

引用本文:周峰,谷文龙,马国远,等. 数据中心冷却系统研究及应用进展[J]. 制冷与空调,2024,24(2):63-71.
DOI:10.3969/j.issn.1009-8402.2024.02.012

专题关注·机房空调

本栏目投稿邮箱:

zldt@chinajournal.net.cn

数据中心冷却系统研究及应用进展*

周峰 谷文龙 马国远 晏祥慧

(北京工业大学制冷与低温工程系)

摘要 为加速实现数据中心节能降耗的目标,在合理、高效、最大化地利用自然冷源的同时,更不能忽视机械制冷系统本身能效的提升。加强自然冷却与机械制冷的协同,降低数据中心 PUE,充分发挥安全稳定、高效运行的数据中心冷却系统自身能效至关重要。本文通过对气流组织、供/回水温度和冷却系统部件及形式 3 个方面的研究梳理,总结分析数据中心冷却系统节能提效有关技术研究与应用进展,从而为绿色、高效数据中心冷却系统的研发提供参考和借鉴。

关键词 数据中心;冷却系统;气流组织;供回水温度;部件及形式

Progress on research and application of cooling system for data center

Zhou Feng Gu Wenlong Ma Guoyuan Yan Xianghui

(Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Beijing University of Technology)

ABSTRACT In order to accelerate the realization of the goal of energy-saving and consumption reduction in data centers, the improvement of energy efficiency of the mechanical refrigeration itself cannot be ignored while using ambient energy reasonably, efficiently and maximally. It is very important to enhance the synergy between natural cooling and mechanical refrigeration, to reduce the PUE of data center, and to give full play to the energy efficiency of cooling system for data center with safe, stable and efficient operation. The research and application progress of cooling system for data center are concluded and analyzed combining the literatures on air distribution, supply and return water temperature, and cooling system components and forms, which provide references for the research and development of green and high efficient cooling system for data centers.

KEY WORDS data center; cooling system; air distribution; supply and return water temperature; components and forms

数据中心作为承载各类数字化转型技术的重要基础设施,其机架建设数量和规模屡创新高^[1]。高速发展的数据中心产生了高能耗和高碳排放问题,2021 年我国数据中心的年用电量已达到 2 166 亿 kW·h,占全国总用电量的 2.6%^[2]。对此,国家相关部门对数据中心能耗提出了更严格的要求,截至 2023 年,全国大型、超大型数据中心电能利用效率(PUE)需降至 1.3 以下^[3]。而目前

我国数据中心 PUE 平均在 1.4 以上,且有不少地区超过 1.8^[4]。因此,数据中心节能减排刻不容缓。

数据中心能耗的 40% 由冷却系统产生,提升冷却系统能效是实现数据中心节能减排目标的重点环节^[5]。目前数据中心冷却系统运行方式仍以机械制冷为主,系统全年能耗居高不下。合理利用室外自然冷源可以有效延长自然冷却时间,降低冷水机组工作负荷,提升系统能效,但在夏季高

*北京市教委科技计划项目(KM201910005017),北京工业大学“城市碳中和”科技创新基金(049000514122607),北京工业大学环境与生命学部培育基金(PY202105)

收稿日期:2023-07-31,修回日期:2023-08-23

作者简介:周峰,博士,副研究员,主要从事制冷空调节能环保技术研究。

温环境中,仍需要机械制冷提供必要的冷量。为进一步提升机械制冷系统能效和自然冷源利用率,增强自然冷却与机械制冷的协同能力,降低数据中心 PUE,国内外学者对数据中心机械制冷及其耦合系统开展了一系列研究工作,例如:送风结构^[6-7]、通道封闭^[8]及气流组织管理^[9];提高冷冻水供回水温度^[10]和温差^[11];采用磁悬浮离心式冷水机组^[12]和部分部件变频控制^[13];热管冷却^[14]、冷却塔冷却^[15]、间接蒸发冷却^[16]、蒸发冷凝^[17]等技术。笔者通过对上述数据中心冷却系统相关文献的梳理,从气流组织、冷冻水供回水温度、冷却系统部件及形式 3 个方面,总结分析数据中心冷却系统的技术研究与应用进展情况,为冷却系统在新建和既有数据中心的节能应用提供参考和指导。

1 气流组织

随着数据中心高密度化发展,合理地机房内气流组织进行优化,可以有效消除局部热点,改善数据中心热环境,进而提升冷却系统运行效率。当前数据中心采用的送风形式主要有架空地板送风和顶部送风,如图 1 所示。架空地板送风形式由于具有送风空气均匀、噪声较小和节能环保等特点得到了较多关注^[18]。

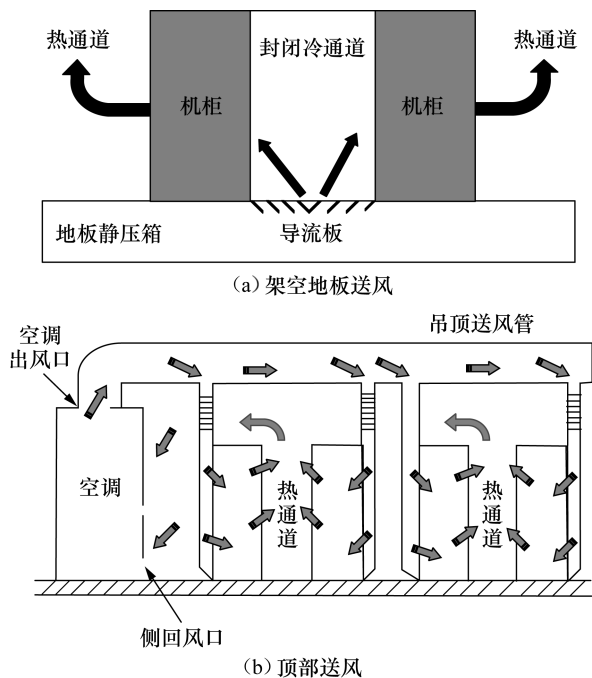


图 1 数据中心采用的送风形式^[18]

1.1 送风形式

早在 2005 年, S. Shrivastava 等^[19]对“上送下回式”和“下送上回式”2 种气流组织进行了研究和

对比,发现“下送上回式”气流分布效果更好。刘鹏等^[20]通过 CFD 技术对上述 2 种气流组织模拟分析,发现后者温度场和速度场优于前者,进一步验证了下送风形式的优势。为进一步优化气流组织, Jin C. Q. 等^[21]总结分析了从机房级别到服务器级别影响架空地板送风的因素,表明气流均匀性和热性能主要受地板下通风结构的影响。

地板下通风结构主要受架空地板高度、穿孔地板穿孔率和静压层几何结构的影响。对于不同配置的数据中心,架空地板高度不是统一的,需要结合冷/热通道封闭情况寻求最佳高度。Zhang M. 等^[22]对在封闭不同通道情况下的架空地板高度进行研究,发现在封闭冷通道时架空地板高度应为 600~800 mm,而在封闭热通道时架空地板高度应为 400~600 mm。此外,空气出口流量大小主要取决于穿孔地板穿孔率,穿孔率的大小对于机房内部热性能至关重要^[23-24]。研究表明,当穿孔率为 20%~30%时,气流均匀性和热性能达到最佳^[25-26]。对于静压层几何结构,黄渤^[27]提出了一种带有局部挡板的地板下送风结构,并对其进行了仿真模拟分析,发现可以有效改善数据中心热性能。耿云^[28]使用 Airpak 模拟了不同挡板角度对机房热环境的影响,结果显示:在高架地板下方搭建 15°角挡板,静压层高度为 700 mm,地板穿孔率为 20%时,冷却效果最好。马昕宇^[29]设计了一个梯形静压箱,使用该箱地板下送风可以有效改善压力分布不均匀对气流组织的影响,并通过 CFD 模拟得到了静压箱最佳结构参数。

由此可见,架空地板送风是目前数据中心所采用的主要送风形式,其性能的优劣主要由地板下通风结构所决定,封闭不同通道时的架空地板最佳高度是不同的;当穿孔地板穿孔率为 20%~30%时,气流均匀性和热性能最优。但该方面多集中于单个因素的研究与改进,对于多参数组合的研究和优化有待加强,应综合探究其影响。

1.2 冷/热通道封闭

在冷/热通道方面,当采用地板下送风形式时,机柜通常以“面对面、背靠背”的形式排列,容易造成冷/热气流掺混,为防止冷气流旁路和热气流再循环,研究人员提出了封闭冷/热通道的措施。

在封闭冷通道方面,秦冰月等^[30]和 R. Schmidt 等^[31]基于实际数据中心研究了冷通道封闭前后的能耗,结果显示:冷通道封闭后,制冷能耗节约超

过 59%。还有一些学者研究了冷通道封闭前后进出风的温度变化,采用封闭冷通道后,送风温度可提高 3 °C,机柜的进出风温度平均下降 2~3 °C,冷量利用更加充分^[32-33]。在封闭热通道方面,陈文辉^[34]采用 DeST 模拟了热通道封闭前后数据中心冷却系统的全年能耗,对比发现,封闭热通道后,冷却系统能耗下降约 9.6%。虽然上述研究证明了封闭冷通道或热通道的优势,但并未在结构上对其进行改进。在通道结构上,S. A. Nada 等^[35]研究了侧面封闭的半封闭冷通道和从侧面和顶部封闭的全封闭冷通道,发现二者均能够改善数据中心热性能。Wang I. N. 等^[36]提出了一种新型抽屉式机架,可以有效增大热通道空间并减小冷通道空间;与传统抽屉式机架相比,新型抽屉式机架的最高入口温度可降低 13.3 °C。此外,可以在冷通道或热通道中添加挡板,防止冷热气流混合^[37]。Yuan X. L. 等^[38]提出在机架的进气口中设置柔性挡板,进而改善气流分布。刘义军等^[39]对采用“V 形”和“Δ 形”挡板时的冷通道封闭系统进行仿真模拟,研究显示二者最佳静压高度分别为 0.5 m 和 0.6 m,最佳穿孔率均为 20%,但前者温度分布更均匀。

由此可见,封闭冷通道或热通道均能够改善气流组织和热性能,但相对于封闭热通道,封闭冷通道节能效果更好;在冷/热通道中增加挡板或改变通道其他结构,对改善机房热环境也有着显著作用。

2 供/回水温度

数据中心冷却系统的工作原理是通过送回风温差或供回水温差等驱动空气、水、制冷剂等传热介质循环,将机房内产生的热量排出到室外环境中。在此过程中,各个传热介质的温度和温差选取,不仅直接关系到相关制冷设备的选型和运行,更会影响到数据中心冷却系统的整体能耗。对于常用的数据中心冷水系统,其冷冻水供/回水温度对提升系统整体能效有着至关重要的作用。根据 GB 50174—2017《数据中心设计规范》,机房冷冻水供/回水温度为 7~21 °C/12~27 °C,这对采用较高供/回水温度实现数据中心的节能具有很好的指导作用。合理提高冷冻水供/回水温度和采用大温差技术可以显著提升冷水机组工作效率,降低数据中心 PUE^[40]。

2.1 提高冷冻水供/回水温度

数据中心通常采用冷水机组作为机房冷源,其水系统对于数据中心的稳定运行极为重要,尤其是

冷冻水供/回水温度。适当提高冷冻水供/回水温度可以提升冷水机组中蒸发器的蒸发温度和蒸发压力,降低压缩机的压缩比,提升冷水机组能效^[41]。

冷冻水供水温度每提高 1 °C,冷水机组能效可提高 2%~3%^[42]。陆琼文^[43]总结分析了某品牌冷水机组在不同冷冻水供水温度下机组的 COP,与冷冻水供水温度为 7 °C 时相比,供水温度为 15 °C 时,冷水机组 COP 提高 26.3%;每提高 1 °C 冷冻水供水温度,冷水机组 COP 约提高 3.3%。毛路等^[44]结合中国人寿数据中心实际工程应用方案,分析了冷冻水供水温度对冷水机组效率的影响(如图 2 所示),并据此选择了适合该工程的冷冻水供/回水温度。熊成^[45]利用 Trnsys 软件分析不同负荷条件下空调系统最优供水温度及最高节能效率。罗露等^[46]运用 MATLAB 软件分析了变供水温度对制冷系统能耗、流量及冷冻水供/回水温度的影响,发现变流量方式较原基础方式可节能 7%。

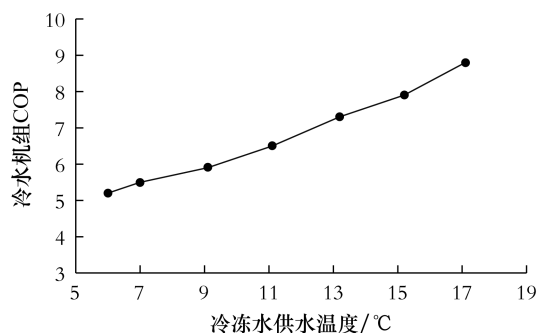


图 2 冷水机组 COP 与冷冻水供水温度的关系^[44]

2.2 大温差技术

大温差技术主要是通过提升数据中心冷却系统中冷冻水供回水温差减小流量,进而降低水泵和冷水机组能耗,提升系统节能效果。降低供水温度的同时提升回水温度是国内外增大水系统温差所采用的主流方式,但降低供水温度会增大冷水机组制冷负担,因此合理的水系统温差格外重要。

蒋吉敏^[47]分析了影响冷冻水大温差主体性能的主要因素,且提供了部分优化设计方案。张洪淇^[48]通过对大温差冷却系统应用于数据中心项目的节能性分析,基于假定的系统模型研究计算了不同冷冻水供回水温差条件下系统的冷水机组能耗,如表 1 所示,温差每提高 1 °C,单位制冷量能耗下降约 0.2%。康致博^[49]基于对数据中心冷却系

统大温差供冷工况下换热器的优化设计,计算得到优化后的冷冻水供/回水温度为 15 °C/20 °C,与常规 7 °C/12 °C 相比,每年可节省 106.52 万元电费。赵磊等^[50]通过实际项目对大温差技术进行了分析,当冷水温度由 7 °C/12 °C 提高到 18 °C/28 °C 时,离心式冷水机组的 COP 可提高 25%。

表 1 不同供回水温度下的冷水机组能耗^[48]

供/回水温度/ °C	EER/ (kW/kW)	功耗/ kW	相比 11 °C/16 °C 工况的能耗下降/%
11/16	6.591	455.2	0
11/17	6.607	454.0	0.26
11/18	6.621	453.1	0.46
11/19	6.633	452.3	0.64
11/20	6.644	451.5	0.81

综上所述,针对数据中心冷却系统的供/回水温度,一方面要提高冷冻水供/回水温度,提升冷水机组制冷效率;另一方面要采用大温差技术,增大系统冷源侧换热温差,降低系统中水泵能耗。但同时应考虑二者附带的不利影响,例如,冷冻水供/回水温度提高会提升空调末端进出风温度,导致风机功耗增大;影响电子元器件耐受性和寿命等。数据中心冷却系统采用提高冷冻水供/回水温度和大温差技术应结合实际需求统筹考虑,尤其是既有数据中心的节能改造。

3 冷却系统部件及形式

数据中心冷却系统作为一个复杂的整体,其中任何一个部件的变化都会影响到系统的整体性能。通过对系统中部分组件进行合理的选型和管理,不仅可以提高相关部件的运行效率,还能进一步提升系统能效。此外,合理、有效、最大化利用室外自然冷源,充分发挥冷水机组的灵活性和可控性,也是降低冷水机组工作负荷和实现数据中心节能降耗的重要举措。

3.1 系统局部提效

在数据中心冷却系统运行时,压缩机的能耗居于首位,直接影响冷水机组的制冷效率和系统能效。因此,可通过压缩机设备的选型更换、变频控制等实现局部提效。传统蒸汽压缩系统中需要使用一定量的润滑油减轻部件的磨损、散热、密封等,但润滑油的存在会降低传热性能,增大冷水机组工作负荷。针对这一情况,研究人员开发了磁悬浮离心式压缩机。张娴等^[51]对海南某数据中心空调系统进行了研究,当冷水机组全部运行,负载率为 70%~80% 时,磁悬浮离心式冷水机组的

COP 在 15 以上。Lyu W. H. 等^[52]模拟分析磁悬浮离心式冷水机组对数据中心冷却系统的节能性和经济性的影响,并结合南京某高校小型数据中心长期监测数据,发现磁悬浮离心式冷水机组在不同负荷条件下的平均 COP 在 8~10 变化,高于传统离心式冷水机组和涡旋式冷水机组,可节能 10%~40%。孙洁等^[53-54]针对夏热冬冷地区研发了数据中心专用小压比磁悬浮变频离心式冷水机组,经测试,该机组全年综合能效比在 5 以上;此外,还建立了小压比磁悬浮变频离心式冷水机组的性能系数半经验模型,根据其特性提出了具体的运行控制策略。娄小军等^[55]利用参数分析法计算得到了不同城市数据中心在不同工况下采用变频冷水机组的节能效果,结果显示:变频冷水机组相较于定频冷水机组可以对数据中心实现显著的节能减排效果。

冷冻水泵、冷却水泵的变频调节、管道优化和水阀控制也是系统局部提效的重要方法。黄国瑞等^[56]以上海某金融类数据中心为研究对象,利用 Trnsys 仿真平台搭建其冷却系统能耗模型,分析水泵变频改造后数据中心的节能减排效果,结果显示:在负载率 10%~20% 下,水泵变频改造后,水泵能耗降低 150~168 kW。Yu F. W. 等^[57]提出了一种基于建筑变负荷的冷冻水泵变频控制策略,试验结果表明,与传统的定频运行策略相比,变频控制策略能够使系统能耗降低 19.7%。管道布置和其他的一些结构改进也会影响系统的节能效果。为消除完全自然冷却工况下需要克服额外冷水机组蒸发器阻力的缺点,研究人员针对冷冻水侧和冷却水侧分别提出了新的连接方式,如图 3 所示^[58]。但这样做额外增加了管道和阀门,同时增大了阻力损失和泄漏风险。在水阀方面,唐瑞等^[59]设计了一个新型混水温控阀,相比 T 形三通阀混水出现温度分层现象,该温控阀混水温度分布均匀,有助于降低冷水机组能耗。

综上所述,数据中心冷却系统中各个部件的优化能够提升系统整体能效。如采用磁悬浮冷水机组,较传统冷水机组可节能 10%~40%;对系统中水泵采用变频控制,与定频运行相比,系统能耗可降低 20% 左右;此外,通过对系统中管道的优化和阀门的改进,也能实现系统的节能降耗。但冷却系统中各部件或多或少都会对系统性能有所影响,节能优化涉及的因素更为复杂多样,且各因素

相互影响,局部提效在实际应用中往往不能达到预期效果,如何确保优化后的部件与系统中其他

各部件高效协同运行是一大难点,也是下一步需要重点关注和解决的问题。

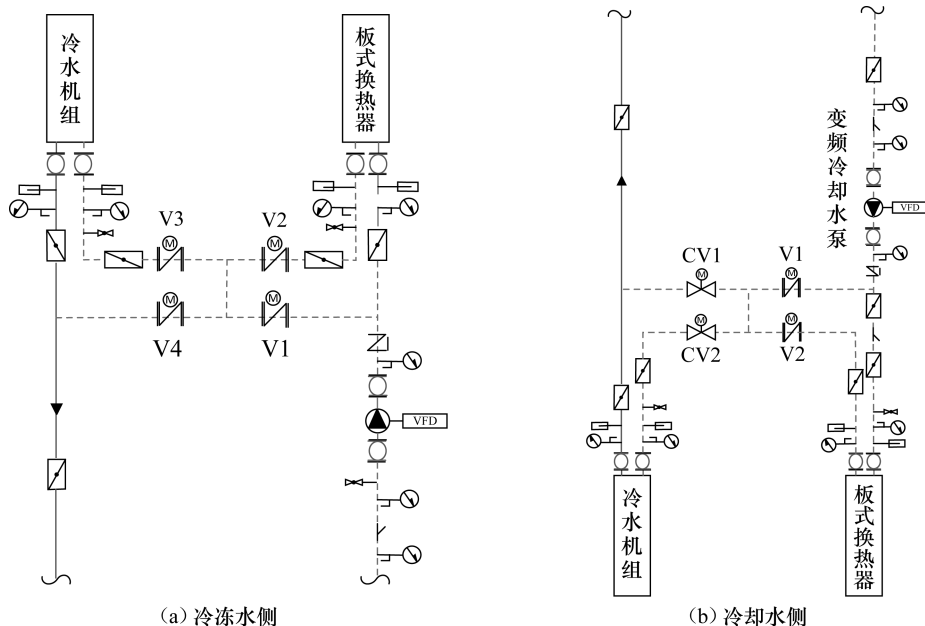


图 3 冷冻水侧和冷却水侧管网优化^[58]

3.2 机械制冷耦合自然冷却

除了对数据中心冷却系统局部上的一些优化改进,在系统形式方面也有着一定的研究进展。自然冷却技术是数据中心节能降耗的一项关键技术,可以有效降低冷水机组全年工作负荷。自然冷却技术主要通过空气换热器、水换热器和热管换热器等方式利用室外自然冷源对数据中心冷却,但当室外温度较高时,仍需要开启机械制冷系

统,由冷水机组补充必要的冷量。对于自然冷却与机械制冷耦合的复合系统,目前数据中心常用的主要是冷却塔自然冷却和蒸发冷却。

3.2.1 冷却塔供冷

冷却塔供冷可以有效缩短冷水机组的启动时间,降低能耗,提高自然冷源利用率。根据应用形式的不同,可分为冷却塔直接供冷系统和冷却塔加板式换热器的间接供冷系统,如图 4 所示^[60]。

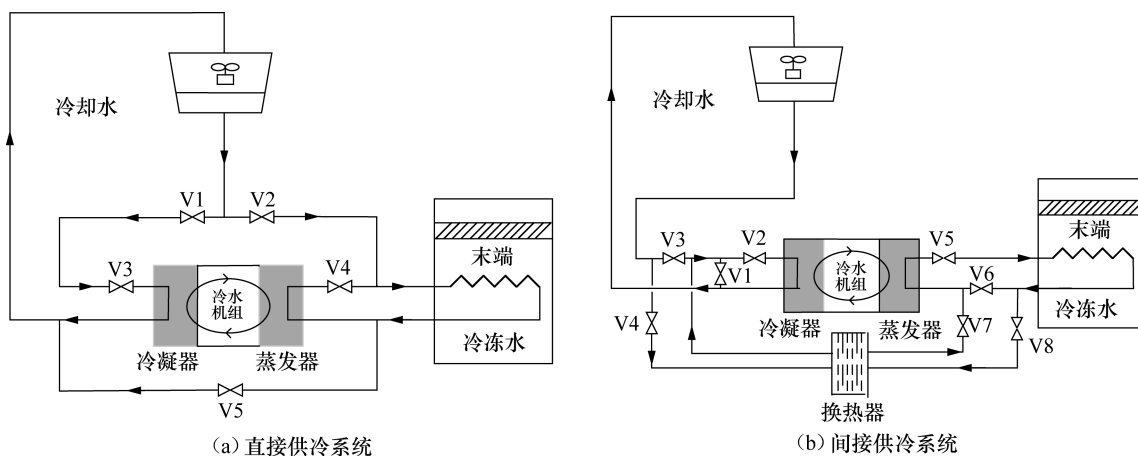


图 4 冷却塔供冷系统^[60]

目前,冷却塔供冷广泛应用在数据中心,且已经取得了显著成效。李佐洋等^[61]以重庆某数据中心为研究对象,使用冷却塔供冷技术对该数据中

心进行自然冷却,每天可节能 7 990 kW · h,节能率为 8.05%。冯潇潇^[62]基于冷却塔间接冷却系统的研究,在冷却塔进水侧添加了一个空气-水表面

式换热器,设计了间接蒸发冷却塔系统;采用该系统后,自然冷却的全年可利用时间得到进一步延长,且该系统结构在冬季能起到防冻的作用;但该系统需要配置额外的设备和管路,一方面增加了投资,另一方面加大了系统运行控制的复杂性。

3.2.2 蒸发冷却

蒸发冷却技术是一种利用水蒸发吸热制冷的绿色节能技术。蒸发冷却式冷水机组是主要工作设备,其实质是产出介质为冷水的蒸发冷却-机械制冷联合冷水机组。Huang X.等^[63]提出了一种间接蒸发冷却器预冷进气,将其应用到我国新疆维

吾尔自治区的数据中心,实现数据中心空调系统的自然冷却。陈璐等^[64]针对间接蒸发冷却机组占地面积大和数据中心出架率较低的问题,提出了一种空调系统新型架构模式,即冷冻水系统与间接蒸发冷却机组顶层应用相结合,为数据中心实际应用提供参考。郭志成等^[65]以新疆地区冬季室外冷空气为工作条件,研发一种复合乙二醇自然冷却技术的蒸发冷却式冷水机组,并设计了单面进风蒸发冷却式冷水机组和双面进风蒸发冷却式冷水机组 2 种方案,如图 5 所示,经测试节能效果显著。

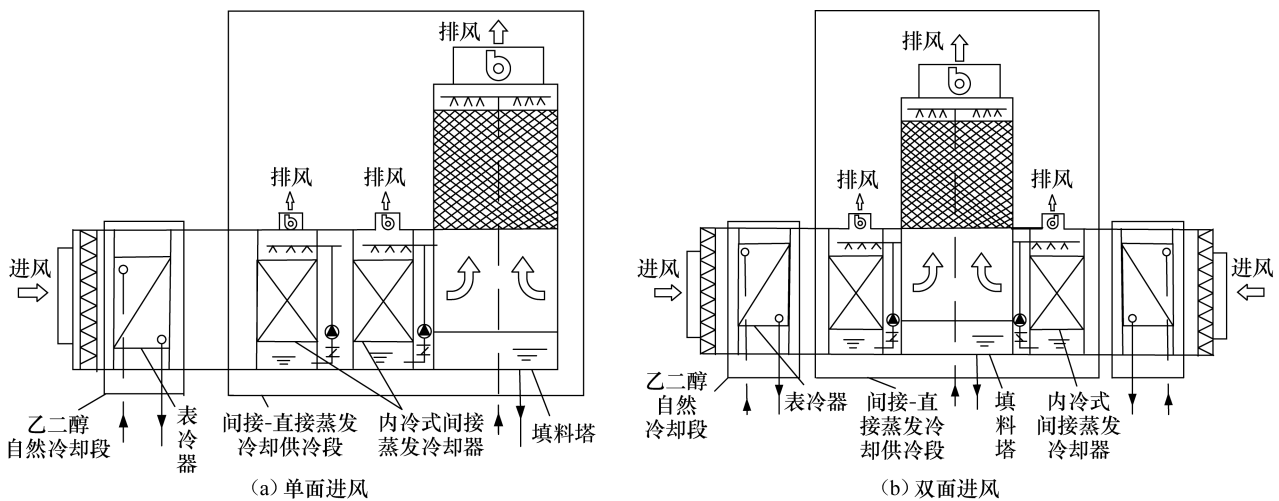


图 5 蒸发冷却式冷水机组^[65]

近年来,为增强蒸发冷凝技术的预冷效果,减少冷水机组的能耗,蒸发冷凝技术在数据中心得到了推广和应用。苏晓青等^[66]研究了蒸发式冷凝冷水机组在数据中心的适用性,将该机组与水冷式冷水机组进行比较,结果显示蒸发式冷凝冷水机组节能约 29.5%。区志江^[67]利用 VB 软件对适用于机房空调领域的蒸发式冷凝冷水机组进行优化设计,相比水冷式冷水机组,优化后的蒸发式冷凝冷水机组性能提高 14.0%,节能 12.8%。吴东青等^[68]针对新疆地区冬季气温较低的特点,为防止冷水在冬季结冰,对蒸发冷凝空调系统中的冷水系统添加 45%乙二醇(凝固点温度为 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$)溶液,采用该技术后,数据中心 PUE 为 1.362。Wu X. Y.等^[69]为提高数据中心冷却系统在炎热干燥夏季的能效,避免寒冷冬季结冰,提出了配置板管式蒸发冷凝器的冷水机组,并在干燥寒冷西北地区数据中心使用了一年,数据中心年均 PUE 可达 1.32。刘振宇等^[70]为加大自然冷源的使用时间,

将蒸发冷却、蒸发冷凝、机械制冷技术结合,提出一种新型数据中心用蒸发冷却(凝)空调机组,对比分析了新疆某数据中心年耗电量,采用蒸发冷却(凝)空调机组年节电率可达 51.4%。

综上所述,冷却塔供冷和蒸发冷却,尤其是冷却塔间接供冷和间接蒸发冷却,二者均在数据中心实际应用中取得了显著成效,能够充分利用室外自然冷源,降低冷水机组工作负荷。二者冷却系统各有千秋,在实际设计数据机房空调系统时,应根据当地的气候条件、机房的实际情况等,充分利用室外自然资源,选择合适的供冷系统,从而达到数据中心节能降耗的目的。此外,目前的研究大多数只考虑某一种自然冷却技术与机械制冷耦合。但实际上,对于某些气候条件下的数据中心,如果能够实现多种自然冷却技术与机械制冷的联合应用,节能效果将更加显著。

4 结论

为应对高密度、集中化、模块化的数据中心制

冷需求,笔者基于气流组织、供回水温度和冷却系统部件及形式3个方面,对数据中心冷却系统的发展现状进行了总结分析,得出如下结论:

1) 在气流组织方面:采用架空地板送风和冷/热通道封闭技术不仅可以有效改善气流组织热性能,消除局部热点,还能够提升机房送风温度,进而降低冷水机组工作负荷,提升系统能效。研究表明,采用冷通道封闭,机柜进出口温度可降低 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度均匀性提升。未来数据中心要注重探索多组合送风和智能化送风。

2) 在供/回水方面:一方面要提高冷冻水供/回水温度,冷冻水供水温度每提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷水机组能效可提高 $2\%\sim 3\%$;另一方面要增大供/回水温差,降低水泵能耗,提高系统节能效果。在提高冷冻水供/回水温度和大温差时,既要强化节能降耗的主导作用,又不可忽视其附带的不利影响,应统筹考虑,综合评判。

3) 在冷却系统部件及形式方面:从系统局部提效来讲,采用磁悬浮离心式压缩机、变频控制、管道优化、阀门改造等部件技术改进,可以使机组更加稳定可靠、节能、避免喘振、快速重启等,进而提升系统能效;从系统整体节能来讲,主要是自然冷却和机械制冷复合的冷水机组,其中冷却塔间接供冷和间接蒸发冷却以各自独特的优势得到关注,能够有效提高自然冷源利用率,降低冷水机组工作负荷。但在实际设计应用时,应结合所处环境,因地制宜,采取合适的供冷系统。

参考文献

- [1] 中国信息通讯研究院. 数据中心白皮书(2022年)[EB/OL]. [2022-06-27]. <http://www.scdsjzx.cn/scdsjzx/ziliaoxiazai/2022/6/27/5b92a33cc6de4ec18c940410bf7cbdba.shtml>.
- [2] 林冬. “双碳”背景下我国绿色数据中心建设的思考与研究[J]. 节能, 2023, 42(4): 73-76.
- [3] 白静. 推进数字行业高质量发展助力实现碳达峰碳中和目标——解读《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)》[J]. 中国科技产业, 2023(2): 40-41.
- [4] 叶伟能. PUE在数据中心节能管理中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2023, 40(2): 112-114.
- [5] 苏林, 董凯军, 孙钦, 等. 数据中心冷却节能研究进展[J]. 新能源进展, 2019, 7(1): 93-104.
- [6] 肖新文, 魏赠, 曾春利. 间接蒸发冷却空调箱机组制冷的数据中心气流组织探讨[J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(1): 62-69.
- [7] HOU F L, SHEN C H, CHENG Q. Research on a new optimization method for airflow organization in breeding air conditioning with perforated ceiling ventilation[J]. Energy, 2022, 254: 124279.
- [8] ZHANG M R, AN Q S, LONG Z, et al. Optimization of airflow organization for a small-scale data center based on the cold aisle closure[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1893-1900.
- [9] CHU W X, WANG C C. A review on airflow management in data centers[J]. Applied Energy, 2019, 240: 84-119.
- [10] 张亚男, 李斌, 李玲玲, 等. 西安某数据中心空调系统设计[J]. 制冷与空调, 2022, 22(11): 92-101, 105.
- [11] 赵磊, 李宏鹏. 长三角地区某数据中心空调系统设计[J]. 暖通空调, 2020, 50(1): 86-91.
- [12] 方大俊. 磁悬浮冷水机组应用于数据中心的节能潜力分析[J]. 暖通空调, 2015(E11): 1-4.
- [13] 周利军, 张立江, 刘莉莉, 等. 变频技术在数据中心暖通系统的应用研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(19): 89-91.
- [14] WANG X L, WEN Q W, YANG J X, et al. A review on data center cooling system using heat pipe technology[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2022, 35: 100774.
- [15] 颜晓光. 冷却塔间接供冷系统在数据中心的应用研究[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(5): 693-700.
- [16] CHU J J, HUANG X. Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers[J]. Energy and Built Environment, 2023, 4(1): 86-110.
- [17] 王红利, 黄翔. 数据中心用蒸发冷却(凝)技术发展现状[J]. 制冷与空调, 2021, 21(11): 1-6.
- [18] 叶萌, 张学伟, 盖东兴. 数据中心气流组织研究综述[J]. 绿色科技, 2021, 23(24): 218-221, 228.
- [19] SHRIVASTAVA S, SAMMAKIA B, SCHMIDT R, et al. Comparative analysis of different data center airflow management configurations[C]// International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2005: 329-336.
- [20] 刘鹏, 田伟龙. 大型科研单位信息机房空调气流组织模拟研究[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(5): 48-50.
- [21] JIN C Q, BAI X L, YANG C. Effects of airflow on the thermal environment and energy efficiency in raised-floor data centers: A review[J]. Science of The Total Environment, 2019, 695: 133801.
- [22] ZHANG M, ZHANG Z B, HU Y, et al. Effect of raised floor height on different arrangement of under-floor air distribution performance in data center

- [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 556-564.
- [23] ARGHODE V K, KANG T, JOSHI Y, et al. Measurement of air flow rate through perforated floor tiles in a raised floor data center[J]. Journal of Electronic Packaging, 2017, 139(1): 011007.
- [24] ZHANG K, ZHANG X S, LI S H. Simplified model for desired airflow rate in underfloor air distribution (UFAD) systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 244-250.
- [25] FAKHIM B, SRINARAYANA N, BEHNIA M, et al. Effect of under-floor blockages and perforated tile openings on the performance of raised-floor data centres[C]//17th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2010.
- [26] ARGHODE V K, JOSHI Y. Modeling strategies for air flow through perforated tiles in a data center[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3(5): 800-810.
- [27] 黄渤. 采用新型局部挡板结构的数据中心热性能优化办法[J]. 中国设备工程, 2020(15): 105-107.
- [28] 耿云. 地板下送风风道结构对数据中心热环境影响的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [29] 马昕宇. 高热流密度数据机房气流组织的数值模拟与优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [30] 秦冰月, 杨欣, 闫涛, 等. 基于热环境评价指标的数据中心冷通道封闭机房气流组织研究[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 123-128, 39.
- [31] SCHMIDT R, VALLURY A, IYENGAR M. Energy savings through hot and cold aisle containment configurations for air cooled servers in data centers[C]//International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2011: 611-616.
- [32] GAO C F, YU Z, WU J L. Investigation of airflow pattern of a typical data center by CFD simulation[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 2687-2693.
- [33] 王涛. 封闭冷通道在数据机房中的应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(3): 44-46.
- [34] 陈文辉. 热通道封闭在数据中心应用分析[J]. 洁净与空调技术, 2020, 105(1): 115-116.
- [35] NADA S A, ELFEKY K E. Experimental investigations of thermal managements solutions in data centers buildings for different arrangements of cold aisles containments[J]. Journal of Building Engineering, 2016(5): 41-49.
- [36] WANG I N, TSUI Y Y, WANG C C. Improvements of airflow distribution in a container data center[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1819-1824.
- [37] RASMUSSEN N. Improving rack cooling performance using airflow management™ Blanking Panels[J]. White Paper, 2012, 44: 2007-2008.
- [38] YUAN X L, WANG Y, LIU J X, et al. Experimental and numerical study of airflow distribution optimization in high-density data centres with flexible baffles[J]. Building and Environment, 2018, 140: 128-139.
- [39] 刘义军, 马志荣, 陈萌, 等. 地板下送风方式和几何参数对数据中心热性能的影响[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 71-80.
- [40] 张萌. 数据中心空调水温选择的技术经济分析[J]. 洁净与空调技术, 2019(3): 53-57.
- [41] 姜洁良. 数据中心能效案例及节能运行[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 95-104.
- [42] 罗海亮, 李印, 王学军. 数据中心冷却系统的温度与温差浅析[J]. 制冷与空调, 2021, 21(5): 83-88.
- [43] 陆琼文. 数据中心冷冻水供水温度设计取值探讨[J]. 上海节能, 2019(5): 345-351.
- [44] 毛路, 王伟, 曹连华, 等. 中国人寿数据中心水冷空调系统的节能方案及实施[J]. 建筑技术, 2016, 47(2): 126-130.
- [45] 熊成. 集中式空调系统变水温与变风量协调优化节能效果研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [46] 罗露, 刘刚, 朱俊斌. 某办公建筑变水量空调方案分析[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(9): 55-58.
- [47] 蒋吉敏. 冷冻水大温差的设计探讨[J]. 科技创新导报, 2019(10): 113, 115.
- [48] 张淇淇. 大温差水系统运用于数据中心空调节能性分析[J]. 上海节能, 2021(3): 309-314.
- [49] 康致博. 基于大温差高温供冷技术的数据中心冷却节能研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
- [50] 赵磊, 范强, 白本通. 数据中心间接蒸发冷却技术及大温差高温冷水技术[J]. 制冷与空调, 2021, 21(6): 21-24, 62.
- [51] 张娴, 戴新强, 李翔. 海南某数据中心空调系统设计[J]. 暖通空调, 2022, 52(1): 117-120.
- [52] LYU W H, WANG Z C, LI X F, et al. Energy efficiency and economic analysis of utilizing magnetic bearing chillers for the cooling of data centers[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 48: 103920.
- [53] 孙洁, 魏辉, 苏鹏飞. 夏热冬冷地区数据中心高效磁悬浮冷水机组研发[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 179-184.
- [54] 孙洁, 苏鹏飞, 魏辉. 浅析某数据中心小压比磁悬浮冷水机组控制方法[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(8): 58-61, 27.
- [55] 姜小军, 高英博, 高萌. 数据中心变频冷水机组应用效益分析[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(2): 56-58, 96.

- [56] 黄国瑞,刘宏伟,赵耀,等. 低负载率下数据机房绿色节能技术应用效果分析[J]. 制冷与空调,2023,23(3):70-76.
- [57] YU F W, CHAN K T. Environmental performance and economic analysis of all-variable speed chiller systems with load-based speed control[J]. Applied Thermal Engineering,2009,29(8-9):1721-1729.
- [58] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 数据中心工程设计与安装 18DX009[M]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [59] 唐瑞,熊汉兵,杨艳,等. 武汉某数据中心空调系统设计及节能分析[J]. 暖通空调,2022,52(5):96-101,35.
- [60] 任飞. 数据中心冷却塔供冷技术优化应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [61] 李佐洋,白雪莲,任飞,等. 重庆某数据中心冷却塔冬季供冷能力分析[J]. 制冷与空调(四川),2021,35(4):547-551.
- [62] 冯潇潇. 间接蒸发冷却技术在数据中心中的研究与应用[D]. 北京:清华大学,2017.
- [63] HUANG X, GUO Z C, TIAN Z W, et al. Application of new evaporative cooling air-conditioning system in a data center in Xinjiang[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2019). Springer Singapore, 2020: 727-735.
- [64] 陈璐,王晨平,王克勇,等. 间接蒸发冷却空调在数据中心的应用及分析[J]. 通信电源技术,2022,39(15):197-199.
- [65] 郭志成,黄翔,耿志超,等. 单双面进风蒸发冷却冷水机组在数据中心的应用对比分析[J]. 西安工程大学学报,2018,32(3):296-301.
- [66] 苏晓青,黄翔,王俊. 蒸发式冷凝冷水机组在数据中心的应用分析[J]. 西安工程大学学报,2016,30(1):37-42.
- [67] 区志江. 蒸发式冷凝制冷机组节能研究及其在机房空调的应用[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [68] 吴冬青,吴学渊. 间接蒸发冷凝技术在北疆数据中心的应用[J]. 暖通空调,2019,49(8):72-76.
- [69] WU X Y, SHAO S Q, AKKURT N. Investigation on application of plate-tube evaporative condensating technology for data centers in the northwest of China [J]. Energy Reports,2023,9:4713-4720.
- [70] 刘振宇,黄翔,常健佩,等. 数据中心用蒸发冷却(凝)空调机组的设计及试验分析[J]. 制冷与空调,2020,20(1):74-79.



(上接第35页)

- [11] MAHMOUDAN A, SAMADOF P, HOSSEINZADEH S, et al. A multigeneration cascade system using ground-source energy with cold recovery: 3E analyses and multi-objective optimization [J]. Energy, 2021, 223(15): 121185-121202.
- [12] HAN X L, LI J B, KONG X Q, et al. Thermodynamic performance study on a novel absorption-compression cascade refrigeration activated by an internal combustion engine[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(6): 9595-9612.
- [13] 剧成成,曲宏伟,李建风,等. CO₂ 亚临界循环用螺杆式压缩机的探讨[J]. 制冷与空调,2015,15(12):25-27.
- [14] WU D, HU B, WANG R Z. Performance simulation and exergy analysis of a hybrid source heat pump system with low GWP refrigerants[J]. Renewable Energy,2018,116:775-785.
- [15] SAYYAADI H, NEJATOLAH M. Multi-objective optimization of a cooling tower assisted vapor compression refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(1): 243-256.
- [16] REZAYAN O, BEHBAHANINIA A. Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems[J]. Energy Oxford, 2011, 36(2): 888-895.
- [17] ÖNDER K, ŞENCAN A, KALOGIROU S A. Thermoeconomic optimization of a LiBr absorption refrigeration system [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2007, 46(12): 1376-1384.
- [18] YAGHOUBI M, BAGHERNEJAD A. Thermoeconomic methodology for analysis and optimization of a hybrid solar thermal power plant[J]. International Journal of Green Energy, 2013, 10(6): 588-609.
- [19] RUBIO-MAYA C, PACHECO-IBARRA J J, BELMAN-FLORES J M, et al. NLP model of a LiBr-H₂O absorption refrigeration system for the minimization of the annual operating cost[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37(5): 10-18.