

基于PUE指标的数据中心能效评估体系构建与优化路径研究

李宏鹏

中信银行股份有限公司 北京 100000

摘要：数据中心作为高能耗基础设施，其能效提升对实现“双碳”目标至关重要。PUE（电源使用效率）作为衡量数据中心能效的核心指标，在评估与优化实践中发挥关键作用。文章系统梳理PUE指标内涵，构建涵盖指标选取、评估方法及数据采集分析的能效评估体系，并从制冷、供电、IT设备及能源管理等维度提出优化路径，旨在为数据中心能效提升提供理论依据与实践指导，助力数据中心行业绿色低碳转型。

关键词：PUE指标；数据中心；能效评估体系构建；优化路径

引言

数字经济以及AI大模型的快速发展，是目前的主要因素，其能耗问题日益突出。PUE指标作为衡量数据中心能源利用效率的国际通用标准，能直观反映数据中心非IT设备能耗占比，对优化能源管理具有重要意义。然而，现有研究在PUE指标应用深度与评估体系完整性方面存在不足。本文聚焦基于PUE指标的数据中心能效评估体系构建与优化路径，通过完善评估体系、探索多维度优化策略，为数据中心节能降耗提供科学解决方案，推动行业可持续发展。

1 PUE 指标概述

PUE（电源使用效率）是衡量数据中心能源效率的关键指标，通过数据中心总设备能耗与IT设备能耗的比值反映能源利用情况。在全球数字化加速、数据中心规模扩张的背景下，PUE指标的重要性愈发凸显，其数值体现数据中心在能源管理、制冷系统优化、供电架构设计等方面的综合水平。数据中心运行时，除IT设备耗电外，制冷系统、UPS不间断电源、配电系统、照明系统等也消耗大量电能。PUE将这些能耗纳入考量，数值越接近1，说明非IT设备能耗占比越低，能源利用效率越高，运行越节能。例如，PUE为1.2时，非IT设备能耗占总能耗的16.7%；PUE为1.8时，非IT设备能耗占比达44.4%。在数据中心建设与运营中，PUE指标贯穿始终。选址时，气候条件等影响制冷能耗从而影响PUE；设计时，合理规划能为降低PUE奠定基础；运行时，相关措施有助于保持较低PUE值。随着技术发展，液冷技术等创新方案为降低PUE提供新可能，推动行业绿色、高效发展。低PUE能节省运营成本，体现可持续发展责任，对缓解能源压力、减少碳排放意义重大。

2 基于 PUE 指标的数据中心能效评估体系构建

2.1 指标选取

在数据中心能效评估体系构建中，指标选取是奠定评估科学性与准确性的关键环节。PUE（Power Usage Effectiveness，电源使用效率）作为国际通用的核心指标，反映了数据中心总能耗与IT设备能耗的比值，直观体现了制冷、供电及其他辅助系统的能耗占比。围绕PUE核心，需选取与之关联且能全面反映能效状况的辅助指标。基础设施层面，制冷系统能效比（Cooling System Energy Efficiency Ratio）不可或缺。该指标量化制冷系统消耗的能量与去除热量之间的关系，直接影响数据中心PUE值。通过分析制冷系统能效比，可清晰掌握空调设备运行效率、冷却介质循环效能等，精准定位制冷环节的能效瓶颈。供配电系统的电能转换效率同样关键，从变压器、UPS（不间断电源）到配电柜等设备，电能传输与转换过程中的损耗对整体能效影响显著，其效率指标能为优化供配电架构提供依据。在IT设备层面，服务器利用率指标不容忽视。服务器的CPU、内存、存储等资源的实际使用程度，决定了设备能耗是否得到充分转化为有效计算能力。低利用率的服务器不仅造成资源浪费，还增加了不必要的能耗。存储设备的I/O（输入/输出）性能与能耗比也是重要指标，高效的存储设备能在满足数据读写需求的同时，降低能耗。综合这些指标，可从多维度对数据中心能效进行深度剖析，为全面评估提供详实的数据支撑^[1]。

2.2 评估方法

数据中心能效评估方法的选择直接关系到评估结果的可靠性与实用性。基于PUE指标，可采用多种科学评估方法相互补充验证。第一，对比分析法在能效评估中发

挥重要作用。将数据中心的PUE值与行业标杆、同类型数据中心的平均PUE值进行对比,能够清晰判断该数据中心在行业中的能效水平定位。通过对比不同时间段的数据中心PUE值,还能直观呈现能效变化趋势,便于分析能效改进措施的实际效果。这种方法操作简单,结果直观,能快速发现数据中心能效的优势与不足。第二,回归分析法可深入挖掘能效指标之间的内在关系。通过建立PUE值与制冷系统能效比、服务器利用率等相关指标的回归模型,量化各因素对PUE值的影响程度。例如,分析发现制冷系统能效比每提升10%,PUE值可降低约0.08,为制定针对性的能效优化策略提供精准的数据依据。该方法有助于揭示复杂能效系统中的潜在规律,提高评估的科学性与预见性。第三,仿真评估法通过构建数据中心的虚拟模型,模拟不同工况下的能效表现。利用专业的仿真软件,输入设备参数、环境条件等数据,对制冷系统的气流组织优化、供配电系统的负载调整等方案进行模拟评估,提前预判能效改进措施的效果,避免实际改造过程中的盲目性,降低优化成本,提高能效提升的效率与可靠性。多种评估方法的综合运用,能从不同角度对数据中心能效进行全面、深入的评估。

2.3 数据采集与分析

数据采集与分析是确保数据中心能效评估体系有效运行的基础。准确、全面的数据采集是评估的前提,而科学的数据处理与分析则是得出可靠结论的关键。在数据采集环节,需构建完善的监测系统。对于能耗数据,在数据中心的关键节点,如IT设备机柜、制冷机组、配电柜等位置安装高精度智能电表,实时采集各部分的能耗数据。通过物联网技术,将分散的能耗数据集中传输至数据管理平台,确保数据采集的及时性与准确性。对于设备运行参数,如制冷系统的温度、湿度、风量,服务器的CPU使用率、内存占用率等,利用设备自带的传感器或外接监测设备进行采集,并同步上传至平台。采集到的数据需经过清洗、整合等预处理步骤。去除异常值、重复值,对缺失数据进行合理填补,确保数据的完整性与一致性。采用数据挖掘技术,对处理后的数据进行深度分析。通过聚类分析,可将数据中心的运行状态划分为不同的能效等级区间,找出高能效与低能效状态的特征差异。利用关联规则挖掘,发现各能效指标之间的潜在关联,例如服务器利用率与制冷系统能耗之间的关系,为能效优化提供新的思路。数据分析结果需以可视化的方式呈现,如通过折线图展示PUE值随时间的变化趋势,利用热力图直观呈现数据中心各区域的能耗分布情况。这些可视化图表便于管理者快速掌握数据中心的

能效状况,为制定科学合理的能效提升策略提供有力支持,实现数据中心能效的持续优化与精细化管理^[2]。

3 基于 PUE 指标的数据中心能效优化路径

3.1 制冷系统优化

(1) 通过引入磁悬浮离心式冷水机组,利用磁悬浮轴承技术消除机械摩擦,相比传统离心式机组可降低30%以上能耗。结合变频控制技术,根据服务器负载实时调节制冷量,实现动态精准控温,避免过度制冷导致的能源浪费。(2) 搭建物联网监测平台,将制冷系统各设备接入统一网络,实现运行数据的实时采集与传输。利用大数据分析技术,对历史运行数据和实时监测数据进行深度挖掘,建立制冷设备能耗预测模型,提前预判设备潜在故障与能耗异常。通过可视化界面展示系统运行状态,便于运维人员直观掌握设备运行情况,及时优化系统参数,提升制冷系统整体运行效率。(3) 采用自然冷却技术,在室外温度较低时,利用新风或间接蒸发冷却方式,引入自然冷源替代机械制冷,大幅降低制冷能耗。例如,当室外温度低于18℃时,启动新风系统,通过高效过滤器净化室外空气后送入机房,带走服务器产生的热量,可使制冷系统能耗降低50%以上。结合蓄冷技术,于夜间电价低谷时段高效制冰蓄冷储存冷量,白天用电高峰时段精准释放,进一步降低运行成本。(4) 引入液冷技术,采用直接或间接液冷方式,将冷却液直接接触发热部件或通过冷板换热。直接液冷能快速带走热量,间接液冷则保障设备安全。相比传统风冷,这种制冷方式效率提升显著。搭配智能温控系统,可依据设备实时状态精准调节冷却液流量与温度,动态优化制冷效果,有效降低数据中心整体PUE,实现高效节能制冷。

3.2 供电系统优化

(1) 采用模块化UPS电源系统,其N+X冗余架构可根据实际负载需求灵活配置功率模块,避免传统UPS“大马拉小车”造成的效率低下问题,提高电能转换效率至96%以上。优化UPS输入输出配电设计,减少线路损耗,采用智能配电监测装置,实时监控各支路电流、电压、功率因数等参数,及时发现并解决供电异常问题。(2) 部署高压直流(HVDC)供电系统替代传统交流UPS供电,HVDC系统减少了AC/DC、DC/AC等中间转换环节,根据相关权威测试数据及实际项目运行统计,其电能转换效率较传统交流UPS供电系统可提升10%-15%。HVDC系统的蓄电池组可直接为服务器提供直流电,无需复杂的逆变过程,降低了系统复杂度和故障率。通过优化配电柜布局,缩短电缆长度,采用低电阻电缆和高效接线端子,进一步降低线路损耗。(3) 引入储能系统与市电协

同供电,在市电不稳或停电时,储能系统快速响应为IT设备提供不间断电力。利用峰谷电价策略,夜间低谷充电、白天高峰放电降成本。通过智能能量管理系统,实现无缝切换与协同,提高供电稳定性可靠性^[3]。

3.3 IT设备优化

(1) 选用高效能的服务器设备,采用最新的处理器架构和制程工艺,例如基于ARM架构的服务器在低负载场景下,经权威机构实测对比传统x86服务器可降低40%能耗,且具备更高的集成度和散热效率。优化服务器内部散热设计,采用液冷技术替代风冷,直接对发热量大的CPU、GPU等核心部件进行冷却,可使服务器运行温度降低15-20℃,提升设备稳定性和使用寿命。(2) 实施服务器虚拟化技术,通过将多台物理服务器虚拟化为多个虚拟机,实现硬件资源的集中管理和动态分配,提高服务器利用率至70%-80%,减少物理服务器数量,降低能耗和运维成本。采用智能电源管理策略,对处于低负载或空闲状态的服务器进行休眠或降频处理,进一步降低能耗。(3) 优化存储系统,采用分布式存储架构替代传统集中式存储,利用多台存储设备并行处理数据读写,提高存储性能和可靠性。引入固态硬盘(SSD)作为存储介质,相比机械硬盘,SSD具有更快的读写速度和更低的能耗,可显著提升数据处理效率。通过数据压缩和重复数据删除技术,减少数据存储空间需求,降低存储设备能耗。

3.4 能源管理优化

(1) 搭建能源管理平台,全面集成智能电表、水表、流量计等各类能耗监测设备,构建起覆盖广泛、精准可靠的能耗数据采集网络。实时采集制冷、供电、IT设备等各个系统的能耗数据,运用先进的数据分析算法和直观的可视化界面,清晰呈现能源消耗情况和设备运行状态,帮助管理人员及时发现能源浪费点和设备异常情况。(2) 运用大数据分析和人工智能技术,对历史能

耗数据进行深度挖掘,建立能源消耗预测模型,预测不同时间段、不同工况下的能源需求,为能源优化调度提供决策依据。例如,根据服务器负载变化趋势和天气预报数据,提前调整制冷系统和供电系统的运行参数,实现能源的精准供应。(3) 实施能源审计和能效评估,定期对整个数据中心的能源利用效率进行全面评估。在此过程中,详细收集并分析各项能源消耗数据,精确掌握能源流向与使用状况,从而精准识别节能潜力点和改进方向。通过对比行业标杆数据和最佳实践案例,深入了解先进经验与技术,结合自身实际情况,制定针对性的节能改造方案,持续优化能源管理策略,实现数据中心能源利用效率的不断提升^[4]。

结语

综上所述,基于PUE指标构建的数据中心能效评估体系,通过科学的指标选取、合理的评估方法与高效的数据采集分析,为数据中心能效诊断提供精准依据。制冷、供电、IT设备及能源管理等多维度优化路径的提出,为数据中心能效提升指明方向。研究成果对促进数据中心绿色化发展、降低运营成本具有重要价值,未来可进一步结合智能化技术,深化数据中心能效优化研究,助力行业实现更高水平的节能目标。

参考文献

- [1] 林利明.面向云网融合的数据中心能效评估方法核心思路分析[J].同行,2021(1):151-152.
- [2] 李玲.样条函数在数据中心效益评估模型中的应用[J].电子世界,2021(13):156-157.
- [3] 郭亮,齐旭,刘水旺,等.基于机器学习的数据中心参数自动优化关键技术研究[J].信息通信技术与政策,2020(6):21-24.
- [4] 周泉,刘芊,叶晓江,等.数据中心空调系统效能评估与优化研究[J].节能,2024,43(12):118-120.