

高密度智算中心风液协同散热气流组织调控研究

李啟輝

润建股份有限公司 广西 南宁 530001

摘要：随着AI大模型训练对算力需求的激增，智算中心单机柜功率密度大幅跃升，传统风冷系统面临散热瓶颈，而全液冷方案存在初始投资高、改造难度大的问题。风液协同散热技术通过“液冷精准控热+风墙统筹环境”的分层散热架构，成为兼顾能效与成本的优选路径。本文针对高密度智算中心场景，系统分析风液协同系统的气流组织特性，揭示局部热点形成机理与冷热气流掺混规律，提出基于CFD模拟的气流组织优化方法，并构建“分区冷却-智能调控-模块部署”的协同调控体系。通过优化风墙送风均匀性、液冷占比动态调节及热通道封闭设计，可显著降低机房PUE，提升散热能效。

关键词：智算中心；风液协同；气流组织；热管理；高密度散热

引言：智算中心作为AI时代的关键基础设施，其单机柜功率密度正持续快速增长。传统数据中心广泛采用的房间级精密空调加下送上回气流组织方案，在高密度场景下暴露出送风距离过长、冷热气流掺混严重、局部热点频发等问题。风液协同散热技术应运而生，其核心理念是将服务器中的高热热量通过液冷回路直接带走，剩余热量由优化后的风墙（一种近距离送风的风冷末端设备，可将冷风精准输送至机柜进风口）系统处理。本文聚焦高密度智算中心场景，探究风液协同系统的气流组织调控方法。

1 风液协同散热系统的架构与热特性

1.1 系统基本架构

风液协同散热系统采用“冷源共享、末端分流”的总体架构。在冷源侧，统一采用闭式冷却塔或干冷器提供中温冷却水（供水温度25-35℃），通过环路管网实现冷源池化。在末端侧，系统分为两条独立的散热回路：液冷回路采用冷板式液冷技术，冷却液（40-50℃）通过CDU（Coolant Distribution Unit）分配至服务器内部的冷板，直接接触GPU/CPU等高发热芯片，带走约70%-80%的热量；风冷回路则采用风墙式空调末端（送风温度20-28℃），处理剩余热量以及机房环境负荷。这种“风液同源”设计的关键优势在于：液冷系统对水温要求较低（可接受40℃以上冷却液），当环境温度低于供水温度约13℃时，系统可完全关闭压缩机，利用自然冷源实现制冷，显著提升全年能效。

1.2 与传统方案的散热特性对比

传统风冷系统依赖机房精密空调通过地板下送风或房间级送风为所有机柜提供冷量。当单机柜功率超过15kW时，送风距离过长导致的沿程温升、冷热气流掺混

等问题急剧恶化，局部热点不可避免。全液冷方案虽能将PUE降至1.1以下，但需对所有服务器进行改造，初期投资较风冷方案高出30%-50%，且对老旧机房不友好。风液协同方案实现了“按需冷却”的精细化资源分配：高密度区域采用液冷快速带走核心热量，中低密度区域及辅助设备采用风冷保障环境温度，二者通过智能控制系统实现动态协同^[1]。仿真模拟结果表明，在同等算力规模下，风液协同方案可使PUE从传统风冷的1.6降至1.15左右，年节能量可达约80万kWh，显著降低运行能耗。

1.3 热负荷分布特征

高密度智算中心的热负荷呈现显著的分层特征。以典型GPU服务器为例，单颗GPU芯片功耗可达400-700W，局部热流密度高达200W/cm²以上；CPU功耗约为200-350W；内存、硬盘及主板等辅助器件功耗相对较低，散热需求分散。从时间维度看，AI训练任务具有明显的“突发-持续”波动特征：任务启动阶段所有GPU满载运行，产生瞬时高热负荷；任务稳定后功耗趋于平稳；任务间歇期负载骤降。这一特征要求风液协同系统具备快速响应能力。相关研究表明，智能调控系统可在3秒内感知负载变化并调整液冷流量与风墙转速，确保芯片结温始终稳定在75-85℃的安全区间。

2 气流组织面临的关键问题

2.1 局部热点形成机理

在高密度智算中心中，局部热点的产生主要源于三个方面。其一，风墙送风不均匀。当风墙机组间距过大或送风风向设计不合理时，部分机柜处于送风盲区，进风温度显著高于周边机柜。基于CFD仿真分析，机柜间距从2.5m缩小至1.5m时，进风温度可升高约2-3℃。其二，冷热气流掺混。开放式机房中，服务器排出的热风

与冷通道的冷风混合，导致空调回风温度偏高，制冷效率下降。若未对冷热通道进行有效隔离，掺混造成的冷量损失可达30%以上。其三，液冷占比配置失当。液冷系统带走的热量比例过高或过低均会影响气流组织效果。液冷占比过低时，风冷系统负荷过重，风墙送风能力不足；液冷占比过高时，机房环境温度偏低，反而增加了不必要的空调能耗。

2.2 风冷与液冷系统的耦合干扰

风液协同系统中，两套冷却系统并存，存在显著的耦合关系。液冷系统通过CDU将热量排至室外，不直接影响机房内气流组织，但液冷服务器的排热方式与传统风冷服务器不同：液冷服务器主要依靠机柜后部的风扇排出剩余热量（约占20%-30%），排风温度较低（约35-40℃）；而风冷服务器排风温度较高（可达45-50℃）。两者排风的混合效应会影响风墙的回风温度，进而影响风墙的制冷效率。实验研究表明，当液冷服务器与风冷服务器混布于同一机柜列时，若未进行分区隔离，高低不同的排风温度会在热通道内形成温度分层，导致风墙回风温度传感器读数失真，控制系统无法准确判断实际热负荷^[2]。

2.3 风墙送风均匀性挑战

风墙作为风液协同系统中的风冷末端，其送风均匀性直接决定机房热环境的稳定性。传统风墙采用单一方向送风（如前部出风、后部回风），在风墙长度较大的情况下，靠近风墙出风口的机柜获得更多冷量，远端机柜冷量不足，形成“前端过冷、后端过热”的不均匀现象。为解决这一问题，业界开发了“柔性风墙”和“柜式风墙”等新型风墙技术。柔性风墙通过在机柜出风处安装副框收集排风，形成封闭热通道，再由风墙制冷终端统一换热，可有效消除垂直温度梯度；柜式风墙则采用风机交错布置，形成小型风墙阵列，实现机柜级精准送风。

3 基于 CFD 的气流组织优化方法

3.1 CFD模型构建与参数设定

计算流体力学（CFD）仿真是智算中心气流组织设计的核心工具。仿真模型的构建需完成以下关键参数设定：物理边界条件（机房尺寸、机柜布局、风墙及液冷设备位置）、热边界条件（各设备发热量及分布、送/回风温度及风量）、流动边界条件（送风口速度、出口压力等）。在参数设定中，风墙送风参数的设定尤为关键。推荐采用速度入口边界条件，送风速度根据风墙风机性能曲线设定；风墙出风采用均匀送风假设，但需考虑实际风墙的结构特征进行修正。液冷部分的热边界条

件可简化为机柜后部风扇的排风温度与风量。

3.2 典型气流组织模式对比

通过CFD模拟对比不同气流组织模式的散热效果，可识别最优方案。常见的风液协同气流组织模式包括：模式一：冷热通道封闭+列间风墙。将同一列机柜的前部（冷通道）和后部（热通道）分别封闭，冷通道由风墙送风，热通道回风至风墙。该模式可彻底隔绝冷热气流的掺混，提高风墙回风温度（可提升至35℃以上），从而提升制冷系统能效；模式二：热通道封闭+柔性风墙。仅封闭热通道，冷通道保持开放。液冷服务器与风冷服务器分区布置，各自排风收集至独立热通道，再经柔性风墙换热。该模式兼容性强，适合存量机房改造；模式三：开放通道+柜式风墙。不进行通道封闭，依靠柜式风墙的近距离送风保障机柜进风温度。该模式部署灵活，但能效略低于前两种模式。CFD模拟结果表明，模式一可获得最低的机柜进风温度（波动 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ），但需要较大的改造投入；模式二在能效与改造成本之间取得较好平衡，PUE可控制在1.2-1.25之间。

3.3 关键设计参数优化

基于CFD的参数敏感性分析，以下设计参数对气流组织影响显著：（1）风墙间距与排风高度。风墙机组间距过小会导致相互抢风，送风量下降；间距过大则产生送风盲区。推荐间距控制在2.5m以上。同时，提高风墙排风导流罩高度可有效减少热回流，仿真模拟结果显示，每增加1m排风高度，可降低机组进风温度约0.5℃。（2）建筑间距与园区朝向。对于大型智算中心园区，多栋建筑同时运行时，建筑上方会形成“热岛效应”。基于CFD仿真分析，当建筑间距超过23m时，热岛导致的温升可降至0.6℃以下。此外，优化园区朝向可规避季风带来的不利影响^[3]。（3）液冷占比的动态配比。液冷占比（液冷系统承担的热量比例）是风液协同系统的核心控制参数。过高的液冷占比虽可降低风冷负荷，但液冷系统的初投资和运行能耗相应增加。基于典型配置的优化分析，当液冷占比为70%-80%时，系统综合能效最优。

4 风液协同调控策略

4.1 分区冷却策略

风液协同系统的分区冷却需遵循“高密液冷、中密混冷、低密风冷”的原则。具体实施策略如下：（1）分区方法：根据机柜功率密度将机房划分为高密区（ $\geq 30\text{kW/柜}$ ）、中密区（ $15\text{-}30\text{kW/柜}$ ）和低密区（ $< 15\text{kW/柜}$ ）。高密区优先配置液冷机柜，中密区采用风液混合配置，低密区采用纯风冷方案。（2）液冷机柜布局优化：液冷机柜应集中布置于靠近CDU的位置，以缩短冷

却液管路长度，减少沿程阻力。液冷服务器与风冷服务器应分区布置，避免混布导致的排风温度不均问题。若必须混布，应在机柜列内设置物理隔板，分离不同排风区域。（3）冷热通道管理：对于液冷机柜集中的区域，建议采用冷/热通道全封闭设计；对于混合区域，可仅封闭热通道；对于纯风冷区域，可保留开放通道模式，但需确保风墙的近距离送风覆盖。

4.2 智能控制系统架构

风液协同系统的智能控制系统采用“感知-分析-决策-执行”四层架构。感知层通过部署在服务器芯片、冷板进出口、风墙送/回风口、机房各区域的温度、流量、压力传感器，实时采集运行数据，采样频率达秒级。分析层利用AI算法对采集数据进行处理，识别负载变化趋势与热异常，预测未来5-10分钟的冷量需求。决策层根据

分析结果，动态调节液冷泵组转速、CDU运行台数、风墙风机频率及冷源系统运行模式。执行层将决策指令下发至各执行设备，并监测执行效果形成闭环反馈。该架构的核心优势在于实现了“风随液动”的联动控制：当液冷系统感知到GPU负载上升时，在增加液冷流量的同时，同步提升对应区域风墙的送风量，确保机房环境温度的稳定^[4]。

4.3 模块化部署方案

为适配不同规模与类型的智算中心，风液协同系统应采用模块化设计。模块化部署的核心理念是将风墙、CDU、冷源等设备标准化、预制化，实现“即插即用、按需扩容”。以3000P智算中心项目为例，其风液协同系统的模块化部署方案如下：

表1 典型模块化部署方案配置参数

模块类型	功能描述	配置参数	覆盖范围
冷源模块	提供风冷/液冷双工况冷却水	供回水温度兼容风冷(20/28℃)和液冷(40/50℃)；单台制冷量600kW	可支持约800kW IT负载
CDU模块	液冷回路分配与换热	单台换热量300-600kW；二次侧供液40℃	每台CDU支持8-12个液冷机柜
风墙模块	风冷末端送风	单台风墙制冷量70kW；送风温度均匀性 > 90%	每台风墙覆盖8-10个机柜
预制化管路	风液双环路独立敷设	一次侧现场焊接；二次侧工厂预制	支持风液灵活切换与平滑扩容

模块化部署的优势在于：建设周期可缩短约40%（传统工期约18个月，模块化后降至约10-11个月），初期投资按需投入（仅部署当前所需模块），后期扩容时只需增加相应模块，无需中断业务。

结束语

高密度智算中心的散热管理正从单一风冷或全液冷向风液协同融合方向演进。本文系统分析了风液协同散热系统的架构特征与热特性，揭示了局部热点形成、冷热气流掺混及风墙送风不均等气流组织的关键问题，提出了基于CFD仿真的优化方法，并构建了“分区冷却、智能调控、模块部署”的协同调控策略。未来，随着单机柜功率密度突破100kW，浸没式液冷与风墙系统的深

度融合将成为新的技术方向，同时AI驱动的预测性热管理将进一步提升系统的自适应能力与能效水平。

参考文献

[1]王蕊.精细化工项目冷却系统设计分析[J].广州化工,2025,53(22):167-170.

[2]郭方圆.基于价值工程的数据中心液冷与风冷比较分析[J].数字通信世界,2022(6):100-102.

[3]李泽林.高密度数据中心建设浅析[J].智能建筑与智慧城市, 2025(z1): 153-155.

[4]倪乐尘,邵磊,杨威."双碳"背景下数据中心液冷技术节能路径分析[J].低碳世界,2025,15(12):75-78.