

数据中心通风地板与静压箱气流分配特性的精细化研究

严惠萍

润建股份有限公司 广西 南宁 530001

摘要: 数据中心高热密度IT设备的规模化部署对机房冷却系统提出了更高要求。通风地板与静压箱作为机房空调送风系统的关键环节,其气流分配特性直接影响服务器进风温度与运行安全。本文针对通风地板与静压箱气流分配不均、局部热点频发等问题,从静压箱结构参数、通风地板开孔特性、地板布局方式等角度开展精细化分析,探讨气流组织优化策略。合理控制静压箱高度、优化通风地板开孔率与分布、采用分区差异化送风设计,可显著改善气流分配均匀性,降低局部热点温度,为数据中心节能降耗提供有效技术支撑。

关键词: 数据中心;通风地板;静压箱;气流分配;冷却系统;数值模拟

引言: 随着云计算、大数据、人工智能等技术的快速发展,数据中心机柜功率密度持续攀升,单机柜功率呈现快速增长趋势。机房空调系统送风能力的提升速度远高于机柜散热需求的增长速度,气流组织不合理成为制约冷却效率的主要瓶颈。通风地板与静压箱作为下送风方式的关键组成部分,其气流分配特性直接决定了服务器进风温度分布。本文旨在通过精细化研究通风地板与静压箱的气流分配特性,揭示影响因素与作用机理,提出优化设计方法与运行策略。

1 通风地板与静压箱气流分配特性概述

1.1 下送风系统的工作原理

数据中心下送风系统由空调机组、静压箱、通风地板及机柜进风通道组成。空调机组将冷空气送入架空地板下方的静压箱,形成一定压力的气室,冷空气再通过通风地板开孔进入冷通道,被服务器风扇吸入冷却设备后,热空气排至热通道,最终返回空调机组完成循环。该方式送风路径短、阻力小,可满足中高热密度机房冷却需求。静压箱的作用是均匀分布气流,使各通风地板出口风量一致。然而,实际运行中因静压箱结构限制、地板分布不均、开孔特性差异等因素,气流分配偏离理想状态,形成局部热点,影响设备可靠性和运行能效。

1.2 气流分配特性的评价指标

评价气流分配特性的核心指标包括出风均匀性、静压分布均匀性、局部热点指数及送风效率。出风均匀性采用通风地板出风量的变异系数衡量,一般要求控制在15%以内。静压分布均匀性反映静压箱内压力差异,压力差过大会导致远端地板出风不足。局部热点指数量化机柜进风温度超限程度。送风效率是指进入机柜的冷风量与空调送风总量的比值。上述指标相互关联,静压分布均匀性直接影响出风均匀性,出风均匀性决定局部热点

指数和送风效率。精细化研究的核心目标是实现这些指标的最优平衡^[1]。

1.3 影响气流分配的主要因素

影响气流分配的因素可分为三类。静压箱结构参数包括静压箱高度、出风口位置、障碍物分布等,其中静压箱高度是关键参数,过低导致气流贴附流动、远端风量不足,过高增加建设成本。通风地板参数包括开孔率、开孔形状、分布方式及阻力特性,开孔率过高或过低均会影响分配均匀性。机柜布置与通道参数包括排列方式、冷热通道封闭程度等。此外,空调送风参数、机房负荷分布等运行因素也会产生影响。上述因素相互耦合,需通过精细化研究确定最优组合。

2 通风地板与静压箱气流分配的数值模拟方法

2.1 物理模型与网格划分

建立准确的物理模型是数值模拟的基础。本文以典型数据中心模块为研究对象,模型尺寸为长15米、宽12米,架空地板高度400-800毫米(参数化研究),机柜面对面排列形成冷热通道,冷通道宽1200毫米,热通道宽900毫米。通风地板尺寸600×600毫米,布置于冷通道区域。空调机组布置于机房一侧,下送风型,单台送风量20000立方米/小时,送风温度22℃。网格划分采用多面体网格与边界层网格结合,对地板开孔区域、近壁面区域局部加密。网格无关性验证表明,网格数量达800万以上时关键参数变化率小于2%,满足精度要求。空调送风口设为速度入口;机柜进风口设为风扇边界,机柜出风口设为压力出口;静压箱壁面、地板及围护结构均设为绝热无滑移壁面。

2.2 数学模型与求解设置

采用计算流体力学方法进行三维稳态模拟。湍流模型选用Realizable k-ε模型,其在模拟射流和分离流动时表

现优异。连续性、动量及能量方程的离散采用二阶迎风格式,压力-速度耦合采用SIMPLE算法。收敛判据设为各方程残差小于 10^{-4} ,同时监控关键点速度和温度变化。通风地板采用多孔介质模型模拟阻力特性,通过实验测定不同开孔率地板的压降-流速曲线,确定粘性及惯性阻力系数。静压箱内空调出风口气流假设均匀分布,忽略内部预旋影响。机柜风扇的P-Q特性曲线通过产品手册获取,采用风扇模型模拟。求解过程采用稳态计算加局部瞬态调整,加速收敛并提高稳定性^[2]。

2.3 模型验证与可靠性分析

为验证数值模型准确性,搭建1:4几何缩比实验台,基于雷诺相似准则确保模型与原型处于同一自模化区。采用热线风速仪测量通风地板出口速度分布,微压差计测量静压箱内静压值。对比显示,模拟与实验测得的出口速度平均相对误差8.3%,静压分布趋势一致,最大绝对误差1.2Pa,验证了模型可靠性。误差主要来源于模型简化(如忽略电缆桥架)、边界条件近似及测量系统误差。敏感性分析表明,地板阻力特性参数影响最显著,变化10%导致出口速度变化约6%,准确获取该参数是保证精度的关键。模型验证后,系统分析了静压箱高度、开孔率及布局方式对气流分配的影响规律。

3 气流分配特性的精细化分析

3.1 静压箱高度对气流分配的影响

静压箱高度是影响气流分配均匀性的关键参数。对300mm、500mm、700mm、900mm四种高度模拟对比:300mm时气流贴附流动明显,近空调区风速高、远端低,出风量变异系数高达28.6%;500mm时气流充分扩散,变异系数降至16.2%;700mm时进一步改善至12.8%,改善幅度趋缓;900mm时为12.1%,较700mm仅降低0.7个百分点。可见,静压箱高度存在最优区间,500mm~700mm可兼顾气流均匀性与空间利用率。高度过低是远端风量不足的主因,应避免低于400mm;超过700mm边际效益递减,不宜盲目增加。此外,空调出风口与障碍物的相对位置也会显著影响气流分布,设计中应保持出风口前有足够扩散距离。

3.2 通风地板开孔率与阻力特性

通风地板开孔率直接影响局部阻力系数,进而决定相同静压差下的出风量。对开孔率25%、35%、45%、55%四种地板进行模拟,结果表明:开孔率25%时,地板阻力大,近空调与远端区域出风差异显著,变异系数22.3%;开孔率35%时,阻力降低,变异系数降至15.8%;开孔率45%时,变异系数进一步优化至13.2%,优于ASHRAE建议的15%控制目标,表明优化方案可行,

各区域出风速度均能满足送风需求;开孔率55%时,阻力过小,近空调区域出风量过大而远端不足,变异系数回升至17.5%。这表明开孔率并非越高越好,存在优化区间。高开孔率地板对静压分布变化更敏感,易出现“近端过吹、远端不足”现象。推荐开孔率控制在35%-45%,同时采用变开孔率设计——近空调区域使用较低开孔率地板、远端使用较高开孔率地板,可进一步改善分配均匀性^[3]。

3.3 通风地板布局方式优化

通风地板布局方式包括连续布置、间隔布置和分区差异化布置。连续布置气流最均匀,但近空调区域送风速度过大;间隔布置可降低近端过量送风,但远端出风不足加剧,变异系数高于连续布置约5-8个百分点。开孔率与布局方式存在交互效应:连续布置时,最优开孔率为35%-45%;间隔布置本身会恶化气流均匀性,即使提高开孔率也难以补偿远端风量不足,且会加剧近端过吹,因此工程中不推荐单独使用间隔布置。分区差异化布置中,各区域最优开孔率根据负荷独立确定。分区差异化布置效果最优,根据机柜负载将冷通道划分为高、中、低负荷区,分别配置开孔率45%、35%、25%的通风地板,整体变异系数降至11.5%,局部热点温度降低2-3℃。通风地板应正对机柜进风口中心线布置,避免气流短路。对于功率差异较大的情况,可在高功率机柜前方增加通风地板数量或采用高开孔率地板,实现按需供冷。

3.4 局部热点形成机理与控制策略

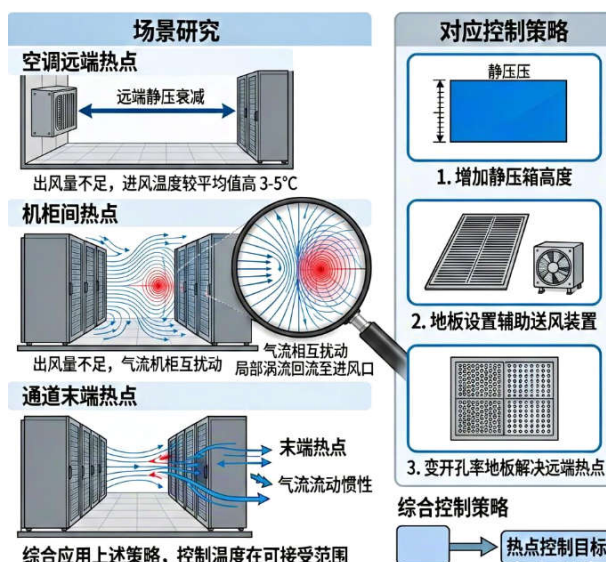


图1 冷通道机柜前缘流线分布示意图

局部热点的形成与气流分配不均密切相关。模拟识别出三种典型场景:空调远端热点(进风温度偏高3-5℃)、机柜间热点(涡流导致热空气回流)、通道

末端热点（气流惯性导致风速偏低）。针对上述场景，提出控制策略：增加静压箱高度或采用变开孔率地板解决远端热点；安装挡流板、优化机柜间距解决机柜间热点；封闭冷通道两端解决末端热点。综合应用上述策略，可将局部热点温度控制在可接受范围内。

4 气流分配优化设计与运行策略

4.1 静压箱与通风地板协同设计

静压箱与通风地板应作为整体系统进行协同设计，核心是使静压箱压力分布特性与地板阻力特性相匹配。协同设计准则：静压箱高度根据机房跨度确定，跨度小于12米取500毫米，12-18米取600-700毫米，大于18米需考虑分区送风或增加空调机组。通风地板开孔率根据位置压力差异化配置，压力较高区域（空调出风口附近）采用较低开孔率（25%-30%），压力较低区域（远端）采用较高开孔率（40%-45%），形成“压力高则阻力大、压力低则阻力小”的匹配关系。开孔形状优先采用圆形孔，其阻力特性稳定，条形孔在高速气流下易产生方向性偏差。地板安装应保证与支架密封良好，防止气流泄漏。协同设计可将出风均匀性变异系数控制在12%以内，较传统设计改善40%以上。

4.2 变开孔率与分区差异化送风

变开孔率设计是实现按需供冷的有效手段。根据机柜负载分布和静压箱压力分布，将机房划分为若干送风区域，各区域采用不同开孔率的通风地板。具体分区配置方案如下表所示。

表1 分区差异化送风配置方案（单机柜平均功率）

区域类型	机柜功率	推荐开孔率	送风策略
高负载区	> 10千瓦	45%-50%	保证充足冷风供给
中负载区	6-10千瓦	35%-40%	标准送风
低负载区	< 6千瓦	25%-30%	按需供冷，避免浪费

分区边界处应设置过渡区，避免开孔率突变导致的气流扰动。模拟表明，采用分区差异化送风后，各机柜进风温度差异从5-6℃缩小至2-3℃，整体送风效率提升12%-18%。在实际工程中，可通过可调开孔率通风地板实现灵活调整，根据运维阶段的实际负载分布动态调节

各区域的开孔率^[4]。对于采用模块化部署的数据中心，可预先配置多套变开孔率方案，根据IT设备上架进度逐步调整，避免初期过度送风造成冷量浪费。

4.3 气流组织优化运行策略

气流组织的优化不仅依赖设计阶段，运行管理同样至关重要。建立动态监测系统，实时采集冷通道和机柜进风口的气流参数。当某区域进风温度偏低时，可通过部分封闭近端通风地板或加装盲板减少送风，实现被动补偿。对于静压箱压力分布不均的情况，采取“远端增开、近端限流”的调节方式——远端更换高开孔率地板增加送风，近端加装盲板抑制过送。定期清洗通风地板，防止灰尘堵塞导致阻力增加，每季度进行一次气流分布测试，评估送风均匀性变化并及时调整地板配置。上述策略可使全年平均送风效率维持在85%以上^[4]。

结束语

数据中心通风地板与静压箱的气流分配特性是影响机房冷却效率和运行安全的关键因素。本文通过精细化数值模拟，系统分析了静压箱高度、通风地板开孔率与布局方式对气流分配均匀性的影响规律。协同设计、变开孔率配置及动态运行策略是提升气流分配性能的有效途径。随着数据中心向高密度、绿色化方向发展，气流组织的精细化研究将成为降低电能使用效率（PUE）、保障设备可靠性的重要技术支撑，后续可进一步研究动态可调开孔率地板与实时负载联动的智能送风系统。

参考文献

[1]陈梦,黄翔,马钢,等.直接蒸发冷却空调机组制冷的数据中心气流组织模拟优化[J].制冷与空调(四川),2022,36(6):819-827,875.
[2]谷长城,韩成付,郭楠,等.华北某数据中心弥散式送风气流组织设计CFD模拟分析[J].通信电源技术,2023,40(1):4-8,12.
[3]李旺,魏豪,原野,等.数据中心气流组织优化研究进展综述[J].绿色建造与智能建筑,2025(5):119-122.
[4]刘育策,周超辉,胡跃,等.数据中心风墙气流组织优化研究[J].流体机械,2025,53(8):112-118.