智算中心风液同源系统技术研究

Research on Air-Liquid Co-Source Cooling System of Intelligent Computing Center

李世龙，郭　凯，贺　晓，胡孝俊，程　序（中讯邮电咨询设计院有限公司，北京 100048）
Li Shilong，Guo Kai，He Xiao，Hu Xiaojun，Cheng Xu（China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.，Ltd.，Beijing 100048，China）

摘　要：
未来智算中心高功率密度的电子设备部署规模日益增大，液冷散热技术凭借其高散热效率成为智算中心的必然选择，由于冷板式液冷散热的特殊性，存在风液混合部署和风液比不确定的问题。通过建立液冷云舱风液同源系统架构模型，并对理论模型进行CFD仿真计算，得到液冷云舱气流组织分布云图和温度分布云图。此外，搭建液冷云舱风液同源测试系统，实测该系统的散热性能和能效表现，结果表明，该风液同源架构通过冷却资源池化与动态协同控制，散热性能良好，PUE低于1.15，具有较好的能效表现。

关键词：
液冷；智算中心；风液同源；CFD仿真；能效
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.004
文章编号：1007-3043（2026）10-0023-05
中图分类号：TU831.6
文献标识码：A
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：
The deployment scale of high-power-density electronic devices in future intelligent computing centers is increasing day by day. Liquid cooling technology, with its high heat dissipation efficiency, has become an inevitable choice for intelligent computing centers. Due to the particularity of cold plate liquid cooling, there are problems such as hybrid air-liquid deployment and uncertain air-liquid ratio. A system architecture model of the liquid-cooled cloud cabin with the same origin of wind and liquid is established, and CFD simulation calculations are conducted on the theoretical model to obtain the airflow organization distribution cloud map and temperature distribution cloud map of the liquid-cooled cloud cabin. In addition, a liquid-cooled cloud cabin air-liquid co-source test system is established to measure the heat dissipation performance and energy efficiency of the system. The analysis results show that the air-liquid co-source architecture has excellent heat dissipation performance, through the pooling of cooling resources and dynamic collaborative control, with a PUE below 1.15, demonstrating a relatively good energy efficiency.

Keywords：
Liquid cooling；Intelligent computing center；Air-liquid co-source；CFD simulation；Energy efficiency

引用格式：李世龙，郭凯，贺晓，等. 智算中心风液同源系统技术研究[J]. 邮电设计技术，2026（10）：23-27.

0　前言

随着传统行业数字化转型加速及智算等新兴行业应用需求驱动，智算基础设施的建设需求快速增长，功率密度持续上升，需要更有效的冷却解决方案。液冷散热技术作为一种高效的散热方式，在解决高功率芯片散热上有着得天独厚的优势，逐渐成为新一代数据中心制冷系统的主流选择[1]。冷板式液冷是将液冷散热冷板紧贴在服务器的发热器件，通过冷板内流动的冷却介质带走服务器中的热量[2]。

目前冷板式液冷服务器内除高发热器件（如CPU、GPU等）依靠液冷系统进行高效散热外[3]，硬盘、内存等低发热量元器件仍需通过风冷散热来解决，出现了智算中心风液共存的状态[4]，制冷系统由单一制冷方

收稿日期：2026-09-01

案演变为多元化制冷方案，为建设方案带来多方面的不确定性变化。

本文通过建立风液同源系统架构模型以及搭建液冷云舱试验样机，将液冷云舱CFD仿真结果和试验数据进行对比分析，验证新型风液同源系统架构的合理性，采用风液同源系统架构极大地简化系统的复杂度，同时可以实现风冷系统和液冷系统的弹性调节，满足现有风冷机房和未来液冷机房灵活扩容需求，为今后智算中心机房建设提供参考。

1 智算中心液冷技术现状

当前在建设冷板式液冷数据中心时，由于服务器的低发热器件需风冷进行补冷，因此需要同时部署风冷和液冷2套冷却系统，通常采用独立冷源设计[5]，无法共享兼容冷源池，导致制冷系统管道繁多且施工难度大，室外空间占用率高或需设置独立的冷源机房，建设成本高，运维难度大，无法满足液冷机房灵活建设实施的需求。

此外，数据中心的规划建设要超前于业务的预估和部署，原有IT设备更新换代或业务机型变动时，无法确定风冷散热IT设备与液冷散热IT设备的部署规模，因此存在风液混合部署以及风液分配比例不确定的问题，所以原有和新建的数据中心都面临构建风液协同的数据中心系统架构的需求[6]。按照目前的发展趋势，更新换代后的服务器的风液比势必会发生改变[7]，即液冷比例提高，风冷比例降低，传统的冷板液冷数据中心无法实现弹性部署，将很难适应未来液冷数据中心的发展趋势[8]。

2 风液同源系统架构分析

风液同源系统架构结合业务需求的风液比例，当液冷比例提高时，相应的风冷冷量需求会越来越小，共用同一套室外冷却系统（见图1）。通过风冷、液冷2类管道预留，实现制冷模式的灵活适配，风液混合部署，从而提高系统兼容性和冷量利用效率，适配高功率密度设备部署及扩容需求，因此，风液同源方案在建设、运营、节能等多方面具有显著的先进性。

液冷冷源有多种形式可以选择，一般选用闭式冷却塔或开式冷却塔+板换，对于极端缺水地区和严寒地区可采用干冷器，根据使用地区的条件选择合适的方案。风液同源系统架构可兼容多种室外冷源形式，室外冷源以同温冷却水向风冷和液冷末端供冷水，风液共享室外冷源池[9]。液冷CDU与水氟双冷源空调并联形成环路，根据冷源提供的不同水温作出相应的调节和功能切换。

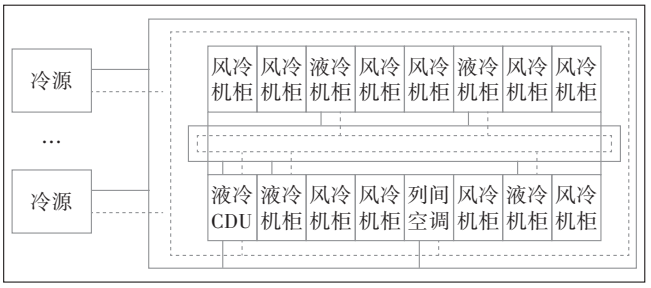


图1　风液同源系统架构示意

风冷末端采用水氟双冷源列间空调，通过一组双盘管蒸发器，将冷水系统和压缩机制冷系统有机结合[10]（见图2），空调根据不同水温、不同负荷进行智能切换控制，该技术可有效提升空调系统全年能效比，使数据中心PUE进一步降低。

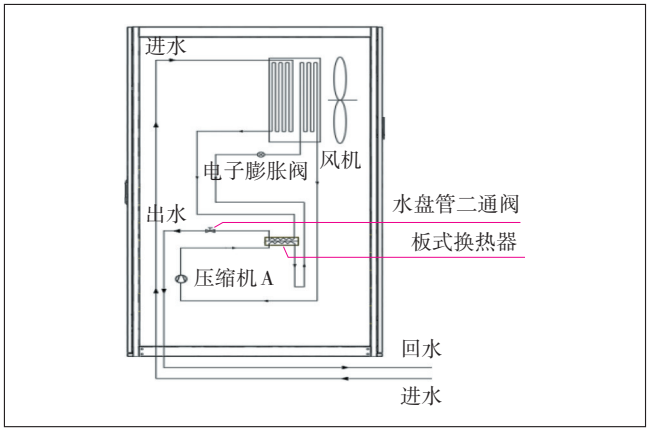


图2　风液同源末端空调系统

在夏季，当室外回水温度高于室内回风温度时，机组通过压缩机系统进行制冷运行，压缩机系统的制冷剂在蒸发器中蒸发相变带走室内回风热量，机组通过开启板换二通阀，关闭水盘管二通阀，回水经过板式换热器，带走压缩机制冷剂中的热量；当空调室外回水温度小于室内回风温度，高于自然冷切换温度时，空调进入混合模式，室外回水先经过表冷器与室内回风进行热量交换，此时表冷器无法提供足够的冷量，通过压缩机系统开启，为机组补充冷量，2种制冷系统同时运行；在冬季，当室外回水温度小于等于自然冷切换温度时，只需通过表冷器提供冷量就能满足机房制冷需求，此时压缩机系统关闭，室外回水经过表冷器与室内回风进行热量交换，实现制冷，达到机

组最高能效。

3 风液同源系统仿真

为全面评估风液同源系统在实际运行中的可靠性、散热性能及气流组织特性，本文基于典型液冷云舱架构建立了CFD（Computational Fluid Dynamics）仿真模型，并开展系统数值模拟分析。通过仿真手段，重点研究云舱内部温度场分布、气流组织均匀性以及潜在热点区域，为后续实体测试平台的设计与优化提供理论支撑。

3.1 仿真模型建立

仿真模型涵盖液冷CDU、液冷机柜、风冷机柜、水氟双冷源列间空调等核心设备，参考实际部署场景中的关键组件及其空间布局，确保模型具备良好的工程代表性，具体参数如表1所示。液冷云舱采用封闭冷通道设计[11]，实现冷热气流物理隔离，有效避免气流短路与回风混合，提升制冷效率，整体布局如图3所示。

3.2 边界条件与求解设置

表1　液冷云舱设备参数

序号	设备名称	参数	数量	备注
1	水氟双冷源列间空调	显冷量45 kW	1台	风量为11 300 m^3/h，送/回风温度为：23/35℃
2	液冷CDU	制冷量300 kW	1台	–
3	液冷机柜1	单柜60 kW，风液比1/9	1台	包含8个液冷假负载4U/台，单台假负载为7.5 kW
4	液冷机柜2	单柜40 kW，风液比1/9	3台	包含2个液冷假负载6U/台，单台假负载为20 kW
5	风冷机柜	单机柜6 kW	4台	其余IT机柜不安装负载

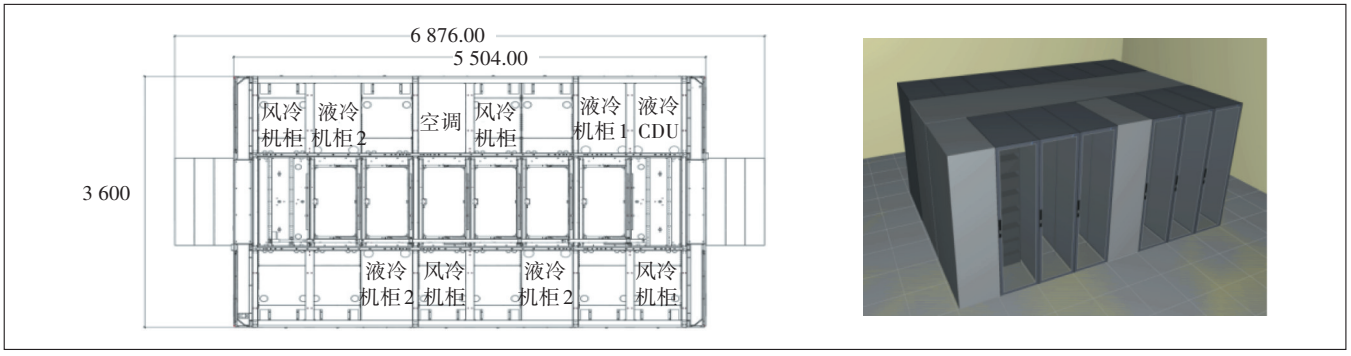


图3　液冷云舱布局

根据4台液冷机柜功率及风液比计算液冷负荷共计162 kW，液冷CDU的制冷量为300 kW，可以满足液冷冷量的散热。风冷负荷较分散且总负荷为42 kW，本次仿真对液冷云舱风冷负荷进行CFD仿真计算，验证云舱内部温度分布的均匀性和最高温度风险点。

在CFD仿真中，设定室外环境温度为35 ℃（夏季典型工况），空气流动采用稳态雷诺平均Navier-Stokes方程（RANS）建立模型，网格划分采用非结构化四面体与六面体混合网格[12]，关键区域（如机柜进风口、空调出风口）进行局部加密，确保温度梯度捕捉精度。

3.3 数据处理及仿真结果分析

完成液冷云舱的CFD仿真计算后，对仿真结果进行分析，气流组织分布和温度分布分别如图4和图5所示。

a）气流组织分布。列间空调采用水平前送风方式，冷风直接送入封闭冷通道，形成稳定的低速均匀送风场。尽管空调仅布置于一侧，但由于冷通道封闭设计，整体送风均匀性良好，未出现明显偏流或涡旋区域。右半区因远离空调位置，风速略有下降，但仍在合理范围内，不影响设备进风质量。

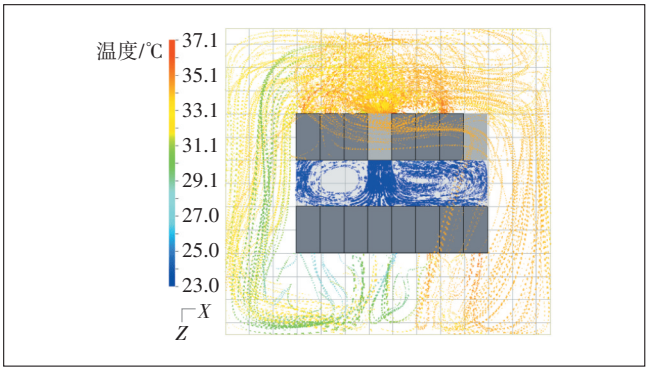


图4　液冷云舱气流组织分布

b）温度分布。冷通道平均温度为24.5 ℃，最低温度为23 ℃（空调出风口附近），满足风冷设备的散热要求。热通道最高温度为37.2 ℃，位于右侧高功率液冷

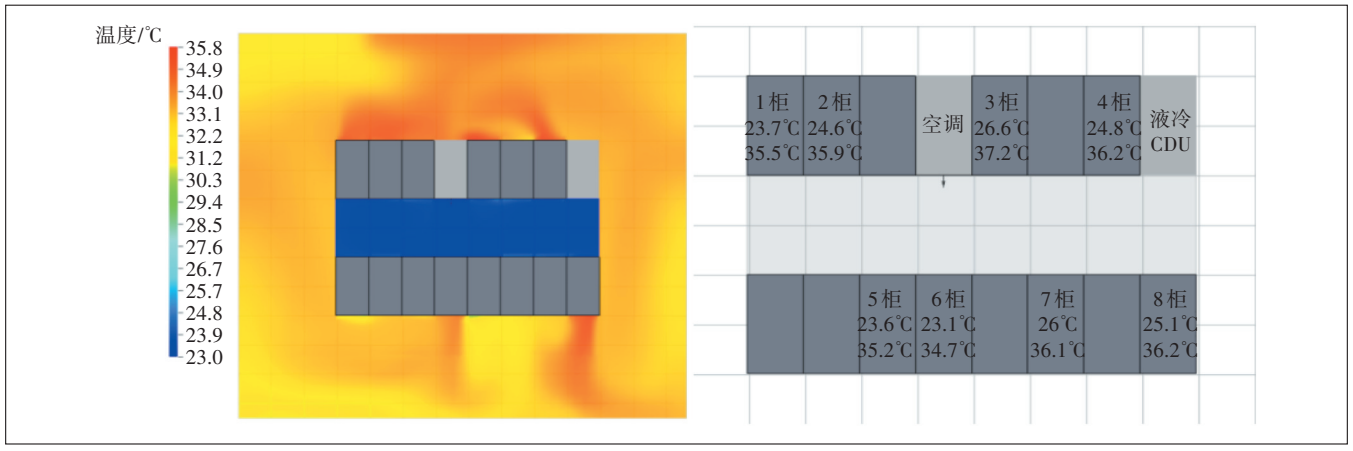


图5　液冷云舱温度分布图及机柜进出口温度分布

机柜回风侧，处于安全可控区间；各风冷机柜进风温度均低于26 ℃，满足运行要求；液冷机柜虽以液冷为主，也须排出风冷残余热量，仿真显示其回风温度被控制在37 ℃以下，无局部过热风险。

此外，机柜3因紧邻空调位置，机柜8因处于热通道末端，回风温度相对较高，分别为37.2 ℃和36.2 ℃，但低于设备允许上限，机柜无过热状态，系统具备一定的散热冗余能力。

4 试验测试验证

为全面评估风液同源系统架构在真实运行环境下的热管理性能、能效表现及系统可靠性，进一步验证前文CFD仿真模型的准确性，本文搭建了液冷云舱风液同源系统测试平台，一次侧采用干冷器，风冷空调和液冷CDU同时接入一次侧冷源，构建冷却水系统、液冷分配单元（CDU）、水氟双冷源列间空调、负载设备等集成化测试环境。

4.1 液冷云舱测试系统搭建

测试系统基于仿真模型中的设备参数与布局进行构建，具体设备及核心组件参数见表1，布设多点温湿度传感器、功率计等设备，实时监测机柜进出风温度、冷却水进出水温、系统能耗等关键参数。

4.2 测试方案

为系统评估液冷云舱风液同源系统的综合性能，测试方案围绕散热能力、温度场分布、能效表现及仿真一致性4个方面展开。

a）散热能力。将所有液冷与风冷负载调整至额定功率，待一次侧与二次侧系统运行稳定（连续波动小于±2%并稳定维持30 min以上）后，持续采集1 h内的温度、流量、能耗等关键参数，用于评估系统在极限工况下的热控能力与稳定性。

b）温度场均匀性测试。在满载状态下，监测8个机柜前后各2个测温点（共16个点位）的进/出风温度，分析冷通道送风均匀性及潜在热点区域，评估气流组织合理性。

c）PUE能效测试。记录云舱内所有用电设备（含列间空调、液冷CDU、水泵等）的累计电能消耗以及室外干冷器的能耗，结合负载设备的实际功耗，按标准方法计算系统整体能效指标PUE值。

d）仿真与实测对比。将实测的温度场分布、关键点温度值与CFD仿真结果进行对比，计算平均误差与最大偏差，评估仿真模型的预测精度与工程适用性。

4.3 测试结果

4.3.1 云舱温度场分布与热控性能

在满载稳定运行状态下，系统各区域温度监测结果如表2所示。测试数据显示，封闭冷通道内送风温度维持在23.1~26.4 ℃，平均温度为24.8 ℃，满足GB 50174-2017推荐的IT设备运行范围（18~27 ℃）[13]。其中，靠近空调出风侧的机柜5与机柜6送风温度较

表2　云舱各区域温度监测结果

机柜位置	封闭冷通道			开放热通道		
	最高温度/℃	最低温度/℃	温度平均值/℃	最高温度/℃	最低温度/℃	温度平均值/℃
1柜	24.9	24.6	24.8	34.0	33.6	33.8
2柜	24.5	24.3	24.4	34.7	34.2	34.5
3柜	25.5	25.3	25.5	34.8	34.6	34.7
4柜	25.4	25.0	25.1	34.0	33.9	33.9
5柜	23.6	23.5	23.5	35.1	34.8	35.0
6柜	23.2	23.1	23.2	36.2	35.8	35.8
7柜	25.2	25.1	25.2	35.0	34.8	34.9
8柜	26.4	26.3	26.4	34.3	34.1	34.2

低（最低23.1 ℃），而远离空调的机柜8送风温度略高（最高26.4 ℃），温差控制在3.3 ℃以内，尽管空调单侧布置，但封闭通道设计有效抑制了气流偏移，整体送风均匀性良好。

开放热通道回风温度最高为36.2 ℃（机柜6），最低为33.6 ℃（机柜1），平均值为34.6 ℃，未出现局部过热现象，满足安全运行要求。

4.3.2 系统能效表现（PUE）

在满载运行1 h期间，监测各系统能耗数据如下。

a）负载总能耗为231.58 kW·h（液冷负载：190.78 kW·h；风冷负载：40.8 kW·h）。

b）云舱内部设备总能耗（含空调、液冷CDU等）为237.36 kW·h。

c）室外干冷器能耗为29.72 kW·h。

由此计算得到系统总能耗为：237.36+29.72=267.08（kW·h）。

$$PUE = \frac{\text{系统总能耗}}{\text{IT负载总能耗}} \approx 1.15$$

实测PUE值约为1.15，表明该液冷云舱风液同源系统在高密度负载下具备优异的能源利用效率，达到行业领先水平[13]，节能优势显著。

4.3.3 仿真与实测对比分析

将CFD仿真预测的冷/热通道温度与实测结果进行对比，结果显示：冷通道平均温度仿真值为24.5 ℃，实测平均值为24.8 ℃，偏差约为1.2%；热通道最高温度仿真预测为37.2 ℃，实测值为35.8 ℃，偏差约为3.7%；整体来看，仿真模型对温度场分布趋势与极值点的预测具有较高准确性，验证了所建CFD模型的有效性与工程指导价值。

5 结束语

本文围绕智算中心高功率密度场景下的散热挑战，提出并系统验证了液冷云舱“风液同源”系统架构的可行性与优越性能。通过理论建模、仿真分析与实体测试相结合的研究方法，得出以下结论。

a）在当前配置下，风液同源系统能够有效维持云舱内温控稳定，气流组织合理，无显著热点。水氟双冷源空调与液冷CDU协同运行良好，具备应对动态负载变化的能力，CFD仿真与实测温度偏差小于4%，模型具备一定的工程指导价值。

b）通过冷却资源池化与动态协同控制，显著提升能源利用效率，在高功率密度负载下系统PUE约为1.15，具有较好的能效表现。

c）本文通过仿真与实测，验证了风液同源架构在技术可行性、运行稳定性等方面具有较高的可靠性和实用性，为高算力数据中心的规模化应用奠定基础。

参考文献：

[1] Iyengar M，David M，Chainer T，et al. Energy efficient data centers：A comprehensive review of liquid cooling technologies[J]. IEEE Transactions on Components，Packaging and Manufacturing Technology，2020，10(5)：789-803.

[2] Tuma，P. Cold plate liquid cooling for high-performance computing：Thermal performance and reliability analysis[C]//Proceedings of the 20th International Heat Sink and Thermal Management Symposium.2021.

[3] 王志刚，赵勇，孙伟. 冷板式液冷服务器散热性能实验研究[J]. 制冷学报，2021，42(3)：67-74.

[4] Zhang H，Li Y，Wang S，et al. Dynamic control strategies for hybrid air-liquid cooled data centers based on AI-driven workload prediction[J]. Energy and Buildings，2022，275：112438.

[5] 李彬，张建良，刘洋. 数据中心液冷技术发展现状与趋势分析[J]. 电信科学，2022，38(7)：45-53.

[6] Chen L，Zhang Y，Wu J，et al. A review of hybrid cooling systems in edge computing facilities[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews，2023，174：113012.

[7] 陈晓东，黄健，吴磊. 面向高密度数据中心的风液混合冷却系统设计与优化[J]. 暖通空调，2023，53(2)：88-95.

[8] 胡孝俊，郭凯，贺晓. 智算中心液冷系统弹性扩容关键技术研究[J]. 信息通信技术与政策，2023(8)：22-28.

[9] Tan X，Zhang Y，Liu H，et al. Resource pooling in modular data center cooling systems[J]. Journal of Cleaner Production，2022，365：132845.

[10] 赵宇，孙明，何平. 水氟双冷源空调在数据中心的应用实践[J]. 制冷与空调，2023，23(4)：55-60.

[11] 张瑞，王磊，李娜. 封闭冷通道对数据中心制冷效率的影响研究[J]. 智能建筑，2022(9)：34-38.

[12] 刘志强，李浩，王鹏. 基于CFD仿真的数据中心气流组织优化研究[J]. 建筑节能，2020，48(11)：102-107.

[13] GB 50174-2017　数据中心设计规范[S].

[14] 周涛，徐立，高翔. 数据中心PUE影响因素分析与节能路径探讨[J]. 电力系统自动化，2022，46(15)：134-141.

作者简介：

李世龙，高级工程师，硕士，主要从事数据中心液冷基础设施研究工作；郭凯，高级工程师，硕士，主要从事数据中心研究咨询工作；贺晓，正高级工程师，硕士，主要从事数据中心研究咨询管理工作；胡孝俊，高级工程师，硕士，主要从事数据中心基础设施研发工作；程序，正高级工程师，学士，主要从事数据中心研究咨询管理工作。