

数据中心机电散热系统与空调暖通协同控湿的节能策略

刘兰花

江西省通信产业服务有限公司南昌分公司 江西南昌 330096

摘要：本文针对数据中心高能耗问题，研究了机电散热系统与空调暖通系统协同控湿的节能策略。研究首先深入剖析了两大系统在产热排湿、温湿度调节方面的内在机理及其运行中的关联与矛盾，揭示了传统控制模式的局限性。在此基础上，文章提出了三大核心节能策略：基于热通道封闭的湿度分区控制以实现精准调控、自然冷却与机械制冷的优化切换以充分利用自然冷源、以及新风引入与回风混合的动态调节以降低制冷负荷。进而，探讨了通过建立一体化智能监控平台、制定基于负荷预测的联动控制方案及优化系统运行参数与控制逻辑等实施路径，确保策略的有效落地。该研究旨在通过系统间的协同与智能化管理，在保障IT设备稳定运行的前提下，显著提升数据中心能源利用效率，推动其向绿色、智能方向发展。

关键词：数据中心；协同控湿；节能策略；自然冷却

引言

随着数字经济的蓬勃发展，数据中心已成为支撑现代社会运行的关键基础设施，但其巨大的能源消耗也随之成为行业乃至社会关注的焦点。在数据中心的总能耗中，用于散热和湿度控制的空调暖通系统占据了相当大的比例，而传统的独立控制模式存在能耗高、响应慢等问题。因此，将产热的机电散热系统与调湿控湿的空调暖通系统视为一个整体，研究其协同控湿的节能策略，对于降低数据中心PUE、实现绿色低碳运营具有重要的理论价值和紧迫的现实意义。

一、数据中心机电散热与空调暖通系统协同运行机理

（一）机电散热系统的产热与排湿特性

数据中心机电散热系统，主要指IT设备（如服务器、存储设备、网络交换机）及其配套的供电系统（如UPS、PDU），其核心功能是进行数据处理和电力转换，此过程伴随着显著的产热与特定的排湿特性。这些特性是理解数据中心热湿环境源头的关键。IT设备的产热是其运行过程中不可避免的物理现象。其电能消耗基本转化为热能，产热量与计算负载直接相关，呈动态变化。热量散发主要有两种途径：一是设备内部风扇强制对流，排出热空气形成机柜热点；二是设备外壳辐射和自然对流，向周围散热。供电系统因电能转换效率问题产生大量稳定热负荷，产热平稳但总量可观。在排湿方面，机

电散热系统不主动产生或吸收水分，但对机房湿度有间接影响。设备风扇加速空气流动，使局部湿度均匀。IT设备排出的高温干燥空气，相对湿度低，与低温区域接触会增加冷表面凝露风险。机柜内部为防短路呈低湿状态。这种“产热不产湿、排热又排湿”特性构成数据中心热湿环境基础，其产热动态性和排气干燥性，对空调暖通系统调控策略提出精确匹配要求^[1]。

（二）空调暖通系统的温湿度调节原理

数据中心空调暖通系统是维持IT设备所需特定温湿度环境的核心保障，其调节原理基于热力学和空气调节的基本原理，通过一系列设备组合实现对空气温度和湿度的独立或耦合控制。温度调节通过制冷循环和空气输送实现。制冷机组产生冷冻水，由水泵送至空调末端，空气在末端与冷冻水热交换降温，再由风机送入机房冷却IT设备，热空气回空调机组形成闭式循环。湿度调节较复杂，常与降温耦合。机房回风流经低于露点温度的冷却盘管时，水蒸气凝结排出，即“减湿冷却”或“冷凝除湿”，这是传统主要除湿方式，但会造成“过冷”和能源浪费。为提高能效，现代数据中心采用转轮除湿等先进技术，将除湿与降温解耦，避免不必要再热能耗。此外，新风系统引入需对新风预处理后与机房空气混合。空调暖通系统调节是能量输入转换过程，其设计科学性和控制精确性决定数据中心运行能耗水平。

（三）两大系统协同运行的内在关联与矛盾

机电散热系统与空调暖通系统在数据中心内构成了

一个紧密耦合、相互作用的整体，二者之间存在着深刻的内在关联，同时也存在着固有的运行矛盾，这种关联与矛盾是协同控湿节能策略研究的出发点。其内在关联首先体现在能量流上。机电散热系统是热量“生产者”，其产生的热量由空调暖通系统“搬运”到外界，二者在热量上形成供需平衡。IT负载变化决定空调制冷负荷需求，空调制冷能力需实时满足动态需求。其次，二者在空气流上有关联，空调输送的冷空气与IT设备排出的热空气在机房形成气流组织，混合效率影响冷却效果。最后，在湿平衡上，机电系统排出的高温干燥空气是机房湿环境一部分，空调需精确控制送风含湿量以维持湿度稳定。不过，二者存在运行矛盾，核心是能耗目标不一致。机电散热系统首要保障计算性能，非以节能为主；空调暖通系统则在保障环境参数下尽量降低能耗，这一矛盾在湿度控制上突出，传统空调“过度冷却再加热”模式能耗大，与数据中心节能目标相悖。此外，控制响应速度也有矛盾，IT负载变化快，大型制冷系统响应慢，会导致温度波动。理解这些关联与矛盾，揭示了传统“各自为政”控制模式的局限，表明需将两大系统视为整体，通过协同控制策略，在满足IT设备运行需求时寻求系统总能耗最低的最优运行状态，这是节能的根本途径^[2]。

二、数据中心协同控湿的节能核心策略

（一）基于热通道封闭的湿度分区控制策略

基于热通道封闭的湿度分区控制策略，其核心思想是通过物理隔离改变机房内的气流组织，从而创造两个具有不同温湿度特性的独立区域，并针对各区域的特点实施差异化的、更为精准的湿度控制，以达到节能目的。传统数据中心采用混合送风模式，冷热空气大量混合，需对整个机房统一调控温湿度，为确保IT设备进风口湿度达标，要对机房空气除湿或加湿，处理风量大、能耗高。热通道封闭技术将机柜排出的热空气限制在热通道，阻止其与冷空气混合，形成冷、热通道，实现物理隔离。因IT设备对湿度的要求主要在冷通道，所以湿度控制重点可集中于此。空调系统只需监测和控制冷通道湿度，维持在推荐范围，热通道湿度控制要求可放宽，因热空气饱和含湿量高，无凝露风险，无需进行湿度处理，避免额外能耗。此外，热通道空气可作优质回风，提高制冷机组蒸发温度和制冷效率。该策略通过物理隔离，将湿度控制从“面”转为“线”，减小需调控的空气体积和湿负荷，使空调系统低能耗运行，保障IT设备关键环境参数，实现节能与可靠性统一^[3]。

（二）自然冷却与机械制冷的优化切换策略

自然冷却与机械制冷的优化切换策略，是一种充分利用自然环境低温资源、最大限度减少高能耗机械制冷运行时间的节能方法，其核心在于建立一套科学的、基于多参数判断的切换逻辑。数据中心的巨大热量最终需要排向室外环境，当室外环境温度低于数据中心回风温度时，就具备了利用自然冷源的潜力。传统制冷系统不论室外温度，依赖压缩机等机械制冷设备，能耗大。优化切换策略是在系统中增加自然冷却的板式换热器或采用风冷冷水机组，室外条件适宜时，用室外冷空气冷却数据中心内循环水或空气，部分或完全替代机械制冷。该策略关键是“优化切换”，即确定何时、如何切换，决策应综合判断，而非仅基于单一干球温度。理想的优化切换模型会实时监测室外空气干球温度、湿球温度（间接蒸发冷却系统）、数据中心制冷负荷及自然与机械制冷系统实时能效比。当模型预测开启自然冷却、部分或全部关闭机械制冷可降低系统总能耗时，触发切换。切换过程需优化，设定温度回差区间，避免频繁启停。部分自然冷却模式下，要精确控制两侧负荷分配。此策略将数据中心与外部气候智能联动，在不牺牲制冷可靠性前提下，利用自然能源，降低制冷系统全年能耗，适用于凉爽地区数据中心，是优化PUE指标的关键技术路径。

（三）新风引入与回风混合的动态调节策略

新风引入与回风混合的动态调节策略，是一种通过智能调节室外新风与机房回风的混合比例，在满足空气质量和湿度控制要求的同时，利用新风焓值降低制冷负荷的节能方法。传统数据中心为维持洁净度和正压，采用最小新风比运行，混合处理新风与回风，未充分利用新风节能价值。动态调节策略将新风视为可调节、主动资源，核心是建立基于实时焓值比较的决策模型。系统持续监测室外新风和机房回风的温湿度并计算焓值，当室外新风焓值低于回风焓值时，控制系统增大新风阀开度、增加新风引入量、减少回风量，利用新风“稀释”回风，降低空调制冷和除湿能耗；反之，当室外新风焓值高于回风焓值，系统将新风量降至最小值，避免增加制冷负荷。调节过程动态连续，系统根据焓差精确计算最优新风-回风混合比，实现总制冷负荷最小化。在湿度控制上，室外空气干燥时引入新风可降温除湿，湿度过高时限制新风引入，优先利用回风循环。该策略打破新风量固定思维，通过精细化动态调节区分利用室外空气属性，使空调系统以最经济方式处理空气，在保障室

内环境质量前提下深度节能^[4]。

三、协同控湿节能策略的实施路径

(一) 建立一体化的智能监控平台

建立一体化的智能监控平台是实现协同控湿节能策略的物理基础和数据中枢，其核心在于打破机电散热系统与空调暖通系统之间的信息孤岛，构建一个统一、全面、实时的数据采集、分析与决策支持系统。传统数据中心监控分立，动环监控系统管IT设备功耗和温度，楼宇自控系统（BAS）管空调运行，数据标准不一、缺乏交互，无法全局优化。一体化智能监控平台部署统一传感器网络和数据接口，汇聚不同系统海量数据，如机柜PDU功耗、服务器温度、空调温湿度等，形成全站“数字孪生”数据映像。平台核心价值是强大的数据分析与可视化能力，能直观展示热湿环境和能源流向，深度挖掘数据，计算关键性能指标，识别能耗异常。它还为上层应用提供标准化接口和资源，是负荷预测和联动控制的前提。建立该平台，管理者可全局洞察系统运行，为精细化控制和优化提供可靠数据，是迈向主动、智能管理的第一步。

(二) 制定基于负荷预测的联动控制方案

制定基于负荷预测的联动控制方案，是将协同控湿从静态的、被动的响应，提升为动态的、主动的调节的核心实施路径。该方案核心是用预测模型预知机电散热系统热湿负荷变化，据此调整空调暖通系统运行策略，实现供需精准匹配与能耗最小化。负荷预测是联动控制基础，要利用一体化监控平台历史数据，结合机器学习算法建高精度IT负载预测模型，输入含时间、历史负载、天气预报、业务计划等信息，输出未来机房总及各区域热负荷预测值。基于准确预测，联动控制方案可制定前瞻性策略。如预测夜间IT负载下降，提前降制冷机组功率或切换自然冷却模式；预测高温高湿天气，提前夜间除湿。湿度控制上，可实现机电与空调系统深度协同，预测局部热点和排湿量增加，提前增大对应空调送风量并微调除湿设定值。基于预测的联动控制赋予系统“预见性”，将控制从“事后补救”变为“事前预防”，提升系统运行稳定性与能源效率，是数据中心精细化、智能化节能关键^[5]。

(三) 优化系统运行参数与控制逻辑

优化系统运行参数与控制逻辑是实现协同控湿节能策略持续改进和深化的关键，其通过软件调优挖掘系统

节能潜力，是数据驱动的闭环优化过程。一是对关键运行参数寻优，数据中心控制系统有大量可设定参数，传统设定值非最优，通过一体化监控平台收集数据，采用数据驱动算法全局寻优，同时要验证调整是否会致局部热点或湿度超标。二是对控制逻辑优化，传统控制逻辑缺乏全局协调，优化后的应更智能协同，如采用集群协同控制、避免“冷热抵消”，还可引入自适应控制逻辑。这一路径以低投入成本，通过软件和算法升级挖掘系统能效，将数据中心运行管理转为智能过程，是协同控湿节能策略长期有效的核心保障。

结语

数据中心机电散热系统与空调暖通系统的协同控湿节能策略，是应对当前数据中心高能耗挑战的有效途径。通过热通道封闭的湿度分区控制、自然冷却与机械制冷的优化切换、以及新风引入与回风混合的动态调节等核心策略，数据中心能够在保障IT设备稳定运行的同时，显著降低制冷系统的能耗。而建立一体化的智能监控平台、制定基于负荷预测的联动控制方案、以及优化系统运行参数与控制逻辑等实施路径，则为这些策略的有效落地提供了技术支撑和管理保障。这些策略和路径不仅有助于数据中心实现节能减排的目标，更推动了数据中心向绿色、智能、高效的方向发展。未来，随着技术的不断进步和应用场景的持续拓展，协同控湿节能策略将在数据中心领域发挥更加重要的作用，为构建可持续发展的数字基础设施贡献力量。

参考文献

- [1] 薛怀坤, 李丹, 杜永鹏. 数据中心环状空调水系统计算分析[J]. 暖通空调, 2021.
- [2] 安理. 数据中心暖通空调水冷系统节能控制优化及应用[J]. 学生电脑, 2021(9): 0238-0239.
- [3] 郭天明. 智慧能源站数据中心节能措施的研究[J]. 名城绘, 2020, 000(011): P.1-1.
- [4] 陈菡, 唐旭. 全生命周期碳排放视角下数字技术在暖通空调设计运维中的应用[J]. 暖通空调, 2022, 52(10): 50-54. DOI: 10.19991/j.hvac1971.2022.10.08.
- [5] 江浩. 暖通空调系统群智能协调优化方法与节能控制策略研究[J]. 中国设备工程, 2022(018): 000. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.18.037.