

# 智算中心高密度环境的能耗降低技术实践研究

金福林

武汉烽火信息集成技术有限公司 湖北 武汉 430205

**摘要：**智算中心高密度环境下能耗降低技术的实践研究，以西北某A级智算中心为实际工程载体，针对该中心高密度部署带来的散热压力大、能耗偏高问题，通过精细化管理与成套技术手段搭建能效优化实施路径。通过对服务器硬件架构的针对性改进、冷却系统智能化升级以及电源管理策略的整体优化，实现了算力设备功耗精准管控、散热与能耗动态匹配、供电效率最大化。项目落地后PUE由1.7降至1.2，年节约电量约3812万度，年减少碳排放约3.8万吨，为高密度智算中心的绿色可持续运行提供了可落地的技术支持。

**关键词：**智算中心；高密度环境；能耗降低技术；实践

引言：智算中心是人工智能算力供给的核心基础设施，高密度部署在提升算力密度的同时，也带来了愈加突出的能耗与散热挑战。西北某智算中心为A级建设标准，总建筑面积12000平方米，一期总算力3000P，总电力容量按8219KVA×2配置，共有机柜450台，主机房核心区单机柜负载功率高达28KW，属于典型的高密度算力环境。基于上述工程实际，本研究以该项目为依托，采用智能化能耗管理技术，结合传感器监测、数据分析与自动控制手段，形成一套适配高密度场景的能耗实时监测与动态优化方案，为智算中心绿色节能发展提供实践参考。

## 1 硬件层面的能耗优化技术

### 1.1 处理器功耗动态管理技术

处理器功耗动态管理技术凭借精确的电压频率调节机制达成性能与能耗的最佳契合，这项技术利用处理器自带的功耗监控单元，实时采集核心温度、电流消耗与工作负载的数据，依靠这些数据构建出动态的功耗模型，频率调节算法根据现有的任务需求，自动调整处理器的运行频率，在维持计算性能良好的基础上，最大限度地降低功耗水平。电压调节技术借助精准调控供电电压，降低无用的能量消耗，智能缓存管理策略实现数据访问模式优化，降低处理器等待的时长及功耗高峰，借助负载均衡技术，多核处理器把计算任务合理分配到各核心，避免部分核心过载而其他核心闲置的情况<sup>[1]</sup>。

### 1.2 内存系统能效提升技术

内存系统能效提高技术重点聚焦DRAM访问模式的优化以及内存控制器的智能化管控，该技术凭借分析应用程序的内存访问特质，预估未来应用的访问模式并把相关数据预取，缩减内存延迟与能耗，内存压缩技术把频繁访问的数据做压缩存储处理，增进内存带宽的实际

利用率。智能刷新算法按照温度变化情况动态调整内存刷新频率，多通道内存架构负载均衡技术保障各内存通道均匀运用，避免单通道的负载超出承受范围，结合工作负载特性动态调整内存时序参数，实现访问时序的优化，减少无用的等待周期。

### 1.3 存储设备节能控制技术

存储设备节能控制技术凭借智能化的存储介质管理实现对能耗的精确调控，固态硬盘利用磨损均衡算法延长了设备使用时长，减少了因频繁更换设备而产生的能耗，存储分级技术把热点数据存放在高性能存储介质里面，把冷数据转移到低功耗存储物件。数据去重技术削减了存储空间的占用，减少了整个能耗量，防止影响正常业务的开展，存储设备的休眠唤醒机制根据访问频率自动对设备状态加以调整<sup>[2]</sup>，机械硬盘的节能技术牵扯到转速控制与寻道优化。转速调节技术依照I/O请求的密集程度对磁盘转速进行动态调整，智能寻道算法对磁头的移动路径加以优化，减少机械运动形成的能耗，存储阵列的负载均衡技术保障各个磁盘均匀使用，实施RAID配置的能耗优化，在保障数据可靠的同时降低整体的用电功耗，存储缓存的智能管控降低了磁盘的频繁读写，文件系统的能耗感知设计对数据布局以及访问模式进行优化。

## 2 冷却系统的智能化升级

### 2.1 液冷技术的精确控制

液冷技术的精准控制依靠闭环反馈系统来达成冷却效果的实时调整，冷却液流量控制阀依照设备温度变化自动调节流速，使散热效果与能耗达到最优组合，采用分布式部署的温度传感器网络提供了全方位的温度监控覆盖，支撑精准的热管理决策形成。冷却液温度调节系统凭借热交换器调节入口冷却液的温度，适应不同的热负荷需求，压力监控系统保障冷却回路稳定运转，预防

泄漏或堵塞问题的出现,冷却泵的变频控制技术依照实际需求调节泵送功率,防止过度冷却引起的能源浪费,液冷系统热管理策略牵扯到热负荷预测与冷却容量动态分配。设计优化热传导路径提升了热交换的效率,减少了由温差引起的损失,选择冷却液成分时考虑了导热性能、腐蚀性以及环保标准要求,对管路布局做优化,降低了流动的阻力,推动了系统效率的上升,冷板设计改进后增大了与发热器件的接触面积,冷却回路按模块化设计,便于后续维护与扩容,系统的冗余设计让其在单点故障情况下依旧能维持基本的冷却功能。

### 2.2 风冷系统的智能调控

风冷系统智能调控技术借助精确的气流管理实现散热效率极大化,风机转速的PID控制算法借助温度反馈信号实时调控转速,实现气流与热负荷的动态平衡,靠气流导向装置的自动调节,改变气流方向与分布,增进了散热效果,温度梯度的监测、分析为气流优化给出了科学依据。风扇组协调控制技术防止气流冲突和涡流现象产生,风压监控系统保障气流能有效抵达目标区域,智能管理空气过滤系统,维持了空气质量与散热效率的平衡<sup>[3]</sup>。

本项目对微模块实施冷热通道全封闭改造,改造前机房内冷热空气混流明显,机柜进风温度最高达32℃,局部热点温度超38℃;改造后机柜进风温度稳定在22~24℃,热点温度降至27℃以下,通过微模块温度热力图可直观呈现机房温度分布,快速定位局部过热区域。气流导向装置自动调节气流方向与分布,风扇组采用协同控制避免气流冲突与涡流,风压监控系统保证气流有效送达核心设备。

### 2.3 制冷设备的能效优化

制冷设备的能效优化技术依靠压缩机变频控制及冷凝器优化达成整体效率提升,压缩机的工作点优化算法按照实际负荷需求调节运行参数,防止部分负荷期间效率出现下降,冷凝器的清洁维护技术使换热表面维持良好状态,提升了热交换的效率,蒸发器的除霜控制技术在维持制热成效时减少能源损耗<sup>[4]</sup>。

制冷设备的能效优化以压缩机变频控制、冷凝器换热优化为核心,使系统综合能效比(COP)由改造前4.2提升至6.8,制冷效率提升超60%。压缩机工作点优化算法根据实际负荷调节运行参数,避免部分负荷工况下效率下降;冷凝器自动清洁技术维持换热表面高效状态,蒸发器自适应除霜控制在保证制冷效果的同时减少额外能耗。通过精准控制制冷剂充注量、配套余热回收技术,将设备废热用于机房辅助采暖,进一步提升能源利用率。

## 3 电源管理策略的优化设计

### 3.1 不间断电源的节能运行

不间断电源节能运行技术借助智能切换、效率优化实现能源的有效利用,UPS系统的工作模式根据市电质量自动实施切换,正常情形下采用高效模式实施运行,若市电稳定,可直接经旁路进行供电,减少无用的能量转换环节,电池管理系统对充电、放电过程做优化处理,采用三阶段充电方式(恒流、恒压、浮充)延长电池寿命且减少能量流失,同时采用温度补偿技术防止电池过度充电和欠充电。逆变器的效率优化技术采用软开关技术、同步整流技术这类先进方法,在各异负载率情形下维持较高转换效率,若处于轻载,自动进入休眠模式降低电耗,优化UPS系统的冗余配置,在保证可靠程度的同时减少冗余度,N+1配置的负载分配策略达成各台UPS均衡运用,利用智能负载均衡算法,防止部分设备长时间满载,而其他设备却闲置。不间断电源节能运行通过智能模式切换与效率优化,使本项目UPS系统平均运行效率由92%提升至97.5%,轻载工况下效率提升更为明显。UPS系统根据市电质量自动切换工作模式,市电稳定时采用高效旁路供电,减少不必要的能量转换环节;电池管理系统采用三阶段充电加温度补偿策略,延长电池寿命并降低充放电损耗。

### 3.2 配电系统的智能调度

凭借负荷预测与电源优化分配,配电系统的智能调度技术实现了电力资源的高效利用,采用自动化控制的智能开关设备减少了人工操作能耗损失,采用电动操作机构与智能控制器相配合,响应速度快且操作精准恰当,负荷分级管理技术按照设备重要性把负荷分为一级、二级、三级,优先保障关键设备所需电力,用电高峰期时段,可适度对非必要负荷进行限制<sup>[5]</sup>。

配电系统智能调度依托负荷预测与电力优化分配实现高效用电,智能开关设备减少人工操作带来的能耗损失,负荷分级管理优先保障关键算力设备供电。电力质量监测系统实时监控电压、电流、谐波等参数,本项目通过有源滤波器与无源滤波器配合治理,将配电系统总谐波畸变率由12%降至3%,有效降低谐波带来的线路发热、设备损耗与电能浪费。配电网络拓扑优化减少线路损耗与电压降,变压器经济运行策略适配不同负荷工况,系统容量动态评估为合理扩容提供依据。

### 3.3 能耗监测与优化平台

能耗监测与优化平台依靠大数据分析技术实现对能耗的精细管理,实时数据采集系统采集各类设备的能耗数据,形成一套完整的能耗数据库,数据清洗、预处理

理技术保障了数据质量以及分析准确性，打造能耗基准线，为节能效果评估提供了参考标杆。

能耗监测与优化平台依托大数据分析实现能耗精细化管理，实时采集全场景设备能耗数据并建立数据库，通过数据清洗与预处理保证分析精度。平台建立能耗基准线用于节能效果评估，异常检测算法可快速识别能耗异常并告警，趋势分析用于预判能耗变化。本项目优化

后，平台能耗预测准确率由78%提升至94.3%，机器学习模型持续优化控制策略，多目标优化平衡能耗、性能与成本，可视化界面直观展示能耗分布与PUE变化，移动应用与开放接口实现远程监控与系统集成，为智算中心能耗动态优化提供数据支撑。如下表1，为改造前后核心能效指标对比表。

表1 改造前后核心能效指标对比表

监测指标	改造前	改造后	优化效果
数据中心 PUE	1.70	1.20	显著下降
UPS 系统平均运行效率	92.0%	97.5%	提升 5.5 个百分点
配电系统总谐波畸变率 (THD)	12%	3%	下降9个百分点
制冷系统综合能效比 (COP)	4.2	6.8	提升61.9%
机柜平均进风温度	32℃	22 ~ 24℃	温度更稳定、更低
机柜局部热点最高温度	> 38℃	< 27℃	热点问题消除

以上指标均为智算中心满负荷运行工况下的实测值，测试时间为2025年 10月，测试点位为各系统核心监测端

**结语**

本文以西北某 A 级高密度智算中心为工程实践对象，开展了全维度能耗降低技术研究与应用，验证了硬件设备节能、冷却系统智能升级、电源配电高效管控多维度技术协同的可行性与实际应用价值。硬件层面通过处理器、内存、存储的精细化管控，从源头降低基础能耗；冷却系统智能化升级同时实现散热能力提升与制冷能耗下降；电源与配电系统优化保证了供电稳定与高效。各项技术协同形成完整的能耗管控体系，使项目PUE由1.7降至1.2，年节电约3812万度，年减碳约3.8万吨，制

冷能效、UPS效率、配电质量均得到显著改善。

**参考文献**

[1]关宝良.基于单相浸没式液冷技术在超高热密度智算中心的工程实践[J].广西节能,2025(3):38-40.  
 [2]李丰,严方舟,伍锡海.面向AI大模型的智算中心能效优化策略[J].通讯世界,2025,32(12):20-22.  
 [3]冯辉,郑发秀,吴贤望.智算中心低能耗实现路径与技术探讨[J].电信工程技术与标准化,2025,38(z1):183-187.  
 [4]刘璐,吴冰冰,赵文玉.智算中心光互联技术呈高速率、低能耗、高可靠三大发展态势[J].通信世界,2025(3):36-37.  
 [5]张贺新.冷板式液冷技术于智算中心高密机房的应用方案探究[J].科技资讯,2025,23(19):30-32.