AI时代算力基础设施

流体系统水能绿色发展报告

2026年9月

格兰富 GRUNDFOS

CAICT 中国信通院

前 言

当前，人工智能技术快速发展带动算力需求持续攀升，算力基础设施步入规模扩张与技术升级并行的发展阶段。随着高密度智算集群规模扩大，算力中心能源、水资源消耗及资源管理压力进一步上升；与此同时，液冷技术规模化应用正在推动冷却体系加快重构。在保障算力供给的前提下提升资源利用效率、增强运行可靠性，成为算力基础设施绿色发展的重要议题。

全球范围内，算力基础设施快速扩张加剧能源与水资源的供给压力。据高盛及相关机构预测，2026年美国数据中心总电力需求将达到41GW，并在2027年进一步升至66GW，到2030年美国数据中心预计新增697至1451百万加仑/日的供水量；预计2025年欧盟数据中心运行过程中消耗水资源约760亿升，并逐步将水资源利用效率(WUE)等指标纳入数据中心可持续性评价体系。截至2026年6月底，中国智能算力规模达到2185EFLOPS(FP16)，全国算力设施整体上架率达到71.4%，绿色低碳和算电协同成为算力基础设施发展的重要方向。

本报告指出，AI时代算力基础设施的核心竞争力，已由单纯算力规模比拼，转向算力、能源、水资源协同利用能力的竞争。随着单机架算力密度持续增长，热管理水平、水资源管控、能源效率与系统可靠性等成为影响算力基础设施可持续发展的关键因素。如何以更少的资源消耗支撑更多算力增长，正在成为行业共同面对的新课题。从能源效率到碳排放，从用水效率到余热利用，越来越多国家和地区开始将资源协同利用纳入算力中心可持续发展评价体系。伴随机架功率密度不断提升，液冷等新型冷却技术加速落地，行业优化思路也从单一设备效率优化，转向全系统统筹优化。

在此背景下，流体系统的重要性正在被重新认识。过去，流体系统更多承担散热保障功能；而在AI时代，它正在成为连接算力设备、冷却系统、能源系统和水资源系统的重要枢纽。热量如何被收集、输送、调节、利用和回收，不仅影响冷却效率，也影响能源利用、水资源消耗以及系统长期运行能力。流体系统正逐步从“冷却配套设施”演变为支撑绿色算力发展的关键基础设施。

基于这一判断，本报告确立算力与“水资源-能源”协同的研究视角。算力基础设施绿色发展的重点已从单一能效优化，扩展到算力增长、资源利用和运行韧性的协同平衡。围绕这一目标，报告构建了由架构层、设备层和平台层组成的流体系统能力框架，从分布式按需输配、泄漏风险分级、余热利用、智能泵控协同、多层冗余容错到数据闭环调控和介质全生命周期管理，系统探讨高密度液冷时代流体系统的发展方向。

本报告希望推动行业更加关注流体系统在绿色算力发展中的基础作用，促进算力基础设施从单点节能向系统优化演进，从资源消耗向资源协同利用演进，从经验运维向智能化运营演进。我们期待通过产业链各方协同创新，共同探索更加高效、可靠、可持续的算力基础设施发展路径，为人工智能时代绿色算力高质量发展提供支撑。

由于人工智能基础设施和流体系统技术仍处于快速发展阶段，报告难免存在不足之处，恳请业界专家和广大读者批评指正。我们也将持续跟踪行业发展动态，不断完善相关研究成果。

目 录

01 **AI时代算力基础设施水-能绿色发展背景**

1.1 全球算力基础设施资源约束现状 6

1.2 中国算力基础设施绿色发展现状 8

1.3 高密度算力下冷却体系重构 11

1.4 当前行业痛点与挑战 12

02 **流体系统促进算力中心绿色化发展**

2.1 流体系统连接热量与水效管理，提升散热运行效率 15

2.2 流体系统优化能源管理，支撑高密度与弹性运行 17

2.3 流体系统重构算力基础设施体系，支撑水-能协同与韧性运行 18

03 **架构、设备、平台层结构下流体系统的关键技术**

3.1 流体系统的架构层关键技术 23

3.2 流体系统的设备层关键技术 28

3.3 流体系统的平台层关键技术 31

04 **流体系统支撑绿色算力基础设施的典型实践**

4.1 智能泵赋能高效液冷，实现高密算力节能稳定运行 36

4.2 流体架构系统优化，推动算力中心全域节能升级 38

4.3 水-能资源协同利用，构建绿色算力循环体系 39

4.4 流体系统优化改造，盘活传统数据中心节能潜力 40

05 **未来发展趋势及建议**

5.1 未来发展趋势 42

5.2 建议 43

图 目录

图 1 典型排热方式的能量-水耗权衡（定性示意） 16

图 2 算力中心“水-能”协同机制示意图 18

图 3 三层结构下的七项关键技术及递进关系 21

图 4 集中式输配与分布式按需输配概念对比 23

图 5 分布式按需输配架构全局示意图 24

图 6 水-能协同与余热利用路径 26

图 7 传统集中控制下的CDU控制关系 29

图 8 采用Syspro本地控制冗余的CDU控制关系 30

图 9 数据闭环架构图 31

图 10 冷却介质全生命周期管理闭环 33

图 11 NorthC数据中心智能流量调控现场 36

图 12 芯片级泵驱两相液冷冷板散热系统 37

图 13 土耳其某数据中心系统结构设计 38

图 14 德国某超算中心温水直接液冷系统现场 39

图 15 QNB Finansbank数据中心存量机房改造现场 40

表 目录

表 1 近年来绿色算力相关政策情况 9

表 2 典型排热方式的能量与水资源特征对比 16

表 3 流体系统关键技术与预期效果 19

表 4 三层七项关键技术与四维价值映射 22

表 5 不同散热形态下流体系统的技术关注点 24

表 6 液冷系统泄漏风险分级与控制目标 25

表 7 智能泵控制模式及工程边界 28

表 8 典型失效场景与验证要求 30

表 9 介质风险、监测与验证要点 33

表 10 水资源闭环与介质管理的层级区别 34

第一章

AI时代算力基础设施 水-能绿色发展背景

01

1.1 全球算力基础设施资源约束现状 6

1.2 中国算力基础设施绿色发展现状 8

1.3 高密度算力下冷却体系重构 11

1.4 当前行业痛点与挑战 12

1.1 全球算力基础设施资源约束现状

美国

美国人工智能产业快速发展，加剧了区域电力系统和资源管理压力。当前美国数据中心规模扩张已由平稳增长迈入高速跃升新阶段。据高盛测算，2025年美国数据中心整体取电功率达31GW，2026年升至41GW，2027年将进一步飙升至66GW，较2025年增长约112%，电网扩容、电力消纳与能效管控压力持续加剧。电力负荷高速增长的同时，高密度AI算力设施的冷却需求也带来严峻的水资源消耗压力，水资源-能源耦合约束特征愈发突出。加州理工学院、加州大学河滨分校等机构研究团队于2026年发布的《Small Bottle, Big Pipe: Quantifying and Addressing the Impact of Data Centers on Public Water Systems》指出，若按照2024年数据中心的单位耗水水平延续发展，到2030年，为满足冷却需求增长，美国数据中心可能需要新增约697至1451百万加仑/日的供水能力。采用蒸发冷却的大型数据中心在高温时期可能产生较高用水需求，部分设施峰值日用水量超过100万加仑，规划中的大型设施甚至可能达到800万加仑/日。产业实践方面，微软、AWS等头部云计算企业已建立PUE/WUE联合运营监控，使用再生水替代市政淡水，采用直接芯片冷却和微流体等技术创新，并提出2030年“水资源正向（Water Positive）”发展目标，将水资源集约利用绩效与能源利用效率绩效并列纳入数据中心核心考核KPI，构建水-能协同管控的长效运营机制。

欧洲

欧洲算力规模化扩容带来的能耗、水耗双重压力持续叠加，推动欧盟形成能效与水效协同管控的算力绿色发展体系。数据中心作为欧洲数字服务的基础，正推动计算和人工智能的迅猛发展，但其巨大的能耗可能拖慢欧洲的清洁能源转型进程，并可能因电网承受压力而推高电力成本。预计未来几年欧盟数据中心的容量将增长一倍以上，从2025年的12GW增至2030年的28GW。欧洲数据中心当前约占欧盟电力需求的3%，到2030年可能上升至7%至9%，电力供需缺口持续扩大。水资源消耗层面，算力产业扩张带动冷却用水规模稳步增长，欧盟委员会于2026年发布的《Digitalisation and Sustainability of Data Centres》指出，预计2025年欧盟数据中心运行过程中消耗水资源约760亿升，其中大型数据中心冷却系统可能每日需要数百万升淡水供应，冷却方式、气候条件和区域水资源条件将直接影响数据中心实际用水水平。欧盟委员会2026年发布的《2026 Country Report - Ireland》显示，爱尔兰以数据中心为主的大型能源用户用电量占全国计量电力消费比重，从2015年的14.8%大幅攀升至2024年的31.0%，电力负荷较为集中于都柏林地区；同时，还面临着污水处理能力不足、供水管网漏损率偏高等水资源基建问题，水资源短板进一步限制算力扩容空间。针对算力发展中水、能管控碎片化的突出问题，欧盟持续完善顶层制度规范，依据《能源效率指令》(Directive (EU) 2023/1791)欧盟委员会能源总司2025年发布的评估报告进一步完善了统一的数据中心可持续性评估与披露体系，将WUE与PUE等传统能效指标并列纳入常态化公开披露范畴，明确在数据中心规划、设计与运营全流程需系统考量电网承载能力、区域水资源禀赋、设备能效等关键要素，推动算力基础设施实现能源高效利用与水资源集约节约的协同优化。

日本及东南亚

日本及东南亚国家的数据中心发展受到区域资源禀赋和基础设施保障能力影响，部分国家正在通过能源规划和绿色数据中心要求提升算力基础设施的资源利用效率。日本资源能源厅于2025年发布的《第七次能源基本计划》指出，随着数字化转型和绿色转型推进，日本未来电力需求将持续增长，2040年度发电量预计达到约1.1万亿至1.2万亿千瓦时，并提出通过提升可再生能源比例、强化能源效率等措施支撑新增电力需求。[1]新加坡土地和水资源条件有限，将资源利用效率纳入绿色数据中心的建设要求。新加坡资讯通信媒体发展局（IMDA）于2024年发布《Green Data Centre Roadmap》，指出数据中心运行对电力和水资源均存在较高需求，并提出提升数据中心水利用效率（WUE）的目标，其中2021年新加坡大型用水数据中心平均WUE为2.2m^3/MWh，未来目标降低至2.0m^3/MWh以下；同时指出冷却塔约占数据中心用水量的97%，冷却系统优化成为降低水资源消耗的重要方向。[2]马来西亚投资发展局（MIDA）于2024年发布《Guideline for Sustainable Development of Data Centre》，要求数据中心在设计和运营过程中提升水资源利用效率，并通过可持续冷却方案降低资源消耗[3]。

1. 《The7th Strategic Energy Plan》，Agency of Natural Resources and Energy，2025年
2. 《Green Data Centre Roadmap》，IMDA，2024年
3. 《Guideline for Sustainable Development of Data Centre》，MIDA，2024年

1.2 中国算力基础设施绿色发展现状

我国算力基础设施建设持续推进，算力供给能力和资源规模不断提升。截至2026年6月底，我国智能算力规模达2185EFLOPS(FP16)、全国算力设施整体上架率达71.4%，算力基础设施规模和水平持续提升。

我国智能算力规模达

2185 EFLOPS(FP16)

全国算力设施整体上架率达

71.4%

截至2026年6月底

我国持续出台算力基础设施相关政策，绿色低碳已成为算力基础设施高质量发展的核心导向之一。2020年前我国政策重点聚焦数据中心规划、选址、布局，大力推动绿色数据中心建设。随后《关于加强绿色数据中心建设的指导意见》《新型数据中心发展三年行动计划(2021-2023年)》等政策文件的发布，提出要提升新建数据中心绿色发展水平，加强在用数据中心绿色运维和改造，加快绿色技术产品创新推广。随着“双碳”战略和“东数西算”工程启动，国家强调要坚持把节约资源贯穿于经济社会发展全过程、各领域，算力全产业链绿色发展逐渐具备政策基础。《贯彻落实碳达峰碳中和目标要求推动数据中心和5G等新型基础设施绿色高质量发展实施方案》、《算力基础设施高质量发展行动计划》、《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》等多项政策，聚焦绿色低碳算力建设与算电协同，明确算力设施能效、碳效提升要求及国家枢纽节点数据中心绿电占比标准。2026年，《政府工作报告》、《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》、《“十五五”碳达峰行动方案》等政策明确将人工智能、智算集群、算电协同列为新基建重点，并推动AI与能源双向赋能，规范算力设施绿电消费与碳排放核算。

表 1 近年来绿色算力相关政策情况

发布时间	政策文件名称	具体内容
2023年10月	《算力基础设施高质量发展行动计划》	提出完善算力综合供给体系、提升算力高效运载能力、强化存力高效灵活保障、深化算力赋能行业应用、促进绿色低碳算力发展、加强安全保障能力建设等重点任务；到2025年，算力规模超过300EFLOPS，智能算力占比达到35%。
2023年12月	《关于深入实施“东数西算”工程 加快构建全国一体化算力网的实施意见》	提出统筹通用算力、智能算力、超级算力一体化布局，推动东中西部算力一体化协同、算力与绿色电力一体化融合；到2025年底，算力电力双向协同机制初步形成，国家枢纽节点新建数据中心绿电占比超过80%。
2024年7月	《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》	提出到2025年底，全国数据中心布局更加合理，整体上架率不低于60%，平均电能利用效率降至1.5以下，可再生能源利用率年均增长10%，平均单位算力能效和碳效显著提高；到2030年底，全国数据中心平均PUE、单位算力能效和碳效达到国际先进水平。
2024年8月	《加快构建新型电力系统行动方案（2024-2027年）》	提出实施一批算力与电力协同项目，统筹数据中心发展需求和新能源资源禀赋，科学整合源荷储资源，开展算力、电力基础设施协同规划布局，探索新能源就近供电、聚合交易、就地消纳的“绿电聚合供应”模式。
2025年3月	《关于促进可再生能源绿色电力证书市场高质量发展的意见》	提出依法稳步推进绿证强制消费，逐步提高绿色电力消费比例并使用绿证核算；加快提升数据中心等重点用能单位和行业的绿色电力消费比例，国家枢纽节点新建数据中心绿色电力消费比例在80%基础上进一步提升。
2025年8月	《深入实施“人工智能 +”行动的意见》	提出优化国家智算资源布局，完善全国一体化算力网，加大数、算、电、网等资源协同，加强智能算力互联互通和供需匹配，推动智能算力供给普惠易用、经济高效、绿色安全。
2026年3月	《政府工作报告》	提出深化拓展“人工智能+”，实施超大规模智算集群、算电协同等新基建工程，加强全国一体化算力监测调度，支持公共云发展。
2026年4月	《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》	提出促进能源、算力、场景、数据、模型等要素高效协同，强化能源对人工智能发展的基础支撑作用，发挥人工智能对能源转型的叠加倍增作用，加快构建协同高效、安全可靠、绿色低碳、开放融合的“人工智能+”能源发展新格局。
2026年7月	《“十五五”碳达峰行动方案》	强化算力设施与可再生能源协同布局，支持开展绿电直供，合理配置储能、备用电源等配套设施，推动新建算力设施主要使用非化石能源电力。完善算力设施节能降碳标准，推动未达标算力设施开展节能降碳改造，有序淘汰落后低效技术和设备，提升算力设施能效水平。加快建设绿色算力设施，鼓励建设零碳算力设施。

我国算力基础设施绿色产业正逐步形成算力设施、算力设备、算力平台、算力赋能“四位一体”的全链条协同发展格局。

算力设施层，国内算力枢纽集群普遍遵循“算力跟着绿电走”原则布局，依托风光新能源资源落地源网荷储一体化项目，广泛应用自然冷却、余热回收等成熟技术，持续压降整体能耗与碳排放。

算力设备层，行业硬件绿色替代进程提速，高压直流供电设备、储能装置、智能泵组、高密度节能服务器、超低损耗网络设备等核心硬件不断迭代，通过材料创新、产品创新、工艺创新和手段创新等方式，夯实算力基础设施设备层节能底座。

算力平台层，依托算力虚拟化、池化调度、AI智能调优及全流程能耗监测技术，实现算力资源动态配置与高效利用，大幅减少资源冗余消耗。

算力赋能层，绿色算力持续渗透千行百业，为工业低碳改造、智慧城市建设、科研技术革新等场景提供绿色算力支撑。当前产业各环节深度融合、协同迭代，形成了从底层硬件、平台软件、核心算法到行业赋能的完整算力基础设施绿色产业生态。

算力基础设施xUE指标体系持续完善，算力中心能效、水效等管理水平成为产业关注重点。2007年，电能利用效率(Power Usage Effectiveness，PUE)指标被提出用以评价数据中心能源利用效率，PUE值越接近1，说明数据中心能源利用效率越高。随后，水资源利用效率(Water Usage Effectiveness, WUE)、碳利用效率(Carbon Usage Effectiveness, CUE),基础设施利用效率(Infrastructure Usage Effectiveness，IUE)，面积使用效率(Space Usage Effectiveness，SUE)等指标又陆续被提出，有效丰富了算力中心能耗评价指标。随着绿色算力建设深入推进，当前行业不再单一考核节电能力，而是构建水-能协同的多维绿色评价标准，倒逼数据中心节能节水一体化升级。目前行业规模化应用间接蒸发冷却、液冷、循环水复用等绿色技术，在降低PUE数值、提升电能利用率的同时，也有效控制水资源消耗，实现能效、水效同步优化。国内优质绿色数据中心已实现PUE、WUE双优表现，头部枢纽节点数据中心PUE可控制在1.2以内、WUE降至0.7L/kWh以下。同时，行业逐步建立双指标常态化监测机制，通过智能运维、工艺优化破解节能与耗水的矛盾，推动算力基础设施从单一节能向水-能协同高效的绿色低碳模式转型。

国内优质绿色数据中心已实现PUE、WUE双优表现

PUE控制在

<1.2

WUE降至

<0.7 L/kWh

1.3 高密度算力下冷却体系重构

高密度AI负载正使冷却能力成为算力部署的直接边界，并推动风冷、单相液冷与两相液冷形成分层技术体系。2025年全球调查显示，数据中心最常见机架密度均值约为9kW，82%的受访者最高密度机架仍低于30kW；但当机架密度超过60kW后，高性能计算和AI已成为主要负载，少数机柜甚至突破100kW，表明传统设施与头部AI集群之间正在形成明显的“密度断层”[4]。当前机架级AI架构(包括NVIDIA NVL72)最多可集成72颗加速器，单颗加速器热设计功耗已达1000W；两相直接液冷试验已实现单插槽2200W、约250W/cm^{2}热流密度的散热能力，并可支持超过10kW的1U服务器[5]。因此，风液混合适合存量机房过渡，单相冷板是当前规模化部署的主流方案，两相冷板则面向更高热流密度芯片。

冷却体系重构的核心不是简单替换末端散热设备，而是建立贯通芯片、机架、冷却液分配单元、输配管网和室外冷源的系统级流体热管理。美国太平洋西北国家实验室(PNNL)，美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)和美国电气制造商协会(NEMA)提出，AI数据中心应在规划、设计、调试、运行和改造全过程统筹能源与用水效率，并根据气候区和负载密度选择技术方案[6]。系统边界扩大后，可靠性也由冷板性能延伸至管网清洁、水质控制和工程调试：当前单相冷板内部流道可窄至约100微米，施工残渣和腐蚀产物均可能造成堵塞；OCP因此要求投运前完成水压测试、清洗与冲洗，冲洗水至少循环8个系统容积，最终浊度应低于5NTU[7]。

高密度冷却的下一阶段重点，将由提高名义散热能力转向负载感知、动态供液和系统协同控制。基于Frontier超级计算机全年47186组运行数据的数字孪生研究显示，仅优化流量即可降低冷却能耗20.4%，联合优化流量与供液温度的理论节能率达到30.1%；加入泵和执行器调节速率等实际约束后，仍可实现27.8%的节能，夏季降幅达到33%[8]。这说明液冷并不会自动带来高能效，只有将泵组、CDU、换热设备和冷源纳入统一闭环控制，才能把高密度算力带来的散热压力转化为系统效率。英伟达面向2027年1MW及以上IT机架的技术规划也进一步表明，未来冷却、供电与建筑结构必须同步开展前置设计[9]。

2025年，单机柜密度功率已突破

100 kW

Frontier超级计算机数字孪生研究显示
优化流量和供液温度可节能

30.1%

4.《Uptime Institute Global Data Center Survey 2025》，2025年7月
5.《Pumped Two-Phase Refrigerant-Based Direct Liquid Cooling Technology for Next Generation AI Clusters with High TDP Accelerators》，2025年2月14日
6.《PNNL/ASHRAE/NEMA AI Data Center Energy Performance Framework》，2026年
7.《Guidelines for Pre-Commission Preparation of Technology Cooling System Row Manifolds in Liquid Cooled Data Centers》，2025年1月27日
8.《Digital Twin-Based Cooling System Optimization for Data Center》，2026年3月3日
9.《NVIDIA 800 VDC Architecture Will Power the Next Generation of AI Factories》，2025年5月20日

1.4 当前行业痛点与挑战

能耗总量快速攀升，能效瓶颈突显

智算中心建设加速，单集群功率从千瓦级向兆瓦级、百兆瓦级跃升。AI大模型训练集群的功耗尤为突出，单次大模型训练任务往往涉及数千张高性能GPU协同运算，持续数周乃至数月，部分超大规模智算中心年用电量可达数十亿千瓦时，能耗强度远超传统数据中心。在人工智能、云计算、大数据、工业互联网等算力需求持续高增长的背景下，全国算力基础设施能源消耗总量仍将长期保持上升态势，对区域能源供应和电网安全构成持续压力。从区域分布看，东部地区算力需求集中、上架率高，但本地能耗指标和电网承载能力趋于饱和；西部地区清洁能源丰富，却面临算力消纳和时延敏感业务落地瓶颈。截至2025年6月底，全国算力中心平均PUE已降至1.42，部分采用液冷技术的高密度机房PUE可小于1.2。继续依靠常规措施降低PUE的边际改善空间正在收窄，如传统变频空调、冷热通道隔离、自然冷却等通用节能技术当前普及率较高，边际节能效益逐步递减，剩余节能空间主要依赖制冷系统革新、IT设备能效提升、算力智能调度优化等深层次变革。这些变革涉及芯片制程、服务器架构、散热材料、系统控制策略等多环节协同，技术复杂度高、投入成本大，且不同地区、不同规模算力中心的建筑条件、气候环境、负载特征差异显著，短期内难以形成统一可复制、规模化推广的解决方案，导致能效提升进入平台期和瓶颈期。

绿色改造成本高、投资回报周期长

液冷系统、新型储能、余热利用、高效电源、智能监控等绿色节能设备的初始投资显著高于传统风冷和常规电源方案，且对数据中心的气流组织、承重设计、管线布置、漏液防护、运维团队专业能力提出更高要求。部分老旧数据中心受建筑层高、楼板承重、机房布局、电力容量、消防规范等条件限制，进行液冷改造、储能接入等工程的难度极大，往往需要对建筑结构和机电系统进行全面重构，进一步推高改造成本和投资周期。传统数据中心进行液冷往往面临较高的改造成本，需要重新布置机柜、机房地面与管道、泵和冷却液系统，还可能涉及停机期，影响业务连续性，伴随运维复杂度上升、故障响应要求提高等隐性成本。与此同时，绿色算力在环境效益、社会责任和品牌价值等方面虽然具有潜在价值，但市场尚未形成稳定的绿色溢价机制和差异化定价机制，算力服务同质化竞争日趋激烈，用户对绿色属性的支付意愿有限，企业绿色投入难以直接转化为经济效益。在现有算力市场价格竞争激烈的背景下，许多运营商更倾向于将有限资金用于算力规模扩张而非绿色改造，进一步加剧了绿色转型的滞后性。虽然国家和地方出台了补贴、税收优惠、绿色金融、节能改造奖励等支持政策，但政策落地存在区域差异，部分中小型算力中心融资渠道有限，绿色技术创新和推广应用还面临较大的资金约束、技术不确定性和商业风险，客观上抑制了企业主动推进绿色改造的积极性。

全国算力中心平均PUE	部分采用液冷技术的高密度机房PUE	常规措施降低PUE的边际改善空间
↓1.42	<1.2	正在收窄

*截至2025年6月底

算力中心全生命周期绿色节能管理有限

当前行业更多关注运营期PUE指标，将绿色节能的重点集中在运营阶段，对设备生产制造、运输安装、退役回收等全生命周期环节的碳排放和环境影响关注不足。上游芯片、服务器、存储、网络设备等制造过程同样属于高能耗、高排放环节，尤其是先进制程芯片制造、半导体材料加工、稀有金属提取等环节能耗巨大，其隐含碳排放约占算力基础设施全生命周期碳排放的较大比例，但目前尚未纳入主流核算和管理体系。

在资源消耗方面，数据中心冷却过程消耗大量水资源，尤其是采用蒸发冷却、水冷系统的中大型数据中心，在水资源紧张地区加剧了水环境压力。当前行业节水技术应用、循环水系统建设和WUE管理仍不充分，大部分数据中心使用市政自来水直接冷却，缺少回收过滤净化系统，存在管路易结垢、废水回收率低、冷却水蒸发损耗大等问题，此外，水与电的耦合关系显著，高温季节为维持制冷效率需增加取水量和排水量，水资源利用效率与算力规模扩张速度不匹配，进一步放大局部地区水资源供需矛盾。

第二章

流体系统促进
算力中心绿色化发展

02

2.1 流体系统连接热量与水效管理，提升散热运行效率 15

2.2 流体系统优化能源管理，支撑高密度与弹性运行 17

2.3 流体系统重构算力基础设施体系，支撑水-能协同与韧性运行 18

如果将算力中心比作人体，服务器和芯片是持续产生算力和热量的“器官”，能源系统提供运行所需的“养分”，而流体系统则类似贯穿全身的“血液系统”：它把冷量精准输送到热源附近，将热量安全带出并进行高效利用，同时连接冷却、输配、水处理、余热回收和智能控制等环节。

算力中心流体系统是支撑算力基础设施安全、高效、绿色运行，助力算力中心持续提升能效、水效、保证可靠韧性不间断运行的重要联通系统。常以水、空气、制冷剂、冷却工质等流体介质为核心，通过输配管网、动力设备、换热装置、处理设施及智能控制系统的协同运行，完成热量的收集、输运、交换与排放，是对机房温湿度、洁净度、流体品质及用水效率进行调控与优化的系统集合。在算力中心，流体系统常包含冷源系统、输配系统、末端换热系统、蓄冷/储热系统、水处理与水质保障系统、热回收系统、监测与控制系统，是算力中心热管理系统的实现主体，也是PUE优化的核心对象。

2.1 流体系统连接热量与水效管理 提升散热运行效率

液冷等流体系统通过直触芯片高效散热，正在重塑算力中心的散热模式。与传统风冷依赖空气远距离输送冷量不同，液冷将冷却工质直接引入服务器内部或贴近芯片、GPU等热源，利用液体远高于空气的比热容和导热系数，可在更小温差下带走更多热量。目前，冷板式液冷已在30至50千瓦机柜场景中规模应用，同时浸没式液冷等技术在更高密度集群中加速落地，部分新建智算中心借此将PUE控制在1.15以下。通过缩短传热路径、降低末端温差、减少风机功耗，液冷不仅支撑了单机柜功率从10千瓦向100千瓦以上的跃升，也显著降低了单位算力的散热能耗。与此同时，相变冷却、热管技术、微通道冷板等新型传热结构不断涌现，使流体系统能够适应芯片级、服务器级、机柜级多层次散热需求。

流体系统通过闭式循环、水质管理与再生水利用等方式，推动算力中心水资源集约化。针对开式冷却塔蒸发损耗大的问题，行业积极推广闭式循环冷却系统、干湿联合冷却和干冷器技术，通过减少直接与空气接触的蒸发水量、提高循环水浓缩倍数，显著降低补水需求和排污量。以干湿联合冷却为例，在干燥季节主要依靠干冷器散热，仅在高温高湿时段启用蒸发冷却，可在保证散热能力的同时将蒸发水量降低50%以上。在水质管理方面，软化、过滤、除垢、杀菌、在线监测等处理技术的应用，延长了设备寿命并维持了换热效率，避免因结垢和腐蚀导致的能耗上升。再生水利用方面，部分缺水地区算力中心已开始试点将中水经深度处理后用于冷却塔补水和绿化灌溉，有效降低了对市政自来水的依赖。系统层面的技术选择还应考虑发电环节关联用水：某些降低现场直接用水的冷却配置可能增加能源消耗，从而将部分水足迹转移到上游。

表 2 典型排热方式的能量与水资源特征对比 ▼

排热方式	能耗水平	水耗水平	主要约束	协同角色
开式冷却塔	低 （蒸发潜热换热逼近度小）	高（蒸发与排污耗水）	受湿球温度限制	能耗优先场景的基础方案
闭式冷却塔	较低	中(喷淋蒸发,内循环封闭换热）	受湿球温度限制，换热温差略大	水质敏感场景的折中方案
干式冷却器	高 （风机功耗＋显热换热）	≈0（现场无水耗）	受干球温度限制，高温天气出力受限	缺水地区的基础方案
绝热辅助干冷器	中高 （高温时段喷淋辅助）	低（仅高温时段耗水）	高温出力改善，仍需少量补水	峰时保冷、平时节水
干湿联合系统	可调度 （干式/蒸发模式切换）	可调度	系统集成与控制复杂度较高	能-水权衡的“调节阀门”

WUE作为衡量流体系统用水效率的核心指标，正被纳入数据中心设计、运行和评价全过程，推动企业在选址、冷源选择、系统配置时充分考虑区域水资源禀赋。此外，冷却水系统的漏损监测、冷却塔收水器优化、喷雾冷却改造等精细化管理手段，也能够在不改变系统架构的情况下进一步降低水耗。通过流体系统的水侧优化，算力中心能够在保障散热能力的同时，将水耗控制在更低水平，缓解大规模算力扩张与区域水资源承载力之间的矛盾。

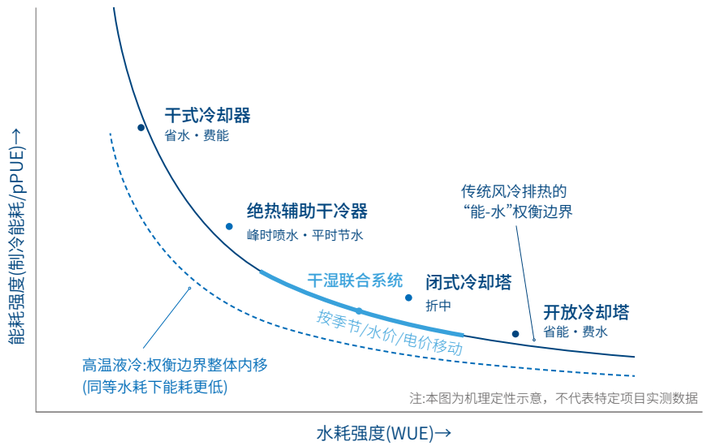

图 1 典型排热方式的能量 - 水耗权衡（定性示意）

随着人工智能与数字孪生技术的引入，流体系统正逐步从经验驱动转向数据辅助运行（*相关应用成熟度因项目而异）。通过在冷机、水泵、冷却塔、管网、末端等关键环节部署温度、压力、流量、液位、能耗等物联网传感器，可以实时构建设备与系统的数字孪生模型，反映流体状态、热负荷分布和设备运行效率。数字孪生平台可在虚拟空间中对冷热通道、管网阻力、末端流量分配进行实时映射和动态仿真，帮助运维人员识别水力失衡、局部过冷或过热等问题，并通过模拟不同控制策略评估优化效果。

在传感、数据质量和控制能力充分的条件下，这类智能协同有助于进一步降低约10%至20%的制冷运行效率，并可通过异常检测提前发现泵组振动、管路泄漏、换热器结垢、阀门故障等潜在风险，实现从被动抢修向预测性维护的转变，延长设备寿命并减少非计划停机带来的能源与算力损失。结合电力市场、气象环境等数据，流体系统可以小时级优化供回水温度设定，日级结合气象与电价制定蓄冷计划，实现“算力未动、冷量先行”的主动式热管理。

2.2 流体系统优化能源管理 支撑高密度与弹性运行

流体系统与算力负载的动态协同，是提升供冷柔性和运行能效的重要手段。传统制冷系统常按最大设计负荷配置并全年高冗余运行，难以适应实际业务负载的波动。高效设计的流体系统通过变频水泵、电动调节阀、智能末端空调、液冷分配单元(CDU)和可调速冷却塔等设备，能够根据实时热负荷动态调节流量、压力和供冷温度，避免负载低谷时的过度供冷和高峰时的冷量不足。例如，在AI模型训练启动阶段，GPU负载迅速上升并伴随大量热量产生，流体系统可提前提升CDU流量和冷冻水供水温度裕度；在训练结束或checkpoint保存阶段，负载下降，流体系统可同步降低泵组频率和冷却塔出力，避免冷量空转。通过流体系统与IT负载的深度融合，算力中心可将制冷系统从固定容量资源转化为可调度的柔性资源。这种精准协同使制冷系统的运行曲线与IT负载曲线高度贴合，显著减少全年无效制冷时长，还可减少设计冗余和设备超配，使流体系统的容量配置更贴近实际运行需求，从而在动态负载条件下维持较低的PUE和较高的散热可靠性。

流体系统传热链路的优化使单位空间内能够承载更大规模的智能算力。液冷流体系统在机柜布局、承重设计、管路走向、CDU容量、漏液防护等方面进行系统规划，形成与供配电、网络布线相协调的基础设施方案，通过机柜级、服务器级、芯片级多层次供冷，将冷却工质精准输送至热源附近，突破了风冷在散热能力和空间占用上的瓶颈。高密度液冷机柜常与模块化机房、预制化电力模块、高密度网络交换架构协同设计，形成算力、电力、制冷一体化交付单元。这种集成式建设模式不仅缩短了数据中心建设周期，也便于根据业务增长按需扩展，避免了传统模式下为预留风冷散热空间而造成的面积浪费。高密度部署带来的直接收益是单位面积算力产出的大幅提升，同等算力规模下机房面积和机柜数量显著减少，相应降低了土建投资、电缆损耗和辅助设施能耗，使算力中心在有限能源和空间约束下支撑更大规模智算集群，实现单位算力能耗与碳排放的同步下降，为绿色算力基础设施的可持续发展奠定技术基础。

2.3 流体系统重构算力基础设施体系 支撑水 - 能协同与韧性运行

流体系统整合“冷(源)-输(配)-储(能)-控(制)”四端，系统性优化算力中心基础设施设计架构。冷源侧，流体系统结合当地气候资源、能源结构、产业政策和水资源禀赋，冷源体系充分挖掘自然冷源潜力，通过干冷器、板式换热器、间接蒸发冷却、绝热加湿等技术，将室外低温空气、地下水、湖水、海水等免费冷量引入数据中心，显著延长自然冷却时间并降低机械制冷运行时长。输配侧，重点优化传统枝状管网普遍存在水力不平衡、末端调节能力弱、水泵能耗偏高等问题，通过环状管网、分区管网和分级泵组等设计，综合考虑最不利环路、末端压差、泵组运行曲线和未来扩容需求，避免因设计余量过大导致长期高能耗运行，使用变频水泵、动态平衡阀、低阻力阀门和高效管路附件降低输配能耗，实现末端分区调节按需分配。在大型智算园区中，输配系统还需统筹室内外管网、管廊桥架、CDU布局、冷热通道设计等，实现冷量从绿色冷源高效、稳定、可扩展地输送至每个算力节点。储能侧，可结合蓄冷罐、蓄冰槽、相变储热装置和大温差蓄能系统等热储能方式参与算力中心能耗的削峰填谷管理。未来还可以结合新型电力储能装置平滑算力出力波动，提升绿电就地消纳能力。控制侧，推动流体系统从分散控制走向算力-能源一体化调度：覆盖冷源、管网、末端、储能的传感与执行设备层，数据接入、治理与分析层，及优化决策与人机交互层。

随着算力芯片技术的升级，流体系统设计的边界正从“机房级”向“芯片级”不断延伸，由单一的制冷系统演变为复合热量管理系统。流体系统贯穿算力基础设施冷却链的全链条，同时作用于“水”和“能”两个维度，其取热能力、输配效率和排热方式，直接决定了算力部署密度、能源消耗强度和水资源代价，是水-能协同优化的关键纽带。

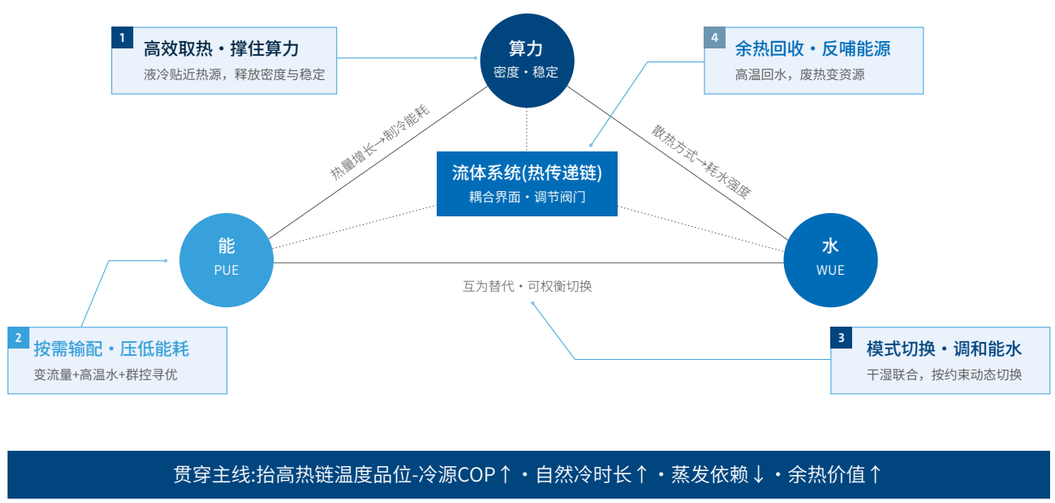

图 2 算力中心“水-能”协同机制示意图

随着人工智能数据中心(AIDC)设计架构的不断升级，流体系统通过提高热量输送效率，持续降低单位算力对应的冷却能源投入，新增算力对应的边际能源投入持续下降，流体系统正在推动数据中心从“算力增长带来能耗同步增长”的发展模式，逐步向“算力增长快于能耗增长”的高效发展模式转变。同时，随着高温液冷、余热回收和水管理体系进一步发展，流体系统将持续推动PUE、WUE以及能源再利用效率协同优化，使算力增长对新增水资源消耗的依赖逐步降低，实现水资源利用效率与算力发展的同步提升。

综合来看，流体系统对算力基础设施的串联与协同作用，最终体现为四个维度的价值输出：一是更精准的热量管理，以更短的传热路径和按需的冷量供给支撑算力密度持续提升；二是更高效的能量管理，以更少的输配与冷源能耗支撑算力增长与能耗增长“脱钩”；三是更集约的水资源利用，以闭式循环、水质管理和再生水利用缓解算力扩张的水资源约束；四是更可靠的运行韧性，以风险分级、冗余容错和预测性维护保障连续供冷。四个维度相互关联、互为约束：追求能效不能以牺牲水效为代价，提升密度不能以削弱韧性为前提，这正是算力与“水-能协同”的实质内涵。

表 3 流体系统关键技术与预期效果

优化类型	技术路径	核心措施	量化效果
能源消耗	高效输配	变频智能泵替代定频泵	泵送能耗降低25%-40%
	按需调节	变流量控制、变压差控制	控制优化节能10%-20%
	分布式架构	以泵代阀、分布式泵系统	输配能耗降低20%-60%
	动态控制	AI算法、双驱AI控制	制冷系统能耗降低15%-40%
水资源消耗	闭式循环	液冷替代蒸发冷却	节水31%-82%
	水质管理	过滤净化、浓缩倍数提升	浓缩倍数3→6，节水20%
	再生水利用	中水回用、雨水收集	饮用水消耗削减97%
运行风险	实时感知	多参数传感网络全覆盖	故障预测准确率90%
	冗余设计	N+1/2N泵组冗余	单泵故障系统继续运行
	健康监测	振动/压差/温度趋势分析	故障率降低40%
	主备切换	智能级联备用泵自动切换	冷却中断时间<10秒

注：数据来源为理论公式和实践测算

第三章

架构、设备、平台层结构下流体系统的关键技术

03

3.1 流体系统的架构层关键技术 23

3.2 流体系统的设备层关键技术 28

3.3 流体系统的平台层关键技术 31

随着AI算力规模持续增长和液冷技术逐步应用于高密度算力场景，算力基础设施流体系统的关注重点正由单一设备效率优化转向覆盖热量产生、输送、调节和利用全过程的系统协同。随着系统规模扩大和运行条件复杂化，局部水力失衡、控制响应不足、介质状态变化以及余热利用条件不匹配等问题，均可能影响系统能效水平、运行可靠性和资源利用效率。未来流体系统需要在保障连续供冷的基础上，进一步提升动态调节能力、智能运行水平和水-能资源协同利用能力。

为实现前述热量管理、能量管理、水资源管理和运行韧性四个价值维度，流体系统技术演进逐步形成架构层、设备层和平台层三层能力体系。架构层作为系统设计基础，重点解决热量输送路径优化、系统安全边界构建和余热利用条件规划等问题；设备层作为系统运行执行环节，通过泵组、控制器、传感器等关键设备实现流量调节、状态感知和连续供冷；平台层作为系统优化闭环，通过运行数据采集、状态分析和策略反馈推动流体系统由运行监测向智能调控和长期优化演进。三层能力体系相互衔接，形成由架构设计、设备执行到平台优化的递进关系，并对应分布式按需输配、泄漏风险分级、余热回收利用、智能泵控协同、多层冗余容错、数据闭环调控和介质全生命周期管理七项关键技术。

图 3 三层结构下的七项关键技术及递进关系

具体来看，架构层从系统设计源头回答“热量如何输送、安全如何保障、余热如何利用”，直接塑造热量管理与能量管理的上限；设备层以智能泵组等执行单元回答“能力如何落地”，将架构意图转化为可按需调节、可容错运行的物理能力；平台层以数据闭环回答“运行如何持续优化”，为水资源利用和运行韧性提供长期保障。

表 4 三层七项关键技术与四维价值映射

层级	关键技术	热量管理	能量管理	水资源利用	运行韧性
架构层	① 分布式按需输配	●	●	○	◐
架构层	② 泄漏风险分级	◐	○	○	●
架构层	③ 余热回收利用	●	●	◐	○
设备层	④ 智能泵控协同	●	●	◐	◐
设备层	⑤ 多层冗余容错	◐	○	○	●
平台层	⑥ 数据闭环调控	◐	●	◐	●
平台层	⑦ 介质全生命周期管理	◐	◐	●	◐

●＝核心支撑（该主张是该价值维度实现的主要路径）；◐＝协同支撑（起配合或保障作用）；○＝关联较弱。

3.1 流体系统的架构层关键技术

01 分布式按需输配

分布式按需输配是提升高密度液冷系统输配效率的重要技术方向，其核心在于使流体供给能力与实际冷却需求动态匹配，实现由集中向按需调节供配的转变。随着AI训练和推理负载持续增长，机柜功率密度不断提高，液冷系统中的热量传输链路日趋复杂。冷板微通道、过滤器、换热器、阀件以及管路等环节都会产生流动阻力，而传统集中式输配通常需要按照最不利工况提供统一压差，以保证所有支路获得足够流量。但在实际运行中，由于不同区域热负载差异显著，部分支路往往长期处于供液超过实际需求的状态，多余压差最终通过阀门节流消耗，造成额外输配损耗。

分布式按需输配通过将调节能力下沉至更接近热负载的位置，根据温度、压力、流量和IT负载变化动态调节运行状态，使流量与冷量能够按需分配、精准匹配。其价值不仅在于降低输配能耗，更在于提升系统响应速度、扩展能力和运行灵活性，为高密度液冷系统提供更符合实际需求的供冷方式。因此，推动流体系统由集中式输配向分布式按需输配演进，是高密度算力基础设施提升能源效率和支撑规模化发展的重要方向。这一技术关键并非简单增加泵或控制设备，而是通过优化流体系统架构和控制逻辑，减少无效输配、提高资源利用效率，使冷却能力能够随着算力负载变化实现动态供给。

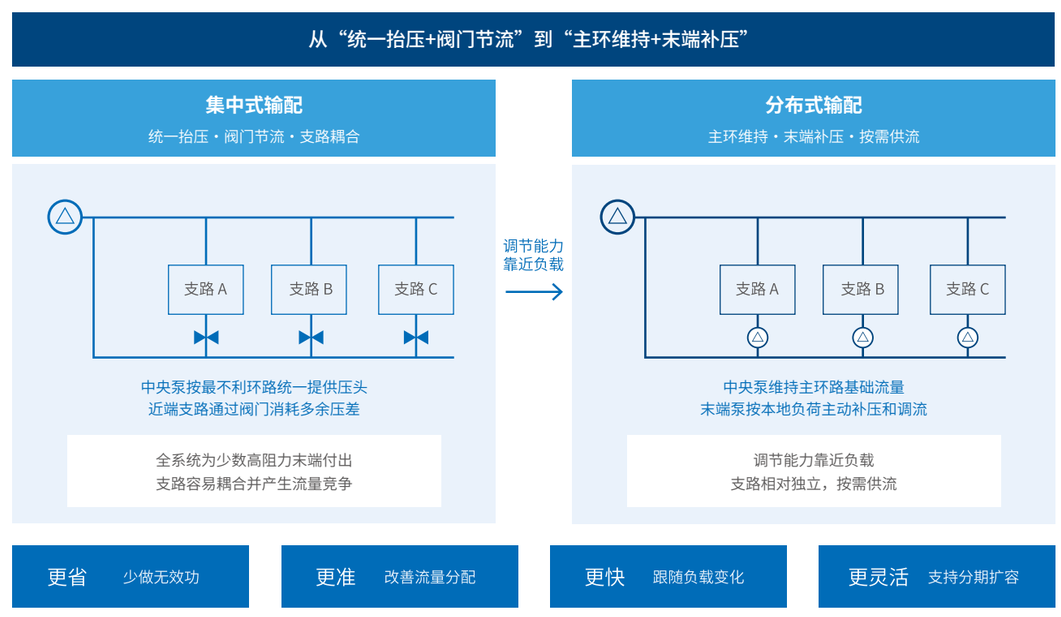

图 4 集中式输配与分布式按需输配概念对比

在具体的实践路径上，分布式架构可以进一步细分为分布式按需输配、分布式泵送和以泵代阀三个技术点。“分布式按需输配”，指冷量随负载就近分配的架构原则，“分布式泵送”，是把变频调节能力下沉至分区、CDU或末端的实现方式，“以泵代阀”则以主动补压和调流减少长期节流损失，并不取消隔离、止回和泄压等安全功能。

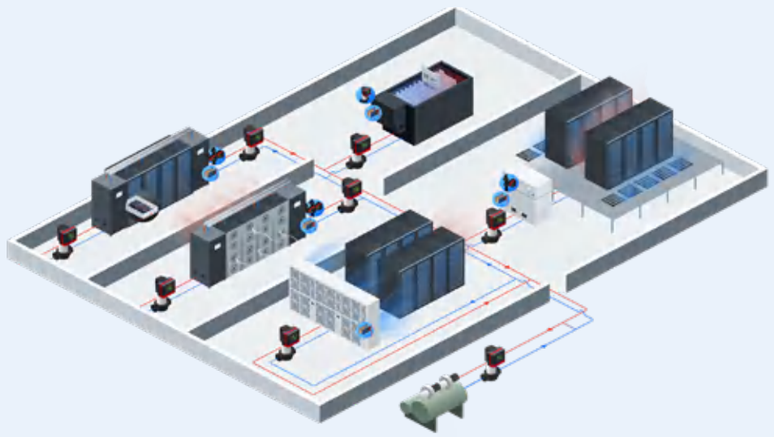

图 5 分布式按需输配架构全局示意图

分布式按需输配的本质，是将流量调节能力从中央系统下沉至靠近热负载的位置，在保障最小流量、压力边界和响应速度的前提下，实现流量与实际冷却需求动态匹配，以达到按需输配和精准供液。高ΔT、低流量不应被视为独立优化目标，而应服从芯片散热安全、系统稳定性和运行可靠性等工程边界，以实现效率与韧性的平衡。冷量到达热源的路径不同，水力和介质边界也随之变化，表5归纳了不同情形下各类末端散热形态的具体技术关注点。

表 5 不同散热形态下流体系统的技术关注点

散热形态	典型位置	流体系统关注点	能量管理
RDHx/背门	机柜后端	供回水、压降、凝露与风液协同	通用回路
冷板式液冷	服务器侧	最小流量、CDU调节、过滤压降与温度响应	工程边界
浸没式液冷	浸没槽	介质兼容、泵型选择、材料及密封	介质适配
风液混合	存量改造	风液协同、局部热点与分阶段改造	控制关系

02 泄漏风险分级

液冷系统规模扩大后，安全风险需要从单设备防护转向基于不同区域特点的风险分级管理。与传统风冷系统相比，液冷系统增加了冷却介质与IT设备、机柜以及管路之间的接触环节，泄漏风险成为系统设计需要重点关注的问题。由于不同位置发生异常后的影响范围不同，架构层需要根据区域特点进行差异化设计：服务器内部冷板区域重点关注避免冷却液影响IT设备运行；白区CDU、机架侧歧管等靠近IT设备的区域需要重点考虑泄漏检测、隔离和影响控制；独立机电区域，如换热站、独立CDU间和泵房，则更多关注设备维护、故障发现和恢复能力。通过建立面向不同区域的分级风险控制管理，可以使不同液冷架构、不同设备方案在统一的安全目标下进行设计和验证，不必依赖某一种固定设备或技术路线，在满足液冷安全要求的同时，提高系统设计的合理性。

表 6 液冷系统泄漏风险分级与控制目标

风险区域	典型位置	主要后果	控制目标与允许技术路线
高风险区	冷板、服务器机内管路、GPU邻近连接	冷却液可能接触带电IT设备	以冷却液不得进入IT设备为结果要求；严格验证连接、材料、压力、热循环和检测能力
邻近IT区	白区CDU、机架侧歧管、RDHx	可能影响相邻服务器或扩大隔离范围	提高检测、承接和局部隔离等级；结合距离、排液条件和剩余供冷能力选择路线
可控机电区	独立CDU间、换热站、泵房	局部设备损坏或供冷能力下降	验证检测时间、排液、隔离、备用供冷和恢复时间；不同泵型可按等效结果验证

液冷泄漏安全应按故障后果分级，而不能按设备结构或泵型一刀切。

无论采用无轴封泵、机械密封泵、磁力泵还是屏蔽泵，本质上都应证明其能够满足相应区域的检测、隔离、排液、剩余供冷和恢复要求，并通过记录检测时间、隔离范围、最低保障流量和恢复时间等指标，实现可验证、可验收。总体而言，液冷系统安全管理的重点不在于指定某一种设备，而在于明确不同区域应达到的安全目标和可接受后果。只有将这些安全边界转化为可验证、可运维的工程要求，流体系统才能在保障可靠运行的前提下，进一步承担高密度算力时代的热管理和资源协同功能。

03 余热回收利用

余热回收利用正在推动流体系统从单纯承担散热功能，逐步向热量资源协同利用的重要载体方向发展，其关键在于建立与实际需求相匹配的热量利用路径。数据中心运行过程中消耗的大部分电能最终都会转化为热量，传统冷却系统主要负责将这些热量排出，而液冷系统能够更高效地收集和传递热量，为余热利用创造条件。随着高温液冷等技术发展，数据中心具备了向建筑供热、工业用热等场景输出热能的能力，推动热量从“被动排放”向“资源利用”转变。

然而，余热利用的价值并不取决于回收热量的规模本身，而在于能否与实际需求形成有效匹配。
热源温度是否可用、输送距离是否合理、热用户需求是否稳定，以及为实现热量利用所新增的设备和运行能耗，都会直接影响项目的实际效益。因此，流体系统应在架构设计阶段提前规划余热利用路径，统筹考虑热量来源、输送条件和消纳场景，提高与外部能源系统协同运行的能力。

数据中心余热利用必须始终以保障IT供冷安全为前提。冷却系统与外部供热系统应保持适当隔离，避免外部热网运行波动反向影响服务器散热。同时，应保留独立备用排热能力，确保在余热无法利用或外部需求中断时，系统仍能稳定散热。评估余热利用价值时，不仅要关注回收热量本身，还应综合考虑热量需求、输送条件以及热泵、输送泵等新增设备的能耗，并结合PUE、WUE、CUE、ERE和运行可靠性等指标进行综合评价，避免出现“节能不节资源”“减碳不增效”或“回收热量却增加运行风险”等情况。

总体来看，余热利用的意义不仅在于回收更多热量，更在于推动数据中心由单向资源消耗向能源循环利用转变。未来，通过在保障供冷安全的前提下加强与区域能源系统协同，流体系统有望成为连接算力、能源与热能利用的重要纽带，为算力基础设施绿色发展提供新的价值空间。

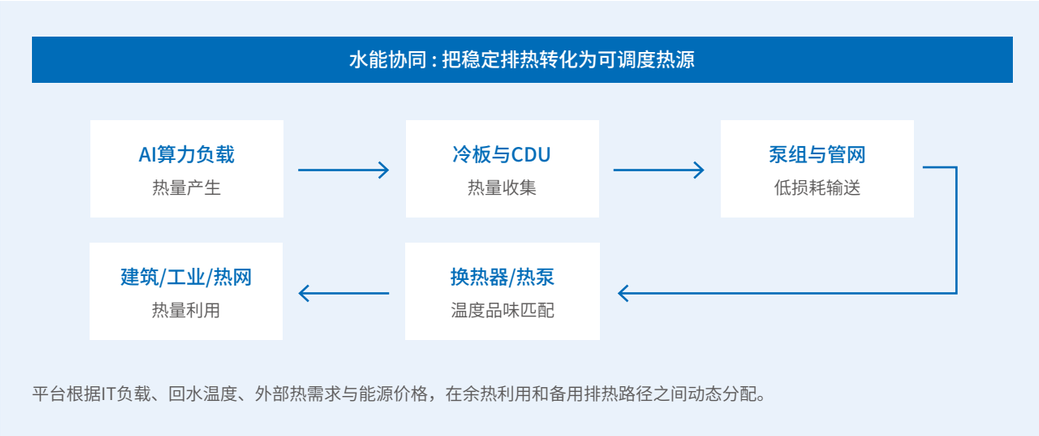

图 6 水-能协同与余热利用路径

专栏 1 ｜丹麦微软 -VEKS 数据中心余热回收项目

微软在丹麦新建数据中心，联合哥本哈根西部12市镇共建的非营利供热企业VEKS落地余热供暖合作，打造“余热收集＋热泵升温＋区域热网”的多能互补模式。项目全链路采用高效泵送系统解决方案，支撑余热回收体系的稳定运行与能效优化，助力数据中心转型为城市绿色热源。

项目采用厂内归集、热泵提温、管网输配的一体化技术路线：微软负责数据中心内余热收集装置与厂界内管网建设，精准归集IT运行产生的低温余热；VEKS项目配套建设外部管网、换热站与大型热泵系统，将低品位余热提质后输送至12个市镇终端用户，并配套3.3万兆瓦时地埋式储热设施平抑供需波动。覆盖余热收集、换热提温、热网输配全环节的高效输配泵送系统方案，以精准水力调控保障低温余热稳定输送与高效循环，降低输送环节能耗，提升系统长期运行的可靠性与经济性。数据中心全程以100%可再生能源供电，从源头保障低碳属性。

项目于2025-2026供暖季正式投运，随数据中心逐步扩容可满足近6000户居民的采暖需求，余热采购成本显著低于VEKS项目常规热源采购成本，有效减少一次能源依赖与区域碳排放，成为北欧跨行业能源协同、零碳园区多能互补的典型示范。

配套地埋式储热设施的容量	数据中心可再生能源供电比例	数据中心逐步扩容可供暖
3.3 万兆瓦时	100%	6000 户居民

3.2 流体系统的设备层关键技术

04 智能泵控协同

智能泵控协同是实现分布式按需输配、提升流体系统运行效率的重要基础能力，其核心并不在于增加更多功能，而在于将感知、决策和执行能力集成到泵设备中去，使其能够根据系统需求动态调整运行状态，实现从“固定运行”向“按需运行”的转变。在液冷系统中，泵组不仅承担冷却介质输送任务，也是连接流体状态感知和系统调节的重要执行设备。传统泵组通常由水泵、驱动设备和外部控制系统组合构成，而智能泵通过集成高效电机、变频驱动、控制器以及传感接口，可实时获取压力、流量、温度、功率和运行状态等信息，并根据实际需求调整转速、压差或流量控制模式，使供冷能力与热负载变化保持匹配。

因此，智能泵的价值不在于具备变频、通信或数字接口等单项功能，而在于能够根据回路目标自主选择和切换控制策略。不同系统可能分别以恒压差、恒温差、恒流量或负载跟随作为运行目标，智能泵根据实际工况动态调整控制逻辑，并在异常情况下自动退回预设安全工况，保障系统稳定运行。这可以很好地应对AI算力基础设施的服务器负载变化及相应的冷却需求变化，减少不必要的输配能耗，提高系统运行适应性。

值得关注的是，智能泵控协同并不等同于单台设备智能化。其最终效果仍取决于设备选型、传感器配置、控制参数整定以及与整体流体系统的匹配程度。只有将水力特性、热管理需求和故障边界纳入统一控制框架，才能真正发挥智能泵控在节能降耗、提升响应能力和支撑高密度液冷应用方面的价值。推动流体系统控制能力从中央系统向设备侧下沉，是液冷系统由静态运行向动态优化演进的重要方向，而智能泵控协同正是实现这一转变的关键基础。

表 7 智能泵控制模式及工程边界

控制模式	适用场景	主要变量	安全与整定边界
恒压差	末端压差较稳定	压差、泵速	设最低压差；校核最不利支路流量、温度、泵功
比例压差	摩阻主导的变流量回路	压差、流量	随流量降压；防末端欠流、超调和振荡
恒流/恒温/恒温差	稳流或明确热工目标	流量、供回液温度	守冷板最小流量和温度上限；传感器异常回退
IT前馈＋热工反馈	AI快变负载、温度滞后	IT功率、温度、压差/流量	限制变化速率和超调；前馈不替代热工保护
多泵级联	并联泵组、宽负荷	总流量、压差、效率	受控加减与均衡；容量调节不等同故障切换

专栏 2 ｜某浸没式液冷平台智能泵设备实践

浸没式液冷系统需要泵设备兼顾可靠循环、嵌入式监测和介电冷却液兼容性。欧洲某浸没式液冷平台的最新一代平台开发中，智能变速泵被集成至冷却回路，以简化水力系统并提供运行数据。嵌入式传感功能支持压力和温度测量，同时可利用泵两端压差估算流量，从而减少外部流量计的需求。相关运行数据有助于识别高效运行点，并在异常趋势影响系统正常运行前及时发现问题。由于介电冷却液对弹性体和泵密封件的影响可能不同，项目对冷却液样品与密封材料进行了兼容性测试。该案例表明，浸没式液冷的泵选型应综合考虑控制能力、运行可视性和材料兼容性。

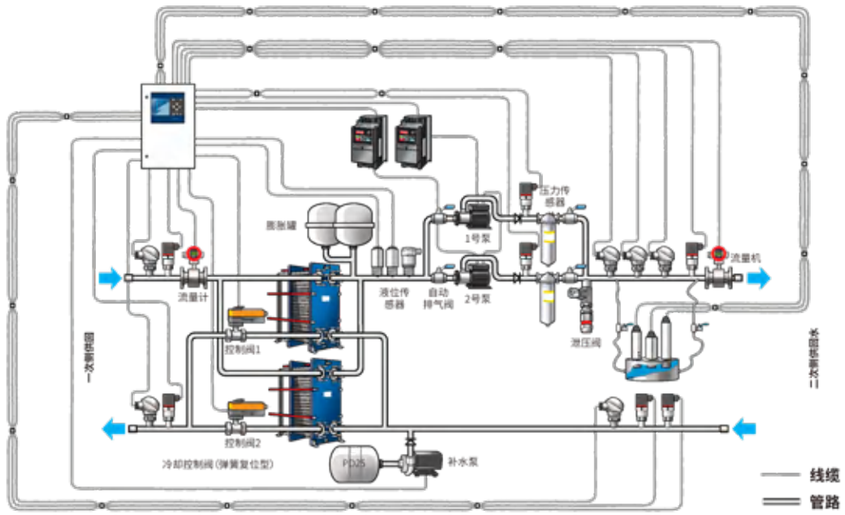

图 7 传统集中控制下的CDU控制关系

05 多层冗余容错

多层冗余容错是保障高密度算力场景连续供冷能力的重要设备层技术，其核心在于避免单一故障影响整体冷却链路。随着算力密度提升，流体系统的可靠性要求不断提高，仅依靠传统“主备设备”的设计思路已难以满足高可靠性要求，也无法完全解决系统运行风险，因为备用设备仍可能与运行设备共享电源、控制器、通信链路或关键部件。多层冗余需要从设备、控制和通信等多个维度进行协同设计：设备层可通过多泵协同、备用能力和可隔离支路提高系统应对单点故障的能力；控制层需要避免单一控制节点成为系统瓶颈，并保留必要的本地控制策略；通信层需要考虑网络异常情况下的运行模式，使设备能够在失去部分上层信息时维持必要运行状态。通过设备、控制和通信协同，流体系统能够由单一设备可靠性提升转向系统连续供冷能力提升。

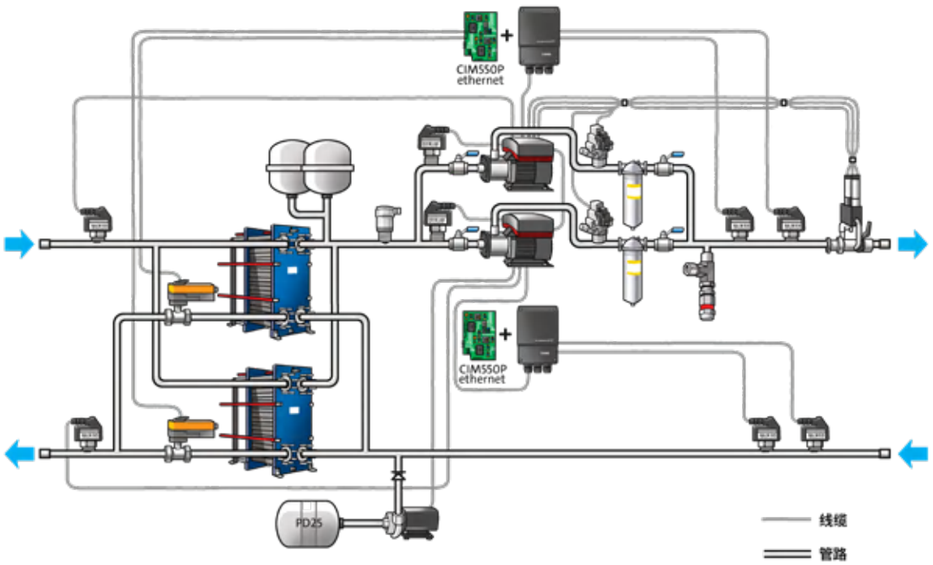

图 8 采用Syspro本地控制冗余的CDU控制关系

冗余设计的评价标准不应局限于配置了多少备用设备，而应关注系统在故障场景下是否能够持续提供必要冷量。图片的对比说明，真正的冗余不仅体现在增加一台备用泵，而在于泵、控制器或通信链路发生故障时，系统是否仍能维持供冷、保障温度边界并实现平稳恢复。水泵集成可编程控制功能仅是实现控制冗余的方式之一，仍需要结合独立供电、硬接线联锁和系统带载验证；通信恢复后应按受控斜率接管，避免压差和流量突变，形成完整的容错体系。

表 8 典型失效场景与验证要求

失效场景	最低动作与保护方式	记录与验收指标
单泵退出	启备泵，其余泵保流并防倒流	最低流量、温度越限、切换时间
控制器故障	本地/备用控制器维持安全设定	降级状态、接管/恢复时间
通信中断	本地保流保温，拒绝高风险远程指令	中断时长、告警、恢复斜率
传感器漂移	校验后切冗余、替代信号或保守值	偏差阈值、回退触发、温/流边界
过滤器堵塞	压差告警，备用/隔离，保护泵入口	压差、最低流量、气蚀、处置时间
检修/电源切换	隔离检修，独立电源/余泵保容量	可用冷量、供冷中断、恢复时间

3.3 流体系统的平台层关键技术

06 数据闭环调控

数据闭环调控是推动流体系统由经验运行向智能优化演进的重要能力，其核心是将数据持续转化为决策依据并优化系统的协同反馈和行动。随着液冷系统结构复杂度提升，仅依靠人工巡检或单点参数监测难以全面反映系统运行状态，流体系统运行过程中产生的大量数据，包括流量、压力、温度、功率、设备状态以及水质水效等信息，只有通过建立统一的数据模型进行关联分析，才能真正识别供冷能力、设备效率以及运行稳定性的变化趋势，并为运行参数优化提供依据。因此，数据闭环调控的重点不在于“看见数据”，而在于“利用数据”。平台层通过建立统一的数据模型，将不同设备、不同回路和不同层级的信息进行关联分析，识别运行偏差、发现效率损失、预测潜在风险，并将分析结果转化为运行优化建议或控制策略，使系统能够根据实际工况持续调整运行状态。

为使数据真正形成闭环，平台应围绕“感知-判断-执行-验证”的逻辑组织运行过程：首先保证数据来源可信，及时识别异常和偏差原因；其次基于分析结果形成受控调整；随后对调整效果进行验证，并持续评估温度、流量、泵功率以及冗余能力等关键指标变化。与此同时，跨设备数据还应统一时间基准、设备编码、计量单位和质量标识，避免由于数据不同步或异常值导致误判。

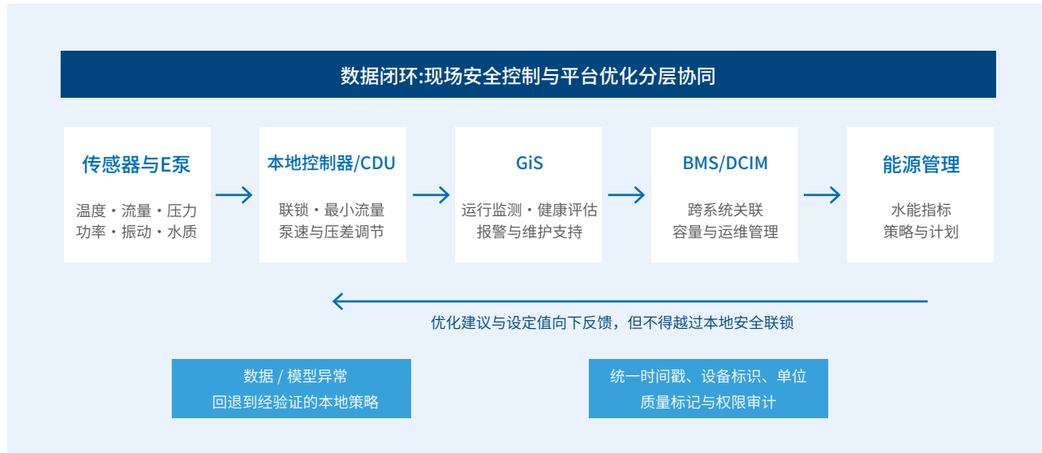

图 9 数据闭环架构图

需要强调的是，数据闭环并不意味着所有控制都集中到平台完成。设备本地仍应承担安全联锁、最低流量和温度保护等基础功能，CDU或区域控制器负责秒级到分钟级调节，而平台层主要负责运行优化、容量预测和维护决策。在数据异常或通信中断情况下，系统应自动退回经过验证的本地控制策略，确保供冷安全不依赖上层平台。

数据闭环调控的最终目标不是建设数据平台，而是建立持续优化能力。

通过长期运行数据积累，流体系统不仅能够管理设备状态，更能够管理介质状态、运行效率和系统健康水平，实现从事后发现问题向提前识别风险、从定期维护向预测维护、从经验管理向数据驱动管理的转变，为高密度算力基础设施长期稳定运行提供支撑。

专栏 3 ｜泵控与远程运维平台实践

分层泵控平台能够把现场自学习调节、上位机协同和远程运维连接为持续优化闭环。四川某大型数据中心面向高密度算力负荷，在冷却系统中部署高效泵组、专用泵控器、上位机接口和远程监控平台。现场控制器根据压力、流量、运行频率和能耗等数据自学习修正泵组运行曲线，实时选择投入泵数与运行频率；上位机在不越过现场安全联锁的前提下汇总运行状态并协调系统设定值；远程平台持续记录能耗、告警和设备健康信息，用于异常预警和维护计划。平台同时保留通信异常时的本地运行策略，避免上层数据中断影响必要供冷。项目实现全天候稳定运行并降低冷却输配能耗，表明平台层的价值不是替代设备控制，而是把现场执行、跨设备分析和全生命周期运维形成可验证闭环。

07 介质全周期管理

冷却介质状态会影响材料兼容性、换热性能和系统长期可靠性。因此，应将水质、颗粒物、介质老化以及冲蚀、堵塞和气蚀等风险纳入持续管理，并结合系统寿命开展验证评价。这些内容属于一般工程原则，而非对某项具体商业服务的描述。

基于此，介质全生命周期管理成为流体系统平台层建设的重要内容。冷却介质状态、水质变化及污染物累积不仅影响换热效率，也关系到设备可靠性和系统寿命。平台层通过持续监测和分析介质状态、水质指标及过滤运行情况，建立介质运行基线，实现异常识别、趋势分析和优化决策。通过将介质管理从定期检查升级为持续监测和全生命周期管理，可提升流体系统运行状态的可预测性和可控性，为高密度算力基础设施长期稳定运行提供支撑。

表 9 介质风险、监测与验证要点

风险维度	监测重点	验证与处置
流动与水力	流量/流速、过滤器压差、入口压力、气蚀	校核最大流速/NPSH；压差告警、过滤清洗
材料兼容性	金属腐蚀、弹性体溶胀、聚合物老化、析粒	按介质/材料/温度/寿命做浸泡、热循环、密封验证
介质状态	黏度、酸值、颗粒、析出物、水质、介电性	建基线和限值；趋势决定净化、加药或更换
维护闭环	处置前后压差、换热、流量及介质指标	复测归档；修正运行基线和维护策略

介质管理必须形成“建立基线-持续监测-状态诊断-净化、加药或更换-复测-归档”的完整流程。每次取样、补液、滤芯更换或材料变更都应记录处置前后结果，并更新运行基线和维护策略，使图片所示过程可验证、可追溯。

图 10 冷却介质全生命周期管理闭环

除技术冷却介质管理外，设施侧水资源管理也是流体系统全生命周期管理的重要组成部分，必须协同运行。其管理范围覆盖取水、处理、补水、循环、排放和回用等环节。算力集群规划建设项目应结合区域水资源条件选择适宜水源，并依据水质要求配置相应处理工艺；运行阶段持续监测补排水平衡、水资源利用效率及水质变化情况，控制微生物、结垢和腐蚀等风险。设施侧水资源管理与技术侧介质管理相互影响、协同作用，但管理目标和关注对象不同，前者强调水资源安全与高效利用，后者强调换热性能、材料兼容性与系统可靠性，两者共同支撑流体系统长期稳定运行。层级关系见下表。

表 10 水资源闭环与介质管理的层级区别

层级	关注对象	关键问题
设施侧	水源和补水	市政/再生/雨水/中水及补水水质
系统侧	FWS/TCS回路	过滤、软化 / 反渗透、加药、压降、可靠性
介质侧	冷却介质	兼容性、腐蚀、颗粒、黏度、老化
环境侧	排水和余热	WUE、ERE、排污水及余热回收利用

未来，流体系统管理将从单点设备优化逐步走向系统级协同，从单一散热保障走向算力、能源和水资源协同配置，从经验运维走向数据驱动的全生命周期管理。数据中心的竞争力不仅取决于算力规模本身，也越来越取决于其能否通过高效输配、智能调控和资源协同，以更低资源消耗支撑算力持续增长。流体系统的价值，也将从保障冷却运行进一步延伸为支撑绿色算力发展的关键基础能力。

第四章

流体系统支撑绿色算力基础设施的典型实践

04

4.1 智能泵赋能高效液冷，实现高密算力节能稳定运行 36

4.2 流体架构系统优化，推动算力中心全域节能升级 38

4.3 水-能资源协同利用，构建绿色算力循环体系 39

4.4 流体系统优化改造，盘活传统数据中心节能潜力 40

近年来，行业已形成一批具有代表性的实践案例，涵盖智能泵系统应用、液冷系统优化、水循环利用、余热回收、高可靠液冷运行以及存量数据中心改造等场景。这些案例展示了流体系统从单一设备支撑向系统级优化能力升级的发展趋势，也为绿色算力基础设施建设提供了实践参考。

4.1 智能泵赋能高效液冷 实现高密算力节能稳定运行

NorthC数据中心：智能流量调控适配高功率芯片液冷场景

随着AI和高性能计算应用不断普及，服务器芯片功耗持续攀升，传统风冷系统在散热效率和能耗控制方面的短板日益凸显。NorthC作为荷兰头部数据中心运营商，在超过10座数据中心的运营过程中持续推进高效液冷技术部署，并提出2030年实现碳中和运营的发展目标。

在埃因霍温高科技园区的数据中心项目中，NorthC采用芯片级直冷(Direct-to-Chip Cooling)技术路线，通过冷却模块直接覆盖服务器主要热源，依托封闭式水循环系统将热量快速带出机柜。项目配套智能温控与流量调节系统，可根据服务器实时负载动态调节供液流量与供回水温度，实现温度、流量的高精度协同控制。相较传统风冷方案，液冷系统散热能力提升约4倍，可适配单机柜300至500kW超高功率部署需求。

图 11 NorthC 数据中心智能流量调控现场

真视通智算中心：泵驱两相液冷背板级散热低碳实践

随着高性能GPU在人工智能训练和推理场景中的广泛应用，单芯片功耗和机柜功率密度持续提高，传统风冷和单相液冷系统面临换热效率低和能耗压力大等痛点。为适应高密度智算中心建设需求，真视通智算中心引入泵驱两相液冷背板级散热方案，探索新型液冷技术路线。

该项目配套应用芯片+背板一体化泵驱两相液冷散热技术，依托液-气相变潜热高效散热，其微通道两相流换热系数达65000W/(㎡・K)，换热性能为单相液冷20倍、风冷1000倍，可承载单芯片1500W超高散热负荷。该技术可精准调控芯片温度，冷却工质流量仅为单相液冷的10%、风冷的1%，通过流体系统精细化优化，大幅降低散热输配能耗，项目设计PUE低于1.20，搭配芯片级散热方案的新建场景最优PUE可降至1.10。依托技术创新，项目实现节能、节水、经济多重效益。系统采用无水运行设计，WUE为0，减少水资源消耗；同时可实现100%余热回收，余热温度超45°C，系统少维护、安全性高、噪音低，投资回报周期仅2年。

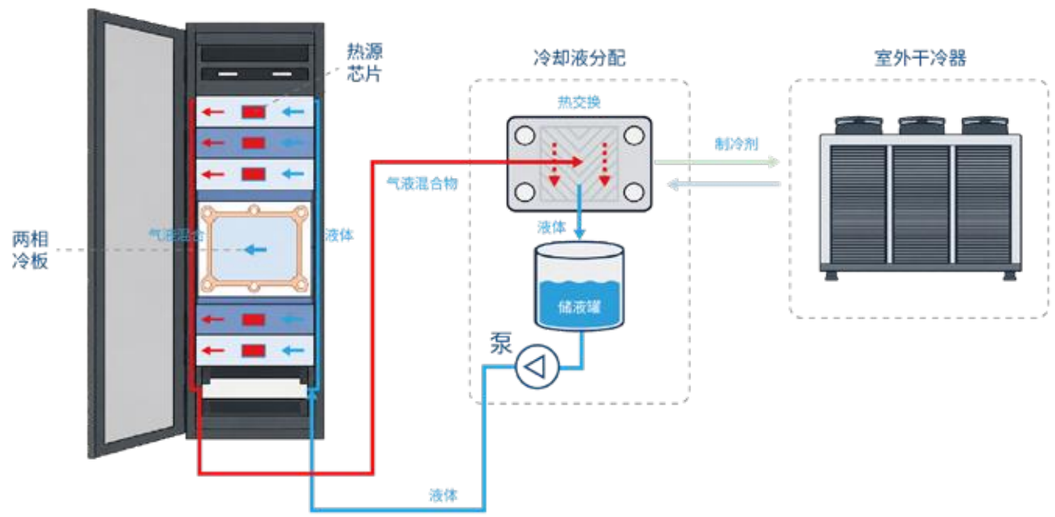

图 12 芯片级泵驱两相液冷冷板散热系统

新建场景最优PUE可降至

1.10

投资回报周期

2 年

4.2 流体架构系统优化 推动算力中心全域节能升级

土耳其某数据中心：分布式泵架构流体系统优化实践

随着算力中心规模扩容与业务负载持续提升，传统集中式冷却系统逐渐暴露出阀门节流损耗大、水力平衡难度高和响应速度不足等问题。土耳其Tier III级数据中心在建设阶段，通过重构冷却输配架构，实现系统能效与运行稳定性的双重升级。

该项目总面积约11838平方米，IT总容量4MW，可用机房面积约1500平方米，已获得Uptime Institute Tier III及LEED Gold双认证。项目摒弃传统集中泵组加动态平衡阀的控制模式，采用分布式泵冷却架构，为数十套风墙空调机组分别配置独立变频泵。以主动流量控制替代阀门节流控制，可根据实时热负荷精准分配冷却流量，有效降低管路压降损耗，提升流体控制精度。

经项目自测，该方案相较传统冷却控制模式，可降低冷却系统整体能耗约15%，同时显著提升系统负载响应速度与水力平衡水平。该案例验证了通过输配架构与流体控制策略优化，可推动数据中心节能从单一设备节能向全域系统节能升级，为高密度算力基础设施建设提供了全新工程思路。

可降低冷却系统整体能耗约

15%

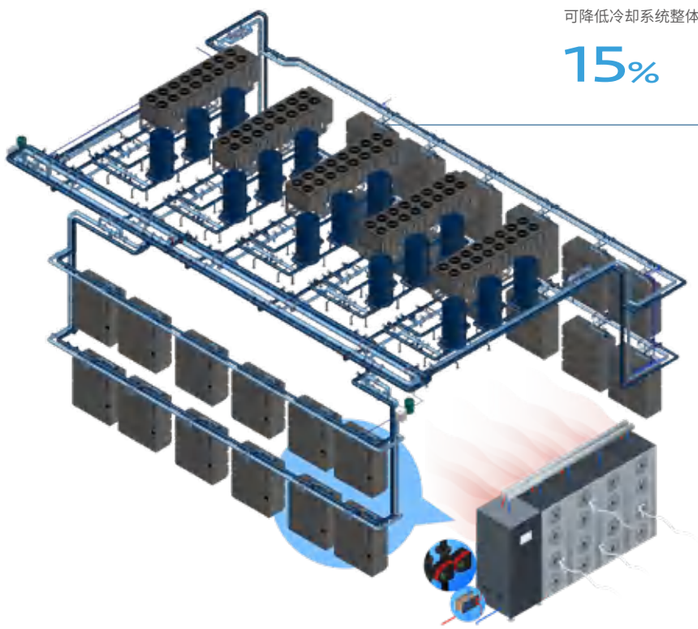

图 13 土耳其某数据中心系统结构设计

4.3 水-能资源协同利用 构建绿色算力循环体系

德国某超算中心：温水直接液冷赋能极致PUE的低碳

作为欧洲新一代百亿亿次级超级计算平台，该超算中心IT负载高达27MW，散热压力巨大，同时需满足能效优化、低碳排放的建设目标，传统风冷方案无法适配超高密度算力的长期稳定运行需求。

该项目采用25MW温水液冷搭配2MW空气冷却的复合型冷却架构，依托预制化模块化设计、温水直冷技术和余热回收系统，实现算力基础设施冷却系统高效运行。项目全部采用绿色电力供能，配置大功率热泵设备，可将服务器产生的低品位热能转化为区域可利用热源。项目同时搭建分布式智能泵控和实时监测体系，实现冷却介质温度、压力、流量的精准调控。

项目配套建设约40°C低温区域供热网络，超算余热直接用于建筑供暖，部分场景通过热泵升温至约70°C高效利用。经项目自测PUE可达到1.05至1.08，每年可减少二氧化碳排放约5000吨，现阶段余热利用率达20%，未来规划余热利用率提升至50%。

PUE可达到

1.05-1.08

每年可减少二氧化碳排放约

5000吨

余热利用率

20% → 50%

图 14 德国某超算中心温水直接液冷系统现场

4.4 流体系统优化改造 盘活传统数据中心节能潜力

QNB Finansbank数据中心：存量机房提效改造实践

随着行业绿色低碳标准持续升级，大量运营年限较长的传统数据中心面临能效提升需求。土耳其QNB Finansbank数据中心在稳定运行13年后，启动能效升级改造项目，在保障业务不间断运行的前提下，全力降低制冷系统能耗、挖掘存量机房节能潜力。

项目摒弃原有制冷剂循环冷却系统，采用“干式冷却器+机房精密空调+自然冷却”的复合型冷却方案，同步配置15台IE5超高能效智能变频双头泵。系统可根据室外环境温度自动切换自然冷却运行模式，从冷却系统架构、流体输配设备双维度实现用能效率升级。

图 15 QNB Finansbank 数据中心存量机房改造现场

改造完成后，数据中心制冷能耗降幅超50%，PUE由1.52优化至1.21，同时实现制冷能力提升、碳排放下降与运行可靠性增强多重成效。该案例通过冷却架构调整和流体输配系统优化提升能效，为存量数据中心绿色改造提供了重要的实践参考，为传统数据中心绿色低碳转型提供了经济高效的改造路径。

数据中心制冷能耗降幅超

50%

PUE优化

1.52 → 1.21

第五章

未来发展趋势及建议 05

5.1 未来发展趋势 42

5.2 建议 43

5.1 未来发展趋势

xUE指标协同管控将进一步深化，水-能协同产业生态持续完善。

随着高密度算力与液冷技术规模化落地，算力基础设施绿色低碳发展正从单一能耗管控，转向涵盖能效、水效等多指标的xUE协同治理模式。华为、阿里、微软、AWS等国内外头部算力企业已率先布局水-能协同绿色算力体系建设，创新智能流体调优、高效自然冷却、非传统水源循环复用核心技术，搭建覆盖全园区的能耗水耗数字化管控与联动调度平台，打破传统单一节电、单一节水的碎片化运维模式，同步实现冷却系统用能压降与水资源高效循环，为行业xUE一体化治理提供了可落地的标杆实践。生态建设方面，行业正加速构建多方协同体系，打通数据中心运营、工程设计、设备研发、科研创新等产业链主体，逐步统一液冷流体系统技术规范、数据交互标准与综合评价体系。未来，行业将持续统一绿色算力评价规则，完善流体系统全流程监测与统计机制，依托水-能协同示范工程串联政策、技术与应用链条，形成标准统一、产业联动、落地可控的绿色算力流体产业生态。

泵及水力输配系统成为算力中心性能与能效升级核心底层支撑，节能与安全管控一体化升级。

随着高密度AI负载增加和液冷应用范围扩大，水力输配系统对冷却能耗、运行稳定性和调节能力的影响更加突出，输配系统设计、调控与可靠性将成为重要技术方向。未来算力中心将进一步普及分布式智能泵系统，在CDU设备研发、冷却管网规划阶段，集成智能传感设备与标准化数据接口，依托泵组动态变频、精准调流能力，匹配算力负载实时波动，大幅提升水电资源适配效率。与此同时，行业将构建输配系统安全管控体系，围绕泵组冗余配置、冷却液材料兼容、管路泄漏防护、设备在线预警开展一体化设计，配套精细化水质管理与设备健康监测机制，有效规避管路渗漏、水质劣化、泵组异常停机等风险，实现水力系统节能降耗与安全稳定双向保障，破解高密度算力场景能效与安全的平衡难题。

新建项目高标准落地与存量系统化改造同步实施，推动算力基础设施实现全生命周期绿色低碳发展。

未来算力基础设施绿色发展将形成“新建提质+存量焕新”双向并行的常态化发展趋势，流体系统水-能协同优化贯穿数据中心规划、建设、运维、改造全生命周期。新建智算、超算枢纽节点将进一步推行风液融合架构，搭配智能泵组精细化流体调控方案，打造适配高密度算力的水-能协同标杆项目，形成可复制、可推广的风液融合架构设计、运维、管控标准。针对大量存量传统数据中心冷却系统老旧、流体调控能力不足、泵组输配系统能耗高等问题，行业将逐步进入存量设施提质升级阶段，通过升级高效智能泵组、优化输配管网、搭建全域能耗水耗监测体系，持续盘活存量算力资源、降低运维能耗。新建高标准建设与存量精细化改造双向发力，将持续压降行业整体能耗、水耗水平，全面提升国内算力基础设施流体系统的绿色化、标准化运行水平。

5.2 建议

从行业层面来看，我国算力基础设施绿色产业需持续完善流体系统标准体系与产业协同机制，全方位夯实算力中心绿色低碳发展的行业基础。

进一步健全PUE、WUE等xUE指标协同管控标准，推动能耗、水耗等核心指标的统计口径与评价规范。聚焦算力基础设施流体输配核心环节，强化泵系统流量、水温、压力、能耗等基础数据采集能力，搭建全维度数据监测机制，推动绿色运行数据标准化。此外，需构建多方联动的产业协同生态，联动CDU厂商、流体设备企业、数据中心运营商、设计院及科研机构搭建行业协同平台，统一泵组及输配系统技术要求、数据接口与评价标准。通过落地标杆示范项目，总结可复制的绿色技术应用经验，建立常态化行业交流合作机制，持续凝聚行业共识，推动政策、技术、应用深度协同发展。

从技术层面来看，聚焦流体系统升级优化与全流程风险管控，实现系统能效与运行可靠性双向提升。

推广分布式智能泵系统与优化型水力输配架构，在CDU整机设计、冷却系统规划中集成智能传感设备与标准化接口，强化系统动态调节能力，精准匹配高密度算力负载需求，提升能源与水资源利用供需匹配效率。针对液冷规模化应用场景，需建立系统化可靠性保障与风险防控体系，将泵系统冗余设计、冷却液兼容适配、泄漏风险管控、在线监测及故障预警机制深度融合，筑牢高算力场景稳定运行根基。同时，强化水质精细化管理与设备运行健康监测，规避水质劣化、设备异常带来的能耗攀升与安全隐患，通过系统级整体优化，破解节能增效与安全运行的矛盾，实现绿色、高效、稳定的一体化发展。

从实施层面来看，需坚持新建优化与存量改造并行，加快推进数据中心全生命周期绿色升级迭代。

一方面，持续推进液冷系统、智能泵组等绿色技术示范项目落地，聚焦系统级能效优化打造标杆工程，形成标准化、可复制、可推广的建设与运维实施路径，以点带面推动行业整体技术升级。另一方面，重点推进存量数据中心节能改造工作，针对传统冷却系统能耗高、水效低、调控能力弱等痛点，针对性开展水力输配系统、制冷设备、监测体系的迭代升级，盘活存量算力基础设施资源。通过新建项目高标准落地、存量项目精细化改造的双向发力，补齐传统算力中心绿色发展短板，持续压降整体能耗与水耗，全面提升我国算力基础设施整体绿色低碳发展水平。

© 格兰富控股公司 2026.09

格兰富(中国)投资有限公司
中国北京市海淀区海淀大街3号
鼎好DH3大厦A座9层903室
邮编：100080
www.grundfos.cn

格兰富
GRUNDFOS

CAICT
中国信通院