绿色数据中心能效EEUE评价指标及提升途径解析

Analysis of EEUE Evaluation Indicators and Improvement Pathways for Energy Efficiency in Green Data Centers

赵海洋[1]，杨瑛洁[1]，侯永涛[1]，滕　达[1]，何　健[2]，陈邦稳[3]，张蓝铮[1]（1. 中讯邮电咨询设计院有限公司，北京 100048；2. 联通数字科技有限公司，北京 100085；3. 中国联通浙江分公司，浙江 杭州 310051）

Zhao Haiyang[1], Yang Yingjie[1], Hou Yongtao[1], Teng Da[1], He Jian[2], Chen Bangwen[3], Zhang Lanzheng[1]（1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China Unicom Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. China Unicom Zhejiang Branch, Hangzhou 310051, China）

摘　要：

在“双碳”与数字经济背景下，数据中心面临能耗高、碳排放强等问题。以EEUE（Electric Energy Usage Effectiveness）为核心，构建涵盖源侧、负荷侧、冷却及辅助系统的综合能效优化体系。研究指出，能效提升的关键是“源—网—荷—储—管”一体优化：清洁能源与储能协同实现低碳化，IT高效化与冷却革新实现负荷侧节能，智能能源管理实现多能流实时监控与调度。未来能效优化将向智能化、协同化、低碳化演进。

关键词：双碳；数据中心；EEUE；综合能效优化；智能管理

doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.001

文章编号：1007-3043（2026）10-0001-07

中图分类号：TP308

文献标识码：A

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract:

Against the background of "Dual Carbon" strategy and the digital economy, data centers face challenges of high energy consumption and significant carbon emissions. Taking EEUE (Electric Energy Usage Effectiveness) as the core indicator, a comprehensive energy efficiency optimization system is constructed, covering source-side, load-side, cooling, and auxiliary systems. The key to improving energy efficiency lies in the integrated optimization of "Source-Grid-Load-Storage-Management": the coordinated configuration of clean energy and energy storage achieves decarbonization, high-efficiency IT equipment and cooling innovations achieve load-side energy savings, and intelligent energy management systems enable real-time monitoring and dynamic dispatch of multi-energy flows. Future energy efficiency optimization will evolve toward greater intelligence, collaboration, and decarbonization.

Keywords:

Dual carbon strategy; Data center; EEUE; Comprehensive energy efficiency optimization; Intelligent management

引用格式：赵海洋，杨瑛洁，侯永涛，等. 绿色数据中心能效EEUE评价指标及提升途径解析[J]. 邮电设计技术，2026（10）：1-7.

1 概述

在“双碳”目标与绿色低碳转型的政策背景下，数据中心的能效提升与碳减排已上升为国家战略任务[1]。我国数据中心能效标准体系在2016年引入电能使用效率（Electric Energy Usage Effectiveness，EEUE）概念，用于衡量数据中心电能利用效率。2025年发布的《数据中心能源综合利用评价方法》（GB/T 45837-2025）在此基础上完善了EEUE的评价机制，将其与可再生能源利用率（REF）、储能率（SEUR）、能源再利用率（ERF）等指标共同纳入综合能效体系，使能效评估更具系统性与可比性[2]。相较于传统的PUE（Power Usage Effectiveness）指标，其涵盖范围更广，能更全面反映数据中心在电、冷、热等多能流耦合下的综合能源利用效率，为绿色算力园区的评价与优化提

通讯作者：赵海洋，zhaohy689@dimpt.com

收稿日期：2026-08-26

供了更科学的依据[3]。

然而，数据中心能耗的构成极为复杂，既包括IT设备的计算负载能耗，也包括制冷系统、供配电系统、照明与辅助设施的能耗[4]。如何在保障算力可靠性与运行稳定性的前提下，降低整体能耗、提升EEUE水平，成为学术界与工程界共同关注的焦点问题。为此，本文在综合分析能耗构成及影响因素的基础上，探讨多能互补的源侧配置策略、IT设备能效优化与冷却系统节能技术，并结合国家标准与工程案例，为未来绿色数据中心的能效提升与碳减排提供参考[5]。

2 双碳战略下的能效标准框架

2.1 政策体系与发展趋势

随着“双碳”目标的提出，数据中心能耗与碳排放问题成为数字经济可持续发展的关键环节。我国政府从顶层设计出发，构建了“政策—标准—技术—监管”四位一体的绿色转型框架。《“十四五”数字经济发展规划》《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》《新型数据中心发展三年行动计划（2021—2023年）》等文件均明确要求：到2025年，新增大型和超大型数据中心的平均PUE须降至1.3以下，绿色数据中心比重显著提升。这一目标不仅约束了新建项目的能效水平，也推动了既有设施的节能改造与能效评估工作[3]。

在政策导向上，国家发改委提出“东数西算”工程，通过算力和能源的区域再平衡，实现清洁能源就地消纳与低碳算力供给。西部地区依托丰富的风光资源与低气温环境，逐渐成为国家级绿色数据中心集聚区；而东部地区则聚焦能效监管与冷却优化，强化绿色能源配额管理。各地政策的差异化实施，推动了全国范围内数据中心能效提升与能源结构优化的协同发展。同时，地方政府也相继出台能效引导文件，如北京的《数据中心绿色高质量发展实施意见》和贵州的《绿色算力中心建设导则》，进一步完善了从规划、设计到运行的全周期能效管控体系。

综上，国家层面的战略驱动和地方层面的政策落地正在形成合力。数据中心已从能源高耗行业转变为能源高效利用的典型代表，绿色、低碳、智能的算力基础设施正在成为未来数字经济竞争的新引擎。

2.2 标准体系演进

我国数据中心能效标准体系的形成经历了从定性到定量、从单指标到多维度的演进阶段。早期的《数据中心设计规范》和《绿色数据中心评价指标体系》主要以PUE为核心指标[6]，用以衡量数据中心总能耗与IT负载能耗之比。PUE的简洁性使其在行业内被广泛接受，但它忽略了多能流系统、可再生能源利用及余热回收等新兴技术的贡献，难以全面反映绿色数据中心的真实能效水平。

随着“双碳”目标的推进与新型能源体系建设的加速，单一电能维度的PUE已难满足评价需求。基于GB/T 32910.3-2016中提出的EEUE能效评价框架[7]，《数据中心能源综合利用评价方法》（GB/T 45837-2025）进一步拓展了指标体系，形成以EEUE为核心，兼顾REF、SEUR、ERF及能源管理的多维评价结构[2]。该标准通过引入“总能量利用率”的概念，将电能、热能、冷能、储能及可再生能源接入等多种能量形式统一纳入能效计算边界，形成“输入—转换—利用”的能量闭环。

《数据中心能源综合利用评价方法》（GB/T 45837-2025）对能效标准体系进行了系统升级，首次将数据中心的能源综合利用定义为包含EEUE、REF、SEUR、ERF及能源管理水平等5个评价单元，并采用分值权重法构建综合评价模型，总分为100分，其中EEUE修正值权重高达50%，为主导性指标。标准明确了能源综合利用等级划分：从一级（$P\geqslant 85$）至四级（$P<60$），并建立了相应的测量要求和管理规范。这一体系的建立标志着我国数据中心能效评价从“单项指标”向“系统集成”的转变，为绿色算力园区的节能监管与能碳核算提供了科学依据[2]。

2.3 EEUE指标的内涵与意义

EEUE是衡量数据中心能耗水平的核心指标，定义为在同一周期内数据中心总电能消耗量与信息设备电能消耗量之比。该定义沿用GB/T 32910.3-2016中的测量方法[7]，在新标准中被进一步细化，并引入“实测值—调整值—修正值”三级结构，使测评结果更具精度与可比性。

EEUE实测值以年度能耗为基础，计算公式为：

$$\mathrm{EEUE}_{\text{实测}}=\frac{E_{\mathrm{dc1}}}{E_{\mathrm{it}}} \tag{1}$$

其中，E_{dc1}为数据中心年度总电能消耗量，E_{it}为IT设备年度电能消耗量。由于气候条件、业务波动及测量方式等因素可能导致偏差，标准进一步提出EEUE的调整值，用以修正实测结果。EEUE修正值则为两者之差，代表在标准化测量条件下的真实能效表现。

EEUE作为综合能效体系的核心指标，其定义和测量方法为后续多维指标的比较提供了统一的能效基准。

在能效等级评价中，EEUE修正值是最具权重的指标，评分规则规定：EEUE修正值高于1.40不得分；等于1.40得20分；每降低0.01，得分增加1分，最高可达50分。这一分值体系鼓励通过技术优化与能源结构调整持续提升能效水平。

EEUE与其他指标（REF、SEUR、ERF）共同构成数据中心能源综合利用的评价框架，总得分为：

$$P = P_{\text{EEUE}} + P_{\text{REF}} + P_{\text{SEUR}} + P_{\text{ERF}} + P_{\text{管理}} \tag{2}$$

其中，P_{EEUE}为电能利用效率，P_{REF}为可再生能源占比，P_{SEUR}为储能能力，P_{ERF}为能源再利用水平，而能源管理部分则考察制度与运维的完善度。

与传统PUE相比，EEUE的计量边界更严格，精度更高，涵盖从配电、UPS、PDU到冷却环节的全链路测量。这使得EEUE不仅能体现节能设备和运行策略的实际成效，也可为节能改造投资、能效监管及碳排放核算提供可靠依据。其在标准体系中的高权重地位表明，EEUE已成为绿色数据中心能效管理的核心评价口径，是连接能源效率与碳减排目标的关键纽带。

2.4 多维能效指标体系比较

为全面反映数据中心的能源利用、碳排放及资源协同水平，现行的能效评价体系已由单一的PUE指标发展为包含电能效率、可再生能源利用、储能率、能源再利用、水资源效率及能碳管理等多维度的综合指标体系。

与传统PUE不同，EEUE的定义更精确，测量边界包括UPS、PDU、冷却、照明及辅助系统，并引入调整值与修正值以消除气候和负荷波动影响。在物理意义上，EEUE反映了能量从输入到IT负载的传递效率，是衡量能耗结构合理性和运行损耗水平的核心指标。而REF、SEUR、ERF、水资源利用效率（Water Usage Effectiveness，WUE）、碳使用效率（Carbon Usage Effectiveness，CUE）等指标则分别反映可再生能源利用、储能调节、能量回收、水资源效率与碳排放强度等维度，共同构成数据中心能源综合利用的评价框架。

REF反映了数据中心在运行周期内清洁能源的使用比例：

$$\text{REF} = \frac{E_{\text{RE}}}{E_{\text{total}}} \tag{3}$$

其中，E_{RE}为光伏、风电、水电等可再生能源的输入量。REF不仅影响碳排放系数γ_{carbon}，还与EEUE呈非线性相关：较高的REF可降低系统一次能输入，间接改善EEUE修正值。对于采用“源—网—储—荷”一体化架构的算力园区，REF体现了源侧清洁化水平，是实现“低碳算力”的关键前置指标。

SEUR反映了储能系统在削峰填谷与能量转移中的调节能力：

$$\text{SEUR} = \frac{E_{\text{stor,dis}}}{E_{\text{total}}} \tag{4}$$

其中，$E_{\text{stor,dis}}$表示储能系统放电量。储能的引入能够平滑可再生能源出力波动，改善IT设备负荷稳定性，降低冷机启停次数，从而间接优化EEUE。理论上，SEUR越高，能效系统的时间分布均衡性越强，反映出能源利用的动态稳定性与运行弹性更好。

ERF[8]用于度量数据中心余热、余冷等能量回收利用的水平：

$$\text{ERF} = \frac{E_{\text{reuse}}}{E_{\text{total}}} \tag{5}$$

其中，E_{reuse}为被再次利用的有效能量，如用于建筑供暖或驱动吸收式制冷。ERF的提高不仅能减少环境散热损失，也能有效降低碳排放强度γ_{carbon}。当采用液冷系统或CCHP结构时，ERF提升最为显著，是绿色数据中心向能量闭环系统演进的重要标志。

WUE反映制冷系统在用水与能耗之间的平衡关系：

$$\text{WUE} = \frac{V_{\text{water}}}{E_{\text{IT}}} \tag{6}$$

其中，V_{water}为制冷系统的年用水量。WUE综合体现了冷却技术路线与自然冷源条件的匹配程度。在干旱地区，蒸发式冷却会显著拉高WUE，因此提升能效需在“电耗降低”和“水耗约束”之间寻求最优解。

CUE[7]是国际通行的碳排放效率指标，用于量化单位IT负载能耗对应的碳排放：

$$\text{CUE} = \frac{C_{\text{total}}}{E_{\text{IT}}} \tag{7}$$

其中，C_{total}为数据中心年度碳排放量。CUE与EEUE、REF间存在显著耦合关系：较高的REF和ERF可直接降低CUE值。理论上可定义能碳协同效率：

$$E_{\text{eco}} = \frac{1}{\text{EEUE} \times (1 + \gamma_{\text{carbon}})} \tag{8}$$

其中，γ_{carbon}表示非可再生能源碳排放占比，E_{eco}越高，系统的能碳综合表现越优。

综合上述指标，PUE与EEUE分别代表电能效率

与系统能效，是能效评价的基础层；REF与ERF构成能源结构与循环利用层；SEUR体现系统的时间调节能力；WUE与CUE则延伸至环境与碳约束层。其逻辑关系可用如下函数描述：

$$E_{sys}=f(\mathrm{EEUE},\mathrm{REF},\mathrm{SEUR},\mathrm{ERF},\mathrm{WUE},\mathrm{CUE})\Rightarrow \max(E_{eco}) \quad (9)$$

其中，E_{sys}为系统综合能效函数，目标是在能量利用率最大化的同时实现碳排放最小化。与仅依赖PUE的传统框架相比，EEUE—REF—ERF—CUE的多指标协同体系能够从能量、碳排、水资源与时间动态4个维度综合评估数据中心运行水平。其评价结果更能反映不同气候区、能源结构和运行模式下的真实能效表现，也为后续能耗指标提升技术分析提供理论基础。

3 能耗指标提升技术分析

3.1 能耗构成分析

根据前述能效标准体系与EEUE指标内涵可知，数据中心的总体能耗由多层次、多环节组成，主要包括信息设备能耗、冷却能耗、供配电能耗及辅助系统能耗等。其中，IT设备能耗直接体现算力负载强度，是数据中心运行的核心能耗部分；冷却系统能耗反映散热与环境控制效率，是决定PUE和EEUE水平的关键环节；供配电及辅助系统能耗则代表能量传输与支撑过程中的损失，是整体能效优化的重要潜力区。

在典型数据中心能耗构成中，IT设备能耗占总能耗的45%~55%，冷却系统占30%~40%，其余为供配电、照明、消防、监控、办公等辅助能耗。由于算力负载的波动性与环境温湿度变化的耦合，能耗呈现明显的时空分布特征：在高负载、夏季工况下，制冷系统成为主导耗能环节；而在低负载或寒冷气候条件下，能耗重心转向UPS与电能损耗部分。因此，提升数据中心能效的关键在于明确能耗结构、识别主要能耗源，并针对不同环节实施差异化优化策略[8]。

从系统视角来看，数据中心能耗的形成过程可划分为“源—网—负荷”3个层面。源侧能源结构决定了供能方式及碳排放强度，主要包括市电、可再生能源、冷热电联供及储能系统；网侧涵盖变压器、UPS、PDU及配电线路等环节，其能量损耗受设备效率及功率因数影响；负荷侧则由IT设备、制冷单元、风机、泵及末端空调组成，能耗受运行负载率与控制策略影响。不同层面间的能流相互作用构成了数据中心能效的系统性特征，也是实现整体节能优化的理论基础[9]。

因此，能耗构成分析不仅是能效诊断的前提，也是开展能碳耦合优化、能量回收与多能互补配置的基础环节。通过对各环节能耗的量化分析，可为后续源侧能源优化、IT设备节能、冷却系统效率提升及辅助系统改进提供方向支撑，构建起面向EEUE指标提升的系统性技术路径。

3.2 源侧优化

源侧优化是数据中心综合能效提升与碳减排的首要环节，其目标在于通过能源结构优化与多能互补配置，实现高效、低碳、稳定的能源供给体系。在传统模式下，数据中心主要依赖市电供能，部分采用燃气发电或柴油备用，整体以高碳、高成本为特征。随着双碳战略的推进与EEUE指标体系的实施，源侧能源已从单一供电模式转向“可再生能源主导、常规能源支撑、储能系统调节”的多元结构。

a）可再生能源接入与就地消纳。风能、光伏是算力园区实现低碳化供能的核心。风光发电具备边际碳排放低、建设周期短的优势，可通过“源—荷—储—网”一体化布局实现能源就地消纳，减少输电损耗并提升REF。对于高功率密度的数据中心园区，可在园区外围部署分布式光伏、风力微网与储能装置，形成局域能源自平衡系统。在EEUE计算中，这类结构能有效降低总能量输入，改善修正值表现，使综合能效等级显著提升[10]。

b）储能系统的能量调节作用。储能系统（含电储能与冷/热储能）在源侧能源优化中承担削峰填谷与能量平衡的双重功能。其关键指标SEUR直接影响能源综合利用得分。通过电化学储能与蓄冷蓄热系统协同运行，能平滑可再生能源出力波动，延长IT设备稳定运行时间，提升EEUE修正值的稳定性。同时，储能装置还能在电价分时机制下实现经济优化，为数据中心运行提供“能效+经济性”双重收益。

c）氢能及多能互补供能结构。氢能在未来高可靠算力园区中将成为关键的长时储能与清洁燃料选项。氢—电—热多能耦合可通过燃料电池实现电能、热能的协同利用，提高ERF，并在GB/T 45837-2025的能效评分中获得附加分值。以“光—储—氢—CCHP”多能互补结构为例，将可再生能源多余电量用于制氢与储能，再经燃料电池发电或供热回收，实现能源循环利用与零碳运行。

d）能源管理与调度优化。源侧优化不仅取决于能源种类，更依赖于调度策略。通过建立能源管理系

统（EMS）与智能优化算法，可实现可再生能源出力预测、储能联动与负荷分配的动态决策，形成多时间尺度的能量优化控制。EEUE的实时修正值可借助此类系统持续计算，指导能效运行策略调整，实现能耗动态最优。

源侧优化通过“可再生能源+储能+多能互补”的集成式路径，能在保证算力供给稳定性的同时显著提升EEUE与REF指标表现，降低整体碳排放，为后续负荷侧与系统级能耗优化奠定基础。

3.3 IT设备节能

IT设备是数据中心能耗的核心来源，其能耗占比通常在45%~55%，对EEUE指标起着决定性作用。随着人工智能、大模型训练及云计算等高算力业务的兴起，单机功率密度与集群功率需求快速增长，导致数据中心在保持性能输出的同时面临严峻的能耗与散热挑战。实现IT设备节能的关键在于从硬件效率、资源调度、虚拟化策略及系统管理等层面协同提升能源利用率[11]。

在硬件层面，采用高能效服务器和先进电源系统是提高能效的直接手段。高转换效率的电源模块（如80PLUS钛金级电源）、低功耗CPU/GPU、智能电压调节与待机模式控制技术，均能有效降低单位算力能耗。通过模块化设计与节点休眠策略，可在不同负载下维持高效运行，减少空载损耗，从而使信息设备年耗电量E_{it}明显下降，直接改善EEUE修正值表现。

在系统运行层面，虚拟化与算力调度技术发挥了至关重要的作用。通过负载感知的任务分配与容器化部署，可以在低负荷时集中任务、关闭冗余节点，实现“以算定能、按需供能”。这不仅提升了服务器群的平均利用率，还减少了无效运行导致的能源浪费，使能效曲线更加平滑稳定。同时，智能能源管理系统（EMS）可实时监测CPU、GPU的运行状态与功率特性，结合AI算法预测负载趋势，动态调节电源分配和运行频率，使设备运行点始终处于能效最优区间[12]。

此外，软件层的能耗优化正成为IT节能的重要方向。通过操作系统功耗管理策略、算法结构优化与数据调度改进，可以有效降低计算冗余。例如，采用模型剪枝、低精度计算及任务分级缓存等“绿色算法”设计理念，不仅减少运算能耗，还能减轻散热负担。该类优化措施在EEUE修正值的长期表现中体现为更低的波动率与更高的稳定性，体现出软硬件一体化节能的长期价值。

总体来看，IT设备节能是提升数据中心能效等级的基础环节，其优化成果直接影响EEUE与PUE 2项指标的变化趋势。通过高效硬件、智能调度与软件优化的协同作用，可实现算力利用率与能源效率的同步提升，为后续冷却系统与辅助设施的能耗优化创造良好条件，也为构建绿色算力中心和低碳园区奠定核心基础。

3.4 冷却系统效率提升

冷却系统是除IT设备外数据中心的第二大能耗环节，其能耗通常占总能耗的30%~40%，直接决定了PUE和EEUE指标的高低。随着服务器功率密度不断提高，传统风冷系统在能效与散热性能上逐渐面临瓶颈，如何提升制冷系统效率已成为实现能耗指标优化的关键路径。冷却系统的优化不仅涉及设备效率提升，更依赖于冷源类型、气候条件利用、气流组织以及余热回收等多维度的系统性改进[9]。

在制冷方式上，液冷技术正逐步取代传统风冷，成为高密度算力中心的主流方向。液冷系统通过介质直接带走服务器芯片级热量，换热效率较风冷提升3~5倍，可显著降低冷机负荷与风机功耗。尤其在采用浸没式或冷板式液冷系统时，可将冷却能耗降低至总能耗的10%以内，使EEUE修正值明显改善。同时，液冷系统还能与热回收装置结合，实现高温余热再利用，为园区供暖或吸收式制冷提供热源支持，从而提升ERF指标并减少碳排放[4,13]。

自然冷源的高效利用是冷却系统节能的另一重要途径。利用寒冷地区的低环境温度条件，通过间接蒸发冷却、全新风系统或冷却塔自由冷却，可在全年40%~60%的时间段内实现“非压缩机制冷”。这种“气候匹配型”制冷模式不仅能显著降低制冷电耗，还能改善能效曲线的季节波动性。依据GB/T 45837–2025的要求，标准在EEUE修正值计算中建议考虑环境修正因子，对具备自然冷源优势地区的园区给予能效修正，以确保跨气候区对比的公平性。

此外，合理的气流组织与冷热通道优化对冷却效率提升同样重要。通过冷热通道封闭、机柜级风道管理及智能风阀控制，可减少冷热气流混合，提高送风温差与制冷系统性能系数（COP）。在大型数据中心中，结合AI温控系统与CFD（Computational Fluid Dynamics）气流仿真技术，可实现动态送风优化与区域热负荷平衡，从而进一步降低制冷能耗。

3.5 辅助系统节能与综合优化

除IT设备与冷却系统外，供配电、照明、消防、安全监控及环境调控等辅助系统同样构成数据中心能耗的重要组成部分，其能耗比例虽相对较低，但优化潜力显著。辅助系统的节能不仅能进一步降低整体能耗结构中非生产性能耗比例，也能提高EEUE修正值的稳定性，改善运行安全性与可靠性。

在供配电环节，UPS、变压器及配电单元（PDU）是主要能耗源。传统UPS系统在低负载运行时效率较低，部分时间处于空载状态，导致无效能耗增加。采用模块化UPS结构、双变换在线模式及高频IGBT逆变技术，可将转换效率提升至97%以上，并通过功率因数校正与谐波抑制降低配电损耗。同时，负载自适应启停控制与母线级能耗监测技术的引入，使系统在不同负荷条件下都能维持高效运行，从而有效减少电能损失并提升EEUE指标[14-15]。

照明与监控系统的能效优化主要依赖智能控制技术。通过采用高效LED光源、分区感应照明及自然光调节，可在保证照度标准的前提下减少30%以上照明能耗；而智能监控系统可实现实时能耗采集与异常报警，为运维人员提供能效管理决策依据。在消防与安全系统方面，通过引入低待机功耗设备及分时供电机制，可在不影响安全性的前提下降低长期运行能耗。

综合来看，辅助系统的节能优化更体现出数据中心“全生命周期管理”的理念。通过能源管理系统（EMS）对IT设备、冷却系统与辅助系统的能耗进行统一调度，可实现多能流协同优化与动态能效分析。利用AI算法与数字孪生模型对能源流进行实时预测与反馈，可在设备维度上发现潜在能耗异常，并通过策略修正保持EEUE修正值的稳定与可持续改善[16]。

因此，辅助系统节能不应被视为单一技术环节的补充，而是构建绿色数据中心整体能效体系的重要支撑。其优化不仅能进一步压缩非核心能耗比例，还能与前述源侧、IT侧、冷却侧协同形成“源—网—荷—储”一体化能效优化闭环，为实现数据中心EEUE等级提升与碳中和目标提供坚实基础。

4 面向EEUE指标提升的能效优化路径

面向EEUE指标提升的数据中心能效优化是一个涵盖能源结构、运行策略与智能管理的系统工程。不同地区、不同类型的算力园区在资源禀赋、业务特征与气候条件上存在显著差异，因此在能效优化中呈现出多路径、多层次的发展格局。整体而言，数据中心的能效优化不应仅聚焦于设备层面或某个局部环节，而应构建从源头供能到负荷利用、再到能量回收与智能管控的系统性路径，实现EEUE、PUE及碳排放强度的协同优化。

从分类来看，我国算力园区大体可分为3种类型：资源型、负荷型和平衡型。资源型园区多布局于西部、北部等能源资源丰富地区，风光资源充足且气候条件适宜，具备建设风光储氢一体化低碳供能系统的天然优势。其能效提升的核心在于“就地消纳、储能调节与能源互补”，通过建设分布式光伏、风电及氢能系统，实现高比例可再生能源自发自用，并通过储能系统与冷热电联供系统平滑负荷波动，从而显著降低EEUE修正值。负荷型园区则多集中在东部沿海与核心城市群，算力密集、负荷波动大、气候湿热。此类园区能效提升的重点在于冷却节能与算力调度的协同，通过液冷技术替代传统风冷，结合冷热通道封闭、智能送风管理与AI能耗预测，实现散热系统能耗占比的显著降低。同时，虚拟化与负载迁移技术可在低峰时段自动聚合任务，减少空载能耗，提升设备整体利用率。平衡型园区则处于两者之间，能源条件与负荷特征均较均衡，其能效优化路径重在“系统集成与智能控制”。通过建立综合能源管理系统（EMS），实现电、冷、热、储等多能流的实时调度与协调优化，使各能流环节在统一能效目标下动态运行，从而保持系统长期高效。

从系统构建角度看，数据中心能效优化体系应由“结构优化—运行控制—智能决策”三层组成。在结构层，优化能源供给与负荷结构，通过清洁能源替代与高效设备应用实现初级能耗控制；在运行层，通过能耗监测与能碳协同控制实现动态能效管理；在决策层，依托AI算法与数字孪生技术建立预测与调度模型，实现能效的自学习与持续优化。该体系的核心在于将EEUE指标纳入能源调控闭环中，实现从指标评价向运行决策的反向反馈，使能效标准与管理策略相互促进[9,17]。

从技术手段看，能效优化不仅涉及硬件节能，更强调系统协同。源侧通过可再生能源接入、储能调节与CCHP冷热电联供系统实现供能多样化，负荷侧通过高效IT设备、算力编排与任务虚拟化实现利用率最大化，冷却侧通过液冷、自然冷源及余热回收技术实现散热系统节能[13]，而辅助系统则依托高效供配电与

智能监控技术降低非生产性能耗[14]。能源管理系统作为能量与信息的中枢，实现了能流与信息流的协同控制，为EEUE的动态优化提供技术基础。

总体而言，面向EEUE指标的数据中心能效优化路径应当立足于系统整体性与能碳协同性，打破“单环节节能”的传统思维，实现从能源供给到算力利用的全过程协同管理。其核心特征可概括为“多能融合、智能调度、能碳协同、持续优化”。未来，随着EEUE标准的普及与智能管理系统的完善，数据中心能效优化将由静态评估迈向动态运行，由设备节能迈向系统节能，最终实现“高算力、低能耗、零碳化”的新型算力基础设施发展目标。

5 总结

本研究围绕数据中心的能耗结构、能效指标及优化技术展开分析，构建了以EEUE评价体系为核心的综合能效提升系统路径。研究表明，能效提升的实质在于实现“源—网—荷—储—管”一体化的系统优化。在源侧通过清洁能源与储能调节提升能源利用率，在负荷侧通过高效IT设备与冷却系统优化降低能耗，在辅助系统与管理层通过智能调度与能碳协同实现运行的长期高效与低碳。EEUE作为反映整体能效水平的核心指标，能够将多能流协同、能源回收与智能控制纳入统一的评价体系，从而实现能源效率与碳排放控制的协同提升。

展望未来，数据中心的能效优化将呈现智能化、协同化与低碳化三大趋势。在智能化方面，AI算法与数字孪生技术将使能耗预测、设备调度与能效评估实现自学习与自调节；在协同化方面，算力资源与能源系统的区域联动将推动跨园区的能效协同运行；在低碳化方面，可再生能源比例的持续提升和碳管理机制的完善将推动数据中心从“高能耗”向“高能效”转变，成为能源体系低碳转型的重要载体。总体而言，数据中心能效的提升不再依赖单项节能技术，而将以系统化思维为主导，在综合能源、智能控制与碳减排协同中实现持续优化与演进。

参考文献：

[1] 李学伟，温亮. 数据中心用电趋势及优化策略研究[J]. 电信快报，2025(7)：45-48.
[2] GB/T 45837-2025　数据中心能源综合利用评价方法[S].
[3] 陈庆. 数据中心能耗指标PUE解析[J]. 中国金融电脑，2019(4)：6.
[4] King S. The Uptime Institute approves range of innovative Tier III Ready Data Centre designs[J]. Electrical engineering，2022(4).
[5] 张忠斌，邵小桐，宋平，等. 数据中心能效影响因素及评价指标[J]. 暖通空调，2022，52(3)：148-156，99.
[6] Víctor Avelar，Azevedo D. PUE：A Comprehensive Examination of the Metric[EB/OL]. [2026-05-25]. https://www. semanticscholar. org/paper/PUE%　E2%84%A2%3A-A-COMPREHENSIVE-EXAMINATION-OF-THE-METRIC-Avelar-Azevedo/4de8ee770ba97e359f3ba0179de8e3653ef9f9e.
[7] GB/T 32910. 3-2016　数据中心资源利用第3部分：电能能效要求和测量方法[S].
[8] 白亚东. 数据中心降低能耗的方法研究[J]. 节能，2024，43(3)：85-87.
[9] 黄海. 基于云计算的通信数据中心能耗优化探究[J]. 大众标准化，2024(9)：168-170.
[10] 周峰，王芮敏，马国远，等. 我国数据中心碳中和路径情景分析[J]. 制冷学报，2025，46(1)：79-85.
[11] 李振刚. 数据中心IT设备的能耗分析与节能研究[J]. 科技和产业，2014(4)：124-126.
[12] 况贶，李大平. 数据中心存储设备节能方案研究[J]. 计算机与数字工程，2023，51(12)：2940-2947.
[13] 葛泉志. 大型数据中心水冷散热系统设计及节能优化研究[D]. 北京：华北电力大学，2023.
[14] 黄平. 数据中心辅助系统分析[J]. 数字通信世界，2020(12)：110-112.
[15] 李长春，张谦，乔蔚林. 数据中心UPS系统运行能耗优化探讨[J]. 信息系统工程，2020(10)：106-107，110.
[16] Mark A，Paolo B，John B，et al. 2018 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency：Version 9. 1. 0[EB/OL]. [2026-05-25]. https://www.semanticscholar.org/paper/8711d1cdc3f9021b97dd2bdc2a5f66e7128ee181.
[17] Beaty D. Creating Energy-Efficient，Low-Risk Data Centers：ASHRAE unveils third edition of Thermal Guidelines For Data Processing Environments[J]. HPAC engineering，2013，85(1)：32，34，36-37.

作者简介：
赵海洋，毕业于郑州大学，工程师，硕士，主要从事供配电设计、节能减排等方面的研究、咨询、规划和设计工作；杨瑛洁，毕业于电子科技大学，高级工程师，注册电气工程师(供配电)，硕士，主要从事通信局房和数据中心供电系统、节能减排等方面的研究、咨询和设计工作；侯永涛，毕业于西安理工大学，高级工程师，硕士，主要从事通信电源工程及动力环境监控工程的研究、咨询、规划和设计工作；滕达，毕业于武汉大学，高级工程师，学士，主要从事供电系统、节能减排等方面的研究、咨询、规划和设计工作；何健，高级工程师，硕士，主要从事数据中心基础设施规划建设、技术研究等工作；陈邦稳，毕业于哈尔滨工业大学，高级工程师，学士，主要从事通信基础设施、网络规划和建设管理工作；张蓝铮，毕业于电子科技大学，助理工程师，硕士，主要从事供配电设计、节能减排等方面的研究、咨询、规划和设计工作。