

高校数据中心绿色改造方案设计与实施效果评估

胡磊*, 孙旭, 张天天, 郭乐江
空军预警学院教研保障中心, 湖北 武汉 430014
DOI: 10.61369/SSSD.2025150045

摘 要 : 随着高等教育信息化的快速发展, 高校数据中心的能源消耗急剧上升, 迫切需要实施绿色转型, 以适应国家提出的碳达峰与碳中和目标。本研究针对高校数据中心高能耗、低能效的问题, 设计了一套绿色改造方案, 集成液冷技术、智能监控与余热回收系统。通过冷热通道分离、全面部署液冷机柜及集成光伏储能系统, 改造后数据中心 PUE 由 2.0 降至 1.3 以下, 制冷能耗降低 30% – 50%, 年节电量超 10 万千瓦时。研究构建了涵盖能效、经济与环境影响的多维评估框架, 并采用生命周期分析与动态基准法验证改造效果, 为高校数据中心低碳转型提供了技术路径与管理参考, 助力教育数字化与生态文明建设的深度融合^[1]。

关 键 词 : 绿色数据中心; PUE (Power Usage Effectiveness, 电能利用效率); 液冷技术; 智能监控; 能效优化

Design and Implementation Effect Evaluation of Green Transformation Scheme for University Data Centers

Hu Lei*, Sun Xu, Zhang Tiantian, Guo Lejiang
Teaching and Research Support Center, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430014

Abstract : With the rapid development of higher education informatization, the energy consumption of university data centers has risen sharply. There is an urgent need to implement green transformation to meet the national goals of carbon peaking and carbon neutrality. Addressing the problems of high energy consumption and low energy efficiency in university data centers, this study designs a green transformation scheme that integrates liquid cooling technology, intelligent monitoring, and waste heat recovery systems. Through the separation of hot and cold aisles, full deployment of liquid-cooled cabinets, and integration of photovoltaic energy storage systems, the Power Usage Effectiveness (PUE) of the transformed data center has dropped from 2.0 to below 1.3. Refrigeration energy consumption has decreased by 30% – 50%, and annual electricity savings exceed 100,000 kWh. The study constructs a multi-dimensional evaluation framework covering energy efficiency, economy, and environmental impact, and uses life cycle analysis and dynamic benchmarking to verify the transformation effect. It provides a technical path and management reference for the low-carbon transformation of university data centers, and helps promote the in-depth integration of educational digitalization and ecological civilization construction^[1].

Keywords : green data center; PUE (Power Usage Effectiveness); liquid cooling technology; intelligent monitoring; energy efficiency optimization

一、绪论

(一) 研究背景和意义

随着高等教育信息化发展, 高校数据中心作为数字化转型的关键基础设施, 规模与能耗持续攀升。根据国家《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》, 到 2025 年数据中心机柜上架率需不低于 60%, 平均电能使用效率 (PUE) 需降至 1.5 以下, 可再生能源利用率年增 10%。“十五五”规划也强调推广液冷等节能技术 (目标 $PUE \leq 1.15$), 推动绿色低碳发展。然而, 当前高校数据中心普遍面临设备老旧、制冷效率低、能源管理粗放等问题, 亟需系

统改造。

为此, 应融合能源管理、信息技术与环境科学等多学科成果, 构建集成化标准体系, 推动绿色数据中心建设。此举不仅有助于降低运维成本、支持碳中和目标, 也是响应国家战略、促进教育数字化与生态文明协同发展的重要路径。

(二) 国内外研究现状

高校数据中心绿色改造研究在国内外发展迅速。

国内方面, 政策推动力度显著。工信部要求新建数据中心电能使用效率 (PUE) 不高于 1.4, 现有数据中心需逐步改造至 PUE 低于 1.8, 并推广液冷、蒸发冷却及智能群控等技术。例如, 南京

作者简介:
胡磊, 男, 空军预警学院教研保障中心副教授, 本文通讯作者;
孙旭, 男, 空军预警学院教研保障中心副主任;
张天天, 女, 空军预警学院教保处参谋。

航空航天大学通过服务器虚拟化实现年节电90%，深圳大学利用屋顶光伏与储能系统使绿电自给率达20%。但老旧数据中心改造仍面临投资高、设备兼容性差和运维复杂等挑战^[2]。

国际层面，技术创新与市场机制深度融合。谷歌采用碳智能平台与液冷技术，将PUE降至1.1以下，并在芬兰利用地热能供电；微软通过氢燃料电池与核聚变技术实现100%可再生能源供电；瑞典卢迪亚兰数据中心运用自然冷却与屋顶绿化，PUE低于1.0；德国亚琛工业大学则借助智能微电网使绿电占比达75%。

未来重点将聚焦于人工智能动态优化、余热多级利用以及校园微电网与虚拟电厂协同，推动高校数据中心向“能源自给”模式转型。

二、高校数据中心现状与问题分析

（一）能源消耗特征

高校数据中心能耗密集，主要来自IT设备和空调冷却系统。其中，IT设备（包括服务器、存储和网络设施）占总能耗的45% - 60%，服务器约占IT能耗的一半，存储和网络设备分别占35%和15%；空调冷却系统占30% - 40%，在传统风冷模式下能耗甚至超过50%。此外，电源系统（含UPS和配电）与照明系统分别约占10%和3%。

在能源效率方面，高校传统机房的电源使用效率（PUE）普遍不低于2.0，远高于国际绿色数据中心标准（ $PUE \leq 1.4$ ）。例如，未节能改造的机房PUE可达2.68。通过采用液冷、智能群控等技术，部分高校数据中心PUE已降至1.3 - 1.5，接近谷歌等国际领先水平（ $PUE \leq 1.1$ ）。制冷系统优化尤为关键，自然冷却可降低制冷能耗30% - 50%，余热回收可提升整体能效20% - 30%。

当前，高校数据中心仍面临IT设备利用率低（平均负载不足30%）及供电转换损耗（UPS效率约80% - 90%）等问题，制约了整体能效提升，与行业标杆存在差距。

（二）主要痛点

高校数据中心面临多重挑战：硬件老化问题突出，大量服务器和存储设备服役超五年，导致故障频发、数据迁移风险高且能耗攀升；制冷效率低下，传统风冷电能使用效率（PUE）普遍超过2.0，自然冷却与液冷技术应用不足，制冷能耗占比超40%；能源管理粗放，缺乏智能调控，即便IT负载率仅30%仍持续高耗能；绿电使用比例不足20%，储能系统缺失，限制清洁能源消纳；运维响应迟缓，跨部门协作效率低，平均故障处理超两小时，且缺乏AI预测性维护能力^[3]。

这些问题导致数据中心能效较行业标杆落后30%以上，推高运营成本，也与“双碳”目标不符，亟需技术升级与管理优化。

三、绿色改造方案设计

（一）总体目标

遵循“双碳”战略导向，并融入“十五五”信息化发展规划

的指导思想，我们针对高校数据中心的绿色改造设定了明确的量化指标，在能效提升方面，期望改造后的数据中心电能使用效率（PUE）能降至1.3以下（相较于传统机房PUE通常不低于2.0的现状），同时制冷能耗的占比需减少至25%以内，在能源结构优化层面，目标是可再生能源（如光伏、风电等）的利用比例达到或超过20%，且年度绿色电力消纳量超过10万千瓦时，在碳排放控制方面，力求单位算力的碳排放强度减少40%，并实现30%的余热回收利用率，在智能化水平的提升上，计划部署数据中心基础设施管理系统（DCIM），以实现能耗的动态监控，进而将运维响应效率提高50%。

（二）技术路径

1. 硬件改造

服务器与存储资源的优化整合策略，运用超融合架构技术，将物理服务器资源进行统一集中管理，构建一个涵盖计算、存储及网络资源的动态资源池，以实现资源的高效动态分配与负载均衡，存储层面，则采用分布式架构，并结合冷热数据分类管理策略，打造混合存储解决方案，旨在提升数据访问的效率与性能。

以液冷技术革新传统风冷方式，实施封闭式全液冷机柜方案，确保所有热量均通过液冷系统进行有效传导与排出，因此机房内无需配置针对IT设备的专用制冷空调，进而省略或简化了冷水机组的安装需求。借助高效的液体热交换过程，能够显著降低制冷过程中的电能使用效率（PUE），并且大幅度减少噪音污染^[4]。

2. 能源系统

太阳能光伏与储能系统的综合部署策略，我们致力于构建一个智能微电网体系，利用标准化的通信协议与系统级互联技术，实现光伏组件与储能装置的无缝整合。在光伏发电方面，我们采用了高效率的钙钛矿材料，其光电转换效率超过25%，显著提升了发电效能。储能系统则采用了先进的锂电或钠离子电池技术，确保了毫秒级的快速响应能力，且充放电效率高达95%或以上。多能源的协同调度与智能化管理，我们旨在最大化地提升整个系统的能源使用效率。

数据中心余热再利用于供暖方案，我们运用热泵机组与高效热交换技术，结合余热回收设备，将数据中心日常运行中释放的余热捕捉并提升至适宜供暖的温度范围（45至70摄氏度）。随后，这些热能将被送入供热网络，为终端用户提供温暖。此方案旨在实现能源的分级高效利用，预计可降低供暖系统的能源消耗40%至60%，既带来经济效益，也贡献于环境保护。

3. 智能管理

实施DCIM系统强化能耗实时监测方案，我们构建了一个全面的数据采集体系，借助智能电表、温湿度监控传感器等工具，实时捕获电力消耗、制冷效果及IT设备运行的关键指标，进而创建了动态的能耗数字镜像模型。该系统集成先进的AI分析算法，旨在识别能效瓶颈，例如过度消耗制冷能量或IT负载分配不均等情形，并能自动生成针对性的优化提案。系统支持3D可视化操作界面，直观展示数据中心的电源使用效率（PUE）实时数值、设备能耗分布情况以及热力图。一旦监测到异常状况，例如机柜温

度超限，系统将触发多级警报，并与任务管理系统实现联动^[5]。结合历史数据，系统能够预测未来的负载变化趋势，从而灵活调整制冷策略。在实际应用中，该方案有望将制冷能耗减少15%至20%。

（三）实施步骤

1. 需求调研与基线评估（1-2个月）

构建能耗数字化镜像模型，以精确计量IT负载效率、制冷电能使用效率（PUE）及可再生能源利用率等关键性能指标，确定能源消耗较高的设备，包括使用超过五年的服务器、存储设备、不间断电源（UPS）以及效率较低的空调系统，并对其进行改造优先级的评估。

2. 方案设计与技术选型（2-3个月）

规划“逐步改造实施计划”，首要任务是更新液冷系统及光伏储能设施，随后有序开展余热回收利用的工作。

选择兼容性方案：如华为微模块支持新旧设备混搭，避免业务中断。

3. 设备采购与施工（6-8个月）

硬件设备采购清单，选用液冷机组（品牌可选华为或曙光）、智能配电柜（推荐使用施耐德品牌）、以及高效率单晶硅光伏组件（光电转换效率不低于21%）。

施工关键环节概述，在进行冷通道封闭改造时，需确保改造工作与数据中心运行同步进行，以防止冷热气流混杂影响散热效果，在储能系统与不间断电源（UPS）并联配置时，需安装智能切换装置以确保电力供应的稳定性^[6]。

4. 验收与持续优化（1-2个月）

性能验收标准设定，电能使用效率（PUE）实际测量值需低于或等于1.3，可再生能源的利用比例需达到或超过20%，年度绿色电力消费量需不少于10万千瓦时，单位算力的碳排放强度需减少40%，同时余热回收的利用率需达到30%。

构建运维智慧库，汇总并分析设备运行数据，用于优化人工智能算法模型的参数配置，旨在将运维响应速度提高50%。

四、实施效果评估体系构建

为了评估高校数据中心绿色改造的实施效果，我们应围绕能效提高、经济可行性和环境友好性这三个核心方面，构建一个包含多个层次且能够动态调整的评估体系框架。

（一）评估指标

数据中心的能效指标是评估其节能水平的重要标准 PUE（电能利用效率）被视为核心指标，其目标值应该小于等于1.3。此外，结合 DCiE（数据中心能效指数， $DCiE=1/PUE$ ）进行双重验证，以确保能效水平得到充分的评估。在实际改造过程中，单位面积能耗（ $kWh/m^2 \cdot 年$ ）需要比改造前下降40%以上，才能真正实现节能目标。要对数据中心进行全面的能效评估和改造，以提高其运行效率，降低能耗，减少资源浪费。

经济指标在评估设备更换及能源支出方面起着至关重要的作用。投资回收期不超过5年、年节电量达到10万 kWh、运维成本

下降率不低于30%等指标，我们可以有效地量化设备更换和能源支出的动态变化。在做出决策时，我们需要通过全生命周期成本（LCC）模型来综合考虑各项经济指标，以确保在降低运维成本的同时获得最大的经济效益^[7]。

环境保护是高校发展的重要组成部分评估环境绩效的关键指标包括碳排放减少量以及水资源循环利用率。对于碳排放减少量，必须结合电网碳排放因子进行核算，以确保准确性，而水资源循环利用率需考虑中水回用系统和冷却水闭环管理数据，确保达到不低于60%的利用率。高校应该重视环境指标，在运营过程中注重减少碳排放，提高水资源的循环利用率，实现可持续发展的目标。

（二）评估方法

生命周期分析法（LCA）是一种综合性的评估方法，它涵盖了建材生产、设备制造、运营维护和报废回收等全生命周期。采用 ISO 14064标准来量化碳足迹，帮助我们全面了解产品或项目在环境方面的影响。以某高校液冷改造为例，通过 LCA 分析发现，全周期碳排放降低了58%。这充分反映出通过技术改进和绿色设计，我们可以有效减少碳排放，实现可持续发展的目标。生命周期分析法的应用对于推动环保意识和可持续发展至关重要。

对比分析是一种评估改造效果的有效方法利用智能电表、水表等设备采集分钟级数据，建立改造前后的能耗基线。以南京航空航天大学为例，他们通过对比 PUE、单位面积能耗等指标变化，成功将 PUE 从1.8降低到1.3，年节电量高达90万 kWh。这一案例充分说明，通过对比分析法，可以有效评估改造效果，为节能减排提供科学依据^[8]。

2024年版的《国家绿色数据中心评价指标体系》引入了动态基准法，通过权重评分机制对16项二级指标进行量化评分。比如，当余热回收利用率达到30%以上时，可获得4分，当可再生能源占比超过20%时，可获得10分。这一方法使评价更为客观和全面，有利于推动数据中心在绿色环保方面持续改进和提高。这种方式，可以有效监测和评估数据中心的环保表现，促使其更加注重可持续发展和资源利用效率。

实时监控数据是 DCIM 系统的重要功能，结合该系统可以生成季度评估报告。报告采用雷达图展示数据，直观展示能效、经济和环境指标的达成情况。与行业标准（如 $PUE \leq 1.2$ 、单位面积能耗 $\leq 35kWh/m^2 \cdot 年$ ）进行对比，可以清晰地识别出改进的空间。这种方法，高校可以更好地了解自身能源利用的情况，及时进行调整和改善，提高能效水平，降低成本，减少对环境的影响。这种系统化的监测与评估方法有助于高校持续改进能效管理，实现可持续发展目标^[9]。

五、案例实证分析

（一）华南理工大学全栈式液冷数据中心

数据中心升级改造前的 PUE 测算高达1.4-2之间，能耗巨大。由于规模庞大，改造成本也相对较高。主要的改造重点包括冷热通道隔离、智能照明系统、液冷技术应用以及模块化供电架

构。引入高密度液冷 ParaStor 存储系统扩展 25PB 的液冷存储能力，全面实施液冷数据中心建设。这一系列改造将使同等规模的数据中心性能提升 100%，并将 PUE 降至 1.2 以下，实现了能耗、成本和性能之间的多元平衡。

（二）武汉大学液冷边缘数据中心

数据中心采用 DLC 浸没式液冷技术，利用高比热液体作为冷媒，有效地转移设备内部硬件产生的热量，达到了 PUE 低至 1.03 的能效水平。单机柜功率密度高达 50kW，同时采用液冷 HPC 超算解决方案，满足了高算力和高能效的核心需求。这种技术不仅可以节省 60% 的空间，还能降低原制冷的用电量达到 90%，并将噪音水平降低至 40dB。整体而言，这种液冷技术的应用在数据中心中的效果十分显著，能够有效提高能效，同时也满足了对高算力和高能效的需求。

绿色改造在提升高校数据中心能效水平方面发挥着重要作用，其核心措施包括冷热通道隔离、液冷技术和智能监控。研究表明，通过这三项措施，能达到节能率 15%–30%、PUE 降幅 0.5–1.0 和运维成本下降 25%–40% 的效果。绿色改造为高校数据中心低碳转型提供了可复用的技术范式。

综合案例显示，高效的绿色改造不仅可以提升数据中心的能效，还能降低运营成本，为实现可持续发展和资源节约做出贡献。这些经验可以为其他行业提供借鉴，推动更多领域朝着绿色、可持续的方向发展。

六、挑战与对策

高校数据中心绿色改造面临多重挑战：初期投资较高，如全面采用液冷技术需投入超千万元；技术兼容性不足，新旧设备协同困难，冷热通道隔离易与原风冷系统冲突，多源系统整合难度大；跨部门协作存在障碍，基建、IT、后勤等部门权责分散，协调效率低。

为有效应对高能耗问题，可采取以下措施：推行混合能源架构，如采用 UPS 与锂电池方案以降低电费；实施模块化设计，提升液冷存储系统灵活性；建立数字化管理平台（如 DCIM 系统），实现能耗实时监控；成立专项工作组，构建数据共享机制以加强协同；完善政策激励，如对 $PUE \leq 1.3$ 的数据中心提供电价优惠。这些举措有助于提升能效，推动数据中心可持续发展。

七、结论与展望

研究表明，高校数据中心进行绿色改造能够显著提高能效。冷热通道隔离、液冷技术和智能监控等手段，典型改造后的 PUE 值可以减少 0.5–1.0，单位面积能耗也会下降 30%–50%。这意味着年节电量可以减少数十万千瓦时^[10]。即便如此，在进行改造时需要权衡短期成本和长期收益。初期改造可能涉及到一些高成本设备，比如液冷系统和智能配电系统。全栈液冷方案可能需要上千万元的资金，而通过存算一体化设计、余热回收和运维成本优化，全生命周期成本可以降低 20%–30%。这意味着虽然初期投入较高，在这种情况下在长期运行中可以获得更多的节约和好处。高校数据中心应该在绿色改造时考虑到整体效益，以达到更好的效果。

未来发展趋势侧重于两大领域，其一是建立在人工智能的动态调优技术，结合数据中心基础设施管理系统和机器学习算法，通过实时分析负载、温湿度等数据，动态调整制冷方案和计算资源分配，实现能源消耗与性能的精确平衡，其二是将校园微电网与虚拟电厂相结合，整合光伏电力、储能系统和数据中心废热回收，构建区域能源协同网络，通过智能调度提高可再生能源利用率至 30% 以上，并与变电站、通信基站探索电力互补机制。在这个领域，需要进一步突破系统间数据障碍，完善碳计量标准和政策激励机制，推动从单体优化向区域协同进化的绿色改造，为高校实现“双碳”目标提供可持续路径。

参考文献

- [1] 李勇. 能耗指标与数据中心的关系研究 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 23–27.
- [2] 张广明. 数据中心能耗现状与节能技术 [C]. 中国电源学会现代数据中心基础设施建设技术年会, 2011.
- [3] 苏林, 董凯军, 孙钦等. 数据中心冷却节能研究进展 [J]. 能源研究与信息, 2019, 35(1): 1–9.
- [4] 海珠, 吕天文, 张慧鑫. 数据中心节能技术及发展方向分析 [J]. 建设科技, 2020(14): 27–30+33.
- [5] 李翔. 云数据中心的温度建模与节能调度方法研究 [D]. 浙江大学, 2017.
- [6] 通讯世界编辑部. 关于数据中心节能减排措施的讨论 [J]. 通讯世界, 2019(08): 87–90.
- [7] 国瑞沃德 (北京) 低碳经济技术中心. 数据中心节能改造与实践案例 [R]. 2021.
- [8] 曙光存储. 华南理工大学全栈液冷数据中心项目案例 [R]. 2024.
- [9] 张志钢, 王泽生. 高校数据中心的绿色节能研究 [J]. 天津城建大学学报, 2010, 16(2): 136–140. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6853.2010.02.014.
- [10] 彭洁, 王跃. 绿色数据中心监控系统平台方案设计 [J]. 电气应用, 2019, 38(11): 8. DOI: CNKI: SUN-DGJZ.0.2019-11-019.