

建筑工程数据中心运行性能优化与低碳节能策略研究

佟悦欣

中国建筑技术集团有限公司 北京 100013

摘要: 本文聚焦建筑工程数据中心运行性能优化与低碳节能目标, 首先梳理了当前数据中心的设备配置、负载分布及能耗水平等运行现状, 分析了计算效率、响应速度等性能指标与能耗强度的关联性特征; 继而从设备层能效瓶颈、系统层协同效率、环境适配性干扰三个维度识别关键影响因素; 最终提出设备级性能-能效双提升改造、系统级动态协同控制、环境适配性强化等协同策略, 为数据中心降低运行能耗、提升资源利用效率提供理论支撑。

关键词: 建筑工程数据中心; 运行性能优化; 低碳节能; 能耗特征; 协同策略

引言

“双碳”目标下, 建筑领域节能降碳成为国家战略重点。数据中心作为建筑工程信息化的核心载体, 其运行能耗占建筑总能耗的比重持续攀升, 部分大型项目占比较大, 但其运行效率与能耗控制仍存在显著优化空间^[1]。现有研究多聚焦单一设备能效提升或系统局部优化, 对设备、系统与环境的多维度协同机制的探讨不足。本文拟从运行现状分析入手, 识别关键影响因素, 提出设备级、系统级、环境级协同优化策略, 旨在为建筑工程数据中心构建性能与能耗平衡的运行体系提供理论依据与实践路径。

一、建筑工程数据中心运行现状与性能能耗特征分析

当前建筑工程数据中心的运行体系主要由IT设备、供电系统及冷却系统构成。从设备配置看, 主流数据中心多采用X86架构服务器作为计算核心, 存储设备以机械硬盘为主, 制冷系统则普遍依赖风冷空调, 部分大型中心配置水冷机组辅助散热。负载分布呈现显著的时段性特征: 工作日白天因工程建模、BIM协同等高频计算需求, 负载率常维持在60%-80%; 夜间及非工作日则降至20%-30%, 设备利用率存在明显波动。从能耗水平观察, 数据中心年均电源使用效率多处于1.8-2.2区间, 其中IT设备能耗占比约55%-65%, 制冷系统占比30%-40%, 成为能耗控制的核心对象^[2]。在运行性能与能耗的关联性方面, 单位能耗完成的浮点运算量与负载率呈正相关, 当负载率低于30%时, 计算效率下降约25%-30%, 导致单位任务能耗增加; 响应速度则受存储设备性能影响显著, 机械硬盘在高负载下延迟可达10-15ms,

较固态硬盘高出3-5倍, 为保障响应速度需额外增加服务器冗余, 间接推高能耗。

二、运行性能与能耗的关键影响因素识别

(一) 设备层能效与性能瓶颈

设备层的能效与性能问题主要体现在核心设备的参数匹配与老化损耗两方面。其一, 服务器作为计算核心, 其能效比直接影响整体性能。当前部分数据中心采用的传统X86服务器, 在低负载状态下能效比仅为满载时的60%-70%, 而早期部署的设备因硬件架构落后, 能效比甚至低于新型服务器的50%, 导致相同计算任务需消耗更多能源。其二, 制冷系统的性能衰减更为显著: 风冷空调运行5年后, 换热器积灰会使制冷效率下降约15%-20%; 部分数据中心为应对未来扩容需求, 选择制冷量超出当前需求30%以上的设备, 在实际运行中长期处于低负载状态, COP(制冷系数)较设计值降低25%-30%, 造成能源冗余。

(二) 系统层协同运行效率

系统层的协同不足主要表现为动力供应、冷却需求与计算负载的动态匹配失衡。首先, 动力系统的容量设计通常基于历史峰值负载, 而实际运行中负载波动可达40%-60%, 导致变压器、UPS等设备在低负载时段效率下降。其次, 冷却系统的控制策略多依赖固定阈值, 未与IT设备的实时热输出关联。当计算负载降低50%时, IT设备散热量同步减少, 但冷却系统仍按原功率运行, 额外消耗约10%-15%的能源。这种系统间的协同滞后, 直接导致资源错配与能耗浪费。

(三) 环境适配性与外部干扰

环境适配性不足对数据中心的影响集中在气候条

件与建筑围护结构两方面。一方面，气候特征决定了基础散热需求：在夏热冬暖地区，数据中心年均需制冷时长超过8000小时，若围护结构导热系数高于 $0.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，外部热量渗入量较隔热性能优良的金属夹芯板（导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）高出3-5倍，需额外增加15%-20%的制冷能耗。另一方面，建筑围护结构的热惰性不足会放大外部温度波动的影响：昼夜温差超过 15°C 的地区，未采用蓄热材料的围护结构会使数据中心内部温度在2小时内波动 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ，为维持稳定运行，冷却系统需频繁启停，导致能耗增加约8%-12%，同时缩短设备使用寿命^[3]。

（四）负载变化与资源调度能力

运行负载并非始终保持恒定状态，而随着时间、任务种类、并发请求等因素不断波动。波动性对系统的能耗、性能产生显著影响。若系统设计没有匹配这种变化特性，例如，缺乏基于负载预测的动态调度策略，资源分配将缺乏弹性。低负载时仍保持高性能模式，会导致大量硬件资源空转，能源被无效消耗；而负载高峰时，若资源无法快速扩展或重新分配，造成系统响应缓慢、数据延迟甚至服务中断，严重影响运行效率。资源调度能力直接决定了系统对负载变化的适应性，高效调度策略能够根据任务优先级、CPU使用率、内存占用等参数，灵活调整线程数量、计算资源占比，实现资源按需分配，从提升运行效率同时降低整体能耗。负载波动本身不可控，但调度机制的智能程度却决定了系统是否能在变动中维持稳定输出。

（五）硬件配置与能效

硬件是运行性能基础载体，其配置水平决定系统处理能力上线，同时也深刻影响能耗表现。高性能处理器、宽带内存、高速SSD虽然能显著提升计算效率，但并不意味能效最优。若硬件性能远高于实际应用需求，反而会因资源浪费导致能耗居高不下。尤其在长时间运行的系统中，硬件利用率偏低意味着持续的电力消耗未能带来成比例的计算产出，单位能耗转化率下降，造成能源效率低下。反之，若配置不足，则系统需在超负荷状态下运行，导致响应时间延长，甚至要借助频繁的数据调度或补充计算资源以弥补性能缺口，再度拉高功耗。硬件选择围绕“性能/能耗”比展开，选用工艺先进、功耗控制出色的器件如低电压处理器、集成内存控制器等，有助于优化整体能耗结构。配置合理性直接关乎系统性能是否稳定、能耗是否可控，是实现能效平衡的前提。

三、运行性能优化与低碳节能协同策略

（一）设备级性能-能效双提升改造

设备级优化需以全生命周期评估为基础，重点从选型与改造两方面提升性能能效比。其一，针对服务器设备，优先选用低功耗、高算力的ARM架构或X86架构节能型服务器，其满载能效比可达传统服务器的1.3-1.5倍，且在20%-50%负载区间能效比仅下降5%-8%，可显著降低低负载时段能耗。其二，制冷系统应替换为变频式风冷或磁悬浮水冷机组，变频机组可根据实时热负荷自动调整转速，COP较定频机组提升20%-30%；磁悬浮机组无机械摩擦损耗，保证部分负荷下COP可达6.0以上。

（二）系统级动态协同优化控制

系统级优化的核心是建立负载需求与资源供应的动态匹配机制，主要通过两方面实现。首先，优化供配电系统的时序控制：基于历史负载数据建立预测模型，在低负载时段将冗余变压器切换为待机模式，减少空载损耗；同时调整UPS运行策略，仅保留1台主机带载，其余转为热备用，可降低动力系统能耗8%-12%。其次，改进冷却系统控制逻辑：将温度阈值由固定值调整为动态范围，并通过传感器实时监测IT设备热输出，当负载降低30%时，自动将冷却功率下调25%；负载回升时，冷却系统延迟5-10分钟启动以利用设备余热，避免频繁启停损耗。

（三）环境适配性强化与外部资源利用

环境适配优化需结合数据中心所在地气候特征，重点从围护结构与自然冷源利用入手。针对夏热冬暖地区，采用导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的金属夹芯板或气凝胶隔热层替换传统砖墙，可减少外部热量渗入60%-70%，降低制冷能耗10%-15%；对于昼夜温差大的地区，选用相变蓄热材料作为围护结构填充层，可缓冲温度波动，使内部温度2小时内仅波动 $0.5\sim 1^\circ\text{C}$ ，减少冷却系统启停次数约30%。此外，需推广自然冷源利用：在年均气温 $\leq 15^\circ\text{C}$ 的地区，增设新风引入口，当室外温度低于 20°C 时，关闭机械制冷系统，通过自然通风散热；在湿润地区，可结合蒸发冷却技术降低新风温度，进一步提升散热效率。

（四）构建弹性计算架构

构建弹性计算架构，在系统架构初期设计阶段引入动态伸缩的计算框架。经过部署支持自动扩展与缩减的云服务节点，确保计算资源按需分配。应把核心计算模

块容器化，结合Kubernetes等容器编排工具实现微服务化部署，支持在资源紧张时快速启动新实例应对突发请求，同时负载下降时自动销毁空闲节点，避免冗余功耗。边缘计算节点能够缓解中心系统压力，对低延迟任务进行本地处理，减轻主数据中心的负载集中现象。虚拟化技术如基于VMware或KVM的虚拟资源池管理，配合统一的资源调度平台，在物理资源之上构建高效虚拟层，实现多任务动态迁移和资源弹性配置。部署中设置阈值监控机制，例如，基于CPU利用率、内存占用和IO负载的指标，驱动扩容和缩容逻辑的自动触发。架构中还需结合API网关，对外统一资源请求入口，提升资源调配控制精度。多区域部署场景中，采用负载均衡策略结合地理位置就近分发任务，提升性能同时减少跨地域传输带来的额外计算消耗。

（五）引入智能调度机制

引入智能调度机制，以任务感知与资源画像为基础，构建调度策略模型。首先系统中接入任务分类与资源需求建模模块，基于任务规模、周期性、执行优先级等参数进行特征提取，实时更新系统资源的使用状态、节点能耗表现与处理能力。基于此数据，形成预测模型，例如，使用LSTM、XGBoost等算法对负载趋势进行估算，为任务调度预先预留资源。调度策略结合强化学习技术进行自适应优化，使调度系统能够根据历史调度结果自动调整策略权重，提高资源匹配效率。可设置调度规则，例如，对非关键性任务自动分配到能效比高的计算节点，低负荷时段集中处理耗能任务，减少高峰时段能源集中消耗。调度器应具备资源热度分析功能，识别资源高频使用和闲置区块，实现冷资源激活、热资源释放动态调整。多级调度架构中提升整体效率，底层节点负责本地任务分配，上层系统全局资源协调，提升调度反应速度、智能度。调度过程中引入反馈机制，持续采集运行状态数据，调整调度逻辑，形成闭环控制模型。

（六）优化算法与代码效率

优化算法与代码效率的第一步步骤是减少算法复杂度，基于时间复杂度更优的逻辑结构替代低效嵌套循环、递归操作，对数据密集型计算任务使用更高效的数

据结构如哈希表、堆等。例如多核系统，并行拆分任务的，结合多线程或多进程方式提升处理速度，减少等待与阻塞时间。IO密集型任务应使用异步编程模型或事件驱动机制，减少线程占用与CPU空转等待。编码中，避免冗余函数调用，合并重复逻辑块，减少中间变量创建，提升代码执行路径的紧凑性。编译阶段，启用高级编译器优化选项如-O2或-O3，自动进行指令重排、内联展开、循环展开等底层性能提升操作。算法级优化可引入近似计算、缓存命中率提升策略、模型剪枝等技术，在保证计算精度基础上降低处理开销。定期执行代码分析与重构流程，配合性能分析工具（如Perf、Valgrind、Flamegraph）定位性能瓶颈，逐模块进行代码微调。对资源频繁访问的模块，使用内存池或对象复用机制，降低内存分配与GC开销。所有关键路径代码应配合单元测试与性能基准测试，在优化过程中量化变化，构成可持续的性能管理机制。

总结

综上所述，本文通过分析建筑工程数据中心运行现状，揭示了设备能效不足、系统协同滞后、环境适配性差是制约性能提升与能耗控制的核心因素，提出的设备-系统-环境协同优化策略可有效降低运行能耗并提升运行效率，验证了多维度协同优化的理论可行性。相较于传统单一设备改造或系统局部调整，本文所提出的研究内容更注重各层级间的动态匹配，在实践中具有更强的普适性。

参考文献

- [1] 庞和伟, 马颖颖, 刘更见, 等. 建筑节能绿色转型发展研究与策略分析[J]. 砖瓦, 2024(10): 29-32.
- [2] 梅健, 潘良金, 沈舒舒, 等. “双碳”目标下数据中心天然气分布式能源站运行现状及合理性建议[J]. 上海节能, 2024(8): 1323-1329.
- [3] 陈冬林, 邹安琪, 王蕾, 等. “东数西算”赋能数据中心可再生能源消纳研究[J]. 情报杂志, 2023, 42(7): 77-85.