷部分的维护

使用高低压气压表来测试制冷管路的高低压力。一旦发现任何问题，要立即排除。定期用仪表检查压缩机表面的温度，观察是否存在过冷或过热的现象。如果发现温度有较大的差异，就需要找出原因。定期检查视镜内氟利昂的流动情况，判断其中是否含有水分或者是否缺少液体。检查制冷剂

管的固定位置是否有松动或震动的问题。检查制冷剂管道的保温层，如果发现破损，应该及时进行修补。确保制冷管道畅通无阻，如果有堵塞，也要及时清除^[5]。

(4) 加湿器部分的维修

保持加湿水盘和加湿罐的清洁至关重要，要定期清除里面的水垢，确保加湿效果。检查给排水管路，确保管道畅通，没有渗漏或堵塞的问题。检查电磁阀的动作，观察加湿负荷电流和控制器的工作情况，一旦发现问题，应及时进行排除。检查电极和远红外管，保证它们处于良好状态，没有损坏或污垢^[5]。

(5) 冷却系统的维护

保持冷却循环管路^[6]的畅通至关重要，不能出现跑风或冒风的现象。定期清理冷却水池中的杂物和冷凝器上的水垢，以保证冷却效果^[5]。

(6) 电气控制部分的维护

定期检查报警装置的声音和光报警功能是否运作正常至关重要。同时，对接触器和熔断器进行检查，确保它们未出现松动或损坏情况，发现问题应立刻处理。电加热器的螺丝是否紧固、热管是否积灰也需定期确认，存在松动或积尘时应及时紧固和清理。利用钳形电流表测试所有电机的负载电流，若与原始数据不符，需查明原因并排除问题。继电器和电子元件的完好也需定期确认，如有损坏或老化，应及时更换。通过专用设备测量回风温度，若发现异常偏差，应进行调整。检查设备的保护接地线是否接触良好，不良时应立即紧固。同时，检查设备的绝缘性能，尤其是导线的老化情况，以保障电气系统的安全稳定运行。这些维护措施有助于预防意外，确保设备的高效和可靠运行。

(7) 每年对空调系统进行一次工作情况测试，并及时了解系统各主要设备的性能，并对空调系统设备进行有针对性的整修和调整，确保系统的稳定可靠运行^[5]。

(三) 相变蓄能空调

(1) 维护细则

季度巡检；整机检查；柜体内外构件清洁无脏物，无异常震动，冷凝排水正常；柜门紧固正常，紧固螺丝无松动，柜体无破损现象；盘管及保温层无损坏漏氟，机组固定正常；设定送风温度正常，

实测送风温度正常；检测机组运行状况，确认是否缺氟；机组温湿度控制器；电源指示及显示屏显示运行参数正常；测量温湿度数值对比送风区域温湿度数值无异常；室外机；机体外观，冷凝器检查清洗，满半年进行风扇叶轮动平衡检查调整（调整后叶轮自然停止时无异常摆动及噪声）（夏季每月清洗1次，其他每季度1次）；制冷剂管接口部位气密性检测；管路电磁阀动作灵活正常，管路过滤器有无脏堵；机组电控柜；量测电源电压正常及电源指示正常；柜体内外清洁无脏物、异物，检查各线径线路无破损；各接线端子紧固无松动、各指示仪表、灯指示正常；相变材料；检查相变材料性质是否发生变化；检查水箱是否缺水；检查水路循环是否有漏水现象。

（四）集中式（中央）空调设备的维护^[5]

（1）制冷机组的维护^[5]

①制冷循环回路^[1]：保持足够的制冷剂量，确保调节阀的可靠性，避免系统内部的污染、结冰堵塞和渗漏问题。②轴封：检查轴封的漏油量，确保不超出规定指标，同时确保制冷机组的正常运行。③小温差数值：检查小温差数值是否超出设备规定的指标，如超出需要进行相应的调整。④润滑油系统：确保润滑油泵的正常运转非常关键，这涉及到保持油路畅通无阻，避免任何形式的泄漏。定期对润滑油的品质进行检测，以确保其能有效地起到润滑和减少磨损的作用，是维护设备正常运行的重要措施。此外，油温加热装置的正常工作也同样重要，它能保证润滑油在低温条件下仍然能保持良好的流动性和润滑性能。通过这些措施，可以有效延长设备的使用寿命，减少故障率，确保设备的高效和稳定运行。⑤风冷型冷水机组风机运转无异响，定期清理；盘管无泄漏，无结冰堵塞。⑥胶球清洗装置根据设备产品手册、技术规范及实际使用情况，定期检查胶球数量及时进行补充。⑦根据产品手册、技术规范及实际使用情况，定期更换润滑油及油过滤器。

（2）冷却系统的维护^[6]

①制冷剂循环回路：确保制冷剂循环系统正常运行是维护空调或制冷设备的关键一环。首先，要保证制冷剂循环回路的流量充足，这关系到整个系统的制冷效果。各支路的制冷剂分配需要均匀，这

样可以避免局部过热或过冷的情况发生。同时，制冷剂的压力和温度必须维持在正常范围内，这样才能确保制冷系统的稳定性和效率。除此之外，自动补给装置的完好状态也非常重要，它能够保证制冷剂在系统中的持续补充，避免因制冷剂不足导致的效率下降。调节阀的可靠性也至关重要，因为它直接影响制冷系统的流量和压力调节。最后，确保管路中无漏气现象，这不仅关系到制冷效率，还涉及到系统的安全性。通过这些措施，可以有效地保证制冷系统的高效运行，减少故障发生，提高能效和设备寿命。②制冷剂循环泵：关注制冷剂循环泵的正常运行，检查是否存在锈蚀问题，保证水封严密，以防止泵出现泄漏问题。③除尘过滤装置：定期维护空调或通风系统中的一、二次风除尘过滤装置是确保空气质量的关键。保持过滤装置的清洁可以有效避免过滤效率下降和能耗增加。此外，确保调节机构的灵活可靠性对于调整空气流量和保持室内空气质量至关重要。定期检查和清理过滤装置，可以预防过滤装置堵塞，从而保证空气流通畅通，减少系统运行压力，延长设备使用寿命。④风机电机：定期检查风机电机的润滑状况，确保其正常转动方向，并保证足够的空气循环量，以保持机房内的空气质量^[1]。⑤送、回风通道：保持送、回风通道的畅通，确保空气流动的顺畅。定期检查通道是否存在堵塞或其他问题，及时解决。⑥检查控制器、变频器运行性能，对控制器、变频器柜体内部进行灰尘清理，检查接线是否牢固，各元器件是否正常。

（3）冷却系统的维护

①冷却循环管路：确保冷却循环管路畅通无阻，各阀门动作要可靠。②冷却水泵：冷却水泵是整个冷却系统的“心脏”，它负责推动冷却水在系统中循环。因此，关注冷却水泵的正常运行至关重要。定期检查水泵，确保没有锈蚀问题，是保持其高效运转的关键。锈蚀不仅会损坏水泵的部件，还可能导致冷却效率降低。同时，保证水泵的水封严密也非常重要，因为水封的好坏直接关系到水泵的密封性和运行效率。如果水封不严，可能会导致水泵泄漏，影响系统的正常运行。③冷却塔风机和播水器：冷却塔的风机和播水器是确保冷却效率的重要设备。冷却塔风机的作用是通过风力帮助冷却水散热，而播水器则确保冷却水能够均匀地分布在冷却塔

中。确保这两者的正常运行可以使水流畅通，播洒均匀，从而提高冷却效率。定期检查风机和播水器，确保它们运行平稳，无异常声音或振动，并清理其中的杂物，可以避免设备过早磨损和故障。④冷却水池：冷却水池的维护同样重要，它关系到整个冷却系统的水源供应。确保冷却水池的自动补水功能正常，可以持续保持水位稳定。水位显示和告警装置的完好，可以帮助及时发现和处理异常情况，比如水位过低或过高。定期检查冷却水池，除去水中的杂物，保证水质清洁，是保证冷却效率和水泵正常工作的基础。⑤压力和温度正常，变频器控制功能符合要求。⑥风机运行无噪声，运行平稳。

(五) 地下水空调

(1) 地下水空调系统利用低温地下水作为制冷剂水。该系统通过深井泵抽取地下水，经过换热器释放冷量后，再将冷却后的水回灌注入原来的含水层中。

(2) 作为空调用制冷剂，地下水需满足以下要求：1) 水量足够；2) 水温稳定；3) 水质要求地下水的水温和水质随地理环境、地质条件以及循环深度不同而变化。部分水源含有泥沙、有机物和胶体悬浮物，导致水变得浑浊。高含沙量的水会对机组和管阀造成磨损。如果高含沙量和浑浊度的水被用于地下回灌，可能会导致含水层堵塞。一般要求水源的含沙量应小于 1/20 万，浊度应小于 20 mg/L。如果系统中采用板式换热器，水源中的固体颗粒粒径应小于 0.5 mm。发生变化。简而言之，不同地区的地下水特性可能大相径庭，主要是因为这些区域在地理位置、地质结构和水循环深度等方面存在差异。4) 回灌容易^[7-9]。

5.3 BA 自控系统运维管理

在运维管理中，BA 系统的操作是设备管理者必须掌握的，同时也要掌握 BA 系统程序执行过程，当 BA 系统程序执行过程中出错时有据可查，及时恢复，同时也能对执行情况进行实时监控，对参数进行精准分析。例如空调系统的冷水机组制冷与冷却塔一板换制冷模式切换过程，或是设备故障切换过程，在某一设备发生故障（如通信故障、设备故障等），管理者能现场手动操作代替自控完成切换过程，当 BA 系统发生故障时也需要运维人员按照 BA 设定的程序手动完成设备切换操作。

1) BA 系统维护项目

(1) 设备外观检查

①检查直接数字控制、可编程逻辑控制器箱、控制服务器外观是否正常；②检查 DDC、PLC 箱内电气元件正常，有无松动、烧毁等；③清理设备表面灰尘；④检查设备供电电压、输出电压是否正常。

2) 接线端子检查

①检查电气元件接线端子是否松动，检查接地线是否松动；②检查通信线路与设备（阀门、机房专用空调、变频器等）连接点是否松动。

3) 传感器检查

①检查传感器外观是否正常；②检查设备显示数值与系统显示数值是否一致；③校准传感器参数精度。

4) 设备通信状态检查

①检查 BA 系统监控设备通信是否正常；②检查设备手动/自动状态是否正常。

6 运维相关技术标准梳理

运维相关技术标准对于数据中心的运营和管理至关重要。技术标准提供规范和指导，帮助数据中心运维人员确保系统的稳定性、安全性和可靠性。

6.1 TIA942 标准

TIA942^[3]由美国电信工业协会（Telecommunications Industry Association, TIA）发布的数据中心暖通设施标准。该标准涵盖了数据中心的物理结构、电力系统、冷却系统、网络和通信设备、安全和可靠性等方面的要求和指导。研究和梳理 TIA942 标准对于数据中心的设计、建设和运维具有重要意义，可以帮助运维人员了解数据中心的最佳实践和标准化要求，提高数据中心的运行效率和可靠性。国家标准 TIA-942《数据中心的通信基础设施标准》，考量基础设施的“可用性”“稳定性”和“安全性”，将 IDC 分为了四个等级，分别是 Tier1、Tier2、Tier3、Tier4，而 Tier4 则是最高的等级。T1 级数据中心为基本型，T1 数据中心可以接受数据业务的计划性和非计划性中断，只需要提供计算机配电和冷却系统，并且不一定要提供 UPS 或发电机组，因此这是一个单回路系统，容易产生多处单点故障。在年度检修和维护时，或遇到紧急状态时会高频率宕机，同时操作故障或是设备自身故障也会造成系统

中断。T2 级数据中心：组件冗余型 T2 数据中心的设备具有组件冗余功能，以减少计划性和非计划性的系统中断。这类数据中心要求提供高架地板，UPS 和发电机组，同时设备容量设计应满足 N+1 备用要求，单路由配送。当重要的电力设备或其他组件需要维护时，可以通过设备切换来实现系统不中断或短时中断。T3 级数据中心为在线维护全冗余型，T3 级别的数据中心允许支撑系统设备任何计划性的动作而不会导致机房设备的任何服务中断。计划性的动作包括规划好的定期维护、保养、元器件更换、设备扩容或减容、系统或设备测试等。大型数据中心会安装冷冻水系统，要求双路或环路供水。当其他路由由执行维护或测试动作时，必须保证工作路由具有足够的容量和能力支撑系统的正常运行。非计划性动作诸如操作错误，设备自身故障等导致数据中心中断是可以接受的。T4 级数据中心为容错系统型，T4 级别的数据中心要求支撑系统有足够的容量和能力规避任何计划性动作导致的重要负荷停机风险。同时容错功能要求支撑系统有能力避免至少 1 次非计划性的故障或事件导致的重要负荷停机风险，因此这要求至少要有两个实时有效地配送路由，N+N 是典型的系统架构。对于电气系统，两个独立的 (N+1) UPS 是一定要设置的。但根据消防电气规范的规定，火灾时允许消防电力系统强切。因此 T4 机房要求所有的机房设备双路容错供电，同时应注意 T4 机房支撑设备必须与机房 IT 设备的特性相匹配。

6.2 ISO 27001 标准

ISO 27001^[10]是国际标准化组织 (International Organization for Standardization) 发布的信息安全管理系统 (ISMS) 标准。在数据中心运维中，信息安全是一个至关重要的方面。研究和梳理 ISO 27001 标准可以帮助运维人员建立和维护数据中心的信息化安全管理体系，包括安全策略、风险评估、安全控制和持续改进等方面的要求和实施指南。

ISO 27001 是重点针对信息安全管理 (ISMS) 的标准，提供了管理信息安全风险的框架。虽然 ISO 27001 标准本身并未专门针对数据中心的制冷系统运维提出具体要求，但标准中强调了对信息安全管理中各个方面的持续监控、维护和改

进的重要性，包括与数据中心运行相关的物理安全措施。

在数据中心连续安全运行的背景下，制冷系统作为关键的物理基础设施组件，其稳定运行对于确保数据中心内 IT 设备的物理安全和正常运作至关重要。因此，ISO 27001 标准要求组织对所有信息安全相关的方面进行风险评估和管理，这间接包括了对制冷系统的维护和运维要求。例如，组织需要确保制冷系统的设计、实施和维护符合信息安全管理的要求，包括但不限于：对制冷系统进行定期的风险评估，识别可能的单点故障和潜在的安全威胁。实施适当的控制措施来管理这些风险，例如备份制冷单元、冗余系统和定期维护计划。监控制冷系统的运行状态，确保其持续稳定运行，并及时响应任何异常或故障。制定和实施应急预案，以便在制冷系统发生故障时能够迅速恢复数据中心的冷却能力，减少对信息安全的影响。

6.3 ITIL 框架

Information Technology Infrastructure Library, ITIL^[10]是一套广泛使用的 IT 服务管理框架。它提供了一系列最佳实践和指导，涵盖了 IT 服务管理的各个方面，包括服务策略、服务设计、服务过渡、服务运营和持续改进等。在数据中心运维中，采用 ITIL 框架可以帮助运维人员建立有效的服务管理流程和规范，提高服务质量和客户满意度。研究和梳理 ITIL 框架对于数据中心运维人员的培训和实践具有重要意义。

ITIL (信息技术基础设施库) 是一套详细的最佳实践框架，用于管理 IT 服务。在 ITIL 的框架中，数据中心的制冷系统作为 IT 服务连续性的关键物理组件，其运维要求虽然没有在 ITIL 标准文档中明确列出，但可以推断出一些关键的运维实践要求，这些要求与数据中心制冷系统的稳定性、效率和可靠性密切相关。预防性维护：ITIL 强调预防性维护的重要性，以减少意外停机时间。对于数据中心的制冷系统，这意味着需要定期检查和维护空调设备，以确保它们运行在最佳状态。

容量管理：ITIL 建议进行容量管理，以确保基础设施能够满足当前和未来的业务需求。数据中心的制冷系统需要根据 IT 负载的变化进行适当的扩

展和调整。

可用性和冗余: ITIL 要求数据中心的制冷系统设计必须包含冗余元素,以保证高可用性。这意味着至少需要 N+1 的冗余,以避免单点故障。**性能优化:** ITIL 提倡持续的性能优化,制冷系统应定期进行性能评估和调整,以提高能效和成本效益。**事件和问题管理:** ITIL 中的事件和问题管理流程要求数据中心运维团队能够快速响应制冷系统的任何故障或性能下降,以最小化对 IT 服务的影响。**变更管理:** 任何对制冷系统的更改都应通过变更管理流程进行,以确保更改不会对数据中心的冷却能力产生负面影响。**持续监控:** ITIL 建议对数据中心的所有关键系统进行持续监控,包括制冷系统。这包括温度、湿度和气流的监控,以确保数据中心环境符合 IT 设备的要求。**文档和记录:** ITIL 要求所有运维活动都应有详细的文档记录,包括制冷系统的维护日志、检查记录和故障报告。**风险管理:** ITIL 强调风险管理,数据中心制冷系统的运维应包括识别和缓解潜在风险的策略,例如通过备份电源和冷却系统来减少停机风险。**供应商管理:** 如果数据中心的制冷系统由第三方供应商提供,ITIL 建议对供应商进行有效管理,确保供应商的服务水平协议(SLA)满足数据中心的运维要求。

6.4 ANSI/BICSI 002 标准

ANSI/BICSI 002^[12]是由美国国家标准化协会(American National Standards Institute)和 BICSI (Building Industry Consulting Service International)共同发布的信息通信技术(ICT)设计和实施的国际标准。该标准涵盖了数据中心的结构设计、电力和冷却系统、布线和网络设备、机房安全等方面的要求和指南。研究和梳理 ANSI/BICSI 002 标准可以帮助运维人员了解数据中心的设计和 implement 标准,指导数据中心的规划和建设工作。

BICSI002 发布数据中心设计和运维的指导方针和最佳实践,其中包括制冷系统的运维要求,这些要求与 BICSI 推荐的最佳实践保持一致:**预防性维护:** 实施定期的预防性维护计划,以确保制冷系统的所有组件均按制造商规格运行。**冗余设计:** 制冷系统应设计有冗余,以确保在组件故障时仍能维持数据中心的温度和湿度水平。**容量规划:** 制冷系

统应具备足够的容量,以适应数据中心的当前和预期的热负荷。**监控和报警:** 应实时监控制冷系统的性能,并在出现潜在问题时触发报警。**环境控制:** 维持数据中心内的环境条件在规定的温度和湿度范围内,以保护 IT 设备。**能源效率:** 定期评估和优化制冷系统的能源效率,以减少运营成本和环境影响。**故障响应:** 建立和维护一个响应计划,以便在制冷系统发生故障时快速恢复服务。**培训和资质:** 确保运维人员接受了适当的培训,并具备必要的资质来维护和修理制冷系统。**文档和记录:** 保持详细的维护记录和操作文档,以支持持续的运维和未来的系统升级。**安全和合规性:** 遵守所有相关的安全规程和行业合规标准,如 OSHA 和当地的建筑规范。

6.5 ASHRAE 标准

美国采暖、制冷与空调工程师协会(American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE)是一个专注于供暖、制冷和空调工程领域的国际组织。ASHRAE 发布了一系列与数据中心冷却系统相关的标准和指南^[13],包括温度和湿度要求、冷却系统效能评估、空调系统设计等方面。研究和梳理 ASHRAE 标准对于数据中心冷却系统的设计、运行和维护具有指导意义,可以帮助运维人员优化冷却系统的效能和能效。

ASHRAE 发布的标准 ASHRAE 90.4 专注于数据中心的能源效率,它为数据中心的设计、建造、运行和维护提供了最低能效要求。ASHRAE 90.4 标准为数据中心的制冷系统运维提供了一个全面的框架,旨在提高能源效率和可持续性,同时确保数据中心的可靠性和性能。关于数据中心制冷系统运维的一些具体要求。

性能基准: ASHRAE 90.4 标准要求数据中心运维团队必须充分认识到能源效率在设计中的重要性,并且效率低下的设计将被淘汰。**能源效率的最低要求:** 标准明确提出建立数据中心的能源效率的最低要求,包括设计、施工和运行维护计划,并利用现场或非现场可再生能源。**数据中心的改造与扩建:** ASHRAE 90.4 认识到数据中心改造与扩建的挑战,并免除了小变更的要求,允许在电气与机械部分之间进行权衡。**关注 PUE:** 虽然 PUE(功率使用效率)是一个简单的代表效率的指标,但 ASHRAE

90.4 标准更关注整个数据中心设施中电力利用率,凸显整体能源消耗对机房空间温度上升的影响。通道遏制:ASHRAE 90.4 标准中的一个关键部分是通道遏制,它关注数据中心的给定风量的均匀性,从而限制克服热点所需的功率负载。运维数据的利用:数据中心设施的最终用户利用其智能配电单元(PDU)的精细功能来收集机架和设备层面的关键环境指标,以遵守ASHRAE 90.4 标准。设计标准:ASHRAE 90.4 标准旨在关注数据中心使用可再生能源,并允许数据中心运营商测量电力和冷却系统的有效性。效率与损失的计算:组织需要计算系统中不同元件的效率与损失,并将它们合并为单一数值,结果必须等于或小于每个气候区公布的最大参考值。适用于新旧数据中心:ASHRAE 90.4 标准适用于新的数据中心或其部分及其系统,以及对现有数据中心或其部分系统和设备的修改。

6.6 GB/T 51314—2018 数据中心基础设施运行维护标准

GB/T 51314—2018《数据中心基础设施运行维护标准》^[14]是国家推荐性标准,对数据中心的基础设施运行和维护提供了规范和指导。以下是该标准的简介和主要内容:GB/T 51314—2018《数据中心基础设施运行维护标准》旨在规范数据中心基础设施的运行和维护工作,确保数据中心设施的稳定性、可靠性和安全性。标准适用于各类规模的数据中心,包括机房、主机房、IT 设备、电力系统、空调系统、消防系统等方面的运行和维护。

1) 术语和定义:对标准中涉及到的术语和定义进行了解释和说明,确保统一地理解和使用。

2) 基础设施运行管理:包括基础设施管理组织、管理制度建设、运行管理流程和记录管理等方面的内容。标准强调建立科学合理的管理体系和运行流程,以确保数据中心基础设施稳定可靠地运行。

3) 基础设施维护管理:包括预防性维护、应急维护和计划性维护等方面的内容。标准规定了各种设备和系统的常规维护要求,以延长设备寿命、减少故障发生率,并确保数据中心基础设施的安全性。

4) 环境管理:主要涉及温湿度、灰尘、静电等环境因素的控制和管理。标准规定了数据中心环境参数的要求和设备的降温措施,以确保设备正常运行和数据安全。

5) 电力系统:包括供电设备、配电系统和电池组等方面的要求。标准规定了电源接地、设备可靠性、电能质量等方面的要求,以确保电力系统的稳定和可靠。

6) 空调系统:包括空调设备选型、通风、制冷等方面的要求。标准规定了温湿度范围、空调设备的可靠性和能效等方面的要求,以确保数据中心的温度和湿度在合理范围内。

7) 消防系统:包括火灾报警、灭火系统等方面的要求。标准规定了消防设备的选择、布局和维护要求,以确保数据中心火灾的及时报警和有效灭火。

8) 安全管理:包括安全监控、安全措施等方面的要求。标准规定了入侵监测、视频监控、门禁系统等安全设备的要求,以确保数据中心的安全性。

GB/T 51314—2018《数据中心基础设施运行维护标准》为数据中心的基础设施运行和维护提供了规范和指导,有助于提升数据中心的可靠性和安全性。在设计、建设和运营数据中心时,遵循该标准可以提高设施的质量和效率,并降低潜在风险。

在研究和梳理上述技术标准时,可以采取5个步骤和方法。

1) 文献综述:查阅相关的标准和指南文件,了解其主要内容、要求和适用范围。

2) 标准解读:对于每个技术标准,逐一分析其各个章节和要求,理解标准中所涉及的概念、原则和方法。

3) 标准比较:将不同的技术标准进行对比,找出它们之间的异同点,了解各个标准的优势和适用场景。

4) 应用指南:根据研究结果,总结出技术标准的应用指南,包括如何根据标准要求进行数据中心运维的规划、设计和实施。

5) 案例分析:结合实际案例,探讨技术标准在数据中心运维中的应用和效果,分析标准实施的挑战和解决方案。

根据国家标准《数据中心基础设施运行维护标准》GB/T 51314—2018,对于数据中心制冷系统的运维要求主要包括以下几点:运维空间问题:数据中心设计时应预留足够的运维空间和通道,以适应冷站冷量大、机组体积大、高度高和管网构成复杂等特点。冷却塔维护:冷却塔设计时需预留足够的

余量,以应对数据中心负荷增加导致的冷却能力不足问题。运行中应进行有效的维护,确保冷却水出水水温适宜,避免冷机运行耗能增加。无负荷调试:数据中心可采用无负荷调试方法进行调试,利用板换的换热能力,从冷机的冷凝器获得足够的热量作为冷机调试的热负荷。运维制度:应建立一套完整的运维制度,包括但不限于日常巡检、定期维护、应急处理流程等,以确保制冷系统稳定运行。热管理系统:数据中心冷却技术必须适应IT系统不断变化的需求,对于高热密度机柜,可采用热管背板热交换器或直接式液冷方案等先进的冷却技术。液冷设备运维:对于采用液冷技术的数据中心,需要专门的设备来形成冷却液流动环路,并正确配置冷却系统,以确保冷却液的温度控制精度和应对负载突然增加的能力。冷却系统能力:在配置专用环路以满足液冷时,应考虑冷却系统的能力,减少泄漏的影响,并减轻设备重量带来的建筑承重风险。数据中心的最低能效要求:GB/T 51314—2018标准还涵盖了数据中心的最低能效要求,包括设计、建造以及运营和维护计划,同时鼓励使用现场或场外可再生能源。运维数据利用:数据中心运维应利用智能配电单元等设备收集关键环境指标数据,以优化冷却策略和负载平衡。

6.7 GB 34982—2017 云计算数据中心基本要求

GB 34982—2017^[15]是国家标准中关于云计算数据中心基本要求的推荐性标准。该标准主要涵盖了云计算数据中心的建设、运营和管理方面的技术要求,主要包含以下内容:1)数据中心的规划和设计:包括数据中心的选址、建筑设计、电力、网络、安全等方面的规划和设计;2)数据中心的建设和运营:包括数据中心的建设和运营过程中的技术要求、管理要求、安全要求等方面的内容;3)数据中心的管理和运维:包括数据中心的资源管理、服务管理、运维管理等方面的内容;4)数据中心的安全保障:包括物理安全、网络安全、数据安全、应用安全等方面的安全保障要求;5)数据中心的节能环保:包括节能减排、资源利用率优化等方面的环保要求^[14]。

GB 34982—2017标准旨在规范云计算数据中心的建设、运营和管理,确保数据中心的可靠性、安全性、高效性和可持续性^[15]。

GB 50174—2017标准主要内容涵盖建筑节能

工程的施工技术规范,旨在提高建筑的节能水平并减少能源消耗^[4]。

6.8 YD 2727—2014 互联网数据中心运维管理技术要求

YD 2727—2014^[16]是行业标准中关于互联网数据中心运维管理技术要求的推荐标准。该标准主要涵盖了互联网数据中心的运维管理方面的技术要求,包括以下内容:1)运维管理体系的建立和运行:包括运维管理组织结构、职责分工、工作流程、管理制度等方面的要求;2)运维资源的管理:包括服务器、存储设备、网络设备等硬件资源的管理,以及软件资源、文档资料等方面的管理;3)运维服务的管理:包括服务级别协议(SLA)的制定和实施、故障处理、变更管理、备份恢复等方面的要求;4)运维安全管理:包括网络安全、物理安全、数据安全、系统安全等方面的要求,以确保数据中心的安全性;5)运维性能管理:包括资源利用率、服务质量、故障率等方面的要求,以确保数据中心的稳定性和性能;6)运维评估和改进:包括运维管理体系的自我评估和持续改进机制的建立等方面的要求,以确保数据中心的持续优化和提升。

YD 2727—2014标准旨在规范互联网数据中心运维管理的各个方面,以确保数据中心的稳定性、可靠性、安全性和性能。

6.9 中国电子学会标准《数据中心设施运维管理指南》

中国电子学会标准《数据中心设施运维管理指南》(简称“指南”)是中国电子学会发布的一项数据中心设施运维管理的标准。该指南主要涵盖了数据中心设施运维管理的方方面面,包括以下内容:1)数据中心设施运维管理的基本概念和原则;2)数据中心设施运维管理的组织架构、职责分工、工作流程等方面的要求;3)数据中心设施运维管理的资源管理,包括服务器、存储设备、网络设备等硬件资源的管理,以及软件资源、文档资料等方面的管理;4)数据中心设施运维管理的运维管理,包括服务级别协议(SLA)的制定和实施、故障处理、变更管理、备份恢复等方面的要求;5)数据中心设施运维管理的运维管理,包括网络安全、物理安全、数据安全、应用安全等方面的安全保障要求;6)数据中心设施运维管理的性能管理,包括资源利用率、

服务质量、故障率等方面的要求,以确保数据中心的稳定性和性能;7)数据中心设施运维管理的评估和改进,包括设施运维管理体系的自我评估和持续改进机制的建立等方面的要求。

该指南旨在规范数据中心设施运维管理的各方面,以确保数据中心的稳定性、可靠性、安全性和高效性。该指南适用于各类数据中心,包括企业内部数据中心、云计算数据中心、政府数据中心等。

通过研究和梳理运维相关技术标准,可以帮助数据中心运维人员了解和掌握行业最佳实践和规范要求,提高数据中心的运维水平和服务质量。将标准应用于实际的数据中心运维中,可以提供指导和参考,确保数据中心的稳定性、安全性和可靠性,满足业务需求和用户期望。

7 结论

本文研究了 2023 年度中国数据中心冷却系统运维技术,分析了数据中心运维的特点、隐患、工作要点、细化要求和相关标准,得出如下结论:

1) 相比常规冷却系统,数据中心冷却系统的运维需要维持更高的冷却能力,环境温度在 18~27 °C 之间,气流组织需要均匀且稳定,节能和能源效率的要求更高,也意味着运维作业的复杂程度更高;

2) 对于部分布置特别集中和空置的服务器,需要考虑服务器的功耗重新规划布置位置,合理利用机房资源,并加强对于运维人员的培训防止服务器倒装问题的发生;

3) 数据中心水冷冷却系统运维的常见隐患主要包括空间预留不足、冷却塔冷却能力不足、水系统部分管路循环不畅或泄漏、阀门设备故障、机房负荷过小、候补水源不足和防冻措施不到位等问题;

4) 数据中心冷却运维主要包括日常巡检、维护、故障排除和性能优化等方面的工作,同时也要做好机房内的安全培训和宣传工作,建立完善的安全记录和报告机制;

5) TIA-942、ISO 27001、ASHRAE 90.4、ITIL、ANSI/BICSI 002 以及 GB 51314 等数据中心相关的国内外标准也对于智算中心制冷运维进行了预测;未来数据中心制冷系统的发展方向将更加注重智能化、绿色节能、模块化、安全性和标准化,同时,随着新技术的发展和应用,制冷系统将更加高效、

灵活和可靠。智能化与自动化方面,数据中心制冷系统将越来越多地采用 AI 和机器学习技术,实现智能调节和故障预测。绿色节能技术方面,随着全球对可持续发展的重视,液冷等高效节能的制冷技术将得到更广泛的应用。模块化与灵活性方面,模块化设计将使数据中心能够根据需求灵活扩展,同时保持系统的高效运行。余热回收与再利用方面,余热回收技术将被更广泛地集成到数据中心制冷系统中,以提高能源利用效率。标准化与规范化方面,国内愈加完善的行业标准,规范数据中心制冷系统的设计与运维,促进行业内的技术交流和健康发展。安全性与合规性方面,数据中心制冷系统的设计与运维将更加注重安全性和合规性,以满足日益严格的法规要求。多技术融合:液冷技术与边缘计算、5G 等其他技术的结合,将推动数据中心向更高密度和模块化发展。全生命周期管理:数据中心制冷系统将实施从设计、建设到运维的全生命周期管理,以实现整体优化。

TIA-942、ISO 27001、ASHRAE 90.4、ITIL、ANSI/BICSI 002 以及 GB 51314 等数据中心相关的国内外标准对比中的共性观点有:冗余与可靠性方面,TIA-942 和 ANSI/BICSI 002 都强调了数据中心制冷系统的冗余设计,以确保在设备故障时仍能维持运行,保障数据中心的可靠性;能效与节能方面,ASHRAE 90.4 和 GB 51314 都提出了数据中心制冷系统的能效要求,鼓励采用节能技术和措施,以降低能耗和运行成本;监控与维护方面,ISO 27001 和 ITIL 都提到了对数据中心制冷系统的持续监控和定期维护的重要性,以确保系统的稳定运行;环境与健康方面,国内外各标准均在不同程度上提到了数据中心制冷系统需要满足的环境要求,包括温湿度控制,以保障数据中心内设备的健康运行;智能化管理方面,随着技术的发展,智能化管理成为数据中心运维的一个重要趋势,通过采用先进的监控系统和自动化工具,提高运维效率。

参考文献:

- [1] 数据中心基础设施维护规程[S]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [2] 数据中心基础设施运维基础教程[S]. 北京:北京邮电大学出版社,2020.
- [3] ANSI/TIA-942-C: 数据中心电信基础设施标准[S]. 美

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2024.z1.105

中小型数据中心冷却系统优化案例研究进展

黄翔^{*1}, 郑竺凌², 褚俊杰¹, 严政³, 郑品迪⁴, 田振武⁵, 严锦程⁶, 袁卫星⁷, 夏卫东⁸,
王骞⁹, 周峰¹⁰, 沈天磊¹, 姜臻¹¹

(1-西安工程大学城市规划与市政工程学院, 陕西西安 710048; 2-上海建科节能技术有限公司 上海 200032; 3-广东电信规划设计研究院有限公司, 广东广州 510630; 4-北京瑞思博创科技有限公司, 北京 100038; 5-中通服咨询设计研究院有限公司, 江苏南京 210019; 6-新疆华奕新能源科技股份有限公司, 新疆乌鲁木齐 830000; 7-北京航空航天大学航空学院, 北京 100191; 8-上海二冷能源科技有限公司, 江苏昆山 215331; 9-深圳市英维克科技股份有限公司, 广东深圳 518110; 10-北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 11-中国电信股份有限公司, 北京 102209)

[摘要] 针对数据中心行业节能环保的要求, 通过对业界主流节能空调技术在数据中心改造方面的应用探究, 提出了现有中小型数据中心冷却系统节能改造的路径。研究表明: 氟泵热管蒸发冷凝技术、蒸发冷却技术、液冷技术、泵驱动两相机柜背板、数据中心升温节能技术、风冷冷却系统改为水冷冷却系统等技术方案在中小型数据中心节能改造方面具有良好的应用, 针对不同情况选用不同技术措施可以有效降低数据中心能源使用效率。

[关键词] 系统优化; 中小型数据中心; 节能改造; 蒸发冷却; 氟泵热管; 液冷; 气流组织

中图分类号: TB61⁺; TQ051.5

文献标识码: A

Research Progress of Optimization Cases for Cooling System in Small and Medium-sized Data Centers

HUANG Xiang^{*1}, ZHENG Lanling², CHU Junjie¹, YAN Zheng³, ZHENG Pindi⁴, TIAN Zhengwu⁵, YAN Jincheng⁶, YUAN Weixing⁷, XIA Weidong⁸, WANG Qian⁹, ZHOU Feng¹⁰, SHEN Tianlei¹, JIANG Liu¹¹

(1-School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an University of Engineering, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2-Shanghai Jianke Energy Conservation Technology Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3-Guangdong Telecom Planning and Design Institute Co., Guangzhou 510630, Guangdong, China; 4- Beijing Ruisi Baochuang Technology Co., Beijing 100038, China; 5-CTS Consulting & Design Institute Co., Nanjing 210019, Jiangsu, China; 6- Xinjiang Huayi New Energy Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 7-College of Aeronautics and Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 8-Shanghai Erleng Energy Technology Co., Ltd., Kunshan 215331, Jiangsu, China; 9-Shenzhen Invic Technology Co., Ltd., Shenzhen 518110, Guangdong, China; 10-School of Environmental and Energy Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100124, China; 11-China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China)

[Abstract] Aiming at the requirements of energy saving and environmental protection in the data center industry, the path of energy saving transformation of the cooling system of the existing small and medium-sized data centers is proposed by exploring the application of mainstream energy-saving air conditioning technologies in the industry in the transformation of data centers. The study shows that: fluorine pump heat pipe evaporation condensation technology, evaporative cooling technology, liquid cooling technology, pump-driven two-camera cabinet backplane, data center heating energy-saving technology, air-cooled cooling system changed to water-cooled cooling system and other technical solutions in small and medium-sized data centers energy-saving transformation has a good

*黄翔 (1962—), 男, 二级教授, 博士研究生导师。研究方向: 数据中心自然冷却、蒸发冷却通风空调技术。联系地址: 陕西省西安市金花南路 19 号, 邮编 710048。联系电话: 13991812093。E-mail: huangx@xpu.edu.cn。

application for different situations to choose different technical measures can be effective in reducing the power usage effectiveness of data centers.

[Keywords] System optimization; Small and middle size data center; Energy efficiency retrofit; Evaporative cooling; Refrigerant pump heat pipe; Liquid cooling; Airflow organization

0 引言

为了引导数据中心积极采用先进节能环保技术,推动绿色数据中心建设,工业和信息化部组织开展了绿色数据中心先进适用技术筛选工作。自2016年遴选产生第一批绿色数据中心先进适用技术目录以来,先后于2018年、2019年和2020年分别遴选产生出对应的绿色数据中心先进适用技术目录,对数据中心先进节能环保技术的应用起到了较好的指引作用。工信部所遴选的绿色数据中心先进适用技术主要应用于新建数据中心和在用数据中心的改造场景,并考虑数据中心规模及单机柜功率应用的场景。

在国家层面,陆续发布了相关文件对数据中心老旧机房改造提出了新的要求。其中,工业和信息化部等七部门印发《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)》要求加快核心机房绿色低碳化重构,到2025年,改建核心机房能源使用效率(Power Usage Effectiveness, PUE)降到1.5以下。财政部生态环境部、工业和信息化部印发《绿色数据中心政府采购需求标准(试行)》要求2023年6月起数据中心PUE不高于1.4,2025年起数据中心PUE不高于1.3;数据中心水资源利用效率(Water Usage Effectiveness, WUE)的比值不高于2.5 L/(kW·h)。在地区层面,北京、上海、广州等地相继发布了对数据中心改造的相关要求^[1]。

根据目前业界主流节能空调技术,结合中小型(标准机柜数 $\leq 3\ 000$ 个或主设备设计功率 $\leq 7\ 500$ kW)数据中心的应用场景。在中小型数据中心改造项目中可采用的技术有:空调室外机雾化冷却节能技术、风冷空调室外机湿膜冷却技术^[2]、氟泵多联循环自然冷却技术及机组^[3]、蒸发冷却式冷水机组^[4]、节能节水型冷却塔、机柜/热通道气流自适应优化技术、数据中心单相浸没式液冷技术^[5]、集成自然冷却供冷的风冷螺杆冷水机组、高效热管列间空调^[6]、直流变频行级/列间空调、直流变频模块化机柜空调、复合冷源热管冷却技术及空调、冷

板式液冷^[7]服务器散热系统。

在水冷冷水系统冷源侧可选择的技术有蒸发冷却式冷水机组、节能节水型冷却塔、集成自然冷却供冷的风冷螺杆冷水机组。

在冷却水系统的改造方面,若土建条件满足的条件下,蒸发冷却式冷水机组可替代原有冷却塔;若制冷机房空间位置足够的前提下,可搭配设置板式换热器,增加水系统利用自然冷却的措施。在室外湿球温度较低时,可利用蒸发冷却式冷水机组向末端供冷;随着室外湿球温度的增加,可采用蒸发冷却式冷水机组与制冷主机联合供冷;当室外湿球温度继续升高时,可利用蒸发冷却式冷水机组出水温度低于冷却塔的特点,降低制冷主机的能耗。

若土建条件不满足蒸发冷却式冷水机组的布置条件,可采用节能节水型冷却塔替换原有冷却塔,降低数据中心的PUE和WUE。若制冷机房空间位置足够的前提下,可搭配设置板式换热器,增加水系统利用自然冷却的措施。在室外湿球温度较低时,可利用冷却塔向末端供冷,也可利用蒸发冷却式冷水机组向末端供冷;随着室外湿球温度的增加,可采用冷却塔与制冷主机联合供冷;当室外湿球温度继续升高时,制冷主机向末端供冷。

针对冷冻水系统的改造,可采用集成自然冷却供冷的风冷螺杆冷水机组替代原有制冷主机,从而降低数据中心的PUE。

在风冷空调系统中,可采用空调室外机雾化冷却节能技术、风冷空调室外机湿膜冷却技术、氟泵多联循环自然冷却技术及机组、复合冷源热管冷却技术及空调。

若数据中心规模较小,且当原有风冷空调随着使用年限的增加,其制冷效果存在较大衰减的情况下,可将其替换为风冷氟泵空调,增加自然冷却利用的措施。同时可叠加蒸发冷却技术,如采用空调室外机雾化冷却节能技术和风冷空调室外机湿膜冷却技术。一方面,可延长设备利用自然冷却的时间,另一方面,可防止室外极端高温情况下,出现高温超压报警停机问题的出现。

若数据中心规模较大,且有充足的空间布置室外机,采用一拖多的技术形式,可采用氟泵多联循环自然冷却技术及机组和复合冷源热管冷却技术及空调,提升空调系统的能效,为进一步降低数据中心的 PUE 值,可在室外机的进风口处增设蒸发冷却功能段,如湿膜或喷雾,充分利用室外自然冷源。

在空调末端中,若单机柜功率从低功率变为中高功率,可将原有机房中的房间级空调更换为高效热管列间空调、直流变频行级/列间空调和直流变频模块化机柜空调,并根据空调末端匹配对应的气流组织形式。若仅有机房中的个别机柜更换为高功率机柜,可在更换后的高功率机柜处设置一拖一形式的直流变频模块化机柜空调,满足高功率机柜的散热需求。若新客户入驻后,不接受水进机房的情况,可将原有水冷列间更换为热管列间,同时在原有水管间中设置水氟换热器。

在气流组织中,可采用机柜/热通道气流自适应优化技术,通过优化机房内的气流组织形式,降低局部热点的产生^[8]。若原有机房通过改造满足当前智算需求的场景,若土建承重满足液冷机柜要求,则可采用数据中心浸没式液冷技术、数据中心单相浸没式液冷技术和冷板式液冷服务器散热系统满足液冷机柜的散热需求。单机柜 15~50 kW 可采用冷板式液冷服务器散热系统,单机柜 20~100 kW 可采用数据中心单相浸没式液冷技术满足液冷机柜散热需求。上述场景中,均需设置冷却塔或干冷器带走热量,在冷板式液冷中,还需增设风冷系统带走因存储等低热流元器件产生的约 10%~30%热量。同时可采用蒸发冷却式冷水机组作为单相浸没式液冷服务器和冷板式液冷服务器的散热冷源,若运维接受高温环境,则冷板式液冷服务的风冷系统的热量也可由蒸发冷却式冷水机组带走。

1 氟泵、热管及蒸发冷凝技术

1.1 房间/列间级(气泵/氟泵)改造

1.1.1 甘肃某电信数据中心改造项目

该项目位于甘肃陇南,设计 PUE \leq 1.3,在 2021 年 7 月竣工运营。项目前期超期服役空调 121 台,占比 44%,平均超期年限 5.76 年,超期服役空调,效能低下,不能充分利用自然冷源,能耗高,同时故障频发,影响网络安全。

后期对 4 个市州 25 台风冷空调进行节能改造,甘肃陇南全年气候比较温和,温度保持在 4~30 °C 之间。虽然在该气候条件下氟泵运行时间较短,但气动热管技术在该温区内可发挥很好的节能效益。该项目系统能效升级改造中配置了 25 套英维克 CyberMate 模块化气动热管-氟泵空调机组,实物如图 1 所示。



图 1 模块化气动热管-氟泵空调机组运用案例

经全年运行检验,应用段冷却系统制冷负载系数(Cooling Load Factor, CLF)低至 0.15,项目整体 PUE 在 1.25 以下。

1.1.2 无锡某电信改造项目

该电信数据中心位于无锡,设计 PUE \leq 1.3,2022 年 10 月开始竣工运营,项目初始设计采用房间级定速空调,无法利用自然冷源,能耗高。为响应国家双碳政策,需要对现有机房进行改造,更换设备,同时利用自然冷源制冷。

在该机房节能改造中利用英维克 12 台 40 kW 的 XRow040 列间气动热管-氟泵空调,具体应用案例如图 2 所示。无锡气候全年大部分时间温度分布在 5~25 °C,在该温区内气动热管与氟泵系统可以发挥出很好的节能效果,全年有 75%以上时间均运行在气动热管模式与氟泵模式下。



(a) 氟泵空调室内机 (b) 氟泵空调室外机
图 2 高效全变频气动热管-氟泵列间空调运用案例

通过改造后数据监测,经全年运行检验,改造后的数据中心全年 PUE 低于 1.25。

1.1.3 中国联通新疆乌鲁木齐开发区 IDC 改造项目

该项目位于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市头屯河区大连一街 2 号,改造范围是 IDC 机房的 1A 机房。本次改造为腾空后的机房设置 5 个热通道封闭的微模块,共计 144 个功率为 4 kW 的服务器机柜。IT 负载共计 576 kW。每个微模块设置 4 台(3 用 1 备)制冷量为 40 kW 的氟泵双循环列间空调,空调外机采用间接蒸发冷却水氟换热机组。建成后的数据机房空调制冷因子在 0.12 以下。PUE 可控制在 1.2 以下。



图 3 蒸发冷却水氟换热机组运用案例

图 3 所示为本次改造所用机组。本次改造方案通过引入间接蒸发冷却技术及氟泵技术,安全性和节能性同时得到保证,全年预计利用自然冷源时长 8 119 h,较传统风冷空调系统节能率 73%,局部能源使用效率(Partial PUE, PPUE)可降低至 1.2 左右,每年空调系统耗电量可减少 166.5 万 kW·h,相当于减少 CO₂ 排放 1 660 t,有助于推动落实“双碳”

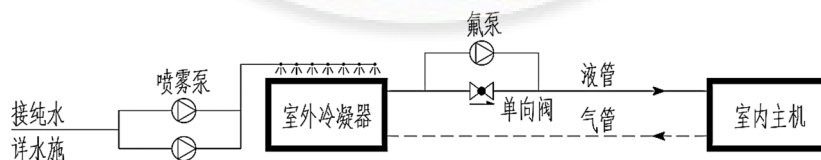


图 5 数据中心冷却系统原理

项目中于数据机房采用制冷量 120 kW、风量 24 400 m³/h 的全时自然冷却精密空调 132 套,在配电室采用制冷量 60 kW,风量 12 200 m³/h 的全时自然冷却精密空调 56 套,在电池室采用制冷量 17 kW,风量 4 300 m³/h 的机房精密空调 54 套。

精密空调通过 UPS 系统和柴油发电机,确保市电断电后的不间断运行。末端精密空调装备了由 UPS 保障的无级变速 EC 风机,可实现不间断运行。所有精密空调都配备双电源切换装置。

目标落地。

1.2 广州某数据中心分布式空调系统

1.2.1 项目概况

该数据中心项目位于广东省广州市天河区,如图 4 所示,总建筑面积 130 853 m²。设计算力机架约 2 600 架,设计算力负荷约为 18 MW,于 2022 年 9 月竣工。



图 4 数据中心整体效果图

1.2.2 冷却系统介绍

该改造项目冷却系统整体架构为分布式氟泵热管空调。机房空调系统采用风冷直膨式空调系统,每个房间单独设置空调,互不影响。对于负荷较大的房间,如模块机房和低压配电室,空调系统加带氟泵,形成风冷氟泵系统。在过渡季节和冬季,根据房间负荷的变化,降低压缩机的输出功率,并启用氟泵来为制冷剂提供足够的循环动力,以此达到节能的目的。同时在屋顶安装水喷雾系统,以供夏季或需要增强自然冷却时间时使用,该系统原理如图 5 所示。

1.2.3 运行测试结果及分析

(1) 综合性能系数(GCOP)

冷却系统综合性能系数和逐月运行性能如表 1、表 2 所示。数据表明,数据中心年均 PUE 为 1.29,年均综合性能系数(GCOPA)为 5.30,年均 IT 负载率为 36%。

(2) 月度平均数据趋势分析

2022 年 11 月—2023 年 10 月的月度耗电趋势和月度能效指标趋势如图 6 月度耗电趋势和图

7 月份能效指标趋势所示。数据中心投产后，随着业务量的增加，IT 负载率不断提高，耗电量逐渐增大，年均 PUE 为 1.29，年均 CLF 为 0.210。当气象参数满足条件时，开启喷淋，有效延长自然冷工作时长。在 6~9 月气温较高时，CLF 相应较大。

表 1 年度运行性能

参数	数值
设计 PUE	1.30
年均 PUE	1.29
年均 WUE	0.183
年均 PLF	0.064
GCOPA	5.14
年均 IT 负载率	36%

表 2 2023 年逐月运行性能

月份	GCOPI	PUE	CLF
11 月	4.17	1.35	0.261
12 月	6.14	1.25	0.175
1 月	6.43	1.24	0.167
2 月	7.13	1.22	0.150
3 月	6.74	1.23	0.159
4 月	6.74	1.23	0.159
5 月	6.74	1.23	0.159
6 月	6.14	1.25	0.175
7 月	5.85	1.26	0.184
8 月	4.06	1.36	0.269
9 月	3.98	1.37	0.275
10 月	3.96	1.38	0.278

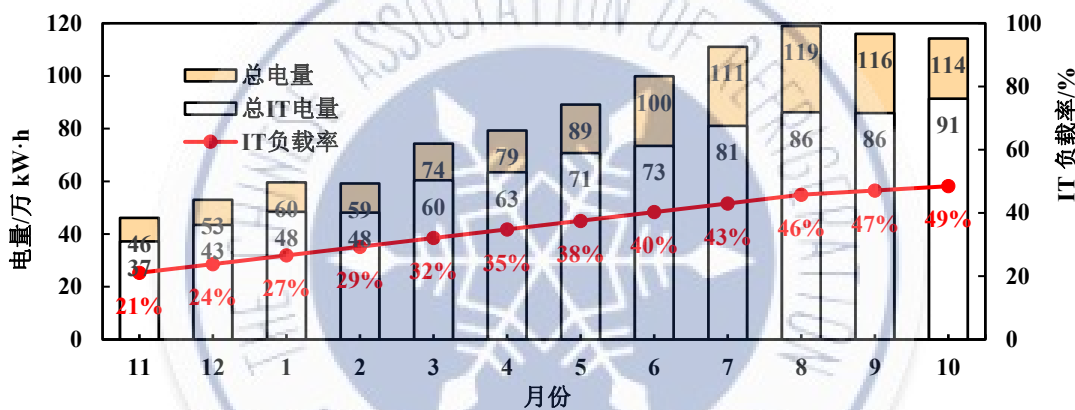


图 6 月度耗电趋势

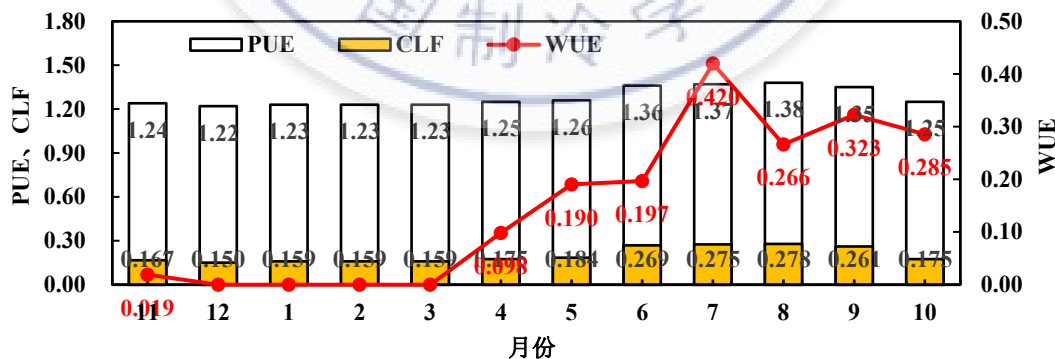


图 7 月份能效指标趋势

(3) 年度运行能耗、水耗数据

系统年度运行能耗、水耗数据如表 3 所示，年用电量 10 206 481 kW·h，其中 IT 设备用电量 7 897 239kW·h，年用水量 1 457 t。

1.3 磁悬浮多联改造

某云计算（定兴）中心改造项目位于河北省保

定市定兴县金台经济开发区，河北气候寒冷，自然冷源充足，设计 PUE ≤ 1.25，2021 年 4 月开始竣工运营，占地 135 亩，总建筑面积约 11 万 m²，计划直接基础建设投资约人民币 20 亿元，项目完成后，可承载超过 12 万台高性能 AI 服务。项目配置了 7 套复合多联热管冷却空调，如图 8 所示，单系统制冷量 300 kW。

表 3 年度运行能耗、水耗数据

参数	数值
总电量/(kW·h)	10 206 481
总 IT 电量/(kW·h)	7 897 239
总水量/t	1457
PUE	1.29
空调 CLF	0.210
WUE	0.183
IT 负载率/%	36
IT 功率/kW	907



图 8 X Mint 复合多联热管冷却空调运用案例

该项目改造采用复合多联热管冷却空调，室内末端采用热管背板空调系统，冬季及春秋季节大部分时间采用氟泵+蒸发冷凝制冷，夏季及春秋室外温度较高时采用无油气体动力泵+蒸发冷凝制冷，空调系统全年能效比大于 15，项目整体 PUE 在 1.2 以下。

1.4 北京某医院数据机房间级氟泵节能改造案例

1.4.1 项目概述

该数据中心位于北京市通州区，总建筑面积 105 m²，主要服务对象为医院患者，如图 9 所示。信息中心内布置有 24 个数据机柜，其中 9 个机柜内设备投入运行，其他机柜陆续投入运行。服务器和交换机等信息设备目前累计功率约 40 kW。另有 30 kVA 的 UPS 电源 2 台。机房内装有 2 台精密空调，单台空调耗电功率为 12 kW。



图 9 数据中心整体图

1.4.2 冷却系统介绍

该冷却系统整体架构原为 2 台精密空调，改造

之后增加了 1 套氟泵驱动热管自然冷却机组。精密空调末端形式为空调室内机，泵驱动热管自然冷却系统末端形式为换热机组的室内机，自然冷却系统采用地板下送风、上回风的送风方式，如图 10 所示。冷却系统主要设备有两台精密空调，制冷量为 40 kW；1 台氟泵驱动热管自然冷却机组，换热量为 80 kW。信息机房为恒温恒湿机房，室内温度为 25 °C，为了保证电子信息设备工作所需的适宜环境的需求，信息中心内的空调需全天 24 小时、全年 365 天全部开启运行，使机房空调能耗较高。当室内温度为 25 °C，且室外内外温差大于等于 10 °C 时，启动自然冷却系统，替代机房空调为数据中心降温。

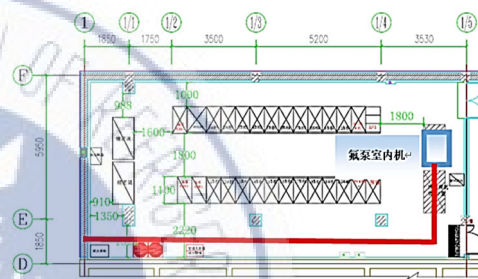


图 10 机房内冷却系统末端

1.4.3 项目总结

该项目较早采用氟泵驱动热管自然冷却技术，增加 1 套氟泵机组，利用室外自然冷源为数据中心降温，仅消耗较少电能，将液态工质均匀输送各处室内机组末端，改善整体运行和排热性能，提高整体系统的可靠性。

在医院类型小型的数据中心中采用自然冷却系统，结构紧凑、效率高，经中国制冷学会第三方检测鉴定，技术总体达到国际先进水平，机组在工况：室内温度 25 °C，室外温度 15 °C，室内外相对湿度 45% 时，能效比不低于 6。

同时，机组采用分离式机组布置，现场连接灵活，安装形式多样，特别适用于信息机房的复杂安装条件，安装牢固，连接可靠无泄漏。增加了电量分项计量，可以对耗电量进行监测计量。根据用户实际需求，可将自然冷却机组与现有精密空调两个独立模块实现梯级协同调控，并与环境监控连接。

该项目制冷系统在室外温度为 -2.6 °C、室内温度为 21.7 °C 条件下，机组实测的能效比达到 7.18。实测及分析结果表明，改造前后机房年总节电率达到 36.9%。自然冷却技术显然是能够取得较高能效

的适宜节能技术，应充分利用自然冷源，尽可能延长自然冷却时间，减少机械式制冷设备的使用时间。

1.5 中国电信苏州科技城数据中心

1.5.1 项目简介

苏州科技城数据中心位于江苏省苏州市，总建筑面积 6 000 m²，主要服务对象为 IDC 互联网企业租用客户，如图 11 所示。该项目建设初期采用国标 A 级数据中心标准进行建设。设计算力机架 605 架，初始设计算力负荷 3 000 kW。经过节能改造后，PUE 可达 1.27。



图 11 数据中心整体图

1.5.2 冷却系统介绍

本项目应用方案集成了蒸发冷凝热管多联技术与变频智能氟泵技术，如图 12 所示。根据数据中心现有机房条件与制冷架构，使绿色节能新技术创新应用于运行数据中心，同时利用空调智能控制平台，根据室外环境温度变化，自动切换空调系统运行模式，大大延长了自然冷源的利用时间，空调全年综合能效比可达 17~20 以上。

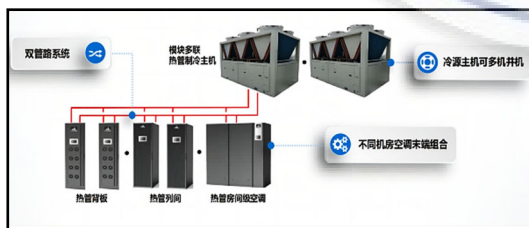


图 12 数据中心冷却系统原理

机房冷却系统末端形式为变频热管房级空调，如图 13 所示。

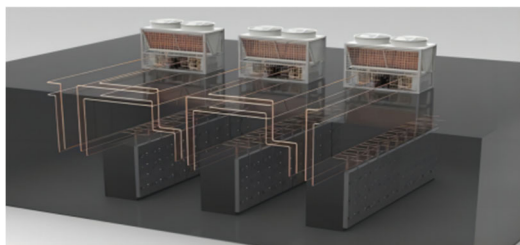


图 13 机房内冷却系统末端

冷却系统设备参数如表 4 所示。运行控制策略：蒸发冷凝复合热管多联空调系统，当室外湿球温度大于 18 °C 时，开启压缩制冷模式；室外湿球温度范围在 10~18 °C 时，压缩机变频热管循环为主，补充机械制冷循环；当室外湿球温度在 0~10 °C 时，压缩机停止工作，热管循环承担全部负荷。

表 4 冷却系统主要设备

设备名称	参数	单 数 位 量
模块热管房 间空调	制冷量≥80 kW，风量 ≥24 500 m ³ /h，宽×厚×高 2 250×1 000×2 000 mm，下送风。	台 10
模块多联蒸 发冷凝 空调主机	名义制冷量≥320 kW，制冷额定功 率≤95 kW；自然冷源模式名义制冷 量≥304 kW，制冷额定功率≤12.9。	台 2

1.5.3 运行测试结果及分析

改造后的空调系统自带监控系统，可以根据环境参数变化结合末端负载情况，自动切换空调系统运行模式。在老旧机房内替换原有老旧空调，更换为热管多联蒸发冷凝主机，空调全年能效比 17~20 之间，使得在苏州地区数据中心改造 PUE 达到 1.27，如图 14 所示。

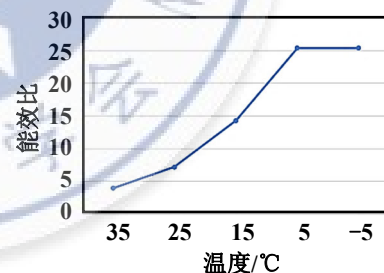


图 14 蒸发冷凝复合热管空调能效比随温度的变化

1.6 中国电信上海公司东区局数据机房空调改造

中国电信上海公司东区局数据机房位于上海市杨浦区，总建筑面积 3 000 m²，建设标准为 B 级。根据改造方案其空调系统改造后实现空调节点不少于 30%。该项目冷却系统整体架构为蒸发冷凝式。共采用 9 台，单台制冷量 35 kW。

该项目日常维护以半年为周期，每半年一次维护保养，清洗冷凝器，集水器排污清洗。室外温度高于 12 °C 时，利用高效的蒸发冷凝方式；室外温度低于 12 °C 时，关闭冷却水系统，利用风冷可满足换热效果，节省用水，且避免冬季冷凝系统被冻。

经过测试，该项目月度平均用电量如表 5 所示。

表5 项目改造后空调用电量

机号	2021 年度						2022 年度					
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1	190	221	207	218	220	143	92	83	81	124	50	49
2	89	158	110	137	134	128	187	190	180	99	171	191
3	206	81	189	193	237	130	68	80	69	72	60	133
4	128	160	119	123	106	87	114	95	88	114	177	192
5	208	177	179	186	186	162	201	211	205	202	200	150
6	192	177	159	137	141	92	71	69	65	50	52	76
7	188	157	126	153	133	137	168	187	178	175	173	199
8	188	202	172	183	184	157	184	176	173	174	181	163
9	44	109	193	194	194	136	127	106	89	125	157	162
单台单日平均用电/(kW·h)	159	160	162	169	171	130	135	133	125	126	136	146
单日总用电/(kW·h)	1 433	1 442	1 454	1 524	1 535	1 172	1 215	1 197	1 128	1 009	1 221	1 315

由于改造前的用电数据选取为2020年11月至2021年4月,因此选取2021年11月至2022年3月空调系统日平均用电量数据作为改造后空调系统用电量。改造前平均单台设备每日耗电量为246 kW·h,通过改造,可降低至133 kW·h,节能率在45.93%左右。

2 蒸发冷却技术

2.1 利用蒸发冷却技术进行节能改造

2.1.1 中国电信内蒙古分公司(存续)赤峰分公司新大楼机房空调间接蒸发节能改造项目

该项目位于内蒙古自治区赤峰市松山区天义路23号。本次改造范围主要为二楼、三楼机房,涉及改造的有二楼UPS室,三楼IDC机房、三楼数据机房、三楼传输机房、三楼电池室。在该项目中采用间接蒸发冷却冷水技术,对二楼UPS室,三楼IDC机房、三楼数据机房、三楼传输机房、三楼电池室等机房的空调进行节能改造。

项目设备方面选用了一台360 kW间接蒸发冷却一体化冷站(含配套控制柜、控制系统、13台40 kW的高效冷冻水末端空调等),同时对三楼传输机房、数据机房、IDC机房内符合改造要求的整列机柜进行冷热通道隔离改造。

项目完工后对项目改造成功进行测试,经测试,6月的平均制冷因子为0.25,在40℃高温时的单日制冷因子为0.27,根据赤峰近年来天气特色测算自然冷却时长可达时长7 161 h,占全年81.75%,一

体化冷站内压缩机参与制冷时长1 599 h,占全年18.25%。全年制冷因子可达0.2以下。

2.1.2 高海拔地区数据中心直接蒸发冷却与余热回收项目

(1) 项目概述

西藏宁算科技集团有限公司、美的楼宇科技、西安工程大学蒸发冷却科研团队通力合作,共同打造行业首创的数据中心“碳中和”创新方案。

本项目建设地点为拉萨市吗,建筑主体为二层,主要功能为数据中心及附属的配套用房。建筑高度为15.8 m。结构形式为钢筋混凝土架,抗震设防烈度为八度。生产火灾危险性为丙类,生产火灾危险性为丙类,建筑的耐火等级为一级,如图15所示。



(a) 宁算数据中心



(b) 直接蒸发冷却模块化机组

图15 宁算数据中心与数据中心专用高效预制集成式热回收直接蒸发冷却模块化机组

(2) 冷却系统介绍

宁算数据中心所采用的热回收直接蒸发冷却方案，针对拉萨地区主要为高原温带半干旱季风气候类型，具有典型的空气洁净、低温干燥、气温年变化小、水资源丰富的特点，采用行业领先的美的数据中心专用高效预制集成式热回收直接蒸发冷却模块化机组，通过高效自然蒸发冷却技术对数据中心冷却降温，实现全年自然冷却，PUE 最低可达 1.08，大大降低数据中心能耗^[9]。

与此同时，数据中心余热由数据中心专用高效预制集成式热回收直接蒸发冷却模块化机组进行回收，经过水源热泵将热量进一步转化为可被使用的高温热水，实现为生态农业供热或空间供暖，达到抵消碳排放的效果，实现相对的“零碳排放”，如图 16 所示。

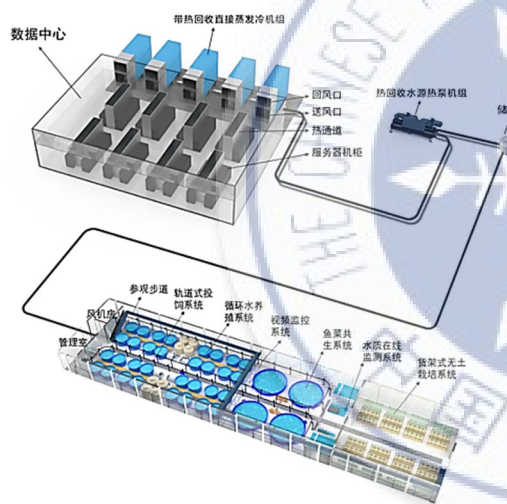


图 16 项目系统

宁算数据中心的热回收直接蒸发冷却方案充分利用了自然冷源，极大地降低了数据中心的 PUE。蒸发冷却空调系统与热回收系统相结合，将数据中心回风的余热进行回收，在满足数据中心制冷要求的前提下，同时满足了农业养殖区所需热量，将数据机房排放的“废热”变废为宝，极大地节省了数据中心和养殖区正常运维电费，与传统方案相比，节能性和经济性效果显著。

相比传统的直接蒸发或间接蒸发冷方案，宁算数据中心的热回收直接蒸发冷却方案，因地制宜地将高效自然蒸发冷却技术及热回收技术相结合，充分提高可再生能源及余热的利用效率，打造了多产业融合的绿色数据生态综合体。

由图 17 中可知：室外新风送入蒸发冷却空调机组，与室内回风进行混合，经过滤处理后再经过蒸发冷却填料段进行等焓降温处理到 24℃，再通过弥散送风的形式送入数据中心内部环境。

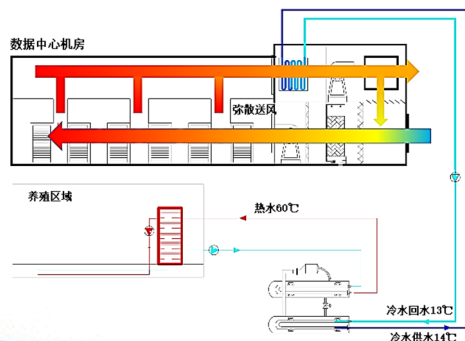


图 17 系统结构

室内回风通过热回收盘管将热量传递给水源热泵，通过水源热泵将蓄水罐的回水加热，水源热泵将热水送入蓄水罐与养殖区的回水进行热交换，将养殖区回水升温至 42℃，再次送入养殖区，满足养殖所需热量。

与此同时，数据中心回风余热升温后不仅可以用于养殖鱼池，同时可以供应给办公楼、居民楼，以供地板辐射采暖所用。低温热水地板辐射采暖系统对水温要求较低、辐射面大、供热均匀，在营造舒适空间温度环境的同时也可以极大降低建筑冬季采暖能耗。通过本项目可以实现冷热自产自自，将节能、绿色的理念带入数据中心中来。

(3) 测试结果及分析

本项目利用室外空气中自然冷和蒸发冷却系统对数据中心内部环境进行降温，同时采用热回收盘管对数据中心热回风进行热回收和预冷。

针对空调系统的节能性进行综合分析：二期工程中，东侧模块机房冷负荷 7 854 kW，拟采用 38 台直接蒸发冷却空调机组；而西侧模块机房与变电所冷负荷 10 699 kW，计划使用 50 台间接蒸发冷却空调机组。在相同情况下若采用风冷直膨空调则需布置 88 台。实测结果显示：直接蒸发冷却空调机组功率在 12.7~19.3 kW，而间接蒸发冷却空调机组功率则在 21~45.3 kW，风冷直膨变频空调功率可达 70 kW。根据藏区当地电价对以上两类系统进行运行电费对比，对比结果如表 6 所示。

经对比分析，二期工程采用蒸发冷却空调系统有显著的节能优势，利用蒸发冷却空调系统全年可

减少耗电量 3 766 万 kW·h，减少运行电费 2 221.9 万元，其中直接蒸发冷却空调机组节电率高达 79.32%。针对余热回收系统的节能性进行综合分析，其运行费用对比结果分别如表 7 和表 8 所示。

表 6 不同空调系统运行费用对比

名称	数量/台	工作模式	功率/kW	全年工作时长/h (总占比)	全年耗电量/(kW·h)	运行电费/ (万元)	合计费用/ 万元
直接蒸发冷却空调	38	蒸发冷却	19.3	2 358 (27%)	1 729 788.4	1 020 575.2	2 839 681.2
		直接混合+直接新风	12.7	6 402 (73%)	3 083 230.6	1 819 106.0	
间接蒸发冷却空调	50	干模式	21.0	4 980 (56%)	5 229 000.0	3 085 110.0	5 851 392.3
		湿模式	28.0	3 335 (38%)	4 669 000.0	2 754 710.0	
		混合模式	45.3	433 (4%)	19 614.9	11 572.8	
风冷直膨变频空调	88	机械制冷	70.0	8 760 (100%)	53 961 600	31 837 344	31 837 344

表 7 水源热泵与电加热器节能性对比

名称	功率/kW	台数/台	制热量/kW	全年耗电量/(kW·h)	电费/(万元/年)
水源热泵	125	3	2 250	3 285 000	193.8
电加热器	295	8	2 159.0	20 673 600.0	1 240.4

表 8 其他加热方式节能性对比

对比项目	燃料消耗量/(kg/h)	制热量/(kW/h)	全年燃料耗费/(t/年)	燃料费用/(万元/年)
燃煤锅炉	412.4	2 159.0	3 609.1	433.1
燃油锅炉	181.9	2 159.0	1 593.4	1 577.4
燃气锅炉	166.4	2 159.0	1 889.5	1 403.9

表 9 碳排放对比

名称	碳排放/t	碳排放成本/元
直接蒸发冷却空调	3 754.2	646 848.66
间接蒸发冷却空调	8 961.6	1 544 083.68
风冷直膨变频空调	42 090.0	7 252 107
水源热泵	2 562.3	441 484.29
电加热器	9 675.1	1 667 019.73
燃煤锅炉	9 383.7	1 616 811.51
燃油锅炉	4 616.5	795 422.95
燃气锅炉	3 830.9	660 064.07

2.2 间接蒸发冷却冷水机组

2.2.1 深圳百旺信云数据中心冷却系统

深圳百旺信云数据中心冷却系统采用间接蒸发冷却预冷一体化架构，系统由露点型间接蒸发冷却塔、离心式冷水机组、冷冻/冷却泵、板式换热器、末端空调及其他辅助设施组成，如图 18 所示，设备包括：离心式冷水机组（6 台）、露点型间接蒸发冷却塔（20 台）、板式换热器（20 台）、冷冻水循环泵（8 台）、冷却水循环泵（8 台）、蓄冷水罐（2 套）、定压补水装置（1 套）、软水器、软水箱（2 套）等。

根据计算结果可知：水源热泵热回收供暖方案具有极大的投资优势，整体费用可节省 56.8%。针对碳排放及其成本进行对比，中国碳排放每吨成本为 172.3 元，说明每降低 1 t 二氧化碳排放可以节省 172.3 元。关于不同制热方式碳排放方面，消耗 1 kW·h 电产生 CO₂ 约 0.000 78 t，燃烧 1 t 煤炭约产生 2.6 t 的 CO₂，燃烧 1 t 汽油约产生 2.89 t 的 CO₂，燃烧 1 t 天然气约产生 2.03 t 的 CO₂。

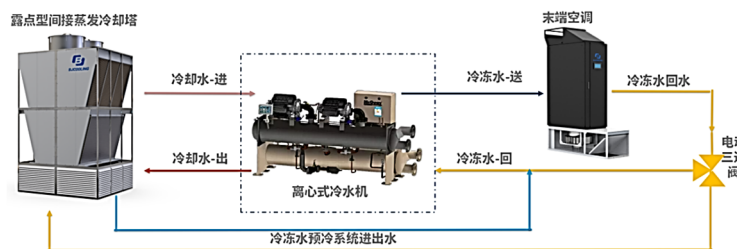


图 18 冷却系统架构

冷却系统根据气候条件有三种运行工况，分别是夏季冷机独立供冷的完全机械制冷模式、预冷时

露点型间接蒸发冷却塔+板换+离心式冷水机组联合供冷的部分自然冷源模式、冬季板换+冷却塔的

完全自然冷源模式，全年自然冷源利用时间超过 4 000 h，较常规冷冻水系统提升能效 40%以上。

夏季模式：如图 19 所示，当环境露点温度+4 °C \geq 冷却塔出水设定温度 (22 °C)+2 °C 时，冷却塔冷却水的三通阀切换到冷却水直接去冷水机的通道，冷却水在冷水机的冷凝器做完热交换后，高温冷却水回到冷却塔；同时冷冻水的三通阀切换到冷冻水直接去冷水机的通道，冷冻水在冷水机的蒸发器做完热交换后，低温冷冻水送到机房供末端空调使用。

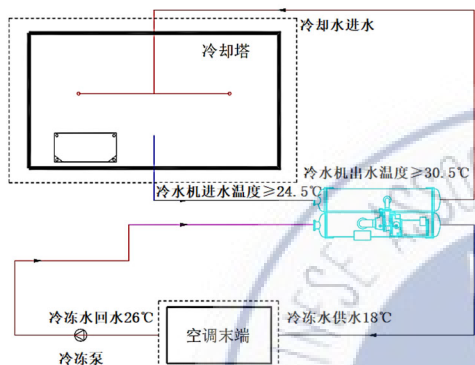


图 19 夏季模式系统运行原理

预冷模式：如图 20 所示，冷却塔出水设定温度 (18 °C) < 当环境露点温度+4 °C < 设定温度上限 (22 °C)，冷却塔冷却水的三通阀切换到冷却水去板换的通道，冷却塔经过板换后直接进冷塔的三通阀关闭，冷却水经过板换进行一部分换热后，再进入冷机冷凝器进行热交换，热交换后的高温冷却水回到冷却塔；冷冻水的三通阀切换到冷冻水去板换通道，冷冻水先在板换和冷却水进行部分热交换，热交换后的低温冷冻水送到机房供末端空调使用。

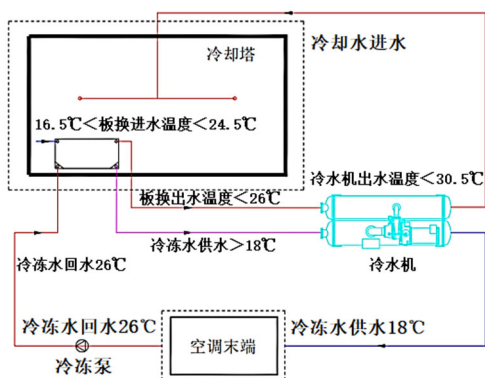


图 20 预冷模式系统运行原理

冬季模式：如图 21 所示，当环境露点温度低于冷却塔出水设定温度 (18 °C)+2 °C 时，冷却塔冷却

水的三通阀保持直接到板换的通道不切换，打开冷却塔冷却水经过板换后直接去冷却塔进水通道，冷却水在板换和冷冻水做完热交换后，高温冷却水直接回到冷却塔；同时冷冻水的三通阀切换到冷冻水去板换通道，冷冻水在板换和低温冷却水做完热交换后经过冷机后回到机房，但此时冷机不开启。

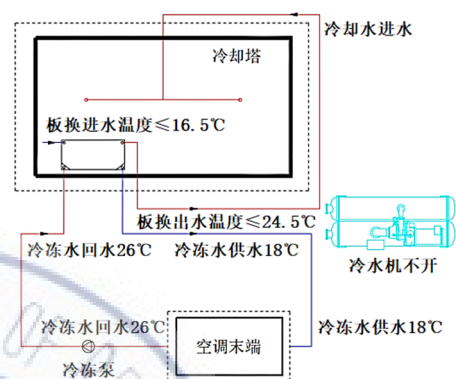


图 21 冬季模式系统运行图

2.2.2 浙江电信温州安阳局机楼间接蒸发冷却冷水节能系统改造

该项目位于浙江省温州市瑞安市隆山东路 495 号，本次改造范围主要为 4 楼、5 楼和 17 楼机房。项目原空调系统采用风冷精密空调（无氟泵），系统运行时间较长，能耗较高。对该数据中心采用间接蒸发冷却节能技术，对机房空调进行节能改造，利用间接复合直接蒸发冷却技术充分利用自然冷源，有效提高空调系统能效，降低空调系统运行能耗，改造完成后机房 PUE 降至 1.35 以下。

改造中选用 1 台 280 kW 间接蒸发冷却一体化冷站（含间接蒸发冷却冷水机组、螺杆式冷水机组、水泵、板换，以及配套控制柜、控制系统等），7 台 50 kW 冷冻水精密空调，2 台 50 kW 变频氟泵空调，1 套冷冻水管路，配套供电及控制系统。同时，对 4 楼、5 楼冷通道封闭改造，优化原机房气流组织，如图 22 所示。



图 22 项目现场

本次改造方案通过引入间接蒸发冷却技术及氟泵技术,安全性,节能性同时得到保证,全年预计利用自然冷源时长 5 600 h (含混合制冷),空调系统节能率 65%, PPUE 可降低至 1.269, 每年空调系统耗电量可减少 109.47 kW·h, 相当于减少 CO₂ 排放 933 t 有助于推动落实“双碳”目标落地。

2.2.3 北京电信瀛海数据(算力)中心系统改造

(1) 项目概述

北京电信瀛海数据(算力)中心位于北京市经济技术开发区内,是中国电信“2+4+31+X”云资源布局中的重要节点,如图 23 所示。该数据中心在 2016 年建设完成并投入运行,建筑面积 8.5 万 m²,共设置 1.2 万架数据机柜。通过采用余热回收、蓄冷等多项节能环保技术,通过完善的新风系统、雨水回收系统、自然冷源系统以及众多环保材料的应用,该数据中心设计 PUE 控制在 1.4 以下。



图 23 数据中心现场

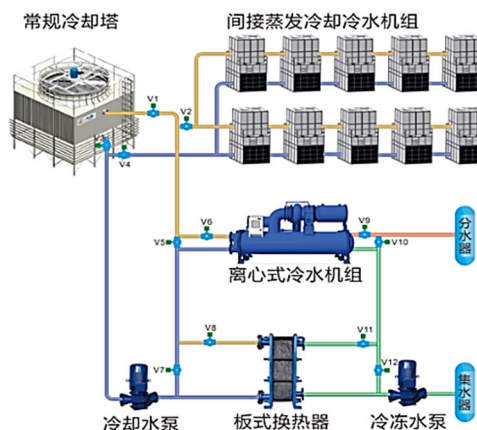
本项目一期工程于 2015 年完工并正式开始运行。该数据中心空调机房位于地下 3 层,规划有 6 300 kW 高压离心式冷水机组共 9 台,系统整体采用集中式冷水机组作为冷源、搭配房间级空调末端在冬季,通过板式换热器和冷却塔,充分利用自然冷源。目前,该项目 IT 总负荷为 3 150 kW,前期已投入运行 3 台机组,两用一备,实际机房年均 PUE 为 1.4。为满足政策要求,需要对该数据中心进行节能改造,降低 PUE。

(2) 冷却系统介绍

由于该项目位于北京地区,全年平均气温较低,结合项目实际情况,为充分利用自然冷源,降低冷却系统耗能,故采用间接蒸发冷却技术对一期机房实施节能改造。

改造过程中,由于该数据中心楼顶室外平台有较为充裕的空气,故增设 10 台(9 用 1 备)单机制冷量 40 kW 的间接蒸发冷却冷水机组并联接入原有

空调系统,如图 24 所示。



(a) 系统原理



(b) 间接蒸发冷却冷水机组

图 24 节能改造后系统原理与机组实物

系统改造后,根据室外湿球温度的不同,系统可实现不同的运行模式。当室外湿球温度低于 14 °C 时,采用自然冷却模式,利用间接蒸发冷却冷水机组通过板式换热器为机房供冷。当湿球温度在 14~18 °C 时,采用自然冷却与机械制冷相结合的模式,通过自然冷却预冷处理降低机械制冷的能耗。当湿球温度高于 18 °C 时,完全切换至机械制冷模式。此时,间接蒸发冷却冷水机组制取低温冷水协助机械制冷,降低冷凝温度,提升系统的能效。

(3) 运行测试及结果分析

依据该项目上半年运行能耗数据以及下半年能耗预测进行分析,该系统全年共耗电约 287.0 万 kW·h,具体数据如表 10 所示。

表 11 所示为改造前后系统运行能耗数据对比。系统改造后年节电约 323 万 kW·h。按照当前该数据中心执行的北京市大工业用电平均电价 0.74 元/(kW·h)计算,折合节省电费 240 万元,制冷因子下降 0.12, 年均 PUE 可降至 1.28^[10]。

表 10 间接蒸发冷却系统三种运行模式耗电量汇总

项目	设备名称	平均运行功率/kW	运行数量/台	运行时间/h	全年总用电量 /万 kW·h
完全自然冷却模式	机械制冷主机	0	0	0	0
	蒸发冷却机组	20	9	5 638	101.5
	合计 1	—	—	—	101.5
自然冷却+机械制冷复合模式	机械制冷主机	380	1	1 332	50.9
	蒸发冷却机组	25	9	1 332	30.0
	合计 2	—	—	—	80.9
机械制冷模式	机械制冷主机	440	1	1 790	78.8
	蒸发冷却机组	16	9	1 790	25.8
	合计 3	—	—	—	104.6
合计 (合计 1+合计 2+合计 3)		—	—	—	287.0

表 11 改造前后节电量及节省的电费

参数指标	改造前	改造后
IT 负载/kW	3 150	3 150
制冷主机+冷却塔/蒸发冷水机组 年耗电量/(万 kW·h)	610	287
制冷主机+冷却塔/蒸发冷水机组 制冷因子	0.22	0.10
节电量	—	323
节省电费/万元	—	240



图 25 浸没式液冷机柜

3 液冷技术

3.1 项目介绍

本示范工程机房位于上海市长宁区新华路电信机房，机房内液冷设备占地 12 m²，年均 GCOPA 为 8.33，主要服务对象为电信传输通信业务，如图 25 所示。机房初始设计采用 2N 架构，采用液冷系统，运行功耗为 5GCU/DU40 台约 40 kW，年均 PUE≤1.18。

3.2 冷却系统原理

项目所采用的液冷系统主要由浸没式液冷机柜、循环液泵柜、室外散热系统（干冷器）三个部分构成，如图 26 所示。机柜中绝缘液与室外换热器中的氟利昂（R410A）进行热交换，从而降低液冷机柜中的液体运行温度，最后通过干冷器将氟利昂的热量散到室外环境中。单台液冷机柜的 IT 设备散热功率考虑 10 kW，室内机柜中的冷却液运行温度根据室外不同干球温度设定为 40~45 °C，机柜内循环液的最高温度控制在 45 °C 以下。

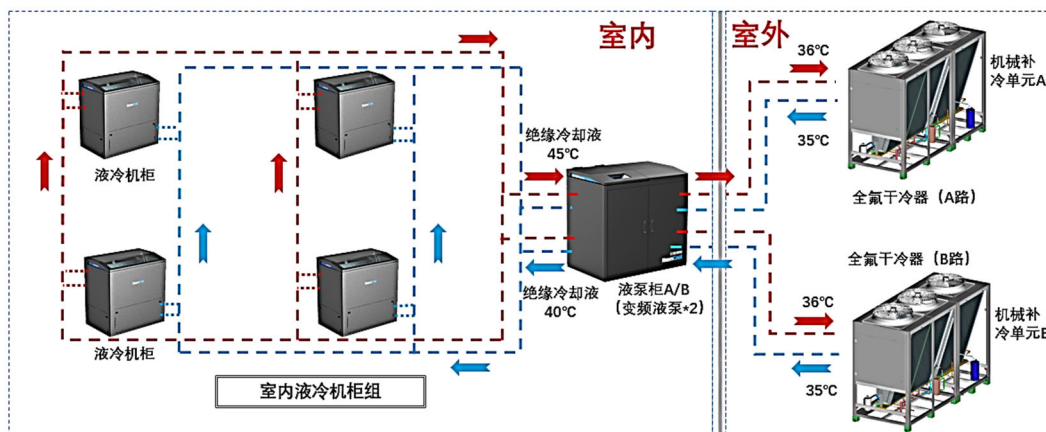


图 26 系统架构

同时,考虑到机房的可靠性,本项目液冷系统共设计了A、B两套独立并带兼容功能的散热系统,两套散热系统均可承担液冷机柜全部散热负荷。日常运行时,A、B两套散热系统只有其中一套日常运行,承担全部散热负荷。当其中一套散热系统发生故障时,系统散热可自动切换至另一套散热系统,并由其承担全部散热负荷。

本项目采用的浸没式液冷机柜主要用于承载IT设备和冷却液,可将IT设备浸没其中,为IT设备提供可靠、高效的冷却环境,如图27所示。表12所示为浸没式液冷机柜的主要规格参数。



图 27 液冷机柜

本项目采用的循环液泵柜内置循环液泵以及换热器,用于冷却循环驱动及热交换,如图28所示。循环液泵柜的主要规格参数,如表13所示。本



图 28 循环液泵柜



图 29 室外散热系统整体效果

项目室外散热系统主要由全氟干冷器及机械补冷单元组成,如图29所示。室外散热循环管道采用DN25铜管(气态介质)及DN19铜管(液态介质)。室外散热系统的主要规格参数,如表14所示。

表 12 浸没式液冷机柜的主要规格参数

项目	规格
型号	KCS-020
容量	20U
适配	华为 5900、中兴 V9200
外观尺寸	1 200 mm×800 mm×1 200 mm (长×宽×高)
液池容积	1 016 mm×456 mm×900 mm (长×宽×高)
可承载热功率	≥10kW
冷却液运行温度	40~45 °C (出液温度 45 °C, 回液温度 40 °C)
IT 设备功率	10 kW
电源冗余	双路输入
电源制式	380/400/415VAC, 50/60 Hz, 3Ph+N+PE
机房净高要求	≥3.0 m
机房承重	≥6 kN/m ² (安装散力架)
循环冷却液接口	DN40 接口
冷却系统	安装于室外

表 13 室内循环液泵柜的主要规格参数

序号	项目	参数	备注
1	柜体尺寸	1 200 mm×1 600 mm×1 150 mm	长×宽×高
2	液体循环泵	流量 20 m ³ /h; 扬程 25 m; 最大功率 3 kW	内置循环液泵
3	动力配电	380 V	本柜内含液泵配电及室外设备配电
4	设备噪声	45~55 db(A)	循环液泵柜运行噪声

表 14 室内散热系统的主要规格参数

类型	全氟型干冷器
额定制冷量/kW	42
机械补冷量/kW	20
主电源	380 V, 3~50 Hz
机组额定功率/kW	4.55
机组最大功率/kW	12.21
液侧管/mm	19.00
气侧管/mm	25.00
机组宽度/mm	3 000
机组深度/mm	1 200
机组高度/mm	2 250
净重/kg	780

该项目系统整体控制策略为双路冗余设计，正常运行时只运行 A 路或 B 路系统，即可满足液冷机柜负荷需求。液冷散热系统分两路循环，分别是液路循环和氟路循环，如图 30 所示。液路循环主要是将 45 °C 的冷却液输配到换热器中进行热交换，热交换后变成 40 °C 的冷却液流回液冷机柜不断地吸收热量。氟路循环的换热工质为 R410A。当室外温度低于 25 °C 时，系统采用自然冷却模式，氟利昂（冷却介质）以 35 °C 液态形式进入换热器进行热交换，吸收热量后氟利昂会发生相变，由液态变成气态，过热气体进入干冷器后进行冷凝放热，重新变成液冷的氟利昂，然后持续不断地进入换热器进行热交换。当室外温度高于 25 °C 时，系统开启机械补冷模式，补充系统额外所需冷量。

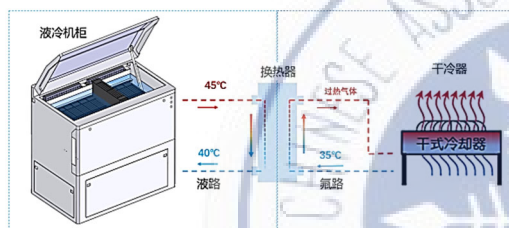


图 30 系统循环原理

3.3 运行测试结果及分析

通过实测分析，该项目冷却系统综合性能系数（GCOP）和逐月运行性能如表 15 和表 16 所示。机房 GCOPA 为 8.570，测试结果为一级能效等级。

从 2022 年 6 月至 2023 年 6 月的性能如表 16 所示，年均 PUE 为 1.175，年均 GCOPA 为 8.57，年均 IT 负载率为 95%。

表 15 年度运行性能

参数	数值
设计 PUE	1.18
年均 PUE	1.175
年均 WUE	0
年均 PLF	0.050
GCOPA	8.570
年均冷站 CLF	0.125
年均 IT 负载率/%	95

同时，通过分析测试数据，如图 31 所示，随着室外温度的逐渐升高/降低，PUE 数值将随着气温逐渐升高/降低，由此可以得出机房的逐月 PUE 情况与外部环境温度存在较大的关联性。通过分析可知，由于室外冷源采用自然冷却方式，这种方式受室外

温度条件影响较大，故上述波动趋势与气温变化趋势基本吻合。

表 16 逐月运行性能

月份	GCOP	PUE	CLF
1	12.66	1.129	0.079
2	11.36	1.138	0.088
3	10.20	1.148	0.098
4	8.26	1.171	0.121
5	7.04	1.192	0.142
6	6.76	1.198	0.148
7	5.71	1.225	0.175
8	5.95	1.218	0.168
9	6.94	1.194	0.144
10	7.41	1.185	0.135
11	8.77	1.164	0.114
12	11.76	1.135	0.085

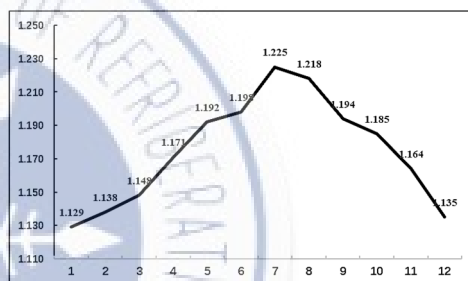


图 31 机房逐月 PUE 数据分析

4 液泵驱动两相机柜背板技术

4.1 项目介绍

九江电信云计算大数据中心位于江西省九江市濂溪区九瑞大道 90 号电信大楼 3 楼，总建筑面积 245 m²，如图 32 所示。该数据中心按 B 级数据中心标准进行建设，设计算力负荷约 20 kW。原有年均 GCOPA 为 1.92，设计 PUE 为 1.7。经两相液冷节能改造后 GCOPA 为 6.05，PUE 为 1.3。

4.2 冷却系统介绍

(1) 冷却系统架构

该项目冷却系统整体架构为两相液冷背部换热模块+室外散热端（冷机+干冷器）+泵驱两相液冷环路，如图 33 所示。两相液冷散热方案对第一列的前 10 个机柜进行了全面的散热改造。房间内 IT 设备的热量以及房间的热负荷全部由改造后机柜的两相液冷背部换热模块带走。室外冷机和干冷器根据不同室外环境温度由自控系统控制启停和工作频率，实现最大限度利用自然冷源的目的。

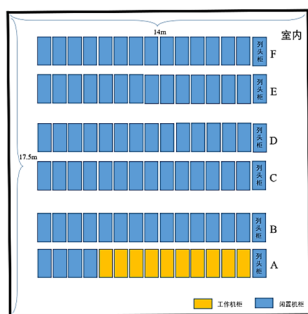


图 32 数据中心整体

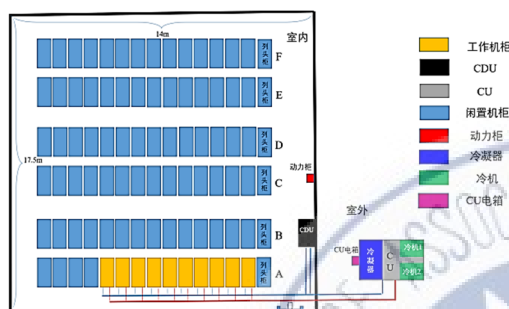


图 33 冷却系统架构

(2) 末端

机房内的冷却系统末端形式为两相液冷背部换热模块。制冷剂通过 CDU 分配到每个两相液冷背部换热模块，液相制冷剂在换热模块内部吸热汽化，而高温空气放热后温度降低被排出机柜，机房内温度因此维持在设定温度 27 °C 左右。

(3) 系统控制逻辑

冷却系统由 PLC 自控系统控制运行，可通过室外温度的变化，自动切换模式。控制系统内置三种运行模式，即低温工况、高温工况和混合工况。PLC 主机可通过远程交互数据和操作，CDU 显示屏可对系统运行参数进行实时显示。该系统通过监测和调节关键参数来实现最佳的散热性能。本系统控制逻辑通过对温度传感器、泵、关键散热设备和各种监测参数的集成，实现了自动化的散热控制。

(4) 冷却系统设备参数

表 17 所示为冷却系统主要设备参数。

表 17 冷却系统主要设备参数

设备名称	参数	数量	备注
两相液冷背板换热模块	质量 50 kg; 额定换热热量 3 kW; 额定功率 90 W; 额定风量 1 500 m ³ /h	10	安装于机柜后方，负责对每个机柜分别进行定点散热。
冷量分配模块	质量 350 kg; 额定功率 0.5 kW	1	负责分配背板散热模块的冷量，并兼总体监控工作。
干冷器	质量 250 kg; 额定功率 1 kW; 额定散热量 20 kW	1	安装在室外，使用 EC 风机，低温工况启动。
冷机	质量 110 kg; 额定功率 6 kW; 额定散热量 20 kW	2	安装在室外，使用高效变频压缩机，一用一备，在高温工况时启动。

4.3 运行测试结果及分析

(1) 综合性能系数 (GCOP)

系统综合性能系数 (GCOP) 和逐月运行性能如表 18 和表 19 所示。其中年均 PUE 为 1.33，年均 GCOPA 为 12.25，年均 IT 负载率为 60%。

(2) 月度平均数据趋势分析

图 34 和图 35 显示出月度 PUE 与月度 GCOP 均随着室外环境温度的变化而变化。在温度低的月份，比如 12 月、1 月、2 月，系统室外侧仅通过干冷器散热，系统月度 PUE 较低，月度 GCOP 较高，存在月度最低 PUE 和最高 GCOP。在温度中等的月份，比如 3 月、4 月、5 月、9 月、10 月和 11 月，昼夜温差大，系统在室外环境温度较高的情况下，需开启制冷机，制冷机低频工作，与干冷器联合运行，系统月度 PUE 相对高，系统月度 GCOP 相对

低。在温度高的月份，比如 6 月、7 月和 8 月，系统室外侧仅通过制冷机散热，系统月度 PUE 较高，月度 GCOP 较低，存在月度最高 PUE 和最低 GCOP。

(3) 各季度典型日数据分析

1) 混合工作模式

图 36、图 37 显示了 2022 年 11 月 4 日 10:00 至 11 月 5 日 9:00，24 小时逐时 PUE 与室外环境温度、GCOP 与室外环境温度变化趋势，系统室外散热端出现两种情况，即仅制冷机散热和制冷机与干冷器联合运行情况。测试中机房室内环境温度控制在 21~25 °C。可知在室外环境温度较高时，如 2022 年 11 月 4 日 10:00 至 5 日凌晨 2:00，PUE 较高，GCOP 较低，室外侧仅通过制冷机散热，在环境温度较低的情况下，如 5 日凌晨 3:00 至 5 日清晨 7:00，制冷机与干冷器联合运行，PUE 较低，GCOP 较高。

表 18 年度运行性能

参数	数值
设计 PUE	1.31
年均 PUE	1.33
年均 WUE	0
年均 PLF	0.15
GCOPA	12.25
年均冷站 CLF	0.19
年均 IT 负载率/%	60

表 19 逐月运行性能

月份	GCOP	PUE
1	28.65	1.19
2	27.31	1.19
3	22.34	1.20
4	6.04	1.34
5	5.74	1.35
6	3.86	1.45
7	3.29	1.51
8	3.29	1.50
9	4.19	1.42
10	5.93	1.34
11	9.38	1.27
12	27.08	1.19

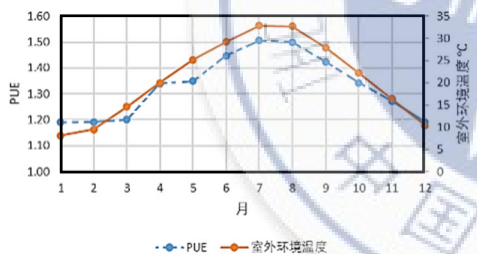


图 34 月度 PUE 与室外环境温度随月份变化趋势

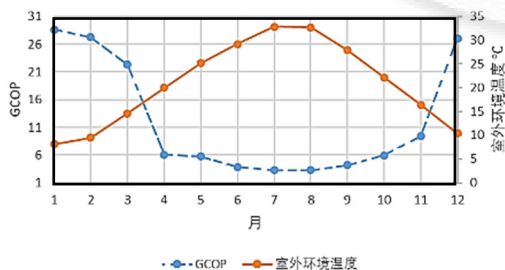


图 35 月度 GCOP 与室外环境温度随月份变化趋势

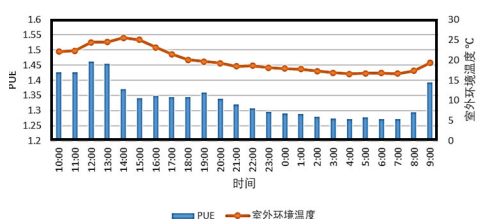


图 36 2022年11月4日10:00至11月5日9:00, 24h逐时 PUE 与室外环境温度

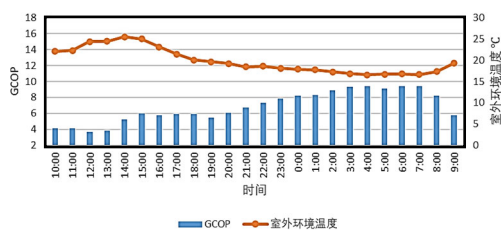


图 37 2022年11月4日10:00至5日9:00, 24h逐时 GCOP 与室外环境温度

2) 低温工作模式

图 38 和图 39 显示了 2022 年 12 月 7 日 0:00—24:00 逐时 PUE 与室外环境温度、GCOP 与室外环境温度变化趋势，在这一天的测试中，室外温度在 8~12 °C 变化，机房室内环境温度控制在 23.5 °C 左右。从图中可看出，在室外环境温度较低的时候，制冷机不工作，干冷器单独运行，此时系统的 PUE 较低，达到 1.19，GCOP 较高，接近 30。

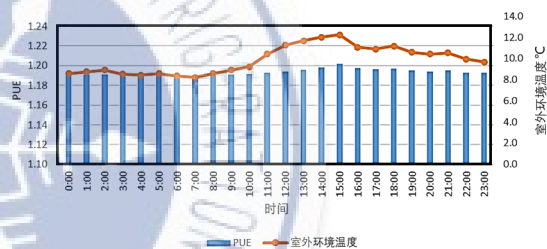


图 38 2022年12月7日0:00至24:00, 24h逐时 PUE 与室外环境温度



图 39 2022年12月7日0:00至24:00, 24h逐时 GCOP 与室外环境温度

5 数据中心升温节能技术

5.1 基于数字孪生的节能调优方法应用案例

本项目是数值模拟技术在某机房楼中的一个模块中的应用，通过现场测试创建了反映现场实际情况的 3D 机房数字孪生模型，通过 CFD 计算得出当前机房的热点、冷却效率等安全与能效问题，提出针对性的整改意见。

数据机房冷却效率的提高是通过提升控制温度实现。升温有两层含义：1) 提高冷冻水温度；2)

提高末端控制温度，提高控制送风温度或者回风温度，或者控制温差。提高空调控制温度可以提高系统能效，优化的气流组织提高送风效率后可以有效降低风机功率，增加自然冷时间。提高控制温度对于利用自然冷源是有利的，蒸发温度越高，可以减少 AHU 补冷开启时间增加自然冷却时间。

本项目所分析的机房面积共 260 m²，采用 32 台行级冷却空调，封闭冷通道形式进行制冷。机房中共包含 4 个微模块，空调控制回风 23 °C，额定风量 5023 m³/h，制冷量 21.9 kW。机房负载率 27%。数据机房 3D 数字孪生模型，如图 40 所示。

从数值模拟评估开始，创建数字孪生模型，现状评估与升温预测，提出可行的优化方案，如图 41 所示。根据优化方案进行现场改造，实施升温操作，包括末端的控制温度和冷水机组的供水温度。

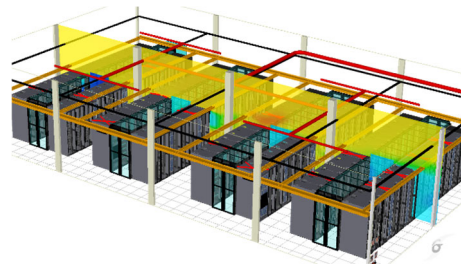


图 40 数据机房 3D 数字孪生模型



图 41 优化控制逻辑

5.2 数字孪生技术概述

提高冷冻水温度或空调末端控制温度提高的前提是机房内不会出现局部热点，所以首先需要通过 CFD 分析，有针对性地消除热点，使整个流场更加均匀化、合理化，为后期机房的升温做好准备。

所有分析的基础是创建反应现场情况的数字孪生模型，模型包括：机柜、盲板、IT 设备、行级空调、封闭冷通道、梁柱、机房通道门窗、桥架、消防管道和灭火器等。

数字孪生模型包括所有现场设备的几何数据，以及性能参数，还包括测试数据与现场监控数据。典型的建模需求数据及要求如下所示：

(1) 建筑结构

CAD 图上确认外墙尺寸是否准确，梁、柱尺寸与平面布局图，桥架平面布局及标高，机房净高

(2) 机柜结构参数

机柜包括机房中的所有设备柜，包括服务器柜、电池柜、网络柜、列头柜等；机柜的结构参数包括整体尺寸，长、宽、高；机柜侧板、顶板、底板的结构，机柜可能不安装侧板，顶板可能有开孔等；机柜前后门结构，通常为网孔门，需要知道它的开孔率，或者前后门是否为封闭的实体；没有安装设备的插槽是否有盲板封闭；统计机柜前门处的缝隙，缝隙大小可以直接统计到机柜的每个 U 上。

(3) 机柜测量数据

测量单个机柜的输入功率；机柜前后门上部、

中部、底部的进风温度。

(4) IT 设备清单

统计每个机柜中的 IT 设备；在统计表格中清楚表示 IT 设备在机柜中的位置，IT 设备的结构尺寸、生产厂家、型号、进出风形式等。

(5) 空调结构与性能参数

空调结构参数包括整体尺寸，送回风口的尺寸；空调的性能参数包括空调的冷却形式，直膨式或者水冷式、制冷量（包括显冷和潜冷）、送风量，送回风温度与输入功率；空调测量风量、温度与功率数据；空调的控制设置：空调控制分为送风控制或者回风控制；空调冗余方案，确定哪些空调是关闭的。

(6) 测量数据要求

实际测量时测点位置越多越好，在平面上均布测试，但受时间限制通常要求：空调送风口 1 个测点，空调回风口四个点；部分机柜前后门各三个点；所有地板出风口风量，部分地板出风口风速；电参数可以与运维人员沟通查监控，至少要知道单机柜的输入功率，空调输入功率。

5.3 项目数字孪生模型

本项目数字孪生模型中建筑结构、桥架和管道按照现状建模，保证模型和现状一致，提高仿真准确性，如图 42 所示。

机房布局：根据设计图纸和现场实测完成机柜、空调和封闭通道布局，维持和现状一致，如图 43 所示。其中机柜模型对应 U 为安装 IT 设备，考虑空 U 位，盲板，侧板等对象。空调模型设置参数包括型号，几何尺寸，制冷量，输入功率，额定风量，控制回风温度。

5.4 模型校准

所有的模型都是真实系统的简化，而简化过程中的误差是固有的。在像数据中心这样的复杂系统中，一个模型将包含无数的简化，所有这些简化都有其自身的误差程度。因此，我们需要区分哪些错误是可接受的和哪些错误是不可接受的。要做到这一点，我们需要定义所述的“可接受的错误”，但定义可能会很复杂，并将取决于对模型提出的问题。

“模型校准”描述一个被认为足够精确的模型，以便为特定目的产生可靠的结果。根据模型的要求和可用的数据，可以有不同程度的校准。“模型校准”

最常用于简单地指能够可靠地预测给定数据中心所有典型日常变化后果的模型。

模型的精度是通过比较数据中心的测量数据和我们感兴趣的仿真结果来确定的。将差异量化，如果差异显著，将通过结果分析进行调查。了解差异的原因可以让工程师编辑模型并将其最小化。

数据中心模型中有许多独立的子系统，其中一些子系统比其他子系统对热环境的影响更大，因此，重要的是将建模工作集中在与工程师要求相关的系统和物理交互上，同时决定哪些信息不那么重要，可以忽略不计。因此，应将校准模型视为由经验丰富的工程师批准以执行特定目的模型，而不是由单个数字（如百分比误差）定义。

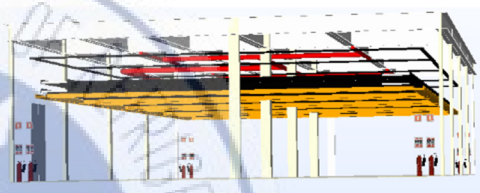
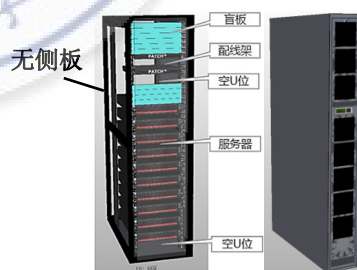


图 42 数据建筑结构



(a) 设备布局



(b) 设备结构

图 43 设备布局与设备结构

5.5 现场测试数据与模拟精度

现场测试数据包括动环监控数据和现场测量数据，包括空调，IT 设备和通道等设施设备。

空调监控数据包括送风平均值，回风平均值，冷冻水进水，冷冻水出水，风机转速，开启数量等。测试了典型 IT 设备的进出风温度，读取了微模块传感器温度。如图 44 所示，空调送回风温度模拟与实测平均偏差 4.2%，最大偏差 8.23%。

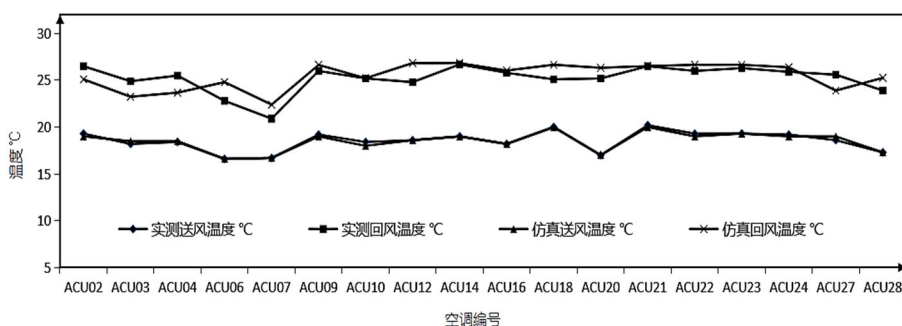


图 44 空调送回风温度模拟与实测对比

冷热通道传感器温度模拟与实测平均偏差 5.3%，有两个值超过 10%，最大偏差 11.4%，但整体趋势基本一致，如图 45 所示。

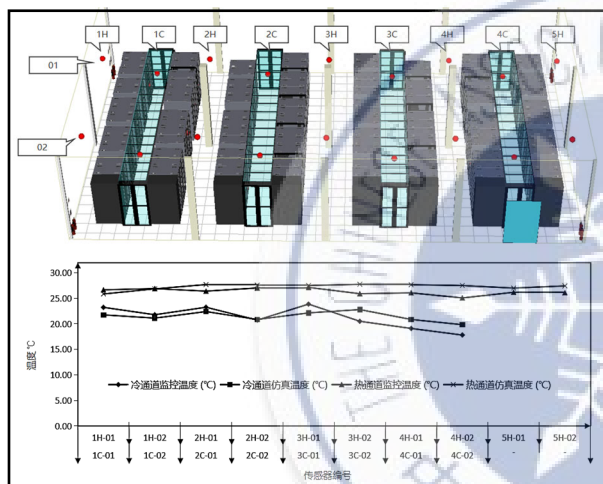


图 45 冷热通道传感器温度模拟与实测对比

5.6 仿真模拟结果分析

通过仿真调优后改造方案。改造方案一：用盲板封闭机柜空 U 位；改造方案二：用盲板封闭机柜空 U 位，并用毛刷封堵。

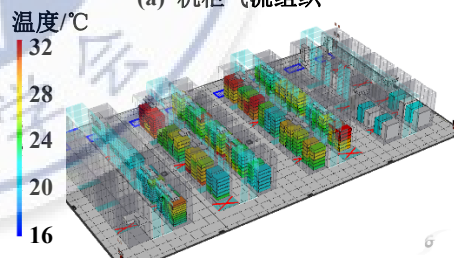
图 46 所示为模拟得到的机柜进风温度分布和

IT 设备进风流程图，圆圈处机柜没有安装侧板。流线显示机柜侧面有热空气回流，导致设备过热。

针对上述问题进行改造方案验证。通过 RCI-HI、MCRI、SHI 等指标对比改造前后的效果，如表 20 所示。



(a) 机柜气流组织



(b) 机房温度分布

图 46 冷热通道传感器温度模拟与实测对比

表 20 改造方案模拟结果对比

方案	过热机柜		机柜热空气短路		冷量损失指数		提高水温可行性
	RCI-HI	MCRI	SHI				
理想值	100%	0%	0				—
现状	88.1%	19.03%	0.53				不建议升温
改进方案一	98.91%	4.83%	0.17				可以升温
改进方案二	100%	0.11%	0				可以升温

由表 20 可知：存在较多的过热机柜，RCI-HI 指标的等级是差，同时存在大量的冷量损失情况，不建议提高冷冻水温度。

改进方案一：前门空 U 位加盲板后，机柜过热

问题显著改善，RCI-HI 指标的等级是良好，可以适当提高冷冻水供水温度。改进方案二：机柜进风温度最高为 21℃，空调冷空气得到有效利用，所以可以提高冷冻水供水温度。

5.7 升温测试与升温前后仿真精度

行级空调升温 2 °C 时, IT 设备进风温度平均提高 1.92 °C, 如图 47 所示。表 21 所示为升温前后 IT 设备模拟与实测数据的对比, 最大偏差 9.29%, 平均偏差 3.15%, 平均偏差 2.8%。

(1) 节电量对比

读取动环系统的电能数据、升温 1 °C、升温 2 °C 在某时间段的电能数据, 图 48 所示为升温前后空调末端的功率对比, 升温 2 °C 时空调末端节能 8.1%。

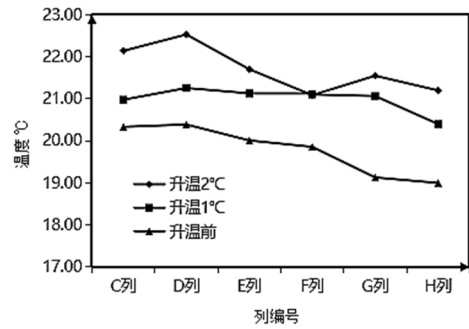


图 47 实测整列 IT 设备平均进风温度

表 21 升温前后 IT 进风温度实测与模拟对比

设备 ID	升温前	升温前	升温前	升温 1 °C	升温 1 °C	升温 1 °C	升温 2 °C	升温 2 °C	升温 2 °C
	实测 IT 进风温度/°C	仿真 IT 进风温度/°C	模拟与实测偏差/%	实测 IT 进风温度/°C	仿真 IT 进风温度/°C	模拟与实测偏差/%	实测 IT 进风温度/°C	仿真 IT 进风温度/°C	模拟与实测偏差/%
C01:Slot28	20.3	20.33	0.15	21.4	21.31	-0.42	22.0	22.32	1.45
C05:Slot28	19.8	20.50	3.43	20.4	21.00	2.94	21.6	22.00	1.85
C11:Slot28	20.5	19.67	4.05	20.9	21.28	1.82	21.8	22.28	2.20
C12:Slot28	20.4	19.71	3.38	21.0	21.27	1.29	21.8	22.27	2.16
D02:Slot28	20.2	20.85	3.22	21.2	21.27	0.33	22.6	22.27	1.46
D08:Slot13	20.2	20.63	2.13	21.9	21.28	2.83	22.6	22.28	1.42
D10:Slot28	20.2	20.30	0.59	21.6	21.30	1.39	22.0	22.27	1.23
D13:Slot28	20.9	21.35	2.15	21.3	21.27	0.14	22.1	22.27	0.77
E01:Slot28	20.0	19.06	-4.70	21.1	21.29	0.90	22.0	22.29	1.32
E06:Slot28	19.8	19.80	0.00	21.3	21.32	0.09	21.3	22.32	4.79
E07:Slot28	19.9	19.25	3.27	21.2	21.32	0.57	21.8	22.32	2.39
E10:Slot28	19.7	20.31	3.10	21.0	21.47	2.24	21.7	22.48	3.59
E13:Slot28	20.7	21.52	3.96	22.0	21.90	0.45	22.2	22.93	3.29
F02:Slot28	19.4	19.72	1.65	20.7	21.29	2.85	20.6	22.29	8.20
F04:Slot28	19.5	18.96	2.77	20.8	21.30	2.40	20.8	22.30	7.21
F10:Slot30	20.9	21.47	2.73	22.0	21.44	2.55	21.5	22.44	4.37
F12:Slot30	21.0	21.62	2.95	22.2	21.44	3.42	22.6	22.45	-0.66
G02:Slot30	18.3	20.00	9.29	20.1	21.51	7.01	20.5	22.53	9.90
G07:Slot24	19.6	19.85	1.28	22.4	21.62	3.48	22.5	22.63	0.58
G13:Slot19	19.3	20.87	8.13	20.4	21.43	5.05	21.6	22.43	3.84

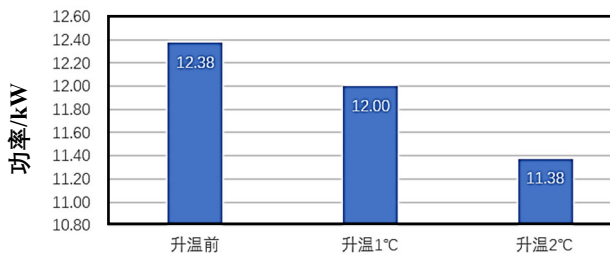


图 48 升温前后节能量对比

(2) 冷冻水系统节能计算

包括两部分内容: 第一是冷机升温后的节能量, 第二是升温后自然冷增加后的节能量。通过前述分

析确定冷冻水升温幅度: 因为数据中心包括多个机房包间, 按照冷冻水升高 1 °C 进行节能计算。

5.8 冷机制冷模式分析

现状: 冷冻水供回水温度: 14 °C/20 °C, 预冷模式: 9 °C < 湿球温度 < 15 °C。

升温后: 冷冻水供回水温度: 15 °C/21 °C, 预冷模式: 10 °C < 湿球温度 < 16 °C, 如表 22 所示。

根据当地典型气象年逐时参数确定自然冷模型时间较调整前增加约 1 个月, 综合计算全年运行电费节省约 40 万元。

表 22 升温后冷机的运行模式数据

冷冻水供回水温度	室外湿球温度	冷却塔进出水温度	判定温度	制冷模式
15 °C/21 °C	>16 °C	>19 °C	>20.5 °C	电制冷模式
15 °C/21 °C	10~16 °C	13~19 °C	14.5~20.5 °C	预冷模式
15 °C/21 °C	<10 °C	<13 °C	<14.5 °C	自然冷模式

5.9 极限升温预测

表 23 为提高末端温度后不同方案的 IT 设备进口温度对比情况, 升温 5 °C 时 IT 设备最大进风温度为 26.08 °C, 对于实施升温操作的方案一, 升温极限为 5 °C。

表 23 极限升温表

方案	改造方案一				改造方案二		
	1	2	3	5	1	2	3
升温幅度/°C	1	2	3	5	1	2	3
IT 设备进风温度/°C	21.96	22.85	23.93	26.08	21.49	22.5	23.56

6 风冷冷却系统改为水冷冷却系统

6.1 项目介绍

本示范项目为上海嘉定某数据中心。总建筑面积 2 684 m², 机房面积 1 540 m², 分为 4 层数据机房, 部署机柜 779 个, 单个机架功耗为 5 kW。其中, 一层至二层包含 379 个机柜, 三层至四层包含 400 个机柜。

本项目市电电源采用 10 kV 进线。在大楼一层机房设置一个变电站, 市电引入容量为 2 路 5 750 kVA, 1 用 1 备 (均衡供电), 接入两套 10 kV 配电系统。每 1 路容量需满足整幢机楼的供电容量需求, 同时再配置 2 台高压柴油发电机组作为后备电源, 单台后备发电机额定功率 1 800 kW。其中, 10 kV 配电系统的 10 kV 主接线采用分段单母线, 两段母线之间设置母线联络, 每段母线均能承担所有负荷。10 kV 配电系统以放射式电缆线路向各台变压器供电。不间断电源系统采用 UPS 设备, 配置方式为 N, 共配置 6 台额定功率 500 KVA UPS 蓄电池组后备时间为后备 15 min。

同时, 在一层布置了配电、冷冻站等房间, 且在一层至四层布置数据机房。

6.2 冷却系统改造方案

本项目原有机房内采用风冷专用空调 (图 49)。由于项目室外空间狭窄, 室外侧设备换热效果差,

导致冷凝器温度过高, 压缩机效率低, 能耗高。

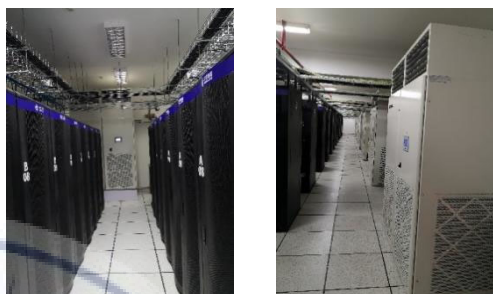


图 49 原有风冷专用空调

改造前数据中心冷却系统夏季 GCOP 为 1.64, 过渡季 GCOP 为 1.92, 冬季 GCOP 为 1.75, 原本数据中心的冷却系统的能效较低, 如表 24 所示。

通过对现场的测试、诊断和分析, 认为项目能耗高的主要问题包括四个方面: 一是室内侧的风机无变频控制, 在低负载条件下的能耗过高; 二是未能充分利用免费冷源; 三是压缩机效率过低; 四是室外侧窝风严重, 影响散热。由于以上问题及室内空气组织不合理, 导致室内局部热点较为严重, 无法承担更高负荷的 IT 负载。

表 24 改造前数据中心冷却系统能效

参数	夏季	过渡季	冬季
IT 设备用电/(kW·h)	10 493.28	8 278.51	7 374.96
空调末端用电/(kW·h)	6 404.09	4 311.70	4 211.184
GCOP	1.64	1.92	1.75

针对此问题, 提出了冷却系统整体改造的方案, 计划将空调系统从风冷专用空调改为水冷冷水空调系统。但业主考虑到既有客户的服务, 需要保留一、二层持续运行, 仅考虑将三、四层的机房进行改造。针对数据中心全年的制冷需求, 在原有空调制冷系统的基础上新增水冷型精密空调和风冷精密空调。三、四层电池间各配置 1 台风冷精密空调, 制冷量为 30.5 kW, 显冷量为 27.8 kW。机房采用水冷型精密空调。数据中心三层、四层热负荷总量为 1 274.45 kW, 为满足制冷量需求, 三层、四层共安装 20 台房间级水冷精密空调 (16 主 4 备) 和 2 台

风冷式空调，总显冷量为 1 510 kW，设计有 18.5% 的余量。

机柜的布置采用冷热通道分开设置的方式，机架布置采用“面对面、背对背”的排列方式，相邻两列设备的吸风面面对冷通道，排风面面对热通道，冷通道封闭，机柜采用前送风机柜，机柜正面之间为冷通道，机柜背面之间为热通道，机房安装活动地板，机架采用下送风，上出风方式，为冷通道地板送风。封闭冷通道送风技术，利用在封闭冷通道内送风、热通道回风即可实现，“冷热气流完全隔离”，避免机柜间的冷热干扰，形成良好的气流组织，以提高空调的制冷效率。

在改造中，对冷却系统的改造内容主要包括以四个部分。

1) 拆除原有风冷专用空调；原有风冷专用空调效率低且较为老旧，因此在改造中予以拆除。

2) 机房内增设架空地板并加装水冷下送风精密空调（图 50）。相比原先风冷专用空调的机房内混风的气流组织，通过架空地板实现下送风可避免冷热风混合，减少末端风机能耗。安装的下送风精密空调可变频调节，在负载较低时减少风机能耗。

3) 室外搭建钢平台，并在钢平台上方安装冷却塔，如图 51 所示。通过抬高冷却塔的高度，使得冷却塔的进风口高出围墙，避免窝风。从而提高冷却效率，降低冷却水温度。不仅在冷机运行期间可提高冷机效率，还可延长免费冷源的使用时长。

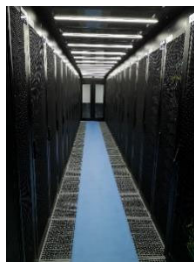


图 50 增设架空地板并加装水冷下送风精密空调



图 51 安装的冷却塔

4) 钢平台下方安装磁悬浮冷水机组，如图 52 所示。通过此冷源改造，一方面充分利用项目组内磁悬浮压缩机小压比等技术的研究成果，提升在夏季、过渡季节的压缩机效率，实现高效运行。另一方面利用板式换热器在冬季室外湿球温度较低条件下直接利用冷却水与冷冻水换热，减少压缩机的运行时长，从而大幅度降低压缩机能耗。



图 52 安装的磁悬浮冷水机组

改造后三层至四层机房采用 BA 智能化控制，可自动根据现场实际情况进行冷水机组增减机、轮机操作。为了保证供冷安全，冷源的冷水机组、冷水塔、板式换热器、水泵等设备均按照 N+1 冗余原则配置。

6.3 运行测试结果及分析

对于数据中心而言，制冷系统主要为机房 IT 设备提供冷量，因此制冷系统的冷量可近似等于 IT 设备的发热量即功率。

根据中国制冷学会团体标准《数据中心冷却系统——第一部分：综合性能系数（GCOP）测试与计算方法》（T/CAR 9.1—2021）中关于 GCOP 计算方法的定义，此数值为数据中心用电量与冷却系统用电量的差除以冷却系统用电量的值^[1]。

GCOP 具体计算方法：

$$G_{COP} = \frac{E_{DC} - E_{CS}}{E_{CS}} \quad (1)$$

式中， E_{DC} 为数据中心耗电量，kW·h； E_{CS} 为冷却系统耗电量，kW。

选取改造后数据中心夏季、过渡季、冬季三个季节进行测试，测试分析结果如表 25 和表 26 所示。

表 25 改造后数据中心冷却系统能效

参数	夏季	过渡季	冬季
总用电/(kW·h)	15 584.3	10 046.9	12 607.6
IT 设备用电/(kW·h)	10 751.87	7 308.44	10 741.6
末端空调用电/(kW·h)	1 617.5	1 186.5	1 298.0
冷站用电/(kW·h)	3 214.93	1 552	568
GCOP	2.22	2.67	5.76

表 26 改造前后数据中心冷却系统能效提升对比

项目	能效		
	夏季	过渡季	冬季
改造前	1.64	1.92	1.75
改造后	2.22	2.67	5.76
能效提升率/%	35.37	39.06	229.14
全年节能率/%	41.33		

数据中心高效制冷解决方案

Coolinside全链条液冷解决方案



产品特点

- 全链条液冷产品完全自主
- 品质保障
- 产品售后无忧

应用领域

IDC数据中心/高密度数据中心/算力数据中心

CyberMate V+系列变频机房专用空调



产品特点

- 创新气动热管技术
- 全变频设计
- 氟泵热管设计
- EVO智能控制

应用领域

计算机房和数据中心交换机房/移动机房/高科技环境及实验室/工业控制室/精密加工设备室/标准检测室和校准中心/电池室

XFlex模块化间接蒸发冷却系统



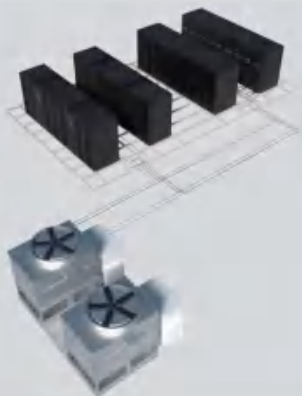
产品特点

- 模块化设计
- 工程预制化设计
- 高可用性
- 高效蒸发冷却
- 专利换热芯体

应用领域

IDC数据中心/云数据中心

XMint高效蒸发冷复合多联空调系统



产品特点

- 高效低压比悬浮式压缩机
- 自适应多联系统
- 多种冷源末端灵活配置
- 无水进机房

应用领域

计算机机房/数据中心/交换机房/移动机房/配电室/电池室/老旧机房改造

XRow靠近热源式冷却列间空调



产品特点

- 按需供冷
- 安全可靠
- 智能控制
- 配置灵活

应用领域

数据中心(IDC)/局部过热机房/高节能需求的机房/模块化数据中心/集装箱式数据中心



英维克公众号
<<< 扫码关注

美的集团贵安云数据中心 绿色高效制冷解决方案



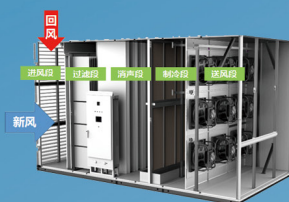
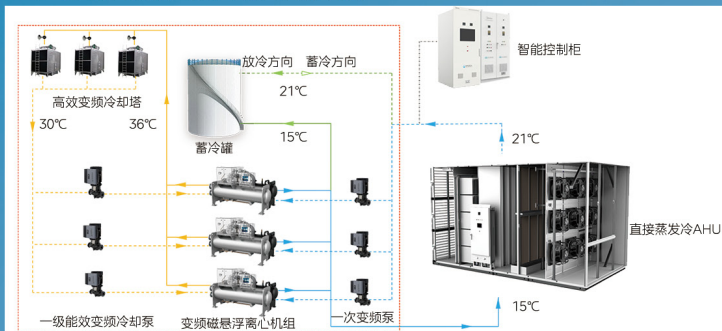
I 项目简介

该项目位于贵州省贵阳市贵安新区马场科技新城，将建设美的数据中心、美的云服务平台、美的软件研究中心等，预计十年内数据中心总规划机架将超1万架。

项目用地规模约132.9亩（一期用地约57亩，二期用地约75.9亩），一期地块总共规划4栋数据中心楼，单栋数据中心容纳1200个8kW机柜，可容纳服务器超7万，是重点建设的高标准数据中心。

在能效方面，**保证全年运行PUE ≤ 1.2，设计PUE 1.17。**

I 常规机房制冷解决方案



增加冷冻水盘管补冷段
直接蒸发冷AHU机组



高温出水
高效磁悬浮离心式冷水机组

贵安地区39.5%的时间处于混合制冷模式，为确保应对极限工况场景，满足数据中心稳定运行需求，直接蒸发冷AHU机组内增加冷冻水盘管补冷段，采用集中式冷站，15/21高温水供冷，高效变频磁悬浮离心机组在设计工况下，能效可达8，补冷量越大、占比时间越长，节能效果越明显。



美的楼宇科技官方公众号

深圳鹏城云脑II项目 | 西藏宁算科技集团 | 中航云数据
中国移动冷水机组集采 | 中国电信 | 中国联通

广东美的暖通设备有限公司 邮编: 528311 服务热线: 400-8899-315

地址: 广东省佛山市顺德区北滘镇北滘居委会蓬莱路工业大道

广告