

数据中心空调系统设计优化分析

张何辉

广东申菱环境系统股份有限公司, 广东 佛山 528313

DOI:10.61369/ETQM.2026070019

摘 要： 随着数字经济快速发展，数据中心作为数字基础设施的核心载体，其能耗问题日益突出，而空调系统作为数据中心能耗占比最高的辅助系统，其设计合理性直接影响数据中心的运行稳定性、能耗效率及运营成本。以数据中心空调系统设计为研究对象，先阐述空调系统设计的重要性，再深入分析当前设计过程中存在的核心难点，结合行业标准与工程实践，提出针对性的设计优化要点，旨在解决设计中的痛点问题，优化提供理论参考与工程借鉴。

关 键 词： 数据中心；空调系统；设计优化

Analysis on Design Optimization of Air Conditioning System in Data Centers

Zhang Hehui

Guangdong Shenling Environment Systems Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528313

Abstract： With the rapid development of the digital economy, data centers, as the core carriers of digital infrastructure, face increasingly prominent energy consumption issues. The air conditioning system, as the auxiliary system with the highest energy consumption proportion in data centers, has its design rationality directly affecting the operational stability, energy efficiency, and operational costs of data centers. Taking the design of the air conditioning system in data centers as the research object, this paper first elaborates on the importance of air conditioning system design, then delves into the core difficulties present in the current design process, and proposes targeted design optimization points by combining industry standards with engineering practices, aiming to address the pain points in design and provide theoretical references and engineering insights for optimization.

Keywords： data center; air conditioning system; design optimization

引言

数据中心内部服务器、交换机等设备24小时不间断运行，会产生大量热量，若不能及时有效散热，将导致设备运行效率下降、故障率升高，甚至引发数据丢失、系统瘫痪等严重后果。空调系统作为数据中心温度、湿度调控的核心设备，承担着维持机房恒温恒湿环境的重要职责，其设计水平不仅关系到设备运行安全，更直接决定数据中心的能源利用效率与运营成本。当前，“双碳”目标推进与能源短缺问题凸显，数据中心作为高能耗建筑，降低空调系统能耗、优化设计方案已成为行业发展的迫切需求。

一、数据中心空调系统设计的重要性

（一）保障数据中心设备稳定运行

数据中心内部聚集了大量精密电子设备，这些设备对运行环境的温湿度、洁净度有着严格要求，通常要求机房温度控制在18~27℃，相对湿度控制在40%~60%，若温湿度超出允许范围，会导致电子元件性能劣化、使用寿命缩短，甚至出现短路、宕机等故障。空调系统通过持续稳定的温湿度调控，为设备运行提供适宜的环境，有效避免因过热、过湿或过干导致的设备故障，降低停机风险。据统计，数据中心约30%的设备故障与环境温湿度失控相关，合理的空调系统设计的，能将设备故障率降低60%以上，确保数据中心24小时不间断稳定运行，为各类核心业务的正常开展提供保障，避免因设备停机造成的经济损失与声誉影响。

（二）降低数据中心整体能耗

数据中心是高能耗建筑，其中空调系统能耗占总能耗的30%~40%，仅次于IT设备能耗，是影响数据中心PUE（能源使用效率）的核心因素。科学合理的空调系统设计，能通过优化气流组织、选用高效设备、利用自然冷源等方式，大幅降低空调系统能耗，进而降低数据中心整体能耗与运营成本。例如，采用间接蒸发冷却技术的空调系统，在自然冷源丰富地区可使PUE降至1.1以下，相比传统空调系统节能30%以上，既能满足“双碳”目标要求，又能为数据中心运营节省大量电费支出，提升项目的经济效益与可持续性^[1]。

（三）提升数据中心运营性价比与可持续性

数据中心的运营周期通常长达15~20年，空调系统作为核心辅助系统，其设计不仅影响初期投资，更决定了长期运营成

本。合理的空调系统设计，能实现初期投资与长期运营成本的平衡，提升项目整体性价比。一方面，通过精准计算冷负荷、优化设备选型，可避免设备冗余配置导致的初期投资浪费；另一方面，通过优化系统流程、提升运行效率，能降低长期能耗与维护成本。同时，随着“双碳”目标的推进，绿色低碳已成为数据中心发展的核心趋势，优化空调系统设计，推广节能技术与自然冷源利用，能减少碳排放，实现数据中心的绿色可持续发展，符合国家能源战略与行业发展方向，提升数据中心的社会价值与行业竞争力。

二、数据中心空调系统设计难点

（一）高密度机柜与热负荷不均衡的设计难题

密度机柜的集中散热会导致机房内热负荷分布极度不均衡，易出现“局部热点”问题——机柜中部温度超标，而机房整体温度偏低，造成能源浪费与设备风险的双重问题。传统空调系统的气流组织设计难以适配高密度场景，若沿用常规送风方式，冷量无法及时送达发热核心区域，无法有效解决局部过热问题；若盲目增加空调设备数量，又会导致设备冗余、能耗上升。同时，数据中心机柜往往逐步投入使用、不断扩容，初期负荷较低与后期高密度负荷的变化，进一步增加了空调系统设计的难度，难以实现全生命周期内的负荷匹配与高效运行^[2]。

（二）温湿度精准控制与能耗平衡的矛盾

数据中心电子设备对温湿度的控制精度要求极高，通常要求温度波动不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度波动不超过 $\pm 5\%\text{RH}$ 。但温湿度的精准控制与空调系统节能之间存在天然矛盾：为保证控制精度，往往需要空调系统持续高负荷运行，导致能耗上升；若追求节能而降低运行负荷，又可能导致温湿度超出允许范围，影响设备运行安全。此外，当前多数空调系统采用温湿度联合控制模式，在机房无明显散湿量的情况下，会出现“先除湿、再加湿”的无效能耗，进一步加剧了能耗与控制精度的矛盾。如何在确保温湿度精准控制的前提下，最大限度降低能耗，实现两者的动态平衡，成为空调系统设计中的核心难点之一。

（三）系统冗余设计与投资、能耗的平衡难题

冗余设计与初期投资、长期能耗之间存在突出矛盾：冗余配置越高，初期设备投资、机房占地面积越大，长期运行中的能耗与维护成本也越高；若冗余配置不足，又会增加系统故障风险，可能导致数据中心停机。例如，采用 2N 冗余配置的空调系统，初期投资比 N+1 配置高 30% ~ 50%，长期能耗也增加 20% 以上，但能显著提升系统可靠性。如何根据数据中心的可用性等级要求，合理设计冗余方案，实现可靠性、投资成本与能耗的三者平衡，是空调系统设计中需要重点解决的难题，尤其对于中小型数据中心，既要满足基本可靠性要求，又要控制投资与能耗，设计难度更为突出。

（四）自然冷源利用的场景限制与系统整合难题

利用自然冷源（如室外低温空气）是降低数据中心空调系统能耗的有效途径，间接蒸发冷却、氟泵自然循环等技术已在行业

内广泛应用，在适宜场景下可使空调系统能耗降低 50% 以上。但自然冷源的利用受到地理位置、气候条件的严格限制，仅适用于室外空气相对干燥、低温期较长的地区（如北方、高原），在夏季高温高湿地区（如华南、华东），自然冷源的利用时长有限，仅能在春秋冬季发挥作用，夏季仍需配合冷水机组运行。此外，自然冷源系统与传统空调系统的整合难度较大，存在系统切换复杂、维护成本高、控制逻辑烦琐等问题，若整合不当，可能导致系统运行不稳定，甚至影响制冷效果。同时，部分数据中心运营方因担心自然冷源系统影响空调系统的可靠性，对其应用持保守态度，进一步增加了设计与推广难度^[3]。

（五）设计与实际运行工况脱节的问题

当前，数据中心空调系统设计多参照国标《电子信息系统机房设计规范》及美国 TIA-942 标准，按照固定工况点（通常为 $24^{\circ}\text{C}/50\%\text{RH}$ ）进行设备选型与系统设计，但实际运行中，机房的热工况与设计工况存在较大差异。一方面，服务器技术快速迭代，新型机柜的功率密度不断提升，实际发热负荷远超设计预期，导致空调系统制冷能力不足，出现局部热点；另一方面，部分设计人员缺乏对数据中心业务发展的预判，未考虑机柜扩容、设备升级带来的负荷变化，导致空调系统与实际运行需求脱节。据调查，目前约 85% 的数据中心空调机组耗能耗比设计工况高 50% 以上，若为应对实际负荷不足而调低空调设定温度，会进一步降低设备 COP 值，增加能耗，形成“设计脱节—负荷不足—能耗上升”的恶性循环，给空调系统设计带来极大挑战。

三、数据中心空调系统设计优化要点

（一）优化冷负荷计算与设备选型，适配高密度场景

冷负荷计算是空调系统设计的基础，优化冷负荷计算需结合数据中心的规模、机柜密度、设备类型、运行模式等因素，采用精准的计算方法，避免负荷计算偏差导致的设备选型不合理。首先，应全面统计机房内 IT 设备、照明、新风、建筑围护结构等各类热源的散热量，结合设备运行负荷系数、同时使用系数，精准计算机房总冷负荷与局部冷负荷；其次，针对高密度机柜区域，应单独计算冷负荷，采用“分区计算、分区供冷”的方式，确保冷量与负荷精准匹配。在设备选型方面，应根据冷负荷特点与机房场景，合理选用空调类型，实现近端精准制冷，解决局部热点问题；超高密度场景（ $\geq 30\text{kW}/\text{机柜}$ ）可采用冷板式液冷技术，兼顾兼容性与散热效率。同时，设备选型应考虑能效等级，优先选用磁悬浮压缩机、DC 变频风机等高效设备，提升空调系统运行效率。

（二）优化气流组织设计，实现精准控温与节能

气流组织设计直接影响空调系统的制冷效果与能耗，优化气流组织的核心是减少冷热空气混合，提高冷量利用率，解决局部热点问题。首先，推广封闭冷热通道设计，将机柜排列为“冷通道进风、热通道排风”的模式，通过密封板封闭冷热通道，避免冷热空气混合造成的冷量浪费，可使冷量利用率提升 20% ~ 30%。其次，针对高密度机柜区域，采用“下送风、上回

风”或“行级送风”的方式，缩短气流路径，使冷空气直接送达设备进风口，热风及时被空调吸入冷却，减少冷量损耗。同时，合理设计送回风风速与风量，根据机柜负荷动态调节送风量，避免过度送风导致的能耗上升；利用 CFD 仿真技术对气流组织进行模拟优化，预判局部热点位置，提前调整空调布局与送风方式，确保机房内温度分布均匀。此外，定期清理空调滤网、维护送回风管道，减少气流阻力，提升气流组织效率，进一步降低能耗^[4]。

（三）优化冗余设计，实现可靠性与经济性平衡

冗余设计的优化核心是根据数据中心的可用性等级要求，合理配置冗余设备与系统，在保障可靠性的前提下，最大限度降低投资与能耗。采用模块化冗余设计，将空调系统分为多个独立模块，每个模块对应一定的冷负荷，可根据实际负荷动态启停模块，既保证冗余可靠性，又降低部分负荷下的能耗。例如，采用模块化冷水机组，可根据机房负荷变化，灵活启停机组数量，避免单台机组低负荷运行导致的效率下降。同时，优化冗余系统的控制逻辑，实现故障自动切换，确保备用设备在 1 秒内启动，保障供冷零中断；合理设计冷冻水管路、供电系统的冗余，采用环形管网布局，配备双路供电，避免单点故障导致的系统瘫痪，实现可靠性、投资成本与能耗的三者平衡。

（四）最大化利用自然冷源，降低空调系统能耗

结合数据中心的地理位置与气候条件，优化自然冷源利用方案，是实现空调系统节能的关键。对于北方、高原等自然冷源丰富的地区，优先采用间接蒸发冷却系统，通过热交换器利用室外低温空气间接冷却机房空气，全年可利用自然冷源的时间长达 8-10 个月，此时制冷能耗几乎为零，可使 PUE 降至 1.1 以下。对于夏季高温高湿地区，采用“间接蒸发冷却 + 冷水机组”的混合模式，春秋冬季利用自然冷源，夏季启动冷水机组，兼顾节能与制冷效果。其次，推广氟泵自然循环技术，在室外温度较低（-15℃以下）时，关闭压缩机，仅靠冷媒自然循环制冷，进一

步降低能耗。同时，优化自然冷源系统与传统空调系统的整合设计，简化系统切换逻辑，提升系统运行稳定性；配备智能控制系统，根据室外温湿度、机房负荷动态调节自然冷源与传统空调的运行模式，实现自然冷源的最大化利用^[5]。

（五）采用智能控制技术，实现系统动态优化运行

智能控制技术的应用，可实现空调系统的动态调节与精准控制，解决设计与实际运行工况脱节的问题，进一步提升系统效率与可靠性。首先，搭建智能监控平台，实时采集机房内温湿度、冷负荷、空调设备运行参数等数据，通过数据分析预判负荷变化，动态调节空调系统的运行状态，实现“按需供冷”。例如，采用 AI 动态调优算法，依据 IT 负载实时调节制冷量，可使末端空调省电高达 31%。其次，采用 PID 算法或模糊逻辑控制，提升温湿度控制精度，将温度波动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内，湿度波动控制在 $\pm 5\%\text{RH}$ 范围内，避免因温湿度波动导致的设备故障与能耗浪费；优化温湿度控制模式，采用“显热优先”控制，避免“先除湿、再加湿”的无效能耗。

四、结束语

数据中心空调系统作为维持设备稳定运行、控制整体能耗的核心系统，其设计合理性直接关系到数据中心的运行可靠性、经济性与可持续性。合理的空调系统设计能有效保障设备稳定运行、降低整体能耗、提升运营性价比；当前设计过程中面临高密度热负荷不均衡、温湿度控制与能耗平衡、冗余设计与成本能耗平衡、自然冷源利用受限、设计与实际工况脱节等难点；通过优化冷负荷计算与设备选型、气流组织、冗余设计、自然冷源利用及智能控制技术应用，可有效解决设计难点，实现空调系统的节能、稳定、高效运行。

参考文献

- [1] 王胜贤. 某数据中心空调系统冷源系统设计与优化研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2022, 4(2): 92-95.
- [2] 张俊. 风墙式数据中心的空调系统布置优化 [D]. 贵州: 贵州大学, 2024.
- [3] 刘禹剑. 数据中心暖通空调水冷系统节能控制优化分析 [J]. 模型世界, 2025(17): 75-77.
- [4] 张栩境. 数据中心机房空调系统设计与节能改造研究 [J]. 节能, 2024, 43(1): 81-83.
- [5] 李晓喻, 李自勇, 孙立峰, 等. 优化控制在数据中心空调冷源群控系统中的应用 [J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(z2): 50-57.