

Analysis of Energy-saving Optimization Strategies for Data Center Cooling Systems

Shihuan Wei

China United Network Communications Co., Ltd. Shijiazhuang Branch, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

As the core infrastructure of the information society, the operational energy consumption of data centers has become a critical factor constraining the sustainable development of the industry. Among these, the cooling system accounts for approximately 40% to 60% of the total energy consumption. Optimizing the operational efficiency of the cooling system is a key approach to reducing energy consumption and improving operational reliability in data centers. This paper focuses on energy-saving technologies and system optimization, exploring energy-saving strategies for data center cooling systems from four dimensions: airflow organization, cold source configuration, intelligent control, and energy efficiency evaluation. By analyzing the energy consumption characteristics and operational bottlenecks of the cooling system, a comprehensive optimization solution is proposed, which includes cold-hot aisle isolation, variable frequency control, utilization of natural cold sources, and artificial intelligence-based energy consumption regulation. The research results indicate that this strategy can achieve a 10% to 25% reduction in Power Usage Effectiveness (PUE) without compromising the operational stability of the equipment, providing a feasible path and technical reference for the construction of green data centers and low-carbon operations.

Keywords

data center; cooling system; energy-saving optimization; airflow organization; intelligent control; energy efficiency management

数据中心机房制冷系统节能优化策略分析

魏士欢

中国联合网络通信有限公司石家庄市分公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

数据中心作为信息化社会的核心基础设施,其运行能耗问题已成为制约行业可持续发展的重要因素。其中,制冷系统能耗约占总能耗的40%~60%,优化制冷系统的运行效率是降低数据中心能耗、提升运行可靠性的重要途径。本文以节能技术与系统优化为研究主线,从气流组织、冷源配置、智能控制和能效评估四个维度探讨数据中心制冷系统的节能策略。通过分析制冷系统的能耗特征与运行瓶颈,提出基于冷热通道隔离、变频控制、自然冷源利用与人工智能能耗调控的综合优化方案。研究表明,该策略可在不影响设备运行稳定性的前提下,实现能效比(PUE)降低10%~25%,为绿色数据中心建设与低碳运维提供了可行路径与技术参考。

关键词

数据中心; 制冷系统; 节能优化; 气流组织; 智能控制; 能效管理

1 引言

随着云计算、大数据与人工智能的快速发展,数据中心的规模与数量持续增长,其能源消耗问题日益突出。制冷系统作为数据中心运行中最大的能耗单元,其效率水平直接决定整体能效表现。传统制冷系统设计多以冗余安全为核心,存在过度冷却、气流混乱与负载不匹配等问题,导致能耗高企。国际能源署数据显示,全球数据中心的年能耗已占社会总用电量的2%~3%,且仍呈上升趋势。面对节能减排与绿色转型的双重压力,优化制冷系统成为数据中心节能改

造的关键。本文在分析制冷能耗结构与运行特征的基础上,结合工程案例与智能化技术,系统探讨数据中心机房制冷系统的节能优化路径,以为行业绿色运营与高效设计提供参考依据。

2 数据中心制冷系统能耗特征与现状分析

2.1 制冷系统能耗构成与运行特征

数据中心制冷系统包括冷源设备、末端空调设备、冷却塔及辅助水泵系统。冷水机组和机房精密空调为主要耗能环节,约占总能耗的70%以上。制冷能耗受负载变化、室内外温差、机组运行效率等因素影响显著。传统制冷系统普遍存在负荷波动响应滞后、系统联动性不足及控制策略单一等问题,造成部分设备长时间高负荷运行,能效比偏低。由

【作者简介】魏士欢(1976-),男,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事通信电源研究。

于冷源系统多采用固定频率压缩机与定流量水泵，其运行状态难以实时匹配 IT 设备的散热需求，形成“供冷过剩”现象，导致能源浪费^[1]。

2.2 气流组织不合理带来的能效损失

机房内设备密度高、热负荷集中，若气流组织设计不当，冷空气无法有效送达服务器进风口，导致局部过冷与热点并存。传统上采用的上送风下回风或下送风上回风方式存在冷热气流混合问题，降低了制冷效率。部分数据中心未采用隔热封闭措施，使冷热通道间的气流短路现象加剧。为保证热点区域温度达标，系统往往被迫提高冷量供应，造成整体能耗上升。气流组织优化已被证明是提升制冷效率的首要途径，其合理性直接决定能量利用率。

2.3 制冷系统节能改造面临的技术挑战

尽管节能技术不断发展，但数据中心制冷系统改造仍面临多重困难。一方面，机房运行连续性要求高，停机施工风险大；另一方面，改造需兼顾系统安全、投资回报与维护复杂度。当前部分中小型数据中心仍采用传统定速压缩机制冷模式，能效提升空间有限。此外，智能化监控系统的普及率偏低，设备间协同调度能力不足。如何在保障系统稳定运行的前提下，实现制冷系统的动态优化与精细化管理，是当前节能研究的重点与难点^[2]。

3 气流组织优化与冷热通道隔离技术

3.1 冷热通道隔离设计原理与应用

在数据中心制冷系统中，冷热通道隔离技术是提升能效与稳定性的核心措施。通过对服务器机柜的进风与出风路径进行物理分离，构建独立的冷、热气流通道，可有效防止冷热空气混合，减少制冷能量损失。其基本原理是利用气流的定向组织，使冷空气集中送入设备进风侧，热空气集中回收至制冷端，从而实现温度分区与能量梯度优化。冷热通道隔离主要分为冷通道封闭与热通道封闭两种方式。冷通道封闭模式适用于制冷能力充足的常规数据中心，可维持机柜前端恒温环境；热通道封闭则更适合高密度负载场景，通过将热气流集中回收并定向排出，有效降低整体机房温差。研究与工程实践表明，合理的隔离设计可使服务器进风温度提升 2~4℃，制冷效率提高 15%~20%，并显著减少局部过冷区域。结合送风地板或顶部风管系统使用，可进一步优化气流组织，使制冷系统实现高效、均匀、稳定运行。

3.2 气流分布优化与动态调节策略

在数据中心节能管理中，气流分布的合理性直接影响制冷系统的能效表现。除通道隔离外，还需通过动态调节实现冷量供需平衡。利用智能送风地板、可变风阀与变频风机等设备，可根据实时负载分布与温度反馈动态调整送风量与风向，避免冷量供应不均。气流分布优化不仅是硬件结构设计问题，更涉及计算与控制的精细化。CFD (Computational Fluid Dynamics) 仿真技术被广泛应用于气流组织分析，通

通过对气流流线、温度场与压力场的模拟预测，管理者可在机房设计阶段或改造过程中准确评估冷量分布与空气循环效率。CFD 结果还能指导风口布置、机柜布局及送回风比例调整，使气流流动路径最短化、温差最小化，从而减少局部热点与能量浪费。实践表明，采用仿真与动态控制结合的气流管理策略，可使制冷系统整体能耗降低 10%~15%，有效提升运行的精细化水平与稳定性^[3]。

3.3 局部冷却与气流精细控制

随着高性能计算 (HPC) 与人工智能集群的兴起，数据中心的局部热密度显著增加，传统整体送风模式已难以满足高功率设备的散热需求。局部冷却技术通过“近源制冷”方式，在高负载区域实现高效热管理。列间空调、行级制冷单元及液冷系统是典型的局部冷却手段。列间制冷设备通过紧贴热源的送风路径，将冷量精准输送至服务器进风口，减少冷气流距离与能量损失；液冷技术则以高导热介质（如乙二醇或去离子水）直接吸收芯片热量，并经热交换装置将热能排出，能效比 (COP) 较传统空气冷却提升 30% 以上。部分先进系统采用微通道热管理方案，通过嵌入式散热模块实现芯片级热控制，进一步提升散热精度与系统可靠性^[4]。

4 制冷系统节能控制与冷源优化

4.1 变频技术在制冷系统中的应用

变频控制技术在数据中心制冷系统中具有显著的节能与调控优势。通过在冷水机组、冷却塔风机及循环水泵等设备中应用变频驱动，可实现运行参数的动态调整，使供冷量与机房实际负载相匹配。该技术利用变频器控制电机转速，当热负荷下降时自动降低运行频率，从而减少能耗与机械损耗。研究表明，在部分负载条件下，变频系统的能耗可比定速系统降低 25%~35%。此外，变频控制可平滑设备启停过程，避免压缩机频繁启动引发的电流冲击，延长设备使用寿命。配合能耗监测与自动控制模块，系统可实现对冷量输出、功率消耗及运行效率的实时监测与动态优化。变频控制的核心价值不仅在于节能，更在于实现供冷系统的柔性调节与智能响应，使机房环境保持在恒温恒湿的最佳状态，确保 IT 设备稳定运行的同时达到能源利用最大化。

4.2 自然冷源与余热回收的协同利用

在中高纬度地区或冬季低温环境下，自然冷源的引入可有效降低机械制冷的能耗负担。通过配置冷却塔、空气换热器或板式换热系统，当室外温度低于设定阈值时，可自动切换至自然冷却模式，使冷却水直接或间接参与制冷过程，从而减少压缩机运行时间与电能消耗。同时，数据中心运行过程中产生的废热可通过热交换装置实现余热回收，用于生活热水、采暖或吸收式制冷系统，实现能源的梯级利用。实践表明，自然冷源与余热回收协同运行可使 PUE 值下降 0.2~0.3，节能率达 15% 以上，不仅显著降低运行成本，也改善了机房外部环境热排放问题。随着智慧能源管理平台的

应用,该模式可实现自动切换与能效平衡,在满足全年稳定制冷需求的同时,实现能源的循环利用与绿色运营^[5]。

4.3 冷水机组能效优化与群控策略

冷水机组作为数据中心制冷系统的核心,其运行效率直接决定整体能效表现。传统机组多以单台独立控制为主,存在负荷分配不均与能耗波动大的问题。通过引入智能群控技术,可对多台机组的运行状态进行实时监测与优化调度,实现负荷均衡与动态协同控制。群控系统根据实时冷量需求、室外气候条件及机组性能曲线,自动选择最优组合运行方案,使各机组始终处于高效能区间。同时,通过调整冷冻水出水温度与回水温差,优化换热效率,进一步降低能耗。在高负载阶段,系统可优先启用高效率机组,低负载阶段则减少运行台数以避免能量浪费。结合能效模型与预测算法,群控系统能根据历史运行数据进行自学习与趋势优化,实现“预判式”能耗管理。该策略显著提升了制冷系统的综合能效水平,为数据中心实现精细化节能与智能化运维提供了坚实基础。

5 智能化监控与综合能效管理

5.1 智能监测与数据驱动的能效调控

数据中心制冷系统的高效运行离不开智能化监控体系的支撑。通过部署物联网传感器网络,可对机房内温湿度、气流速度、设备功率与能耗水平进行全时段监测,实现运行数据的高频采集与动态可视化。大数据分析算法可对采集的历史与实时数据进行多维度关联计算,识别系统能耗波动规律与异常状态,实现能耗趋势预测和设备健康评估。基于人工智能的自适应控制系统能够自动识别环境与负载变化,实时调整冷水机组运行参数、风机转速及送风温度,实现精准制冷与动态能量平衡。通过数据驱动的闭环控制,系统能持续优化制冷效率,使机房温度分布更均匀、气流组织更合理,从而有效降低非必要能耗。该模式不仅提升了运行稳定性,也为实现机房运维的智能化、无人化提供了基础条件。

5.2 能效评估体系与 PUE 优化路径

PUE (Power Usage Effectiveness) 是评价数据中心整体能效水平的核心指标,其优化直接反映制冷系统的节能成效。为科学提升 PUE,应构建完善的能效评估体系,从设备能耗、环境控制与系统耦合多个层面进行综合分析。能效评估不仅关注冷水机组的能效比 (COP) 与末端空调的能量

利用率,还需结合机房负载特性与环境条件,对单位制冷能耗、系统能量损耗及温控稳定性进行量化计算。通过能耗数据建模与趋势分析,可识别高耗能环节并制定优化策略,如调整供回水温差、优化冷却塔控制曲线、提高冷凝效率等。

5.3 人工智能与数字孪生在节能管理中的应用

人工智能与数字孪生技术的融合,为数据中心制冷系统的节能优化提供了创新路径。数字孪生通过构建物理机房的虚拟镜像,实时映射制冷系统的运行状态,能够在虚拟环境中对不同控制策略进行能效仿真与风险评估,实现优化方案的预测性验证。人工智能算法利用深度学习与强化学习技术,对环境参数、负载变化与设备响应进行自学习,逐步形成自适应调控模型。在复杂的运行条件下,AI 可自主计算最优制冷策略,自动调配冷源与末端系统,确保能耗最小化与运行安全性并重。国际领先的数据中心如 Google 与 Microsoft 已应用 AI 自学习系统进行制冷管理,实现能耗降低 10%~15%,同时提升设备运行寿命与运维精度。

6 结语

数据中心制冷系统节能优化不仅关乎能源消耗控制,更关系到信息基础设施的可持续发展。通过综合应用气流优化、变频控制、自然冷源与智能化管理等多维策略,可有效提升制冷系统的整体能效。研究表明,构建以数据驱动为核心的智能节能体系,可实现系统动态平衡与高效运行,使 PUE 显著下降。未来,随着人工智能、物联网与数字孪生技术的进一步融合,制冷系统的节能管理将更加精准与自适应。行业应从单一设备节能转向系统级优化,从静态管理迈向智能协同,推动数据中心向绿色、高效、低碳的可持续方向发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨国淑.基于“双碳”目标的既有数据中心制冷系统架构及节能潜力分析[J].绿色建筑,2025,17(01):109-112.
- [3] 盛元红.数据中心机房制冷系统节能分析[J].华东科技,2022,(07):82-84.
- [4] 许伟伟.数据中心机房空调气流组织研究[D].北方工业大学,2022.
- [5] 孙倩.低碳经济下数据中心机房节能的思考[J].产业与科技论坛,2013,12(16):73-74.