

数据中心机房制冷系统的节能技术探讨

王 赫

中国科学院计算机网络信息中心 北京 100080

【摘要】：数据中心机房制冷系统节能需以节能设计为基础，通过对机房热负荷的精准计算合理进行空调设备选型、机房布局与气流组织设计。机房制冷系统运行中，需着重围绕冷水机组、精密空调与新风系统应用节能技术，减少设备运行时的能耗。另外加强排风余热回收与冷水机组余热回收，则能对机房制冷系统产生的余热进行回收利用，进一步达到节能效果。

【关键词】：数据中心机房；制冷系统；节能技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.075

随着数字化时代的持续发展，数据中心的重要性愈发突出，同时数据中心机房也朝着大规模、高度智能化的方向发展。数据中心机房规模的增大、运行效率的提升以及运行稳定性要求的提高，均对机房制冷系统的运行提出了更高要求。新时期背景下，数据中心机房制冷系统的运行不仅要保障通风制冷效果，还需尽量减少能耗，相应的节能技术应用自然受到了广泛关注。

1 数据中心机房制冷系统节能设计

1.1 机房热负荷精准计算

数据中心机房制冷系统的节能设计与改造，需以机房热负荷精准计算为前提，从而为制冷系统选型提供可靠依据，避免出现设备选型过大导致能耗增加或选型过小导致散热效果较差的情况。对机房热负荷进行计算，需对服务器、交换机、存储设备等IT设备以及配电设备、照明设备的负荷加以计算，同时也需关注传热负荷、新风热负荷与人员散热负荷。其中IT设备散热负荷与设备额定功率直接相关，并且与负荷系数、散热系数有着密切关联；配电设备热负荷同样与配电设备额定容量、额定功率相关，同时需考虑转换效率损耗与负载系数等；照明负荷通常需基于机房面积加以确定；机房围护结构传热负荷需基于传热面积、室内外温差及传热系数进行计算并确定；新风热负荷需基于机房容积、换气次数、空气密度、比热以及室内外温差加以确定^[1]。机房总热负荷的确定需以将上述热负荷与传热负荷进行叠加，并要预留一定冗余量以免负载波动导致供冷不足，同时不得预留过大冗余导致设备低负荷运行并增加能耗，通常需预留10%~15%的冗余量。

1.2 制冷设备选型

制冷设备选型需以机房热负荷精准计算结果为依据，优先选用一级能效设备。中大型机房通常首选冷水机组，优先选用

制冷系数不低于5.5的变频离心式冷水机组，小型机房则可选用制冷系数不低于5.0的变频螺杆式冷水机组。单台冷水机组容量需与机房热负荷相匹配，通过“N+1”的冗余配置以防机组故障造成机房散热不足，同时单台机组容量不宜超过总热负荷的50%。冷水机组在机房中安装后，需对其冷冻水供水温度与回水温度、冷却水供水温度与回水温度进行合理设置，以此保障机组制冷系数正常。机房配备冷水机组，还需配套选用效率不低于85%的变频冷却水泵与冷冻水泵，确保流量与冷水机组匹配，而配套选用冷却塔则需确保其冷却效率不低于80%。中小型机房通常首选精密空调，其中高密度机房优先考虑近距离送风的列间空间，普通机房优先考虑变频精密空调。单台精密空调制冷量需与机房分区热负荷相匹配，同时单台空调覆盖范围应在500m²以内。精密空调的送风温度一般设置为24~27℃，回风温度设置为32~35℃，相对湿度设置为40%~60%，风速则可基于机房温度动态调整，从而在保障温湿度控制效果的同时防止压缩机能耗增加或浪费。对机房新风系统进行选型，通常优先考虑热回收效率不低于70%的全热交换器，确保新风处理量与机房换气次数匹配，合理设置新风模式、热回收模式及新风系统关闭的温、湿度阈值，同时为新风系统配备初效与中效双重滤网，将新风系统与精密空调、冷水机组联动控制^[2]。

1.3 机房布局与气流组织设计

为降低数据中心机房制冷系统运行的能耗，需在机房设计阶段便对机房布局以及气流组织进行合理设计。机房中机柜需面对面、背对背排列，确保机柜进风口朝向冷通道、出风口朝向热通道，冷通道与热通道宽度分别为1.2~1.5m与0.8~1.0m。新建机房优先采用封闭冷通道，对冷通道顶部与两侧进行封闭以免冷空气泄漏。机房中冷水机组配套的空调机组采用“上送风、下回风”方式，而精密空调则采用“下送风、上送风”方

式。在密度机柜周围增设局部送风设备,机柜顶部加装导流板将热空气导向回风口,能避免局部热量堆积。另外机房墙体与屋顶需使用保温材料,门窗则需使用双层中空玻璃,地面需铺设保温层并使用防静电地板,机房围护结构的所有缝隙均需使用密封胶、防火泥等进行密封处理。

2 数据中心机房制冷系统运行中的节能技术应用要点

2.1 冷水机组运行节能技术

数据中心机房制冷系统运行中,冷水机组需维持在高效区间运行以兼顾散热效果与节能效果。以机房IT负载变化为依据对冷水机组冷冻水供水温度进行动态调整,通常在负载率不高于80%、维持60%~80%、低于60%三个区间分别将冷冻水供水温度设置为13℃、14℃、15℃,而且每次调整幅度不得超过1℃,调整后至少需稳定运行30min,以防快速调整使得机房温度产生波动。以室外环境维度为依据对冷水机组冷却水温度进行动态调整,通常在室外温度不超过25℃、维持25~32℃、超过32℃的情况下分别将冷却水温度设置为30℃、32℃以及32~35℃。冷水机组的冷冻水泵与冷却水泵的转速需基于冷冻水、冷却水流量需求进行动态调整,确保流量与负载率成正比。冷水机组运行过程中,定期检查冷却塔水位和水泵运行电流、转速,确保参数正常,避免其冷却效果不佳。冷水机组运行台数需根据总热负荷变化进行动态调整,避免单台机组低负荷运行,同时严禁开启多台机组低负荷运行而导致能耗浪费^[3]。

冷水机组需通过轮巡模式实现轮换运行,合理分配每台机组运行时间,以防特定机组长期运行而磨损严重、能效降低、老化加剧等。数据中心机房冷水机组运行过程中,需定期对冷凝器、蒸发器进行清洗,每月检查制冷剂压力并在压力低于标准值时及时补充制冷剂,每周检查冷水机组运行状态并对故障进行排查与处理。另外冬季室外温度不超过10℃时,应关闭冷水机组并通过冷却塔与板换方式实现基于冷空气的冷冻水冷却。

2.2 精密空调运行节能技术

数据中心机房精密空调的运行需以精准控温、按需送风为核心,从而减少无效能耗。对精密空调送风温度进行动态调整,通常在室外温度不超过20℃、维持在20~30℃、超过30℃时,将送风温度分别设置为27℃、25℃与24℃,如无特殊需求严禁将送风温度设置为24℃以下。精密空调湿度控制需以将机房相对湿度控制在40%~60%范围为核心,即在机房相对湿度超过60%时开启除湿功能并降低风机转速,从而提高除湿效率;而在机房相对湿度低于40%时,优先利用新风自然加湿

并在必要时开启加湿功能,从而避免不必要的电加湿能耗。精密空调风机转速需基于机房冷通道温度进行动态、变频控制,当冷通道温度分别为不超过25℃、25~27℃、超过27℃时,风机转速应分别调整至额定转速的70%~80%、80%~90%、100%,以免风机长期满速运行而徒增能耗。合理切换精密空调运行模式,也能有效降低能耗。通常在室外温度不超过24℃、机房相对湿度不超过60%、新风滤网清洁的情况下,可通过关闭空调压缩机与加湿除湿功能、仅开启风机与新风阀、调整新风量的方式切换至全新风模式;在机房负载不超过50%时,可将精密空调切换至节能模式,从而降低压缩机运行频率、风机转速;将精密空调与机房IT设备负载联动,可实现精密空调在联动模式下根据IT设备负载变化动态调整^[4]。

精密空调运行过程中,需定期进行滤网清洁与更换、蒸发器与冷凝器清洁、加湿器系统电极清洁、加湿罐更换水盘清洁等,并要对各种故障进行排查与处理。针对精密空调漏水故障,需排查排水管堵塞、U型存水弯干涸、加湿水管松脱、加湿罐溢水等,并在发现故障后针对性地进行维修或更换。针对精密空调湿度超标故障,需检查温湿度设定点及回差是否分别为50%和±5%,如不合理需对参数进行调整并开启除湿优先模式,然后再检查加湿接触器粘连情况以及机房密封性,对粘连的接触器进行更换,将墙体、门窗缝隙封堵好。针对精密空调制冷不足的故障,需通过清洁或更换滤网、检查制冷剂压力并在压力过低时补充制冷剂、检查压缩机过载情况与室外冷凝器脏堵情况并进行处理等方式,有效处理故障。另外针对机房中备用或闲置的精密空调,需每月启动一次并运行至少30min,检查运行状态的同时避免长期闲置造成部件老化、卡滞等问题。

2.3 新风系统运行节能技术

新风系统运行中,节能的关键在于对室外新风的合理运用,从而有效减少机械制冷负荷。以室外温湿度为依据进行新风量动态调整,通常在室外温度不超过24℃、相对湿度不超过60%时,新风系统的新风量设置为最大,开启全新风模式,同时关闭机械制冷,利用室外新风直接降温;室外温度为24~28℃、相对湿度不超过60%时,新风系统的新风量调整为中等,开启热回收模式,通过回收排风余热的方式对新风进行预处理;室外温度为28~32℃、相对湿度超过60%时,新风系统的新风量调整为较小,开启热回收与除湿模式,从而减少新风带来的湿负荷;室外温度超过32℃、相对湿度超过70%时,可关闭新风系统,以免新风带来额外的冷负荷与湿负荷而增加能耗。将新风系统与精密空调、冷水机组进行联动控制,确保全新风模式下精密空调与冷水机组的制冷量会自动降低甚至关闭部分制冷设备;新风系统关闭或开启热回收模式时制冷设

备制冷量适度提升,以防机房冷通道温度超过 27℃;机房 CO₂ 浓度超过 1000ppm 或无人员值守机房 CO₂ 浓度超过 1500ppm 时,新风量自动增加并在 CO₂ 浓度降至标准值范围内后自动减少。

每周对新风系统中全热交换器的热交换芯体进行检查,每月对热交换芯体进行清洁,每半年对芯体滤芯进行更换,能保障热回收效率,防止热回收失效而造成的能耗增加问题。新风系统的初效滤网需每周清洁、每月更换,中效滤网则需每季度清洁、每半年更换,而且更换时需关闭新风系统以防灰尘进入机房。每月对新风管路进行检查,确保不存在管路松动、破损等问题,如发现问题需及时修复。每季度对新风风机运行状态进行检查,确保风机轴承润滑油充足、风机叶轮洁净、风机电机运行电流不超过额定电流。

3 数据中心机房制冷系统余热回收节能技术应用要点

3.1 排风余热回收

小型机房余热总量小,一般采用排风余热回收方式进行余热回收。使用热交换器、循环水泵、温度传感器、流量传感器等,可将机房精密空调排风余热进行回收并用于生活用水加热、机房附属区域供暖等,从而减少水加热、供暖的能耗。热交换器一般选用传热效率高、占地面积小的板式设备,换热面积则要根据排风量、空气密度、比热、排风与循环水温差、传热系数、平均温差等加以确定;循环水泵则选用流量与排风量匹配、效率不低于 85%、扬程基于管路长度确定的变频控制水泵。将热交换器安装于机房精密空调排风口处,确保热交换器与空调排风口距离不超过 1m,使用循环水管道连接热交换器与水箱或供暖管路,可形成排风经热交换器后排出室外并加热水管的余热回收模式。排风余热回收模式下,循环水进水温

度与出水温度可分别设置为 20~25℃与 40~50℃,而水泵转速则需在排风温度不低于 35℃或低于 35℃时分别设置为额定转速的 80%~100%或 60%~80%。排风余热回收系统运行过程中,每月对热交换器翅片进行清洁,每季度对循环水管路进行检查和清洗,每月对水质硬度与浑浊情况进行检查并处理,夏季无热回收需求时可关闭余热回收系统并每月启动一次循环水泵以防闲置老化。

3.2 冷水机组余热回收

大中型机房余热总量较大,一般采用回收效率高、节能效益显著的冷水机组余热回收方式。冷水机组冷凝器排出的余热可通过水源热泵机组提升热量品位,从而替代传统供暖设备进行余热回收利用。组建冷水机组余热回收系统,需合理选用制冷系数不低于 4.0、制热功率与余热总量匹配的一级能效水源热泵机组,同时配备高效板式热交换器、循环水泵、温度传感器、压力传感器与流量传感器。板式换热器一端需连接冷水机组冷凝器冷却水出口,另一端则需连接水源热泵机组的蒸发器,从而形成余热回收循环系统。冷水机组余热回收系统运行过程中,冷水机组冷凝器冷却水出口温度一般设置为 37℃,水源热泵机组蒸发器进、出水温度分别控制为 37℃、32℃,水源热泵机组冷凝器出水温度控制为 50~55℃,循环水泵在余热总量不低于 300kW 和低于 300kW 时的转速分别为额定转速的 90%~100%和 70%~90%。

4 结语

综上所述,数据中心机房制冷系统的节能技术应用主要围绕节能设计、系统运行管控、余热回收利用三大维度展开。可预见的是,随着液冷技术的发展,数据中心机房制冷系统节能水平将持续提升,从而强化智能时代发展的能源保障。

参考文献:

- [1] 张勇坚,周玉娟,卿江洁.某银行数据中心机房暖通空调系统升级改造与节能对比分析[J].暖通空调,2025,55(02):130-137.
- [2] 张超轶,刘渊源,刘林忠,等.北京某数据中心机房空调系统节能改造案例分析[J].暖通空调,2024,54(S1):275-277.
- [3] 张栩境.数据中心机房空调系统设计及节能改造研究[J].节能,2024,43(01):81-83.
- [4] 田彩霞.数据中心机房热管空调系统节能改造案例分析[J].制冷,2023,42(04):22-23+39.