

中国数据中心冷却技术 年度发展研究报告 2025

中国制冷学会数据中心冷却工作组 组织编写



中国建设科技出版社有限责任公司

China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 . 2025/
中国制冷学会数据中心冷却工作组组织编写 .
北京: 中国建设科技出版社有限责任公司, 2026. 3
ISBN 978-7-5160-4697-5

I. TB6

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026M3U777 号

中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2025
ZHONGGUO SHUJU ZHONGXIN LENGQUE JISHU NIANDU FAZHAN YANJIU BAOGAO 2025
中国制冷学会数据中心冷却工作组 组织编写

出版发行: 中国建设科技出版社有限责任公司

地 址: 北京市西城区白纸坊东街 2 号院 6 号楼

邮 编: 100054

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京印刷集团有限责任公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 14

字 数: 350 千字

版 次: 2026 年 3 月第 1 版

印 次: 2026 年 3 月第 1 次

定 价: 68.00 元

本社网址: www.jskjcs.com, 微信公众号: [zgjskjcs](https://weixin.qq.com/r/zgjskjcs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 63567684

本书如有印装质量问题, 由我社事业发展中心负责调换, 联系电话: (010) 63567692

本书编委

主任：江 亿

副主任：邵双全 李 震 陈焕新 李红霞 荆华乾

委 员：刘圣春 吴 伟 张 泉 陈孝元 罗海亮

周 峰 郑竺凌 胡孝俊 姜宇光 袁卫星

黄冬梅 黄 翔 韩宗伟 谢晓云 赵国君

张晓宁



参编名单

第1章 陈焕新 刘存 张雪

1.1 陈焕新 刘存

1.2 陈焕新 张雪

1.3 陈焕新 蒋敏辉 张同乐

第2章 李震

2.1 李震 王露

2.2 李震 王露

2.3 李震 王馨翊

2.4 李震 王馨翊

2.5 李震 王露

第3章 黄冬梅

3.1 韩泽磊 周峰 胡玉祥

3.2 龚红超 胡孝俊 王宁波

3.3 郑品迪 刘晴晴

3.4 韩泽磊 周峰

3.5 韩泽磊 李曼洁

第4章 姜宇光 罗海亮

4.1 李自勇 王泽青 安林焱

4.2 肖伦 康蕾蕾 马生麒 薛征 葛海洋 何东波 陈博华

4.3 唐华 朱慧 陈航 王媛媛

4.4 钟志鲲 胡孝俊 朱旭 徐以恒 逯海堂

4.5 李自勇 姜宇光 吴莉

第5章 邵双全 郭玉洁 刘与周 郭焱华 陈壮 张晓宁

5.1 胡孝俊 李世龙 郭玉洁

- 5.2 苗 华 郭玉洁
- 5.3 章玮玮 刘与周
- 5.4 李福金 郭焱华
- 5.5 黄 茜 郭焱华
- 5.6 黄 茜 郭焱华
- 5.7 黄 茜 郭焱华
- 5.8 胡婷婷 郭焱华
- 5.9 陈 航 陈 壮
- 5.1 罗莉莉 田泽琦 陈 壮

第6章 郑竺凌 赵国君

- 6.1 马宇晴 张建雪 侯晓雯
- 6.2 周少博 温晓军 周 理 赵璐璐 谢殿帼 严锦程 田 博
- 6.3 周 峰 郭玉洁
- 6.4 黄 赧 董一鸣 葛 鸽 孙海峰
- 6.5 程 光 张思秀 张 力 李 钊 罗 焯 韦程烜



前 言

数字经济作为科技革命和产业变革的前沿阵地，是支撑新质生产力蓬勃发展的重要力量，而数据中心作为算力基础设施的核心载体已成为数字经济发展的引擎，正快速迈入以高密度、高能效与智能化为特征的新发展阶段，在国家“双碳”战略布局中具有举足轻重的地位。近年来，生成式人工智能、大模型训练、边缘云与智能制造等业务规模高速扩张，算力需求呈指数级增长，随之而来的是设备级热流密度持续攀升、机架功率密度快速提升以及运行负荷呈现更高波动性的趋势，使得冷却系统迎来新的挑战，在此背景下，室内末端技术与输配系统效率成为制约数据中心整体能效提升的核心环节。

为全面总结数据中心冷却系统现状、冷却技术发展方向、不同冷却技术的工程应用等，中国制冷学会数据中心冷却工作组从2016年起，每年出版《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》，该系列报告不仅为中国数据中心行业的技术发展提供了翔实的记录与清晰的脉络，更通过其深度的剖析与前瞻的视角，深刻影响着产业的技术路线选择和创新方向。为了系统呈现我国数据中心冷却技术在“末端及输配系统”领域的研究进展、工程实践与未来趋势，工作组再次组织相关领域的专家、学者及企业代表，编写完成了《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告2025》，本报告在延续往年框架的基础上，重点围绕末端及输配系统展开，并辅以大量工程案例为行业发展提供系统性参考。

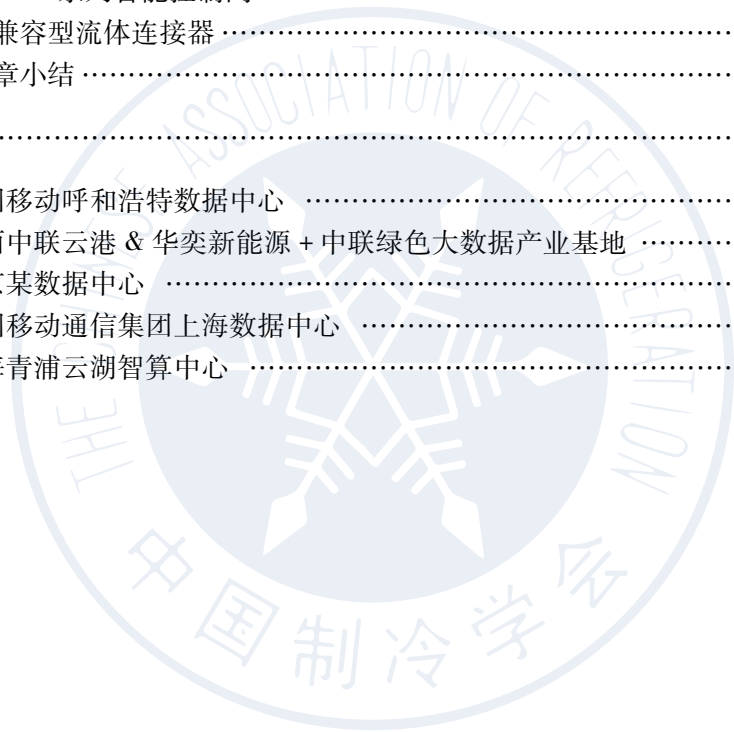
报告第1章概述了数据中心及其冷却技术年度发展的总体概况；第2章涵盖了末端及输配系统的基本问题与进展，详细介绍了末端及输配系统的构成、冷源利用及存在问题；第3章聚焦于数据中心末端设计与调优，分别从房间级、行间级、机柜级及混合冷却末端展开总体概述，并对末端调优进行介绍；第4章聚焦于输配系统形式与优化设计，分别从管网、泵、阀门和输配系统调优展开介绍；第5章重点介绍了典型末端及输配产品；第6章精选多个代表性数据中心的实际运行案例进行剖析，总结经验并探讨未来改进方向。本书旨在帮助行业相关人员全面理解末端散热与输配系统的最新研究与应用趋势，为规划设计、系统集成与技术研发提供专业参考。

中国制冷学会数据中心冷却工作组成员单位对本书的编写工作给予了大力支持与辛勤付出，在此致以衷心的感谢！书中存在的不足或疏漏之处，恳请各位专家和读者批评指正，以帮助我们不断完善和改进。

目 录

第 1 章 数据中心年度发展概况	1
1.1 中国数据中心及冷却系统发展状况	1
1.2 全球数据中心新变化	14
1.3 国内数据中心冷却系统政策及发展趋势	23
参考文献	34
第 2 章 末端及输配系统的基本问题	37
2.1 冷却传热过程及信息设备基本参数	37
2.2 末端定义与构成	42
2.3 输配系统类型与结构	48
2.4 冷源特点及自然冷源利用过程	51
2.5 当前存在的核心问题	54
参考文献	62
第 3 章 数据中心末端设计与调优	64
3.1 房间级末端	64
3.2 行间级末端	78
3.3 机柜级末端	87
3.4 混合冷却（风冷 + 液冷）机房末端	95
3.5 空调末端 AI 调优	101
3.6 本章小结	106
参考文献	106
第 4 章 输配系统形式与优化设计	108
4.1 管网系统	108
4.2 泵与泵组特性	129
4.3 阀门与阀组特性	142
4.4 输配系统运行调优	154
4.5 本章小结	163
参考文献	163

第 5 章 末端与输配系统产品	165
5.1 风水混合末端	165
5.2 SDP 饱和汽液两相制冷剂泵	166
5.3 热管理承压屏蔽泵	170
5.4 定压补水真空脱气装置	172
5.5 BXC 不锈钢紧凑型卧式端吸离心泵	173
5.6 BCES 永磁大流量屏蔽离心泵	175
5.7 Medana 大流量卧式多级离心泵	176
5.8 云模舱	177
5.9 W-SCBV 系列智能控制阀	179
5.10 可兼容型流体连接器	181
5.11 本章小结	183
第 6 章 案例	184
6.1 中国移动呼和浩特数据中心	184
6.2 山西中联云港 & 华奕新能源 + 中联绿色大数据产业基地	201
6.3 北京某数据中心	204
6.4 中国移动通信集团上海数据中心	208
6.5 上海青浦云湖智算中心	210



第 1 章 数据中心年度发展概况

1.1 中国数据中心及冷却系统发展状况

近年来，中国数据中心市场已进入规模扩张与质量升级并行的快速发展阶段，在全球数据中心产业格局中的重要性日益凸显。随着数字经济深化、人工智能技术突破以及“新基建”的持续赋能下，作为数字基石的数据中心，不仅在总体量上快速攀升，在空间上的资源配置也日趋合理与高效。本节将聚焦于中国数据中心产业的整体发展动态及其制冷技术的应用进展。

1.1.1 中国数据中心市场规模及区域分布

当前随着全球 AI 发展及通用人工智能研究竞争的加剧，数据中心行业起着越来越重要的作用，其市场需求出现了稳步增长的趋势。中商产业研究院发布的《2025—2030 年中国数据中心建设市场需求预测及发展趋势前瞻报告》显示，2023 年中国数据中心市场规模为 2407 亿元，2024 年为 2773 亿元，2025 年中国数据中心市场规模预计可达 3180 亿元，如图 1.1-1 所示。从 2023 年开始，数据中心市场规模的增速逐年放缓，但仍保持在 14% 以上，总体规模在逐年稳步扩大，这也预示着中国数据中心在中国新基建战略和数字化产业战略中正逐渐向高质量发展迈进。

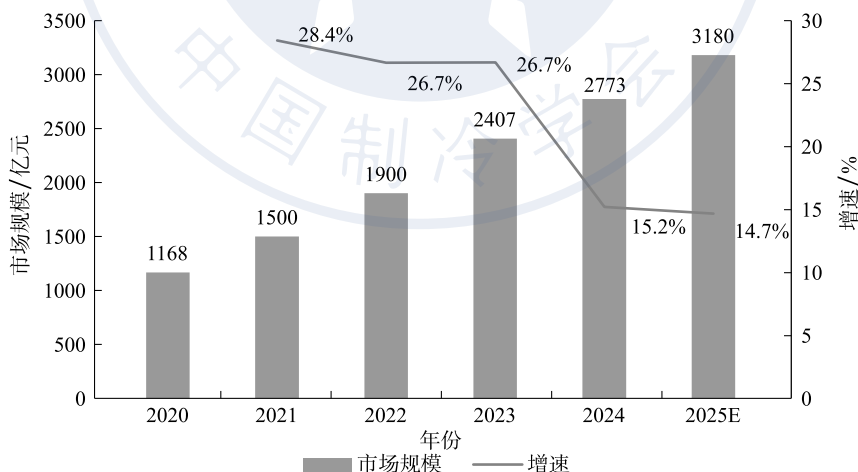


图 1.1-1 2020—2025 年中国数据中心市场规模预测趋势

注：图中 E 表示预测值。

数据中心产业链包含上、中、下游多个环节。其中，上游为产业提供物理载体；中游则通过专业的建设与运维，将基础资源转化为高效、可靠的服务能力；下游各行业的数字化进程，则构成了产业链持续迭代的根本驱动力。各个环节技术协同，紧密互动，

共同推动了数据中心行业不断进步。

数据中心上游主要包含 IT 设备、电源设备、精密空调、动环监控系统等。以上游 IT 设备中最重要的交换机为例，中商产业研究院发布的《2025—2030 年中国交换机行业市场前景预测与发展趋势研究报告》显示，交换机在中国网络设备市场占据了大部分的市场份额。如图 1.1-2 所示，2024 年中国交换机的市场规模达到约 424 亿元，2025 年市场规模预测将增至约 445 亿元，持续多年连续增长，这也与数据中心的发展情况保持一致。

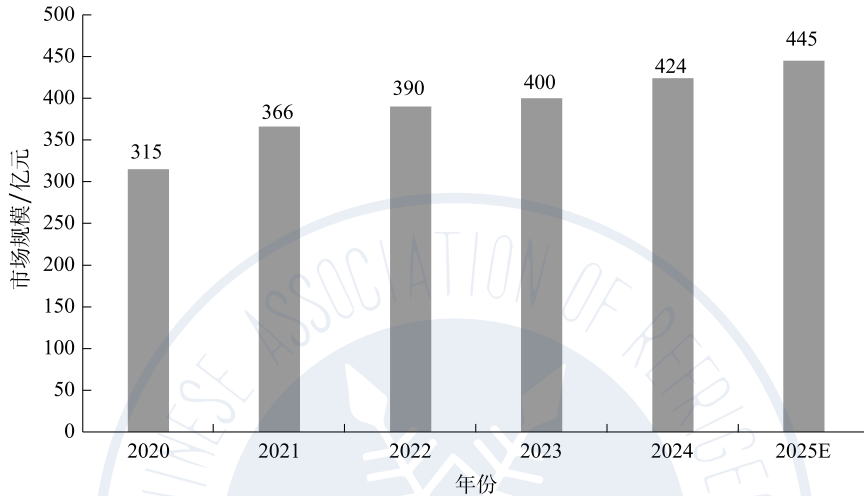


图 1.1-2 2020—2025 年中国交换机市场规模预测趋势

注：图中 E 表示预测值。

国内的三大电信运营商属于产业链中游。2024 年通信业统计公报显示，截至 2024 年底，三家基础电信企业向公众提供服务的互联网数据中心机架数量达 83 万个。中国信息通信研究院发布的《中国第三方数据中心服务商分析报告》显示，2022 年三大电信运营商总体数据中心业务市场份额占比约为 48.32%，其中中国移动占比约为 14.70%，中国联通占比约为 14.35%，中国电信占比约为 19.27%。同期第三方数据中心服务商的市场份额已达到 51.68%，具体份额分布可参考图 1.1-3。值得关注的是，近年来第三方服务商在业务能力与行业影响力方面持续增强，其市场地位不断提升，已在整体规模上实现对传统运营商的领先。

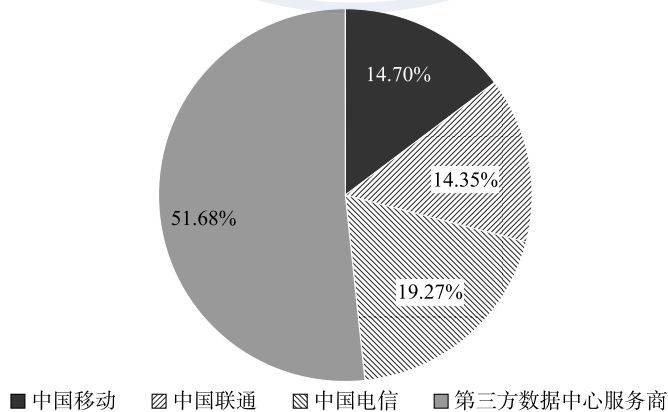


图 1.1-3 2022 年三大电信运营商及第三方数据中心服务商数据中心市场份额占比情况

产业下游则是各行业的数据中心服务需求商。以政府机关为例，其政务行业数据中心是其政务数据平台的数据存储与处理中心，这可以有效提升数据的可用性和互操作性，为政府机关的数据平台提供强大的支持，推动数字政府建设。《中国互联网络发展状况统计报告》的数据表明，以数据中心为支撑搭建的在线政务服务平台，其访问人数呈现出逐年稳步增长的态势，如图 1.1-4 所示。正是因为数据中心规模的连年增长才能够满足在线政务服务的扩张需求。

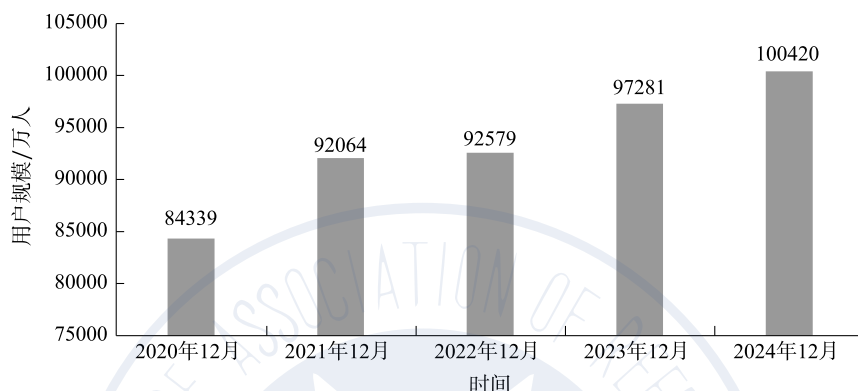


图 1.1-4 2020 年 12 月—2024 年 12 月中国在线政务用户规模统计情况

随着生成式预训练变换器（GPT）、深度求索（DeepSeek）等系列模型、多模态 AI、无人驾驶、行业专用模型加速落地，以大模型训练与生成式 AI 为代表的新型应用正推动着算力需求呈指数级增长，当前 AI 算力成为数据中心扩容的核心焦点。《2025 综合算力指数》数据显示，截至 2025 年 6 月底，我国在用算力中心机架总规模达 1085 万标准机架，智能算力规模达 788 EFLOPS（FP16，1 EFLOPS=10¹⁸ FLOPS）。与 2021 年底的 520 万标准机架相比，4 年间机架规模增长 108.7%，翻了一番多，呈现出爆发式增长态势。东兴证券发布的《通信 IDC 行业：进入 AIDC 发展阶段，高景气有望超过 3 年》显示，2018—2024 年，国内数据中心行业在用算力中心标准机架数由 226 万增长至 880 万，复合增长率达到 22.1%，如图 1.1-5 所示。从长周期看供给，算力中心总规模在稳步扩大，市场正逐步进入成熟发展阶段。

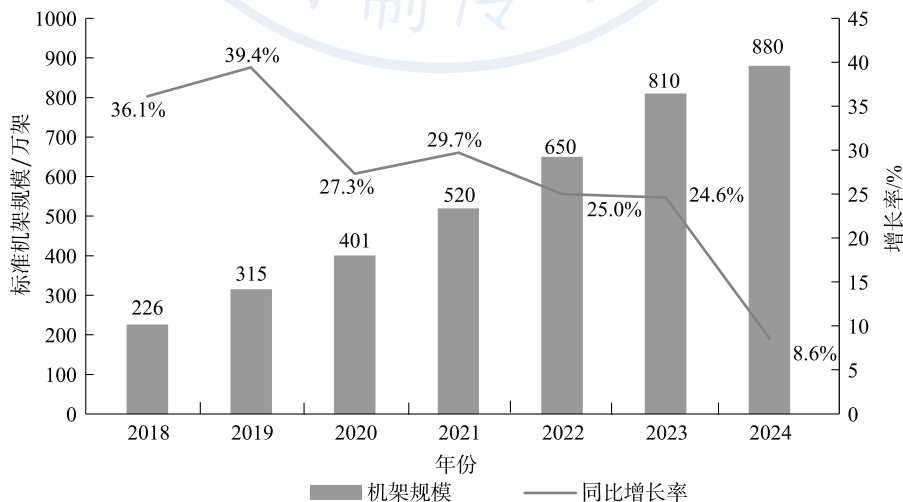


图 1.1-5 2018—2024 年国内数据中心在用算力中心标准机架规模

当前，全球人工智能大模型、无人驾驶等领域的竞争日趋激烈，其兴起与竞争持续推高算力需求。在这一需求的强劲驱动下，中国算力规模已迈入快速增长通道，智能算力与通用算力均呈现迅猛发展态势。而这一发展态势，也在一定程度上推动我国数据中心的算力规模实现快速提升。《2025 综合算力指数》显示，截至 2025 年 6 月底，我国已发布 1509 个大模型，在全球已发布的 3755 个大模型中数量位居首位。国际数据公司（IDC）与浪潮信息联合发布的《2025 年中国人工智能算力发展评估报告》显示，2024 年我国智算市场规模为 190 亿美元，同比增长 86.9%，这为大模型研发和应用提供了坚实的硬件支撑。此外，2024 年，中国智能算力规模已达 725.3 EFLOPS（FP16）；到 2025 年，中国智能算力规模预计将达到 1037.3 EFLOPS（FP16），如图 1.1-6 所示，凸显智能算力在 AI 浪潮下的爆发式增长潜力。嘉世咨询的《数据中心行业简析报告 2025》显示，中国通用算力规模在 2026 年也将升至 110 EFLOPS（FP64），如图 1.1-7 所示，这显示出了中国的通用算力同智能算力一样也在稳步的增长。

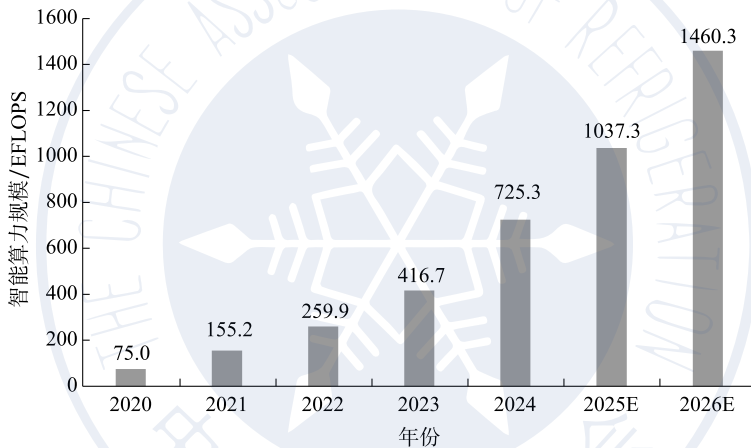


图 1.1-6 中国智能算力规模及预测（基于 FP16 计算）

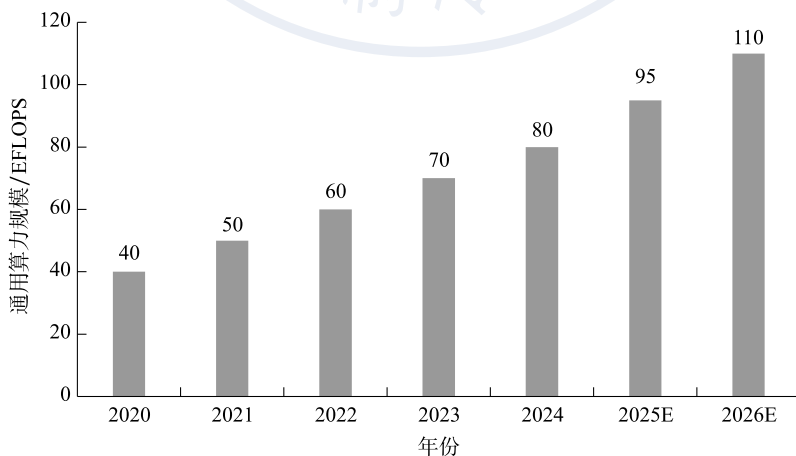


图 1.1-7 中国通用算力规模及预测（基于 FP64 计算）

我国既有的算力布局以需求为导向，主要集中在东部沿海地区，这些地区的数据中心规模巨大，增长迅速。但风、光、水等可再生能源富集在中西部地区，然而这些地区的数据中心产业发展缺乏动力，规模较小，这形成了明显的空间资源错配。为了平衡东西部地区的算力差距，2021年5月，国家发布了“东数西算”工程，该项工程从全国一盘棋的视角对算力布局做了通盘谋划：先是划出八大国家枢纽节点作为核心承载区，在此基础上进一步明确十大集群的具体落位，由此既优化数据中心的建设格局，又让东西部之间真正形成联动效应。

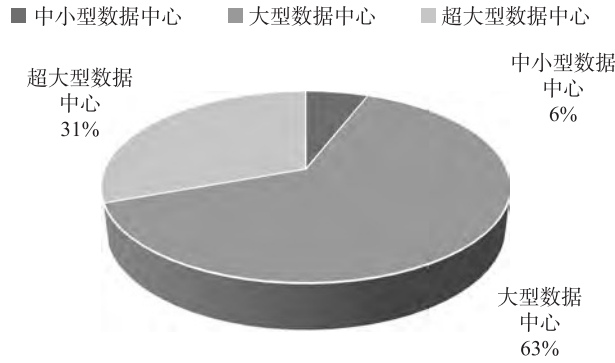
八大算力枢纽节点在资源禀赋、算力需求及功能定位上互有差异，根据《东数西算工程算力枢纽安全能力建设白皮书》的分类标准，可将它们划定为“四数四算”两大类型。从功能定位上看，“四数”枢纽归属于需求导向型，具体涵盖京津冀、长三角、粤港澳大湾区及成渝四大枢纽，其地理分布与我国东部及中西部核心城市群高度重合，这些区域经济活跃度强、人口高度集聚、数据洪流集中，千行百业上云用数的需求相当迫切，算力相关业务需求巨大。与之相对，“四算”枢纽属于资源导向型，包括内蒙古、宁夏、甘肃、贵州四个西部内陆枢纽，其核心竞争力源于得天独厚的自然与能源条件。这些区域地广人稀，土地储备充足，且普遍拥有丰富的风电、光伏等可再生能源，叠加年平均气温较低的气候优势，不仅能通过自然冷却大幅降低数据中心空调能耗，更能依托极低的用电成本压缩运营开支，为大型数据中心建设提供天然便利。

国家“东数西算”工程实施四年来，东部数据向西部迁移规模同比增长显著，初步实现了算力资源优化配置。当前西部数据中心电源使用效率（PUE）普遍低于1.3，能效优势逐步显现。目前我国数据中心分布呈现左右对称的大致趋势，东部共有3个核心枢纽和4个产业集群，西部共有5个核心枢纽和6个产业集群。我国数据中心的发展已呈现集群化发展趋势。

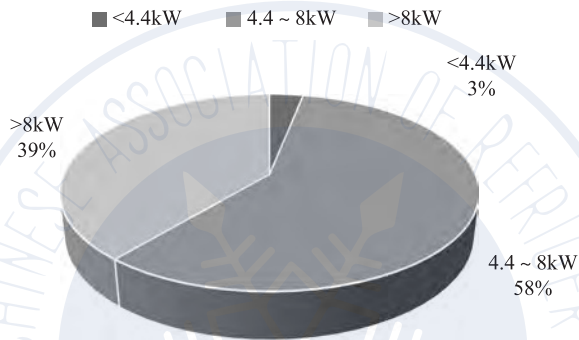
除了规模化部署外，数据中心的机柜功率密度也在不断提升，图 1.1-8 显示了 2024 年新增数据中心项目规模与密度分布。如今，8MW 以上的数据中心在整体市场中的占比已经接近 40%。这一增长趋势不仅意味着数据中心在能源利用效率方面的提升，也体现了对高密度计算需求的积极响应。特别是在人工智能领域，高算力芯片的迅猛发展，正加速推动数据中心向更高密度、更高效能的未来迈进。

在国内，不同省份之间的数据中心发展也存在着差别，这种差别是多种因素造成的。图 1.1-9 显示了国内主要省级行政区的 2025 年预期机架数。可以看出，东部地区依然拥有着最大的数据中心规模，较为明显的省份有河北省、广东省、江苏省等。但由于中央和地方的政策支持、充沛的绿色资源、更低的运营成本等因素，我国西部的数据中心发展也极为迅速，具有代表性的省份有贵州省、内蒙古自治区、宁夏回族自治区等。

《2025 综合算力指数》从算力、存力、运力、模力和环境 5 个维度出发，分析各维度量化因素，进行各省份的算力指数排名。省级行政区综合算力指数 Top10 如表 1.1-1 所示，分别为河北省、江苏省、广东省、浙江省、北京市、上海市、内蒙古自治区、山西省、山东省、贵州省。



(a) 项目规模



(b) 密度分布

图 1.1-8 2024 年新增数据中心项目规模与密度分布

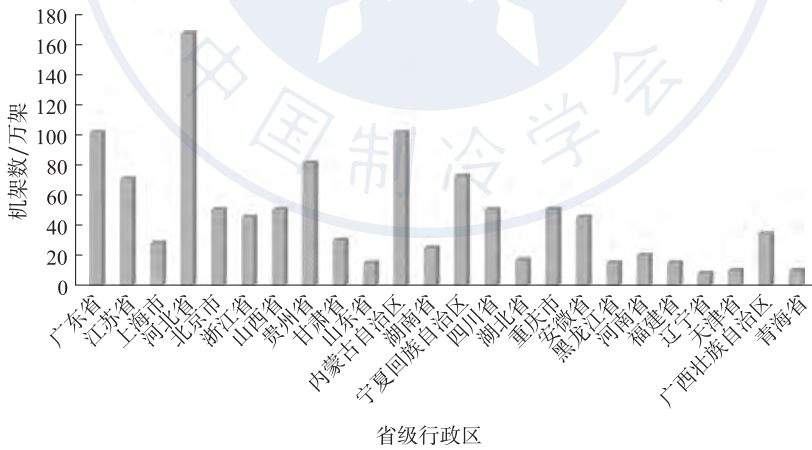


图 1.1-9 全国主要省级行政区 2025 年预期机架数

表 1.1-1 我国省级行政区综合算力指数 Top10

省份	河北省	江苏省	广东省	浙江省	北京市	上海市	内蒙古自治区	山西省	山东省	贵州省
算力指数排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

图 1.1-10 是《2025 综合算力指数》Top10 的省份所对应的当前机架数与 2025 年预期机架数对比情况。当前机架存量最高的省份是广东省，而 2025 年预期机架数增长率较高的省份有河北省、内蒙古自治区等。

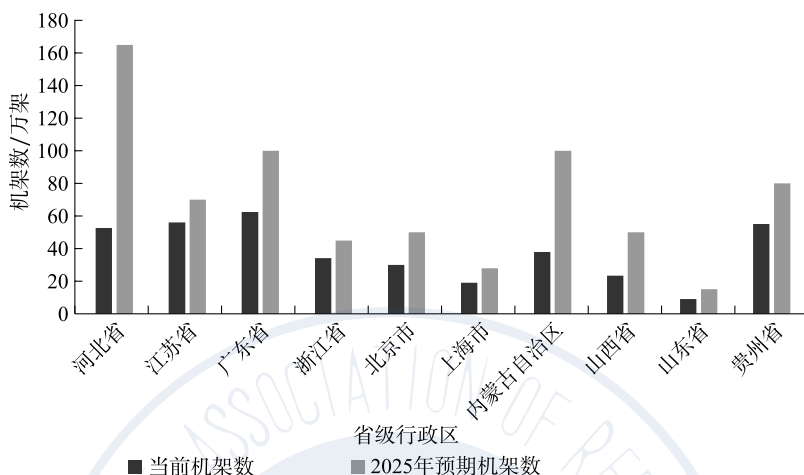


图 1.1-10 算力指数 Top10 省份的数据中心机架数情况

图 1.1-11 是《2025 综合算力指数》Top10 的省份不同方式发电量情况。作为西部省份的贵州省和内蒙古自治区，其绿色能源发电占比高于东部省份。对于内蒙古自治区来说，其火电发电总量、绿色能源发电总量均居各省份前列，这可为数据中心的大量用电提供稳定绿色的供应。

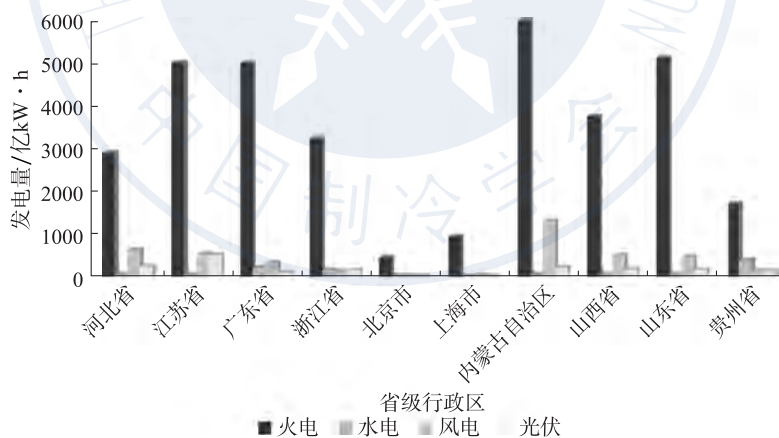


图 1.1-11 算力指数 Top10 省份的不同方式发电量对比

总的来说，中国数据中心市场近年来保持稳健增长，规模预计从 2023 年的 2407 亿元增至 2025 年的 3180 亿元，增速虽有所放缓，但仍维持在 14% 以上。这一增长态势主要受到 AI 算力需求、企业数字化转型和国家“东数西算”等政策的推动。目前，数据中心产业链生态日趋完善，上游覆盖 IT 设备及基础设施，中游提供运营与集成服务，下游链接着广泛的行业应用。在算力层面，中国算力规模迅速扩张，且智能算力增长尤

为迅猛。从地域看，东部地区是需求与规模的核心，西部地区则依托资源与成本优势快速崛起。“东数西算”工程有力推动了跨区域协作与绿色化进程，引导整个产业向高密度、高效能与集群化方向演进，标志着行业整体正逐步迈向成熟。

1.1.2 中国数据中心发展动态及能效现状

中国数据中心行业在快速发展的同时，正面临着能效提升与绿色转型的双重挑战。随着 AI 算力需求的激增、“东数西算”战略的落地和“双碳”目标的刚性约束，共同促使行业在扩大规模的同时，也将能效与可持续性置于发展的关键位置。当前，整个行业的发展模式由政策与技术创新共同驱动，行业正经历着从粗放扩张到精细运营的历史性转变。值得肯定的是，行业平均 PUE 值的持续下降、绿色低碳技术的广泛应用、碳中和路径的逐步清晰，均表明中国数据中心正迈向一个可持续发展的新阶段。本节系统分析中国数据中心的最新发展动态与能效现状。

为系统引导数据中心产业的高质量发展，国家近年来密集出台了一系列具有针对性的政策。2021 年，“东数西算”工程作为算力基础设施建设的核心举措被明确提出，其目的是通过有序引导东部算力需求向西部转移，实现全国数据中心布局的优化调整，为东西部算力资源协同联动奠定基础。2022 年出台的《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022—2025 年）》则为行业绿色转型划定硬性标准，到 2025 年，所有新建大型、超大型数据中心的 PUE 值必须降到 1.3 以下。2023 年的《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》则在前期布局基础上进一步强化算力集聚导向，着重指出除国家枢纽节点外原则上不得新建大型及超大型数据中心，目标直指 2025 年底，使国家枢纽节点地区的新增算力占全国总量的 60% 以上，以此破解区域算力布局失衡问题。2024 年推出的《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》则从综合运营维度加码管控，要求到 2025 年底，全国数据中心整体上架率需提升至 60% 以上，平均 PUE 降至 1.5 以下，同时实现可再生能源利用率年均增长 10%，通过多指标协同推动行业向集约高效、绿色低碳转型。

地方政府也结合自身资源与定位，推出了当地差异化的数据中心产业政策，推动数据中心产业向绿色化、集约化方向升级。在京津冀、长三角等地区，政府通过实施更为严格的能耗双控、建立碳排放核算与交易体系，对可再生能源使用率超 30% 的数据中心给予财政激励，形成了一套驱动能效提升的顶层设计。西部地区则侧重于利用土地、税收等优惠条件，吸引绿色数据中心项目入驻。截至目前，全国已有 15 个省份建立了数据中心项目的节能审查负面清单制度。这些多管齐下的措施，共同推动着整个行业从过去的“粗放增长”向“精细运营”深刻转变。

国家和地方层面的政策对我国数据中心行业的有序发展产生了积极的正面影响。一系列相关政策推动了数据中心行业平均 PUE 值逐年下降，促进了液冷技术的市场渗透率从 5% 提升至 12%，并引导数据中心投资从传统基建向算力基础设施及绿色技术倾斜。通过相关政策引导，2024 年新建数据中心平均 PUE 降至约 1.28，西部枢纽节点可再生资源使用比例普遍超过 40%，较政策实施前提升 15 个百分点。

数据中心的能耗水平需要有一定的标准进行量化评价，而当前能够表示数据中心能耗水平的评价指标如表 1.1-2 所示。

表 1.1-2 数据中心的能耗水平评估指标

指标名称	计算公式	国际标准	中国标准	适用场景
电能利用效率 (PUE)	数据中心总能耗/IT 设备能耗	ISO/IEC 30134-2: 2016	GB/T 32910.3—2016	数据中心电能利用效率
水资源利用效率 (WUE)	数据中心总耗水量/IT 设备年耗电量	ISO/IEC 30134-9: 2022	GB/T 44989—2024	评估水资源利用效率
碳使用效率 (CUE)	碳排放量/IT 设备能耗	ISO/IEC 30134-8: 2022	GB/T 43331—2023	评价数据中心碳利用效率
可再生能源系数 (REF)	数据中心拥有和使用的可再生能源总量/数据中心总能耗	ISO/IEC 30134-3: 2016	GB/T 32910.4—2021	绿色能源使用评估

在这些评价指标中，目前最常用的是 PUE，其可以直观表示数据中心的整体能耗水平。随着低碳与绿色能源的发展，国家对新建数据中心的能效水平也有相应的要求。如表 1.1-3 所示，不同机架规模的数据中心 PUE 水平逐年降低，其中大型数据中心的 PUE 要求更为严格。根据工信部的最新要求，2025 年底前新建大型/超大型数据中心设计 PUE \leq 1.30，国家枢纽节点 PUE \leq 1.2，老旧数据中心改造目标 PUE \leq 1.5。

表 1.1-3 不同规模数据中心的 PUE

年份	标准机架		
	<3000 架	3000~10000 架	\geq 10000 架
2019	1.8~2.2	1.5~1.7	1.4~1.5
2021	1.7~2.0	1.4~1.6	1.3~1.4
2023	1.6~1.9	1.3~1.5	1.2~1.3
2024	1.5~1.8	1.25~1.4	1.1~1.25

此外，绿色数据中心也是国家下一阶段发展的重点。截至 2024 年底，全国数据中心平均 PUE 降至 1.46，超 140 个数据中心绿色低碳等级达到 4A 级以上。2024 年 6 月，《2023 年度国家绿色数据中心名单》公布，50 家数据中心上榜，全国累计建成 246 个国家绿色数据中心，平均 PUE 约为 1.2。《绿色算力发展研究报告（2025 年）》显示，我国 2021—2024 年国家绿色数据中心历年累计数量逐年增加，如图 1.1-12 所示。图 1.1-13 则是国家绿色数据中心的分领域分布情况，互联网领域与通信领域的国家绿色数据中心占比相近，两者占比之和在所有领域中将近 70%。随着国家标准 GB/T 44989—2024《绿色数据中心评价》于 2025 年 6 月 1 日起正式实施，我国算力绿色化发展特征将更加显著。

总的来说，中国数据中心行业在规模持续扩张的同时，正积极向绿色化、高效化转型。在“东数西算”工程与“双碳”目标的宏观指引下，加之 AI 算力需求的爆发性增长，能效提升已成为行业发展的核心议题。当前，从国家到地方的多层次政策正形成合力，驱动着 PUE 指标的持续优化与绿色技术的广泛落地，共同推动数据中心行业绿色高效的健康发展。

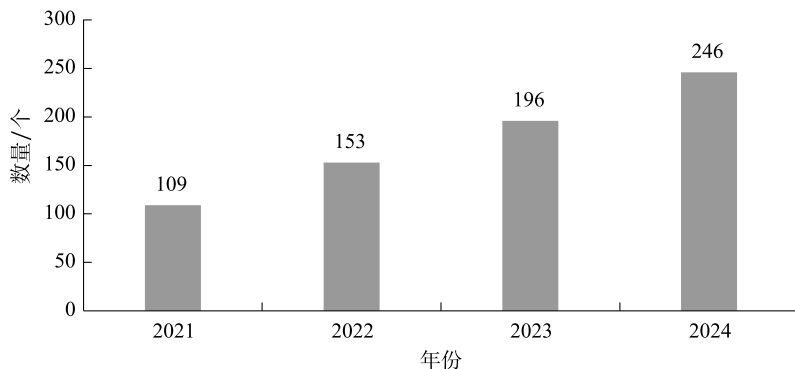


图 1.1-12 国家绿色数据中心累计数量

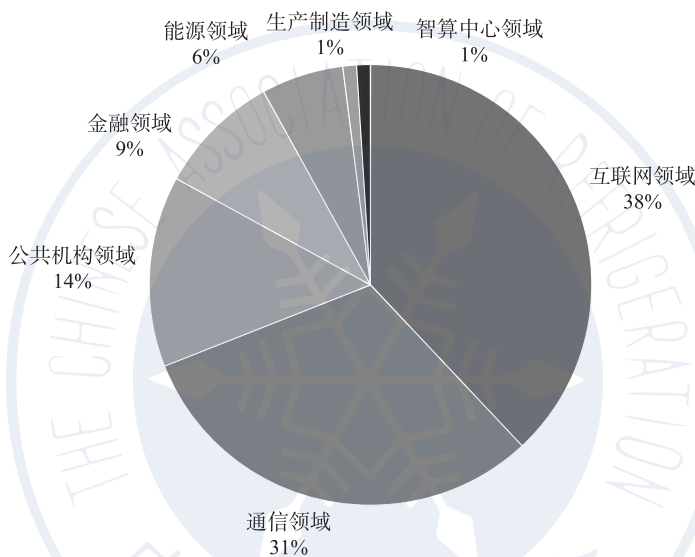


图 1.1-13 国家绿色数据中心分领域情况

1.1.3 中国数据中心冷却系统发展概况

在云计算、AI 与大数据等技术浪潮的驱动下，中国数据中心产业实现了迅猛扩张，其规模和数量持续攀升。在这一背景下，冷却系统作为数据中心能耗的关键组成部分，其效能表现关系到了数据中心的绿色运营水平，其重要性日益凸显。据统计，冷却系统能耗通常占数据中心总能耗的 30%~40%，是仅次于 IT 设备的第二大能耗来源。

图 1.1-14 是中国数据中心精密空调市场规模图。由图 1.1-14 可以看出，自 2021 年以来，除了 2023 年外，其余年份的精密空调市场实际同比增速或预期同比增速均在 13% 以上，市场规模逐年稳步扩大。这也在反向促进更加节能高效的制冷系统的发展，只有满足更低能耗、更高能效的制冷空调系统能够在广阔的数据中心市场中站稳脚跟。

数据中心冷却系统主要由三大子系统构成：冷源系统负责产生冷量，输配系统负责冷量的传输和分配，末端系统则直接与 IT 设备进行换热。这三个子系统相互协同，共同确保数据中心的高效稳定运行。随着“双碳”目标的推进和能效要求的提高，冷却系统的优化和创新成为行业关注的焦点。当前数据中心冷却系统主要关注冷源系统与末端系统。

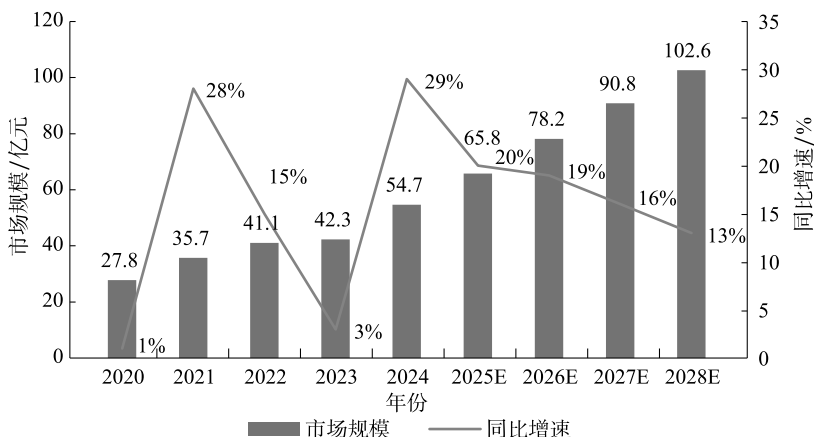


图 1.1-14 2020—2028 年中国数据中心精密空调市场规模

注：图中 E 表示预测值。

数据中心的冷源系统，依据其技术路径可划分为机械制冷、自然冷源应用与双冷源混合冷却。具体到常见系统，则包括水冷/风冷型蒸气压缩制冷、氟泵双循环自然冷却、冷水自然冷却、蒸发自然冷却及风侧自然冷却等多种形式。从技术原理来看，前三种系统主要基于逆卡诺循环机制运作，而后三者则依赖于与自然界中的风、水等进行换热来实现冷却。当前，伴随绿色数据中心建设的加速推进与 PUE 指标的强制性管控要求，行业对自然冷源应用的关注度持续提升，下文将重点针对蒸发自然冷却系统与风侧自然冷却系统这两类典型自然冷源应用系统展开介绍。

蒸发自然冷却技术主要可以分为直接蒸发冷却与间接蒸发冷却两大类型。直接蒸发冷却依赖于空气与水的直接热湿交换过程。在此过程中，工作介质与产出介质之间同时发生热量与质量的传递，最终产出冷风或冷水。该技术因其会增加空气湿度，故尤其适用于气候干燥的地区。间接蒸发冷却则通过换热器将空气与水物理隔离，从而在实现降温的同时，避免了工作环境中湿度的提升，完美契合对空气干燥度有严格要求的场景。图 1.1-15 所示是一种常见的板式间接蒸发冷却器，其关键部件是换热器。该部件将两股流体分隔开，确保流体仅通过换热面进行纯粹的热量传递，而不进行混合。

风侧自然冷却包含直接新风自然冷却、间接新风自然冷却。当室外温度低于数据中心内温度时，直接新风自然冷却直接将外界低温空气引入数据中心，经过过滤等处理后用于冷却设备，适用于空气质量较好、外界温度较低的地区，示意图如图 1.1-16 所示。间接新风自然冷却通过空气-空气非接触式换热器，将外部低温空气的冷量传递给数据中心内部的热空气，而不直接引入新风，避免了外界空气中的污染物对数据中心设备的影响，其示意图如图 1.1-17 所示。

而空调末端形式根据作用对象范围可分为：房间级空调、行级空调（列间空调、顶置空调等）、机柜级空调（热管背板、水冷背板、嵌入式空调等）、芯片级空调（冷板式液冷、喷淋式液冷、浸没式液冷等）。这些空调末端的冷却技术发展演进遵循着不断贴近热源的原则进行。冷却末端从整个房间，逐步逼近到机柜行、单个机柜，直至最终的发热核心——芯片。以上的这种发展演进旨在最大限度地缩短冷却路径、提升换热效率、精准消除热量，从而满足更高密度计算的散热需求，并提升数据中心的能源利用效率。

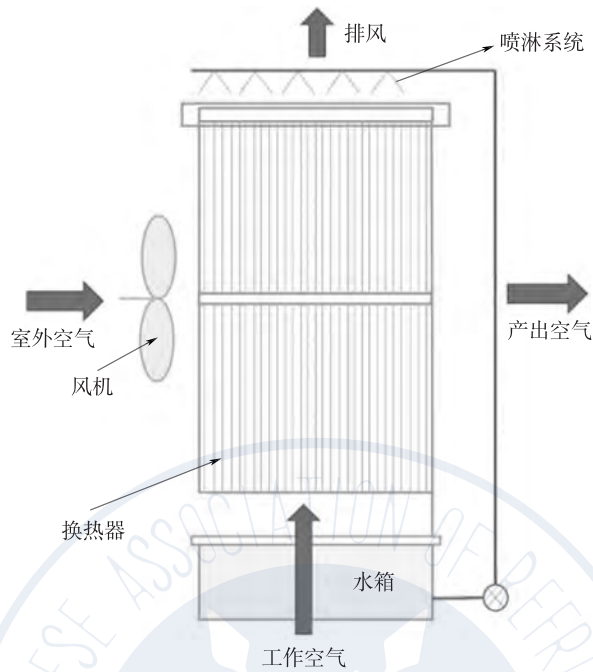


图 1.1-15 常见的间接蒸发冷却示意图^[1]

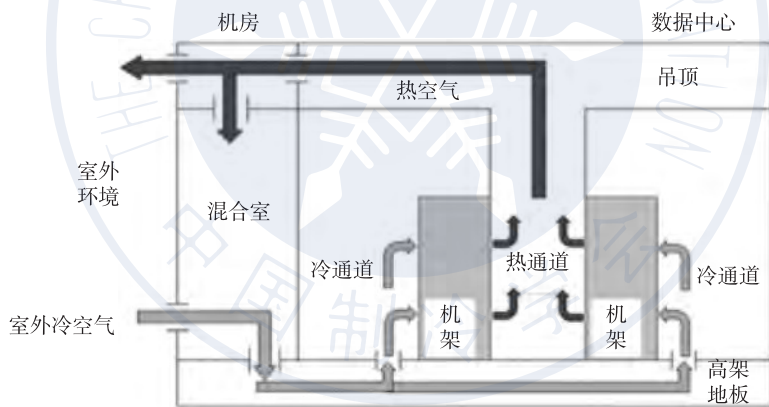


图 1.1-16 直接风侧自然冷却示意图^[2]

数据中心冷却系统是保障 IT 设备稳定运行的关键基础设施，随着中国数据中心规模快速扩张和单机柜功率密度持续提升，冷却系统的能效优化已成为降低 PUE 值、实现绿色低碳发展的核心环节。2024 年，在“双碳”目标和 AI 算力需求爆发的共同驱动下，中国数据中心冷却技术路线正从传统风冷向高效液冷、自然冷源利用等方向迈进，并呈现出技术多元化、区域差异化与管理智能化的鲜明特征。

传统风冷技术在国内数据中心仍有较高的保有量，但随着数据中心功率密度的增加，其冷却效率逐渐难以满足高密度服务器的散热需求。尽管部分运营方通过精细化的气流组织与系统设计来挖掘风冷潜力，但这类优化措施所能带来的效率提升已日趋见顶，其技术局限性越发明显。

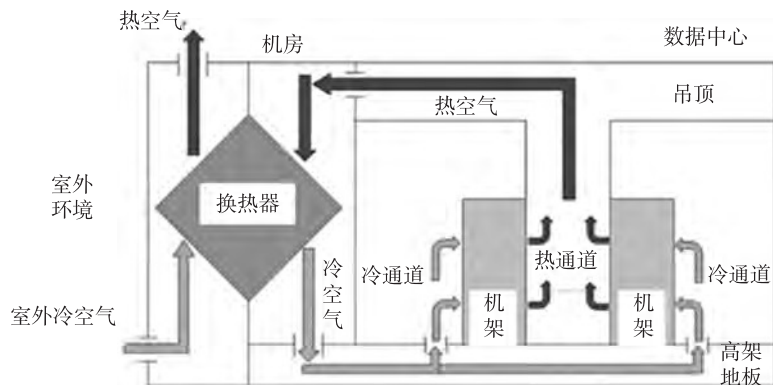


图 1.1-17 间接风侧自然冷却系统示意图^[2]

随着全国数据中心单机柜功率密度突破 30kW，传统风冷已难以满足散热需求，而凭借高效散热、节能降耗等突出优势，液冷技术迎来爆发，正在成为数据中心冷却系统的重要发展方向。液体的体积比热容和导热系数远高于空气，能够更快吸收芯片表面热量，提供更好的热传递路径，更精确地控制芯片温度，避免因过热导致的性能下降或损坏。当前，液冷技术主要包含冷板式、喷淋式与浸没式三大类，其共同优势在于能显著降低数据中心算力载体的 PUE。冷板式液冷因兼容性好、可靠性高、产业链成熟、改造成本较低，已经成为当前市场的主流，预计可将 PUE 降至 1.15 以下。喷淋式液冷可实现芯片级精准喷淋，但技术成熟度有限，目前仅在少数数据中心中使用。而浸没式液冷因其散热效率高，被普遍视为未来的重要发展方向。2024 年中国液冷数据中心市场规模约达 236 亿元，同比增长 53%，预计到 2027 年可突破 1000 亿元。图 1.1-18 是不同制冷技术对应的 PUE 范围。

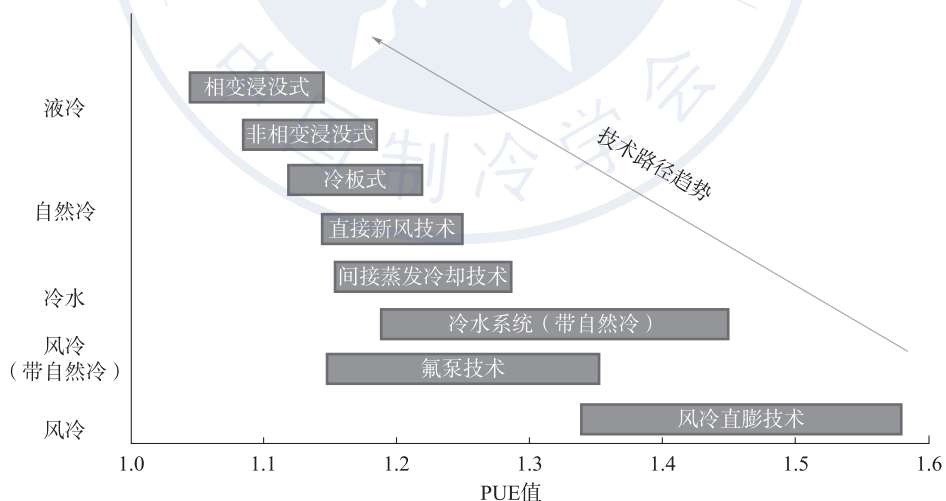


图 1.1-18 中国数据中心制冷技术路径

总的来说，随着液冷技术的主导变革，自然冷却技术的不断普及，可再生能源电力比重的逐步增加，中国的数据中心将会进一步的节能环保、绿色高效，并将引领世界高效绿色数据中心的发展。

1.2 全球数据中心新变化

1.2.1 国外数据中心市场规模现状

大数据、人工智能、云计算等现代化技术的应用与发展促使人类社会每天都会产生大量的数据及处理需求，全球数据中心市场因此而呈现出持续的高速扩张的发展态势，以支撑数字经济、云计算与人工智能等技术的落地与正常运行。图 1.2-1 为 2021—2027 年全球数据中心市场规模及预测趋势图。根据图中的数据，2021 年全球数据中心市场总值为 765.6 亿美元，2022 年增长至 826.9 亿美元，虽然当年增速回落至 8.0%，但自 2023 年起重回快速增长轨道，2023 年市场规模达 945.1 亿美元，同比增长 14.3%，2024 年达到 1086.2 亿美元，同比增长 14.9%。到 2025 年全球数据中心市场将迈入 1289 亿美元的新台阶，增速升至 18.7%，为预测期内最高值。此后几年全球数据中心市场规模的增长速度虽有所缓和，但市场总量却持续扩大，其市场规模预计将于 2027 年增长至 1632.5 亿美元，展现出强势的增长潜能。

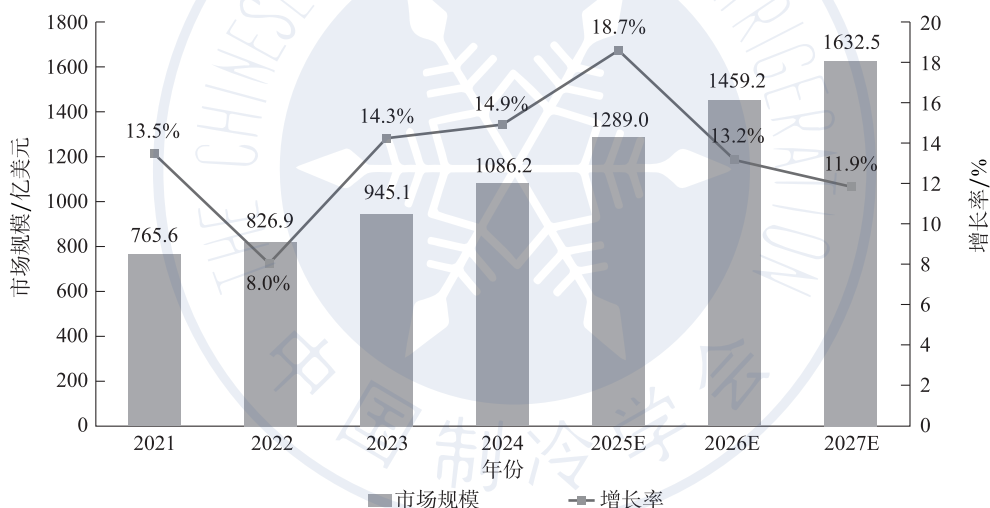


图 1.2-1 2021—2027 年全球数据中心市场规模及预测

注：图中 E 表示预测值。

人工智能、云服务等现代化技术对算力资源的依赖成为全球数据中心市场规模持续增长的重要因素，特别是在新一轮科技革命的时代背景下，海量数据的生成、存储、传输及数据处理需求的显著提升，使数据中心不再仅是数据的存储仓库，而开始逐渐演变为智慧计算平台。此外，国家相关政策的颁布也加速了数据中心产业的发展，不少发达国家将“国家级算力基础设施”纳入信息战略体系，通过财政补贴、提供土地资源以及能源倾斜等方式推动超大规模数据中心部署。

图 1.2-2 为 2024 年度全球数据中心区域分布，按供给 IT 负载规模进行统计。从数据中心区域分布来看，2024 年全球数据中心 IT 负载呈现出明显的区域性差异。根据图 1.2-2 中的数据，亚洲以 22780MW 的 IT 负载量占据 44% 的市场份额，位居全球首位，

展现亚洲在全球数据中心产业中的核心地位，这一现状反映出中国、日本、新加坡、韩国等国家近年来在数据中心基础设施建设上的持续投入，还与全球云服务商加速布局亚太节点密切相关。北美地区以 16200MW 的 IT 负载占据 32% 的市场份额，位居全球第二，其中美国是全球范围内数据中心密度和体量最大的国家，具备完整的生态和运营体系。欧洲的数据中心市场份额占比为 19%，主要集中在德国、英国、荷兰等国家，在能效标准等政策的推动下逐渐形成绿色、高效的发展特色。非洲、大洋洲与南美洲的数据中心市场份额所占比例较低，其 IT 负载总计仅 2567MW，占全球数据中心总市场规模的 5%。其中非洲仅 675MW，未来虽有较大的增长潜力，但基础较为薄弱。

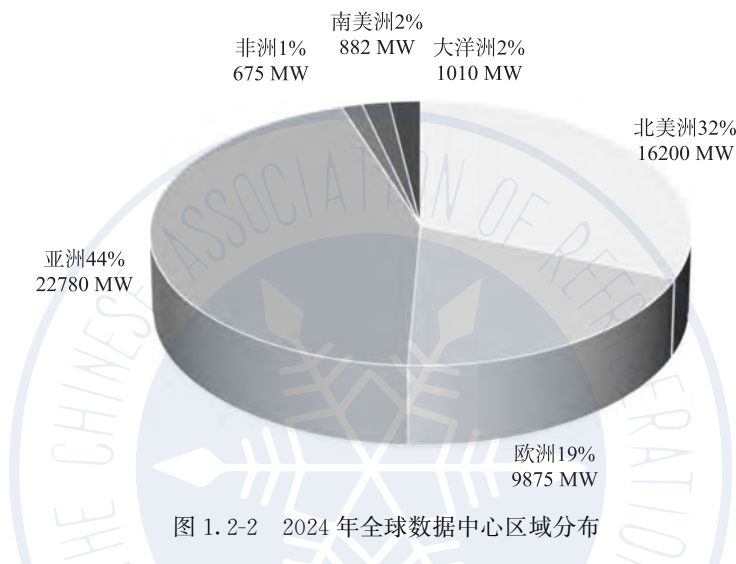


图 1.2-2 2024 年全球数据中心区域分布

在数据中心服务商市场份额方面，2024 年全球数据中心服务商的市场份额结构呈现出高度集中的态势。图 1.2-3 为 2024 年全球重点数据中心服务商市场份额占比统计，其中 Equinix 凭借其强大的全球布局能力以及互联能力占据全球 19.4% 的市场份额，稳居行业首位，Digital Realty 则以 14.5% 的市场份额排名第二，两者总计占据了全球超过 1/3 的市场份额。中国电信、中国移动和中国联通分别以 6.3%、4.9% 和 3.5% 的市场份额位居全球前列，并在“东数西算”以及“一带一路”倡议等驱动下加速拓展海外数据中心节点。其他具有一定影响力的服务商还包括 GDS、NTT、Keppel、CHINDATA 等。部分头部企业虽在全球数据中心服务商市场份额竞争中占据主导地位，但其他服务商仍占据 37.9% 的市场份额，展现数据中心的竞争结构仍具多样性与活力，部分中小服务商通过本地化部署、行业定制化服务等方式形成了差异化竞争优势。

此外，随着人工智能技术的高速发展，AI 驱动型数据中心正成为未来全球数据中心部署的重要方向。图 1.2-4 中的数据显示，全球 AI 驱动型数据中心市场规模将以每年 27.1% 的增长率高速扩张，将从 2024 年的 143 亿美元增长至 2034 年的 1573 亿美元。其中，图形处理器（Graphics Processing Unit, GPU）数据中心、人工智能超算中心（Artificial Intelligence Suprecomputing Centre, AISC）及混合架构数据中心共同构成市场主体。

GPU 数据中心因深度学习模型的训练需求而占据重要地位，AISC 数据中心凭借其

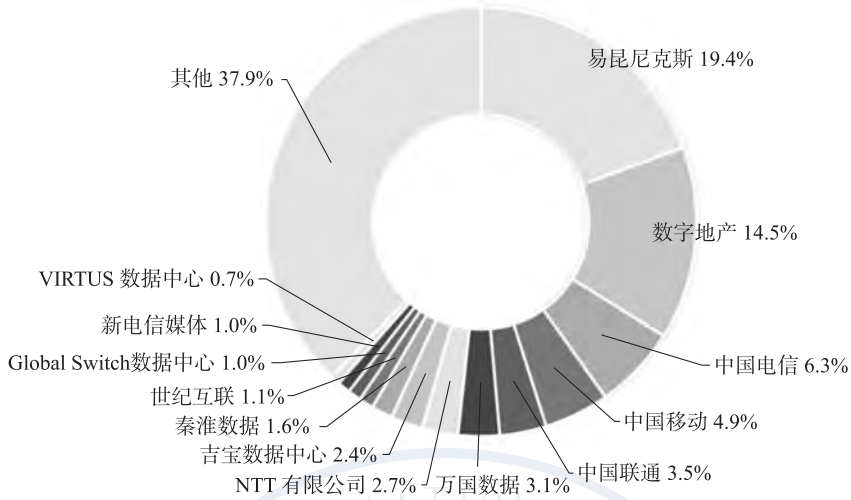


图 1.2-3 2024 年全球重点数据中心服务商市场份额

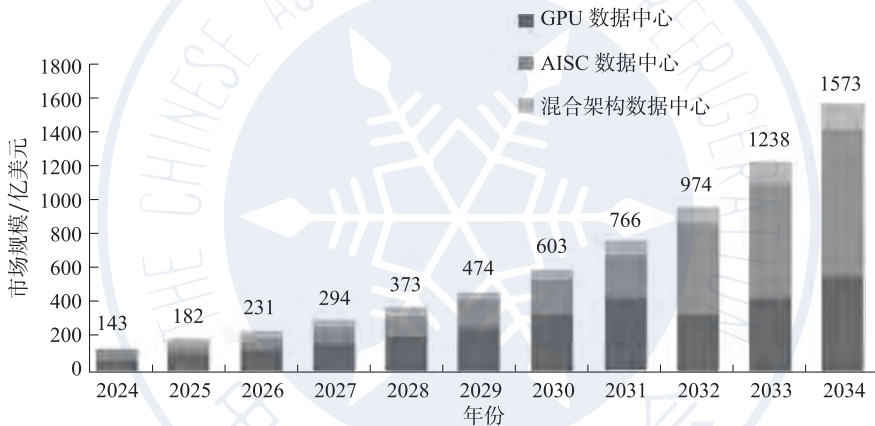


图 1.2-4 2024—2034 年 AI 驱动型数据中心市场规模^[1]

在推理阶段的高效性快速发展，混合架构数据中心则融合了两者优先，展现出更强的灵活性与扩展能力。在大模型全面发展的时代背景下，传统通用型数据中心难以满足 AI 训练与推理的资源密度需求，AI 驱动型数据中心将在规模化投资、能源系统升级等方面形成新的技术路径和产业范式。

总体来看，全球数据中心市场正处于现代化技术与国家政策驱动下的高速发展阶段。从整体市场规模到区域竞争格局，从服务商集中化趋势到 AI 数据中心结构性崛起，均预示着数据中心正从“底层基础设施”向“高阶算力资源”升级演化。

1.2.2 国外数据中心发展政策及标准

本小节将立足全球视角，选取美国、欧盟、日本与澳大利亚等发达经济体，梳理其近年来数据中心相关的政策与技术标准，概括其主要内容，并将代表性文件与要点汇总于表 1.2-1，便于后续对比分析。

表 1.2-1 国外数据中心政策与标准

国家/地区	政策/标准/法律法规	主要内容
美国	《公共便利与必要证书及相关审批——发电站定义（2024 年〈关键基础设施精简法〉）》 ^[4]	简化数据中心园区 应急备用发电设施 的许可门槛，并涉及与数据中心相关的公司所得税收入分配条款
	《数据中心电信基础设施标准》（2024 版） ^[5]	在 2024 年版中更新了 布线/连接、冗余与韧性、边缘数据中心与高密度/AI 负载 等要求，作为数据中心设计与实施的重要行业基准
	《合格数据中心项目销售与使用税豁免》 ^[6]	在州税法中新设“合格数据中心项目”销售/使用税豁免与认证流程，允许经初步或正式批准的项目就数据中心设备的购买、安装、维修和更换享受免税
欧盟	《欧盟委员会授权法规（EU）2024/1364》 ^[7]	建立首个欧盟统一数据中心可持续性评级体系，明确 PUE、废热利用、水耗和可再生能源等关键绩效指标，并要求能耗 $\geq 500\text{kW}$ 运营者自 2024 年 9 月开始定期上报至欧盟数据库
	《企业可持续尽职调查指令（CSDDD）》 ^[8]	CSDDD 要求大型企业（含数据中心）对供应链与自身运营进行人权/环境尽职调查，制定与 1.5℃ 一致的气候计划，并接受强制监管
日本	《GX 2040 绿色转型远景计划》 ^[9]	将数据中心等技术产业迁移至 低碳能源枢纽 ，如海上风电场和核电站附近，以促进绿色转型
澳大利亚	《国家温室气体与能源报告法》 ^[10]	2025 年起，数据中心须按照《国家温室气体和能源报告法》提交半年度能源消耗与温室气体排放报告，未达标者将失去政府合同资格并面临罚款
	《数据中心能效评级规则》	更新数据中心能效评估与评级方法，作为政府与市场通用的能效标准被广泛用于合规、招投标与信息披露场景

1.2.2.1 美国数据中心现状及标准

美国仍是全球数据中心最密集且以市场为主导的国家。AWS、Google、Microsoft、Meta 等头部云厂商掌握了大部分公共云算力。随着人工智能与高密度部署迅速扩张，各州围绕供电可靠性、许可效率与税收激励形成差异化政策组合：一方面通过优化应急电源许可来提升并网与运行韧性，另一方面以行业标准统一设施设计与验收基线，并辅以税收减免以吸引新增投资与存量改造。

《公共便利与必要证书及相关审批——发电站定义（2024 年〈关键基础设施精简法〉）》以关键基础设施精简为目标，调整发电站及相关审批边界，对数据中心园区内的应急备用发电在满足特定条件时提供公共便利与必要证书 CPCN 的豁免或简化路径，从而压缩审批链路、降低时间不确定性与制度性成本，增强在极端天气与电网扰动情形下的韧性与可用性。

《数据中心电信基础设施标准》为数据中心电信与基础设施领域的重要行业标准，其系统性规定了数据中心布线与连接、配电与通道、边缘场景、高功率密度以及人工智能负载的适配要求。该标准在选址改造、土建机电一体化设计、竣工验收与第三方评估中被广泛采用，为跨区域项目提供可对比的一致性技术路线。

《合格数据中心项目销售与使用税豁免》于 2024 年正式生效，其从投资端入手设定

合格数据中心项目的销售与使用税豁免，有助于降低前期资本开支与园区的技术改造成本，提升中西部地区项目投资的吸引力。

总体来看，美国数据中心正由单一市场驱动迈向市场与合规并存。州法侧重优化许可与税制，行业标准重点提供统一技术底座，大型运营商依托规模化采购、标准化设计受益明显，中小型企业则需在税制红利与新增合规成本之间精算选址与规模扩容。

1.2.2.2 欧盟数据中心现状及标准

欧盟在数字化与气候治理的一体化推动下成为首个将数据中心系统性纳入能源与环境监管体系的经济体。2024 年通过《欧盟委员会授权法规（EU）2024/1364》确立了统一的信息报送与评估框架，规定自 2024 年 9 月起所有 IT 装机功率大于 500kW 的数据中心需定期向欧盟数据库报送 20 余项运营与能源指标，并由主管机关监督核验，该法案的颁布为数据中心监管透明与政策评估提供数据基础。

更广泛地，欧盟将数据中心纳入可持续合规闭环。《企业可持续尽职调查指令（CS-DDD）》于 2024 年正式生效，该法案要求达到门槛的大型企业需开展供应链人权和环境影响尽职调查并制定与 1.5℃ 一致的转型计划，与《公司可持续信息披露指令（CSRD）》及《能源效率指令（EED，2023/1791）》共同构成“披露-尽调-绩效”的治理链条。其中《能源效率指令（EED，2023/1791）》作为《欧盟委员会授权法规（EU）2024/1364》的上位法依据，也为由信息披露逐步过渡至最低性能要求预留了政策空间。总体来看，欧盟正从“能效报告”迈向“强制标准+行业评级+金融导向”的综合治理。

1.2.2.3 日本数据中心现状及标准

日本数据中心主要集中于东京—大阪都市圈一带，导致土地紧张、电网承压与热岛效应突出。为此，日本政府在 2024 年发布的《GX 2040 绿色转型远景计划》中将数据中心列为优先外迁与绿色布局对象，鼓励数据中心向北海道、东北、九州等气候更冷、低碳电力占比更高的地区迁移，并配套用地与税收优惠、输配电扩容及绿色电力采购支持，加速项目落地。

在能源侧，日本通过绿电套餐、非化石证书与长期购电协议（Power Purchase Agreement, PPA），为运营商提供更稳定的绿电与价格锚定机制，此举既缓解一线城市的电力与环境压力，也将数据中心建设纳入“国家能源转型+地方振兴”的双重战略。经第三方测算显示，2024 年日本数据中心市场约 99.3 亿美元，并预计将以 5.06% 的年均复合增长率（CAGR）增长，至 2030 年将超 133.5 亿美元。

在监管与标准方面，日本继续将数据中心纳入《能源节约法》进行管理，同时叠加经济安全保障推进法下“关键基础设施制度”的事前申报与安全韧性要求，共同推动企业在能效、用水、备电与网络安全上的前瞻规划与分期改造。

总体来看，日本头部运营商依托规模化绿电采购与园区级能源共建获得成本与合规优势，中小运营商则依托园区共建、标准化模块与合同能源服务摊薄投入、稳步对齐政策节奏。

1.2.2.4 澳大利亚数据中心现状及标准

澳大利亚的数据中心主要集中于悉尼、墨尔本等沿海地区，电力来源仍以化石能源为主，面对碳减排目标与电网弹性需求，联邦层面更侧重以“披露+采购规则”的方式

形成“软性约束”。修订完善的《国家温室气体与能源报告法》要求部分企业需每年向联邦主管机构申报能源消耗与温室气体排放，并接受审核，瞒报或不报将面临处罚。

此外，澳大利亚还在 2024 年采用了最新的《数据中心能效评级规则》作为配套的能效基准，明确了基础设施、IT 设备、整站三类评级方法与数据质量标准，并已广泛应用于政府与市场的合规、招投标与信息披露，不少公共机构在招标中把目标星级设为门槛或加分项。在信息披露之外，联邦还通过强制气候相关披露制度提升大型企业对外排放、气候治理与转型计划的要求，数据中心运营商及其母公司将随体量分组纳入该体系。

整体上看，澳大利亚更强调“透明度+市场驱动”，而非简单的“硬性限排”，并结合强制年报、政府采购规则、第三方评级以及气候披露的方式引导投资向高效率、低碳运维靠拢。

1.2.3 全球数据中心技术前沿

随着人工智能和高性能计算的迅猛发展，数据中心的能耗与散热压力正以前所未有的速度攀升。人工智能模型的训练和推理通常伴随数以万亿次的浮点运算，这些运算不仅推动了算力需求的激增，同时也带来了显著的热功率密度上升。不断攀升的热负荷迫使数据中心相关企业采取一定措施以适应未来数据中心对冷却效率的需求。

1.2.3.1 液冷技术

传统依赖空气对流换热的数据中心冷却方案正逐渐显露其局限性。风冷换热系统需要依赖庞大的散热器体积、复杂的气流布局以及高功耗的风机才能维持设备在安全温度范围内稳定运行，但随着单芯片功率的不断提高，其冷却能力已接近物理瓶颈。根据相关调查（如图 1.2-5 所示），到 2024 年已有 22% 的数据中心部署了直接接触式液体冷却（Direct Liquid Cooling, DLC），61% 的数据中心正在进行可行性研究，仅有 17% 的数据中心明确表示不会采用该技术^[11]。这种趋势充分说明，DLC 技术的普及与应用正在成为行业共识。

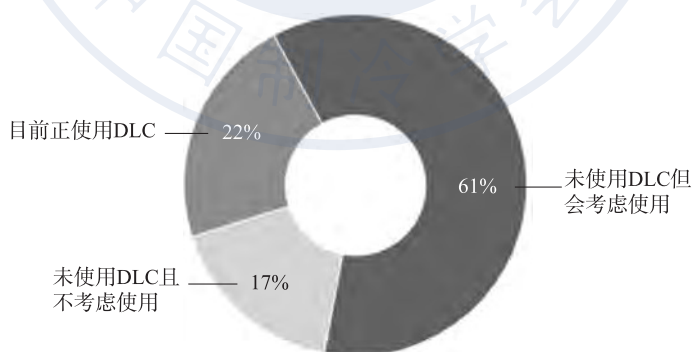


图 1.2-5 2024 年直接接触式制冷调研^[11]

由于液体更高的比热容与导热系数，在相同体积与流量下液冷系统的冷却液可转移的热量远高于空气。据统计，液冷相较空气冷却可降低 60%~80% 的散热能耗，服务器整体能耗下降 10%~20%，制冷能耗最高可降 90%，PUE 可逼近 1，在同等算力下，其碳排放较风冷约低 39%^[12]。液冷系统的实施路径主要有浸没式液冷与直接芯片冷却

(Direct-to-Chip, D2C)，前者将设备直接浸入绝缘冷却液中实现整体散热，后者则在处理器表面安装冷板并引入冷却液进行直接换热。相较浸没式液冷技术，D2C 对硬件改造少、冷却液用量低，工程推广价值更高。

在 D2C 体系中，按冷却介质的状态又可分为单相与双相。单相直接芯片冷却（1P-D2C）技术使冷却液在冷却的过程中始终保持为液态，该技术方案成熟、稳定性强。双相直接芯片冷却（2P-D2C）技术采用低沸点的冷却工质在芯片表面沸腾换热，吸热汽化后在冷凝器中液化回流，相变的引入显著提升了单位流量的带热能力，尤其适用于高热流密度的极端算力场景。

图 1.2-6 为从印刷电路板（Printed Circuit Board, PCB）到散热器的简化堆叠结构图，DLC 系统通常由芯片、导热界面材料（TIM）、冷板与冷却液回路构成，芯片热量经 TIM 传至冷板，再由流经冷板的冷却液带走。此外，冷板内部通常布置微通道或翅片以增加湍流与换热面积，从而提升整体冷却效果。随着微纳制造工艺进步与新型冷却液研发推进，DLC 的效率与可靠性仍在提升，在超大规模 AI 训练、金融计算、气候模拟等场景中前景广阔。

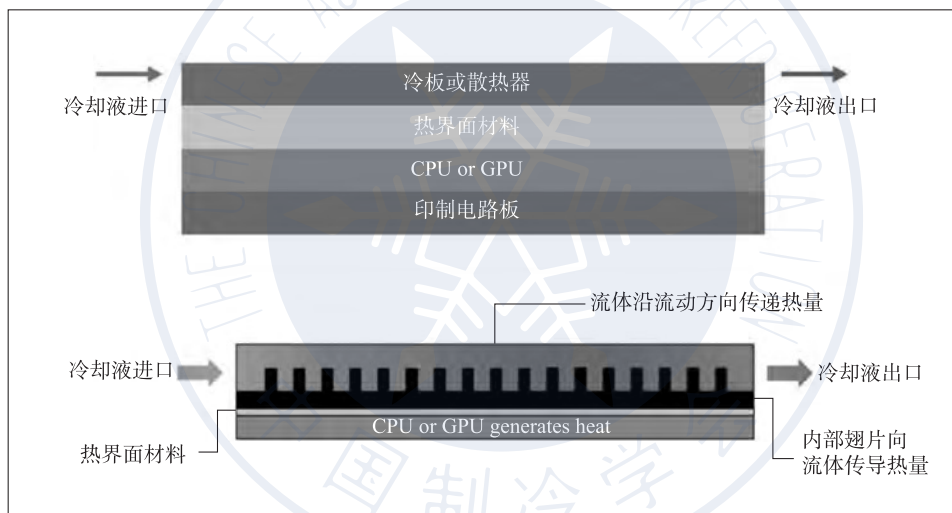


图 1.2-6 从 PCB 到散热器的简化堆叠结构^[13]

1.2.3.2 数据中心余热回收技术

数据中心 90% 的用电量将以热量的形式耗散，作为废热最终排入大气，导致大量的能源浪费。在倡导绿色可持续发展的时代背景下，对余热进行回收利用引起了业内极大的关注。本小节就数据中心的几种余热回收技术进行梳理与总结。

(1) 风侧余热利用技术

数据中心风侧余热以显热为主，排风温度为 35~45℃、湿度低，适合就地/近端显热回收。在冬季可以回收余热为温室与养殖保温、暴露设备融雪，或为辅助用房预热，还可经空气—水循环将余热传递至水侧作为“中间热源”。此外，还可以与太阳能集热器耦合以提升排风温度，为固体/溶液除湿再生等中低温场景提供热风^[14]，其系统结构如图 1.2-7 所示。

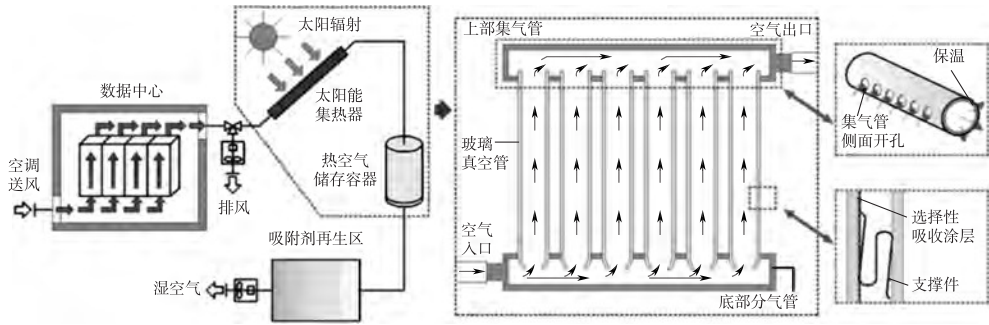
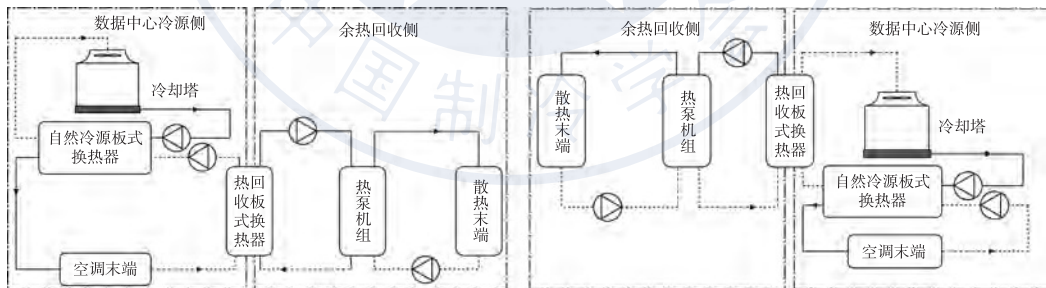


图 1.2-7 搭配太阳能集热器的数据中心排风热回收系统^[14]

风侧余热回收侧重点在于保持稳定气流与洁净边界、确保冷热通道封闭与机柜围挡完整以及机房压差和送回风温度不受回收支路干扰。现实中常采用变频风机与旁通、混风段精细调节，排风侧设置中高效过滤，并对长距离输送做好保温与漏风控制以降低热损失。跨区或跨楼宇可采用空气对空气或空气对水的分离换热，通过乙二醇闭式回路将热量安全传至远端空气处理机组或末端盘管，从而在不改变原有机房洁净与气压体系的前提下，实现更灵活的余热配送。

(2) 水侧余热利用技术

采用冷水机组为 IT 设备供冷时，冷水回水与冷却水回路都蕴含可回收热量，但其温度多在 30~40℃，需经热泵或具备热回收功能的冷水机组“升温”到可用的中温区间，以供生活热水、空气处理机再热和季节性供暖等负荷。对应图 1.2-8 为典型的两种做法：其一以冷水回水侧为热源，通过板式换热器配合水源热泵获得稳定的中温热水；其二则以冷却水侧为热源，利用全热回收或部分热回收型冷水机组直接从冷凝热产出更高温度热水，在维持制冷的同时实现热能输出。两种路径可根据园区热负荷时段与规模进行组合应用，形成制冷与供热的协同。



(a) 冷水热回收 (b) 冷却水热回收

图 1.2-8 数据中心冷水及冷却水热回收系统示意图^[15]

在系统集成与控制层面，原则是优先保障 IT 冷却安全与主回路稳定，再在此基础上按需投入热回收设备，实现随负荷联动与能效最优。同时关注冷凝温度与冷却塔工况对整体性能的影响，合理设置热回收优先级与运行边界。为确保长期可靠，需匹配适当的水质管理和设备维护策略，当余热用于生活热水时，还应满足卫生安全与消毒要求。

(3) 余热回收吸收式制冷技术

余热回收吸收式制冷以数据中心废热为驱动热源，将低品位热转化为可用冷量，显

著降低压缩式制冷用电。研究显示在不同规模机房可减少 90%~98.9% 的冷量需求，并在 13.5MW 与 5MW 机房情境下每年分别节约约 1302.5 万 kWh 与 434 万 kWh、减排 CO₂ 约 9208t 与 3068t^[16-17]。在液冷系统条件下，机架/冷板回水温度常达 45~60℃，结合太阳能集热或小型热泵升温，可形成高效热源，减少电制冷运行时数与峰段用电。

系统集成上，可按两类路径与冷站耦合：其一，以冷水回水侧为热源，配板式换热器与水源热泵，将 30~40℃ 回水升温至 55~65℃，同时由吸收式机组制冷向冷水系统供冷；其二，以冷却水侧/冷凝热为热源，采用全（部分）热回收或直接以热水驱动吸收式机组，在维持制冷的同时输出更高温热水，提高综合能效。运行策略遵循“IT 冷却优先、压缩式兜底”的原则，吸收式机组按负荷、电价与气象条件联动启停，可结合储能削峰，并通过温度复位、旁通与差压控制保持主回路稳定，冷却回路重视散热能力与水质管理，维持真空、避免结晶与腐蚀。

总体而言，在具备稳定低品位热源且负荷匹配的园区，该技术可将废热转化为冷量并显著降低制冷电耗与碳排放。

1.2.3.3 相变蓄冷在数据中心冷却中的应用

相变蓄冷（PCM TES）利用材料在相变温度附近的潜热实现近恒温储/释冷，具有单位体积储能密度高、出水温度稳定、结构可模块化集成等特点。与传统显热水蓄冷相比，PCM 方案能够在冷量与负荷错配的昼夜、季节边界下实现“时移”，从而降低机组启停频次与峰段功率，并在应急状态下提供短时“热缓冲”，提高系统经济性与运行安全性。现有综述表明，PCM 在数据中心既可作为冷却侧的强化与稳态调节手段，也可作为储能单元降低冷却用电与运行成本，具备良好应用潜力与工程可行性^[18]。

工程集成上，PCM 常通过两种路径嵌入数据中心冷却系统：其一是在冷水侧设置蓄冷池并内置封装相变单元，与制冷机组和末端空调并联运行，在低负荷或低电价时段充冷、在高负荷时段放冷；其二是将 PCM 封装于壳管式相变换热器，与水侧传热流体直接换热，可与自然冷却或余热—热泵级联系统形成中温区能量的有序转移与再利用。面向数据中心典型温区的实验—数值研究提出了蓄热与放热的代表性工况范围（蓄热侧约 40℃、放热侧约 10℃，配合适中的流速以兼顾能量利用率与焓损失），为系统设计提供了可采用的热工边界，并与服务器散热及冷水机组常用温区相衔接，便于在不改变机房洁净与压差边界的条件下实施并联或旁通改造。如图 1.2-9 所示为“制冷机组-蓄冷池-冷风机”的回路与充/放冷路径。

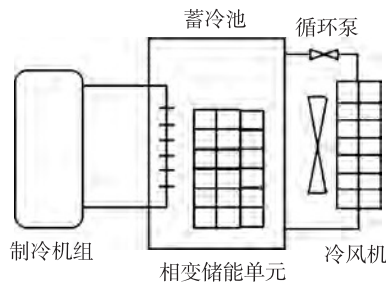


图 1.2-9 一种数据中心相变蓄冷系统^[19]

1.3 国内数据中心冷却系统政策及发展趋势

我国数据中心正由数量扩张阶段迈向质量提升阶段，迫切需要进一步完善结构布局。数据中心中冷却系统通常占据总能耗的 24% 以上，是辅助能源中占比最高的部分，其效率在很大程度上影响着整体能耗水平与运行成本^[20]。为了推动数据中心建设的高质量发展，国家通过政策引导完善标准体系，推进示范工程建设和算力统筹规划，促进冷却系统向高效化、智能化和低碳化转型。下文分别从政策导向和技术发展趋势两个方面分析我国数据中心冷却系统的转型方向和重点。

1.3.1 数字智能时代的数据中心冷却系统政策

政策在推进数据中心高质量发展中起着重要的统筹和推动作用，不仅可以实现有针对性的战略策略安排，还可以通过制度标准的设立，实现算力资源在全国范围内的优化配置和协同发展。在算力需求不断上升的背景下，国家迫切需要建立相应的政策体系，指引全国各地数据中心在总体战略上实现布局优化与差异化发展，以实现算力基础设施的协同发展。以下将从算力布局优化、节能减碳政策与标准化建设三个方面梳理我国数据中心及其冷却系统的政策走向。

1.3.1.1 数据中心算力布局政策

在数字经济时代，算力已成为驱动社会智能化转型和产业结构升级的关键要素，是新型生产力的重要体现。我国虽已通过大量建设算力基础设施获得了大量算力资源，但在地理空间上的分布仍存在显著不均，东部地区算力集中度高而西部地区算力消费潜力未充分释放，导致整体供需结构出现错配。为实现算力资源的均衡配置与高效利用，国家提出以算力网络为载体，通过网络化、集群化与智能化手段，构建全国统一的算力调度体系，从而实现资源的跨区域协同与动态平衡。

2023 年 12 月 25 日，国家发展改革委等部门发布《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》。意见里提到全国各地需进一步推动各类新增算力向国家枢纽节点集聚，将国家枢纽节点打造成为国家算力高地。支持在风光水电等清洁能源丰富、区位优势突出、产业基础较好的非国家枢纽节点地区建设高效低碳、集约循环的绿色数据中心，承接东部地区中高时延业务需求。积极推动东部人工智能模型训练推理、机器学习、视频渲染、离线分析、存储备份等业务向西部迁移。

为贯彻落实《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》提出的全国一体化算力布局目标，2025 年 5 月印发的《算力互联互通行动计划》从技术与标准层面系统部署算力资源的互联互通与高效服务。该计划聚焦不同主体、不同架构、不同地域的公共算力资源，通过构建标准化互联体系、推广高性能传输协议、建设国家—区域—行业三级算力互联平台等举措，着力破解算力资源异构、协同难、调度效率低等问题。《行动计划》明确“两步走”战略：到 2026 年要建立较为完备的算力互联互通标准、标识和规则体系；到 2028 年基本实现全国公共算力标准化互联、形成人机按需获取的“算力互联网”。

在实施路径方面,《算力互联互通行动计划》通过推广高性能网络传输协议,提高算力节点的互联能力和节点间的时延控制水平,推进算、存、网资源协同利用、调度机制创新,提高跨架构、跨地域算力供需匹配能力;建立统一算力标识体系,完善调用接口和通信协议,搭建多级互联互通平台,加强运行安全和容灾保护,全面提升公共算力资源的使用效率。

在区域实施层面,国家“东数西算”工程和全国一体化算力网络建设战略的推进,带动八大算力枢纽节点依托各自区位优势和产业基础,因地制宜制定数据中心区域布局政策,促进算力资源高效配置。

东部枢纽节点依托其在数字经济和信息产业方面的基础,从算力规模扩张向结构优化和质量提升转变,向面向人工智能训练、金融科技等高附加值场景提供高效能智算中心的方向发展,发展重心不再局限于硬件规模,而是通过提高算力密度、绿色化改造和能效优化来实现整体结构转型升级和高效利用。以北京为例,2024年发布的《北京市算力基础设施建设实施方案(2024—2027年)》明确提出,要通过重点智算中心布局增强算力供给能力,并结合政策性与市场化手段,引导传统数据中心逐步退出市场或升级为智能化算力中心。在能效管控层面,北京正在推广液冷、模块化供电以及高效机房系统设计等系统性节能手段,以全面降低PUE和CUE指标,推动城市算力设施向绿色低碳方向演进。与此同时,上海以“算力浦江”专项行动为抓手,于2025年8月推出算力基础设施高质量发展方案,提出到2025年底,全市算力中心智算规模争取达到100 EFLOPS(FP16)以上。在产业园区、科研院所、高校等完成边缘智算节点建设案例不少于5个。先进存储容量占比将提升至30%以上,并能够使全液冷、风液混合和高弹性冷却等节能技术大规模落地,满足单机柜功率超过100kW的算力需求。

西部枢纽节点通过清洁能源、土地资源和区位优势,承担大规模的数据存储、离线计算与绿色算力供给,为东部地区提供低成本、低碳化的算力后端补充与支撑,缓解东部高密度业务的能耗和空间压力。贵州通过实施“千兆黔省、万兆筑城”行动计划(2024—2025年),加快华为云、电信智算等重大项目落地,推动数据中心集群化发展,建设覆盖京津冀、长三角、成渝与粤港澳等地高速直连网络,形成全国算力通道。内蒙古呼和浩特市以网络互联与算力通道建设为突破点,2025年3月出台《关于促进绿色算力及人工智能产业高质量发展的若干意见》,规划建设400G/800G全光互联的跨枢纽网络,打造“呼和浩特—京津冀”算力走廊,实现东西部算力空间与能效高效流动。

其他枢纽节点也根据自身特点出台了相应政策。宁夏枢纽依托本地丰富的绿电资源,推动数据中心集群与新能源基地协同发展,建设绿色低碳数据中心。重点推进绿电园区与源网荷储一体化项目,探索微电网、绿电直供等模式,开展就近供电、聚合交易与分布式能源参与绿电交易试点,提升清洁能源就地消纳水平^[21]。四川依托天府数据中心集群,构建涵盖大型、超大型、城市及边缘数据中心的多层次算力体系,提出到2027年算力总规模达到40EFLOPS、智能算力占比不低于60%,强化算力承载与供给能力^[22]。在区域合作方面,贵州与成渝地区在大数据产业的生产、应用及高端产品制造等领域深度共融,实现贵州优质要素供给与成渝地区成熟市场有机衔接,打造数据驱动的成渝贵州数字合作新生态^[23]。中国数据中心算力政策如表1.3-1所示。

表 1.3-1 中国数据中心算力政策

时间	政策	基本内容
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》	进一步推动各类新增算力向国家枢纽节点集聚，将国家枢纽节点打造成为国家算力高地
2024 年 3 月	《数字中国建设 2025 年行动方案》	明确全国算力总规模 ≥ 300 EFLOPS，数据要素市场规模突破 2.1 万亿元，新增算力向国家枢纽集聚比例超 60%
2024 年 4 月	《北京市算力基础设施建设实施方案（2024—2027 年）》	加快重点智算中心布局建设，提升算力基础设施能效标准，构建“京蒙算力一体化协同发展格局”与算力走廊网络
2024 年 4 月	《关于加快“东数西算”成渝算力枢纽节点重庆集群算力网络建设的相关建议》	推动重庆集群数据中心互联调度以减少资源浪费，联动成渝、贵州集群成示范，合作接入国家算力超宽带试验网
2024 年 7 月	《贵州省“千兆黔省、万兆筑城”行动计划（2024—2025 年）》	加快贵州枢纽节点数据中心集群至国家其他枢纽数据中心集群的直连网络建设
2024 年 12 月	《“东数西算”工程宁夏枢纽建设实施方案（2025—2027 年）》	推行“算力+光伏”一体化模式，要求 2027 年算力规模 80 万 PFLOPS（智算占 80%），新建数据中心 100%绿电；建设 800G 光传输骨干网
2024 年 11 月	《四川省算力基础设施高质量发展发展行动方案（2024—2027 年）》	国家算力枢纽节点内绿色数据中心建设运营和数据服务，主要包括算力服务、算力应用场景开发和推广
2025 年 3 月	《呼和浩特市人民政府关于促进绿色算力及人工智能产业高质量发展若干意见》	2027 年实现绿色算力等产业规模超千亿元，算力 80 万 PFLOPS，培育形成集聚发展的千亿级数据算力产业集群；2030 年建成全国产业高质量发展新高地
2025 年 5 月	《算力互联互通行动计划》	到 2026 年，建立较为完备的算力互联互通标准、标识和规则体系
2025 年 8 月	《上海市通信管理局关于开展“算力浦江”2025 年算力基础设施高质量发展专项行动的通知》	2025 年年度新建成的大型以上算力中心不少于 5 个，全市算力中心智算规模争取达到 100EFLOPS 以上

1.3.1.2 数据中心节能降碳政策

作为“用能大户”，数据中心的绿色低碳建设与运营肩负着资源节约、助力“双碳”目标实现的重任。在全国一体化算力体系战略深入推进的背景下，《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》明确提出，优化全国算力基础设施布局，推动绿色集约发展，着力提升算力供给能力与能效水平。在此目标背景下，立足“东数西算”工程要求，中央和地方政府密集出台了一系列重要政策，全力推动数据中心绿色低碳高质量发展建设。

2024 年 8 月 8 日，国家发展改革委等部门印发《关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025 年的通知）》，要求加快制冷、供暖等工业通用设备能效标准升级，研究制定数据中心能效标识实施细则，力争 2025 年底整体达到国际先进水平，从设备能效与能效管理两个方面明确了数据中心绿色低碳发展的方向。同

年7月3日，国家发展改革委印发《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》，确保到2025年底，新建和改扩建大型和超大型数据中心 PUE 降至 1.25 以下，国家枢纽节点项目 PUE 不低于 1.2，明确数据中心节能技术创新与绿色化改造的目标。

在推动数据中心实现提高能效目标的过程中，节能降碳技术的推广与应用至关重要。《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》提出，以“布局优化+技术革新+制度创新”为核心，推进数据中心设备布局与配置改进及系统智能运行策略，因地制宜推动液冷、蒸发冷却、热管、氟泵等高效制冷散热技术，提高自然冷源利用率，并推广高效变频空调、自然冷源空调等高效产品设备。2025年6月26日，工业和信息化部办公厅发布《关于深入推进工业和信息化绿色低碳标准化工作的实施方案》，将绿色数据中心列入2025—2027年工业和信息化绿色低碳标准重点研究领域，提出研究数据中心能源利用评价方法、绿色智能运行管理规范及IT系统动态能效要求和测量方法，强化标准化建设对技术落地的支撑作用。2025年7月7日，工业和信息化部办公厅等六部门联合印发《关于组织开展2025年度国家绿色数据中心推荐工作的通知》，提出在6个领域推荐一批能效水平高且绿色低碳、布局合理、技术先进、管理完善的绿色数据中心。推荐对象需原则上达到《2025年度国家绿色数据中心评价指标体系》二级及以上等级，并持续优化设备布局、制冷架构、供配电方式、系统智能运行策略及节能、节水、设备回收和循环利用等，推动先进技术和管理模式在行业中广泛应用。

在“双碳”目标纵深推进的背景下，绿色能源利用成为数据中心实现低碳发展的重要抓手。2025年3月18日，国家发展改革委等五部门发布《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》，明确提出国家枢纽节点新建数据中心绿色电力消费比例需在80%的基础上持续提升。同年出台的《关于2025年可再生能源电力消纳责任权重及有关事项的通知》进一步构建起“目标明确、核算清晰、监管有力”的实施框架，明确各省消纳责任权重以物理电量为主、省外绿证为辅核算，且2025年权重需当年完成，不得结转；同时将国家枢纽节点新建数据中心正式纳入绿色电力消费比例监察范围。文件再次强化了“2025年底国家枢纽节点新建数据中心绿电占比超80%”的核心目标，从行业层面看，该目标倒逼数据中心加速能源结构革新，推动企业通过签订中长期绿电PPA合约、自建分布式光伏、参与绿电直连项目等多元路径提升绿电获取能力；从能源系统层面看，数据中心作为大规模稳定的绿电消纳主体，其刚性需求能充分激活可再生能源富集地区的产能潜力，推动“算力电力双向协同”机制落地，提升电网对新能源的消纳能力与整体弹性；从产业价值层面看，绿电利用不仅能降低碳排放，还能通过绿电价格优势降低大量电费支出。

在中央政策的指引和号召下，各地方省市因地制宜制定政策，积极推进数据中心节能降碳行动。在东部地区，北京和上海主要通过能效标准提升来推进改造。北京市加快存量数据中心提质升级，引导存量数据中心完成绿色低碳改造，计划到2027年实现北京市数据中心能效水平全面达到地方标准，年均PUE值降低至1.35以下，集约高效、绿色低碳的数据中心高质量发展格局基本形成^[24]。上海市提出推进数据中心绿色低碳改造，提升项目能效准入门槛，新建数据中心PUE不高于1.25，加大高效制冷技术和新能源推广应用力度，力争改造后PUE不高于1.4^[25]。而在西部地区，则更强调绿色能源利用。内蒙古自治区利用年均7℃的气候，保障数据中心每年有6个月实现自然冷

却，加上 80% 的绿电使用比例，让项目用电成本相比北京降低约三分之二^[26]。青海省鼓励数据中心使用高效环保制冷技术降低能耗，使用风能、太阳能等可再生能源，通过自建拉专线或双边贸易，提升数据中心绿电使用占比^[27]。中国数据中心节能降碳政策如表 1.3-3 所示。

表 1.3-2 中国数据中心节能降碳政策

时间	政策	基本内容
2023 年 12 月	《青海省重点领域数据中心节能降碳技术改造工作方案》	鼓励数据中心使用高效环保制冷技术降低能耗，使用风能、太阳能等可再生能源
2024 年 4 月	《上海市推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动计划（2024—2027 年）》	提升项目能效准入门槛，新建数据中心 PUE 不高于 1.25
2024 年 5 月	《2024—2025 年节能降碳行动方案》	加快数据中心的节能降碳改造
2024 年 7 月	《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》	首次系统构建数据中心绿色低碳发展框架，推广应用节能技术装备
2024 年 7 月	《国家碳达峰试点（深圳）实施方案》	推进大中型数据中心节能改造，逐步改造或淘汰 PUE 高于 1.4 的数据中心
2024 年 8 月	《关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025 年）的通知》	修订升级工业通用设备、制冷和供暖设备能效标准，研究出台数据中心能效标识实施细则
2024 年 9 月	《数据中心能效限定值及能效等级》（GB 40879 修订版）	要求新建大型数据中心 PUE 不得高于 1.25（原标准为 1.3），同时将液冷技术纳入强制应用范畴，淘汰高能耗冷却方案
2024 年 10 月	《新材料大数据中心总体建设方案》	到 2027 年，搭建形成“1+N”的新材料大数据中心架构体系
2024 年 10 月	《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》	推动新建数据中心逐年稳步提升可再生能源使用比例
2024 年 11 月	《北京市存量数据中心优化工作方案（2024—2027 年）》	计划到 2027 年实现北京市数据中心能效水平全面达到地方标准，年均 PUE 值降低至 1.35 以下
2024 年 12 月	《“东数西算”工程宁夏枢纽建设实施方案（2025—2027 年）》	2027 年算力规模达 80 万 PFLOPS，新建数据中心 100% 使用绿电，配套建设光伏直供电站实现能源自给
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》	旨在健全绿证市场，明确强制与自愿消费机制，推动跨省流通，以绿证核算绿电消费，支撑可再生能源发展与“双碳”目标
2025 年 5 月	《算力互联互通行动计划》	2026 年建成算力基础调度体系并推广 RDMA 协议（时延≤20ms），2028 年实现全国公共算力标准化互联
2025 年 6 月	《关于深入推进工业和信息化绿色低碳标准化工作的实施方案》	将绿色数据中心列入 2025—2027 年工业和信息化绿色低碳标准重点研究领域之一
2025 年 7 月	《2025 年度国家绿色数据中心评价指标体系》	在 6 个领域推荐一批能效水平高且绿色低碳、布局合理、技术先进、管理完善的绿色数据中心

1.3.1.3 数据中心标准化发展

随着数据中心建设进入高速发展时期，其作为数字经济核心载体的作用日益凸显，已成为社会必不可少的“数字底座”。而“数字底座”的稳固性、兼容性与高效性，离不开统一规则的支撑。标准化是实现数据中心高质量发展的重要保障，也是支撑数据中心建设的重要推动因素。

2024年8月，工业和信息化部等十一部门联合印发《关于推动新型信息基础设施协调发展有关事项的通知》，从基础设施布局与资源统筹的角度，对大数据中心建设提出标准化与规范化要求，旨在推动行业在建设、运维及管理等环节形成统一标准。各地政府结合区域实际相继出台实施意见，在能源利用效率、算力协同及设施互联互通等方面设定细化指标，逐步实现地方大数据中心建设与国家一体化体系标准的有效衔接。

截至2025年9月，通过全国标准信息公共服务平台检索发现，我国已发布的含“数据中心”相关标准共386项。其中，国家标准25项、行业标准105项、地方标准68项、团体标准188项。当前已发布的标准，重点覆盖绿色节能、基础设施、规划设计、关键技术等基础建设领域以及运维管理环节，表1.3-3中列出了部分我国数据中心相关的现行标准。

表 1.3-3 我国数据中心现行标准

时间	标准名称	主要内容
2017年5月	GB 50174—2017《数据中心设计规范》	涵盖数据中心/机房在选址、结构、机电系统、环境条件、安全防护、能效管理、分级与性能要求等方面的设计规范
2020年9月	DB31/T 1242—2020《数据中心节能设计规范》（上海地方标准）	上海地方推荐性标准，针对数据中心在节能设计方面（包括能耗控制、冷却选型、布局优化等）提出指导要求
2021年11月	GB 40879—2021《数据中心能效限定值及能效等级》	明确数据中心能效限定值和能耗等级，推动淘汰高能耗数据中心，建立统一能效评价技术准则
2023年1月	YD/T 4630—2023《边缘数据中心分类分级及技术要求》	专门针对边缘数据中心（Edge DC）进行定义、分类、分级和技术指标要求，明确在边缘场景下的可用性、能效、冗余、安全等要求
2023年11月	GB/T 43331—2023《互联网数据中心（IDC）技术和分级要求》	涵盖绿色节能、可用性、安全性、服务能力、算力效率、低碳等六大方面，对IDC的规划、设计、建设、运维与评估提出技术与分级要求
2023年12月	DB11/T 2165—2023《数据中心合理用能指南》（北京市地方标准）	对数据中心的能耗合理利用提出指导原则和方法，涵盖冷却系统、电力系统、运行调度、监测与评价等内容
2023年12月	DB32/T 4608—2023《公共数据管理规范》（江苏省地方标准）	覆盖公共数据的分类、共享、标准化导引等，对省级公共数据体系与数据中心承载的公共数据平台建设有指导意义
2024年9月	GB/T 44463—2024《互联网数据中心（IDC）总体技术要求》	明确IDC的整体技术要求，作为基础性国家标准，用于指导数据中心总体建设规范

续表

时间	标准名称	主要内容
2024 年 10 月	YD/T 6048—2024《数据中心算力技术要求和测评方法》	用于数据中心规划、设计、建设和运维阶段，规定算力技术要求与评估方法，体现数据中心算力服务能力等要求
2024 年 11 月	DB33/T 0482—2024《大型数据中心节能系统智能化建设与运维规范》（杭州市地方标准）	该标准规定大型数据中心节能系统智能化建设、运维的基本要求与评价改进机制，是地方标准层面对数据中心节能与运维智能化的具体落地规范
2025 年 6 月	GB/T 45837—2025《数据中心能源综合利用评价方法》	提出对数据中心能源综合利用的评价方法体系，有助于推动能效优化与资源综合利用
2025 年 7 月	GB/T 44989—2024《绿色数据中心评价》	在绿色评价体系里规定数据中心应达到特定等级，包括 PUE \leq 1.30 等节能要求，是绿色高质量发展指导标准
2025 年 5 月	GB/T 19413—2024《数据中心和通信机房用空气调节机组》	细化能效与智能化控制要求，规范多种冷却技术应用，提升制冷系统能效与智能化水平，推动数据中心绿色高效运行

长期以来在国家大力推进“双碳”战略、强化节能减排目标的背景下，数据中心冷却系统的相关标准也在持续更新。2017 年发布的《数据中心制冷与空调设计标准》（T/CECS 487—2017）就对数据中心制冷系统的运维和设计方面建立了专项规范，明确了 A、B、C 三级数据中心的空调系统架构参照及气流组织方式，细化不同功能区室内设计参数，并要求依据室外极端气象条件进行设备选型和运行模式设计，为制冷系统配置提供技术依据。2021 年发布的《数据中心能效限定值及能效等级》则对数据中心的空调设备能耗指定了相关指标，对采用独立配电、空气冷却、电动空调的数据中心建筑单体或模块单元进行能耗计量与能效考核，统计范围包含空凋制冷设备耗电量，并通过设定数据中心 PUE 指标划分能效等级。

2025 年 5 月发布的国家标准《数据中心和通信机房用空气调节机组》（GB/T 19413—2024）对数据中心及通信机房空调设备的性能要求和能效评价进行了细化，在沿用能效等级的基础上，结合数据中心高热量、长时间运行、高可靠等特征，在制冷性能、能效比、运行稳定、噪声、智能化等方面提出了更加可操作的指标要求，按照不同气候条件和数据中心规模，细化空气调节机组在自然冷却、间接蒸发冷却以及液冷辅助等技术路径下的适应性，以确保空气调节机组在不同工况中有效运行。同时，文件提出加强智能控制和节能管理，首次将智能调节能力、温湿度自适应控制精度以及能耗预测与动态优化能力纳入能效评价体系，推动制冷系统向智能化和精细化方向发展。

在“东数西算”工程深入推进的背景下，我国算力资源正打破地域壁垒实现跨区域调度，数据要素也随之从东部算力需求端向西部算力供给端流动，形成了“跨主体、跨行业、跨场景”的流通现状。这种外循环模式虽有效激活了西部绿电算力潜力、降低了东部企业算力成本，却让数据治理难度与流通风险进一步凸显。

2024 年 10 月，国家发展改革委、国家数据局等六部门联合印发《国家数据标准体系建设指南》，从基础通用、数据基础设施、数据资源、数据技术、数据流通、融合应用、安全保障等七个维度布局，明确了数据基础设施在数据要素流通利用过程中的基础

性和支撑性作用，对于存算设施标准、网络传输标准以及流通利用设施的技术、流程、管控要求标准等建设提出了指导意见（如图 1.3-1 所示）。

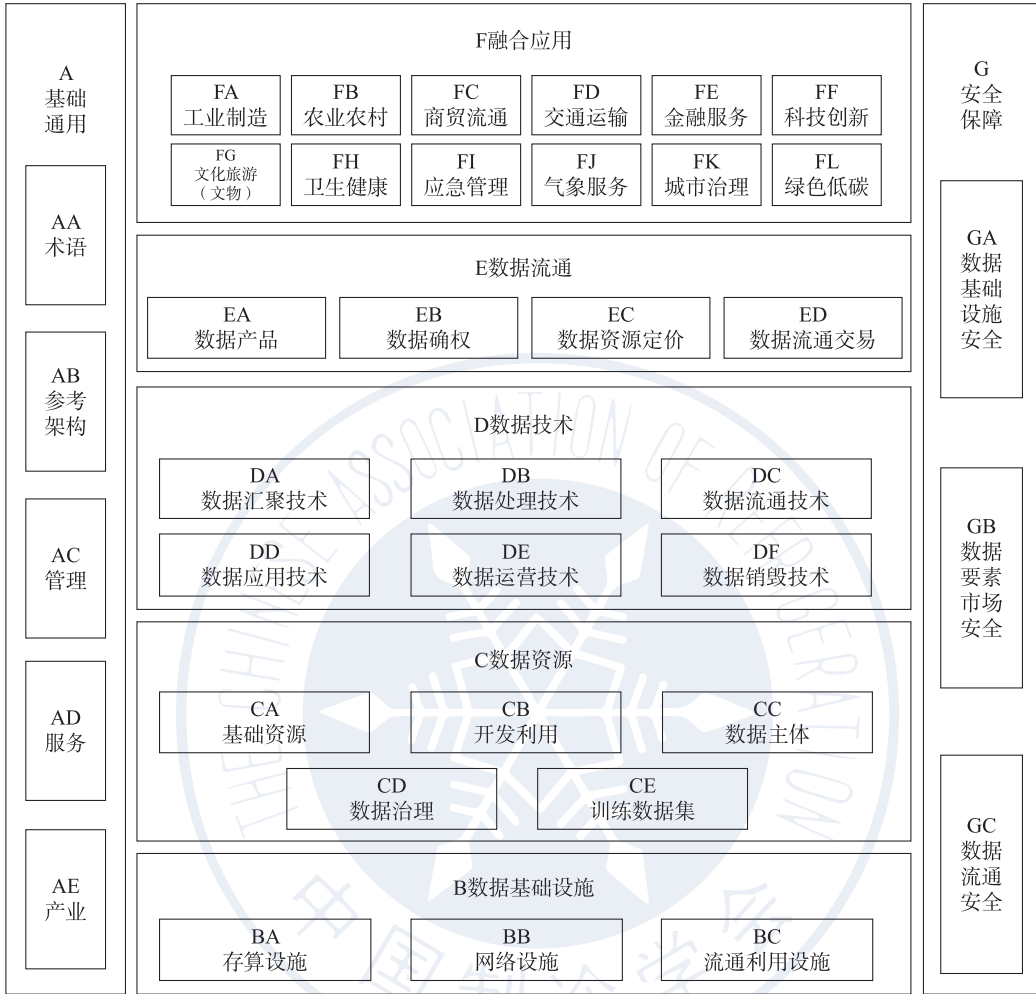


图 1.3-1 《国家数据标准体系建设指南》数据标准体系结构图^[29]

对于数据中心建设，《国家数据标准体系建设指南》从多个方面提供了系统性的指导。首先在基础设施层面，明确各种存算设施、网络设施及流通利用设施的标准要求，推动数据中心硬件互联与高效算力供给。其次在安全保障层面，指导数据基础设施安全标准建立，规范数据中心安全建设框架，结合数据流通安全标准，为数据中心数据存储与流转提供保障。最后，为数据资源、数据技术等标准建立有机联系，引导数据中心在数据全生命周期管理、技术应用适配等方面实现规范化，助力数据中心成为数据“供得出、流得动、用得好、保安全”的关键载体，为“东数西算”工程下数据中心的跨区域协同与绿色高效发展奠定基础^[28]。

1.3.2 数字智能时代的数据中心冷却系统发展趋势及未来展望

随着 DeepSeek、ChatGPT 等大模型的持续升级迭代，全球人工智能产业正经历深

刻变革，迈入全新发展阶段。算力效率提升带来的成本下降，大幅降低了 AI 技术的应用门槛，同时引发了全行业算力需求激增，刺激了更多领域的算力消费。

为满足算力供应需求的不断增长，AI 芯片的算力密度、功率密度将快速增加，整机柜的功耗将会从 50kW 提升到未来 300kW 以上^[30]。功耗增加必然带来高密度的散热，普通的风冷系统难以适应高密度的热量堆积，容易产生局部热点，导致设备降频，影响运行的效率和稳定性。与此同时，AI 任务的算力动态变化十分明显，以大模型训练为例，其算力需求在训练阶段持续高位运行，而在推理阶段的负载随着请求量大幅变化，峰均比差异可达到 40% 以上，将进一步增加散热系统的适配难度，要求冷却系统具有更高的动态响应能力，冷却系统需具备更强的精准、智能调控能力。此外，高密算力和复杂的散热方案的应用也给数据中心运维带来了诸多问题，如液冷系统漏液检测、多冷却模块协同调试、“算力-散热”联动故障排查等工作，进一步提升了数据中心运维的难度和风险，对冷却系统的可靠性、可维护性设计和运维人员的专业性提出了新的挑战，这些挑战对数据中心冷却系统提出了新的需求。

1.3.2.1 绿色高质量

(1) 加深储能技术的应用

电力成本通常占数据中心运营总成本的 60%~70%，随着“双碳”目标的推进和能耗政策的趋严，提高电力的使用效率成为了数据中心节能增效的关键。数据中心从电网取电受电网负荷变化的影响，低谷用电量不足导致发电端多余电能未有效利用，高峰用电需求集中导致电价高，造成数据中心用电成本增加，且电网过载导致供电不稳定，威胁数据中心运行安全。电池储能系统（BESS）可在电网低负荷时储电，在高峰时释放电能，为制冷及供电系统提供稳定支持，显著缓解电网压力并提升能源利用效率^[31]。与此同时，风能、光能等可再生能源的引入为储能系统的充放电周期优化提供了条件，使储能系统能灵活应对清洁能源出力的变化而进行调整，进而减少对化石能源的消耗，促进供电系统的绿色化改造和运行优化。

(2) 液冷技术发展

液冷技术因能灵活匹配不同场景，满足从常规到超高功率密度机柜的散热需求，且制冷效率远高于传统风冷，可在高密场景下快速带走热量、降低能耗，在我国数据中心规模不断扩张且机柜功率密度持续攀升的背景下，液冷服务器市场不断扩大。根据 IDC 报告，2024 年我国液冷服务器市场规模已突破 23.7 亿美元，同比增长约 67%。在 AI 和高性能计算的驱动下，部分边缘节点也已开始引入液冷方案，以降低制冷能耗、提升整体效率^[32]。

从技术演进来看，液冷技术发展呈现出多层次并行的趋势。当前，冷板式与直液冷的改造代价较低、与既有架构兼容性较好，随着算力密度提升，浸没式、两相冷却、微流通道等方案将逐步在超高功率密度场景应用；而从长远来看，可能是多种技术叠加使用的复合冷却，智能切换与能量网络连动实现系统级能效平衡，在高热流密度和极端场景下，其散热性能和能效水平也显著优于风冷。正是基于这种趋势，我国在水下数据中心冷却方向取得实质性突破，首座海底 AI 数据中心在投入使用后，每年可节约用电 1.22 亿 kW·h、节约用地 6.8 万 m²、节约淡水 10.5 万 t^[33]。然而，液冷落地仍面临改造成本高、流体系统可靠性低、标准体系不完善和运维难度大的现实问题。

针对传统风冷数据中心改造周期长、施工难度大的问题，混合冷却技术为过渡期提供了可行方案。该技术在保留原有风冷架构的基础上，局部引入液冷模块，实现低负载时依靠风冷、满负载时切换液冷的动态运行策略，不仅有效降低了整体能耗，也在单系统出现故障时提供了冗余支撑，从而增强了系统的运行稳定性^[34]。随着液冷市场规模的持续扩大，标准化进程也在同步提速。2024年，中国信息通信研究院发布《数据中心液冷技术标准》，对冷板接口尺寸、冷却液物理特性等关键参数进行了统一，提升了设备间的互操作性，降低了集成与部署成本。与此同时，ASHRAE正在修订《Liquid Cooling Guidelines》系列指南，进一步细化冷却液选择、材料兼容性及安全要求等内容，为液冷技术的国际化应用提供技术依据与行业参考。

(3) 零碳数据中心

零碳数据中心指能够通过技术创新、能源结构优化或碳交易等方式，平衡甚至消除运营及建设过程中产生的温室气体排放的绿色数据中心模式^[35]。目前实现零碳数据中心主要可以使用能源结构低碳化、运营效率极致化和碳抵消机制补充三条技术路径。能源结构低碳化是通过直接在供电端使用风能、太阳能、水能等可再生能源作为主供能，或通过绿电采购替代传统化石能源发电，从能源源头减少碳排放；运营效率极致化通过液冷、高效服务器、智能算力调度、余热回收等技术，降低PUE至1.2以下甚至接近1，减少能源消耗总量，间接降低碳排放。碳抵消机制是指对于短期内无法完全消除的残余碳排放，通过购买碳信用进行抵消，最终实现全生命周期碳排放“净零”。

国内目前已有关于零碳数据中心的建设和设计标准，包括T/CA 305—2023《零碳数据中心分级与评价方法》和T/SHSIC 0201—2023《零碳数据中心策划技术与建设评价规范》等团体标准，对零碳数据中心的建设和评价给出了一定的指导意见和实施路径。但是暂时还未建立完善的标准体系和在全国各地区的适用规则，与现有的数据中心标准也难以整合，在未来还有待通过实际项目和研究来进行补充和完善。

1.3.2.2 安全可靠

(1) 配电系统安全

在新型智算中心中，AI训练任务在训练阶段的平均功耗几乎等于其峰值功耗，峰均比可趋近1.0，设备可能需要在峰值功率下运行数小时、数天甚至数周^[36]。高功率IT负载直接带动冷却需求同步上升，使冷源设备必须长时间维持接近满载的运行状态。如果配电系统在安全设计方面不足，容易对电网及其他设备造成冲击，从而放大停机风险。AI与高密度算力场景下，电力系统不仅要承载更高且持续的用电负荷，还需与冷却系统紧密协同。未来的设计应通过采用高可靠性的冗余架构、具备抗冲击能力的配电设备以及软启动策略来平滑冷机启停带来的电流波动，同时引入蓄冷/储能装置实现削峰填谷，增强整个电网-冷源链条的稳定性与安全性。

(2) 数据中心灾备能力

对于数据中心的数据存储安全而言，容灾能力不仅体现在对潜在灾害的预防上，也体现在灾害发生后最大限度地保障数据安全与业务连续性的能力。相关研究表明，在遭遇灾难的同时又没有灾难恢复计划的企业中，将有超过60%在两到三年后退出市场^[37]。而随着社会对于数据的依赖程度逐渐递增，数据中心的灾备能力更加需要引起重视。

灾备体系由“容灾”和“备份”两部分组成，其中备份是容灾的基础。备份通常指

将全部或部分数据从主机存储介质复制至其他介质或位置，以防止数据因设备故障或灾害丢失；容灾系统则通过在异地部署两套或多套功能相同的 IT 系统，当主系统发生故障时，可迅速切换至备用系统，确保业务的连续运行。

在实际的灾备系统构建中，应结合风险损失评估与投资成本分析，选择合适的灾备级别与恢复策略。同时，可通过引入云管理平台、光传输网络及智能监控等技术手段，进一步提升灾备系统的安全性、可靠性与响应效率，实现数据中心的高可用与快速恢复。

(3) 数据隐私防护升级

2025 年 7 月的英伟达后门事件凸显了关键核心技术自主可控的重要性，地缘政治带来的数据隐私风险使得数据中心设备国产化成为必然趋势。智算中心存储着海量敏感训练数据与业务核心信息，而境外设备的硬件后门、隐性漏洞可能导致数据泄露或被恶意操控，直接威胁业务安全与数据主权。

针对芯片泄密风险，中国数据中心的安全防护应以“安全可控、技管协同”为核心，重点推动国产设备应用，从硬件、固件、数据层构建多层次防护体系。

强化设备自主可控，推动国产设备规模化应用，以政策引导企业用国产芯片替代存在安全隐患的境外产品，尤其对国家机关核心数据中心，要求关键设备实现国产化；对核心算力节点实施物理隔离与无网化防护，从硬件源头降低泄密风险。

严格安全审查与管控，开展穿透式安全审查，要求关键设备关闭默认数据回传功能，全面排查并封堵潜在安全通道；同时依托国密算法实现数据存储全链路加密，建立算力调度与数据流向实时监控机制，从技术层面阻断信息泄露路径。

构建全周期防护格局，以自主可控软硬件体系为支撑，覆盖数据中心设计、部署、运行全流程，通过技术创新与管理规范协同，为算力安全与国家信息安全筑牢底层保障。

1.3.2.3 智能高效

(1) 智能化碳市场管理

在“碳中和”目标实现过程中，碳交易体系会通过市场化价格转换将碳排放转换为具有价值的成本信号，引导用能主体主动优化能源结构、稳步推进低碳化转型。基于数据中心等高耗能行业，搭建可与全国碳市场对接的碳交易体系，对碳排放进行精准核算、合规交易和动态管控是推进数据中心高效脱碳的重要路径。目前，一些企业开始着手基于 AI 模型建立碳监测与核算平台，对电力消耗、制冷能耗和制冷剂泄漏等环节进行采集，建立数据中心全生命周期的碳排放模型，可视化追溯和动态评估排放源；结合 AI 模型的预测能力，对碳价进行分析，为企业制定碳资产管理和碳信用投资策略，将减排成果转化为可度量、可交易的“碳资产”，纳入统一的企业碳账本进行管理。与此同时，多地探索算力碳标签机制，通过计算每单位算力对应的碳排放，建立云计算与 AI 服务的碳排放度量指标，促进绿色算力的差异化定价和竞争优势^[38]。未来数据中心的碳交易将从“被动履约式减排”转向“主动碳资产经营”，形成能耗优化、碳收益和算力供给协同发展的新局面，成为绿色算力体系建设的重要经济支撑。

(2) AI 赋能数据中心冷却系统的节能改造

数据中心通过提供 AI 算力推动人类社会向着自动化、数字化和电气化等更加可持续的方向演进，赋能交通、制造和发电领域，减少对环境的影响。反过来，AI 也可以引导数据中心冷却系统的能源管控优化，来减少自身对环境的影响。AI 的作用不仅在

于提供节能建议，还可实现闭环控制，从冷水温度设定、冷流分配到蓄冷放/充电策略均可智能优化。AI 和机器学习技术可以用于数据中心冷源系统和空调末端的控制，通过对历史数据的分析，实时监测数据中心气流分布，并基于数据中心负载的变化，实时匹配合适的冷量输出。通过自动调节末端精密空调及风机的运转方式，从而实现动态地按需制冷，以减少热点并且降低机房的能源消耗与运维成本。AI 技术在机房空调群控系统中的应用，可以实现机房内部环境参数的智能监测和控制，并通过自动调节与优化来提高能效和系统的可靠性，从而达到节能减排的目的。智能化发展趋势使冷却系统从传统的被动式散热，转变为主动、智能地根据算力负载动态调整散热策略，极大提升了冷却系统的适应性与可靠性。Google 与 DeepMind 的合作表明，AI 优化数据中心冷却可使冷却能耗降低约 40%，未来 AI 有望进一步用于冷源的预测性维护和故障诊断，以提升系统稳定性与设备寿命^[39]。

(3) 预制化、模块化建设数据中心

传统数据中心从设计到交付需经历土建、机电安装等多环节，一座万卡级数据中心交付周期约 12 个月，难以匹配 AI 算力快速增长的需求。3 年前规划中标准机柜功率为 5~10kW，如今单台 AI 服务器功耗已超 10kW，建设速度与业务迭代存在显著脱节。面对如今算力需求快速提高的现状，预制化、模块化建设方式成为破局关键。通过装配式建筑与模块化技术深度融合，将机柜、配电、制冷等系统集成于集装箱载体，实现工厂预生产、预测试，现场“搭积木”式组装，与土建工程并行推进。预制化 AIDC 解决方案预制装配率达 90%，工期较传统缩短 60% 以上，3 个月即可建成、17 天完成交装。预制模块化模式通过工厂预制与现场施工并行，交付时间缩短 50%。预制化的数据装配模式，不仅实现了快速交付，还能减少现场测试环节、降低全生命周期碳排放，同时支持柔性扩容，适配 AI 时代机柜功率密度骤升的需求。普洛斯、浩云长盛等 IDC 服务商及浪潮信息、华为等硬件厂商已积极布局，预计预制化、模块化将成为数据中心建设的主流模式，助力算力需求快速落地^[40]。

总体来看，数据中心产业虽处于高速发展状态，但发展目标正从“规模化”转向“质量化”。一方面，随着算力需求的不断扩张，数据中心建设和改造逐步转向高效和灵活性，通过预制、模块化部署的方式实现快速部署，同时通过混合式制冷等技术路径实现存量机房的能效优化，以更低的能耗支撑更高的算力负载。另一方面，绿色低碳和安全韧性成为未来演进的重点方向，数据中心加快推进储能系统和可再生能源应用，以满足日益增加的 PUE 和绿电占比，促进行业低碳、零碳发展；同时，加强安全韧性设计，提高灾备能力和风险防范，保证业务连续性和数据安全。全生命周期管理层面 AI 等技术融入，改变数据中心建设、运维和调度模式，形成从能源管理到运维决策的智能闭环，助力数据中心高效、绿色和安全协同发展的长期演进。

参考文献

- [1] 李超. 数据中心蒸发冷却空调系统运行控制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [2] 赵晓, 薛佳, 刘占盛, 等. 自然冷源技术研究综述 [J]. 暖通空调, 2023, 53 (S2): 143-147.
- [3] Brightlio. AI's influence on the data center colocation market [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://bright->

- lio.com/ai-colocation-data-center-market.
- [4] Maryland General Assembly. Certificate of public convenience and necessity and related approvals—definition of generating station (Critical Infrastructure Streamlining Act of 2024); SB 474. [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://mhaonline.org/wp-content/uploads/2024/05/sb-474-certificate-of-public-convenience-and-necessity-and-related-approvals-definition-of-generating-stations.pdf>.
- [5] Telecommunications Industry Association. Telecommunications infrastructure standard for data centers: ANSI/TIA-942-C [S/OL]. Arlington, VA: TIA, [2026-01-19]. <https://www.tiafoc.org/tia-standards-update/tia-942-c/>.
- [6] Kentucky Legislature. KRS § 139.499—Exemption for certain data center equipment [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://apps.legislature.ky.gov/law/statutes/statute.aspx?id=55425>.
- [7] European Commission. Commission delegated regulation (EU) 2024/1364 of 14 March 2024 on the first phase of the establishment of a common Union rating scheme for data centres [EB/OL]. [2026-01-19]. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2024/1364/oj/eng.
- [8] European Union. Directive (EU) 2024/1760 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on corporate sustainability due diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 and Regulation (EU) 2023/2859 [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1760/oj/eng>.
- [9] Datacenter Dynamics. Japan unveils plan to relocate tech industries near low-carbon energy hubs [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/japan-unveils-plan-to-relocate-tech-industries-near-low-carbon-energy-hubs>.
- [10] WILSON M. The impact of Australia’s National Greenhouse and Energy Reporting Act on data centres [EB/OL]. [2026-01-19]. <https://www.nlyte.com/blog/the-impact-of-australias-national-greenhouse-and-energy-reporting-act-on-data-centres>.
- [11] Uptime Institute. Uptime Institute cooling systems survey 2024: direct liquid cooling (UII Data Report 139) [EB/OL]. [2026-01-19]. https://intelligence.uptimeinstitute.com/sites/default/files/2024-05/Uptime%20Institute%20Cooling%20Systems%20Survey%202024_0.pdf.
- [12] 上海市能效中心. DLC 直接浸没式液冷技术 [J]. 上海节能, 2024 (1): 179-180.
- [13] Dell Technologies. Deep dive into direct liquid cooling [R/OL]. Round Rock: Dell Technologies, 2024. [2026-01-19].
- [14] Li G, WANG S, CUI M, et al. Optimal design of a novel combined heat source system using solar energy and data center waste heat for desiccant regeneration [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 122845.
- [15] 周利军, 张立江, 刘莉莉, 等. 数据中心余热回收系统设计要点分析 [J]. 制冷与空调, 2021, 21 (9): 53-56.
- [16] EBRAHIMI K, JONES G, FLEISCHER A. A review of challenging issues in the integration of absorption refrigeration and organic Rankine cycle into a data center cooling system [C] // IEEE. Proceedings of the 14th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando, 2014: 1047-1054.
- [17] LEYLA A, EDRIS M, NAVID B, et al. Techno-economic analysis of waste heat utilization in data centers: application of absorption chiller systems [J]. Energies, 2021, 14 (9): 2433.
- [18] 刘红敏, 卞家港, 江盼, 等. 相变材料在数据中心绿色冷却中的研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52 (2): 585-587, 594.
- [19] 张媛琳, 谭宽. 相变储能系统在数据中心中的应用 [J]. 信息与电脑, 2019 (22): 6-7.

- [20] 翁建刚. 中兴通讯液冷技术白皮书 [R]. 中兴通讯股份有限公司, 2022.
- [21] 宁夏日报. 我区印发“东数西算”工程宁夏枢纽建设实施方案 [EB/OL]. (2024-12-18) [2025-10-14]. https://szb.nxrb.cn/nxrb/pc/con/202412/18/content_143446.html.
- [22] 重庆市大数据发展局. 关于加快“东数西算”成渝算力枢纽节点重庆集群算力网络建设的相关建议 [EB/OL]. (2024-04-23) [2025-10-14]. https://cqrd.gov.cn/site/article/1217489678498287616/web/content_1217489678498287616.html.
- [23] 张自力, 解婷, 李文平. “东数西算”成渝枢纽战略分析和示范落地 [J]. 大数据, 2023, 9(5): 32-47.
- [24] 北京市经济和信息化局. 关于印发《北京市算力基础设施建设实施方案(2024—2027年)》的通知 [EB/OL]. (2024-04-24) [2025-10-14]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefa-gui/202404/t20240426_3639351.html.
- [25] 上海市发展和改革委员会. 电子通信网络和数据基础设施的环境可持续性要求 [EB/OL]. (2024-04-15) [2025-10-14]. <https://fgw.sh.gov.cn/ys-szgyjcssfw-2.1.3.1.1/index.html>.
- [26] 刘伟, 王靖, 哈丽娜. 绿色算力大基地是怎样炼成的 [EB/OL]. (2025-06-16) [2025-10-14]. <https://www.jjckb.cn/20250616/f7ae9ff7c151472d8377680f417b5f9b/c.html>.
- [27] 产业协调处. 关于印发《青海省重点领域数据中心节能降碳技术改造工作方案》的通知 [EB/OL]. (2023-12-11) [2025-10-14]. http://fgw.qinghai.gov.cn/zfxxgk/sdzdgnr/fgwwj/202312/t20231218_85856_ghb.html.
- [28] 韦韬. 构建国家数据标准体系, 助力数据要素可信流通发展 [EB/OL]. (2025-01-30) [2025-10-14]. https://www.nda.gov.cn/sjj/zwgk/zjld/0105/20250105180414139751118_pc.html.
- [29] 国家发展改革委. 关于印发《国家数据标准体系建设指南》的通知 [EB/OL]. (2024-09-25) [2025-10-14]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6978809.htm.
- [30] 朱照生, 张岳普, 马焯. AIDC 机房参考设计白皮书 [R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2025.
- [31] 中国信息通信研究院. 数据中心白皮书 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2022.
- [32] 王勇, 谢静. 中国半年度液冷服务器市场(2024下半年)跟踪 [R]. 北京: IDC 中国, 2024.
- [33] 中央纪委国家监委网站. 把数据存进海底——探访全球首个商用海底数据中心 [EB/OL]. (2024-03-11) [2025-10-14]. https://www.ccdi.gov.cn/yaowenn/202403/t20240311_333473.html.
- [34] 瑞思博创. 数据中心冷却技术新趋势: 混合冷却如何破解冷热博弈? [EB/OL]. (2025-03-30) [2025-10-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/J3IrIGPmCGfsZAGgJm5WFA>.
- [35] 王元月. 零碳数据中心园区能碳管理系统白皮书 [R]. 北京: 开放数据中心委员会, 2023.
- [36] 熊莉. 新型智算中心改造系列报告二 [R]. 深圳: 国信证券, 2024.
- [37] 华为技术有限公司. 华为数据中心容灾备份解决方案 [EB/OL]. (2019-11-30) [2025-10-14]. <https://wenku.baidu.com/view/a337fa0601d8ce2f0066f5335a8102d276a26193.html>.
- [38] ZHANG G, CHEN S C I, YUE X. Blockchain technology in carbon trading markets: impacts, benefits, and challenges—a case study of the shanghai environment and energy exchange [J]. Energies, 2024, 17 (13): 3296.
- [39] EVANS R, GAO J. DeepMind AI reduces google data centre cooling bill by 40% [EB/OL]. (2016-06-20) [2025-10-14]. <https://deepmind.google/discover/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/>.
- [40] 钛媒体. 探路 2025: 数据中心行业三大趋势展望 [EB/OL]. (2025-01-10) [2025-10-14]. <https://www.tmtpost.com/7416290.html>.

第 2 章 末端及输配系统的基本问题

数据中心冷却系统的核心任务在于高效、可靠地将 IT 设备（尤其是高功率芯片）产生的热量传递至室外环境。这一过程涉及末端侧的取热、输配系统的传热以及冷源侧的散热三大关键环节。本章聚焦于末端及输配系统这一热量传递链条的前端部分，系统阐述其基本原理、构成形式、运行特性及面临的挑战。首先，介绍冷却传热过程的核心环节，明确信息设备的关键参数及其对冷却系统的要求；其次，详细定义末端系统的构成，并分类探讨从机房级到浸没式液冷等不同层级末端技术的原理、特点、适用范围及演进趋势；再次，分析输配系统的类型、结构与关键设计要素；最后，探讨冷源节点与自然冷源利用过程，并总结当前末端及输配系统在能效提升、高密度散热、运维复杂度等方面存在的核心问题，为后续章节的深入分析与解决方案奠定基础。

2.1 冷却传热过程及信息设备基本参数

2.1.1 冷却传热过程

近年来，随着信息技术、人工智能、大数据等领域的快速发展，以及 ChatGPT、DeepSeek、无人驾驶等前沿技术的突破，数字产业规模逐步扩大，我国对算力的需求也逐年增加^[1]。数据中心作为集中进行数据传输、运算、储存的基础设施，在大数据产业中起到基础性、关键性作用。数据中心机房中规律排布多列机柜，机柜中放置的服务器为用户提供安全、可靠的算力支撑服务，保障数据处理的高效运行。数据中心中包含机柜、供配电、冷却、消防、照明等多个支撑系统，实现数据稳定高效传输和计算。数据产业的快速发展使得 IT 设备和数据中心的需求和使用量迅速增加，数据中心机架数及其市场规模均有明显增长^[2]。

数据中心数量与规模的发展在促进数字产业发展的同时，也造成了巨大的能源消耗以及对环境的影响。数据中心总能耗可主要分为 IT 设备、制冷系统、电源系统和照明系统四个部分^[3]。数据中心耗电量居高不下主要有两个原因：一是数据中心全年不间断的运行模式；二是服务器等 IT（Information Technology）设备的密集摆放导致数据中心发热密度非常高，随着服务器集成度的持续提升，数据中心的功率密度也在不断攀升。近年来，高性能计算（HPC）和人工智能等算力密集型业务迅猛发展，芯片的计算能力不断跃升，其热设计功耗（TDP）也呈现出快速增长的趋势。当前，服务器中的主要热源仍集中在芯片层面。芯片通过光刻等精密制造工艺，在硅片上逐层叠加不同功能层，集成数亿至数百亿个晶体管，并通过互连结构形成完整的电路系统，其高集成、高

功率的特性决定了其散热需求远高于以往。根据 NVIDIA 官方公布的消息^[4]，其 GPU 芯片 TDP 的增长尤为显著：2020 年推出的 Ampere 架构 A100 芯片功耗为 300W，2022 年的 Hopper 架构 H100 提升至 700W，而 2024 年发布的 Blackwell 架构 B200 已达到 1000W。2025 年下半年，下一代 B300 芯片的单卡功耗将突破 1400W，散热功率达到 $200\text{W}/\text{cm}^2$ 。这一趋势标志着算力密度进入指数级跃升阶段，芯片要求的散热功率已从以往的 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 增加到 $200\text{W}/\text{cm}^2$ 。芯片表面与周边空气之间的等效换热热阻在系统总热阻中的占比也将增加到 60% 以上，对冷却系统的承载能力提出了更高挑战。

高功率芯片的运行温度直接关系到系统的稳定性。当芯片工作温度超过 75°C 时，故障概率将呈指数级上升，温度每升高 1°C ，器件故障率就会增长 5%^[5]，55% 的 IT 服务器故障事故原因是温度失控。因此，芯片功耗的快速上升不仅是计算能力提升的体现，更是冷却系统设计中不可回避的瓶颈。末端换热能力、输配系统的流量与压差调节能力，以及整个系统的动态响应能力，均需与这一变化趋势同步提升，方可确保数据中心的可靠运行。

在数据中心的总能耗中，IT 设备的耗电量约占 45%，而冷却系统的耗电量则接近 40%，两者合计占比高达约 85%。因此，提高冷却系统的能效水平对整体能耗控制至关重要。数据中心的冷却任务实质上是将机房末端服务器产生的热量高效地排到室外环境中。从散热路径来看，冷却过程可划分为三个主要环节：机房末端侧、输配侧以及室外冷源侧。热量首先在末端侧通过风冷或液冷方式从芯片表面采集，经由输配系统传递至室外冷源侧进行最终散热。输配介质的选择和控制策略通常受末端形式与室外冷源类型共同决定，需在冷量匹配与能效优化之间取得平衡。室外冷源侧可以采用风冷、水冷、蒸发冷却、自然冷却等多种冷却机制。图 2.1-1 为数据中心典型冷却系统构成，数据中心冷却系统由多个尺度、不同物理机制的子系统耦合构成，其节能优化需从各个环节协同推进：末端与热源协同匹配、末端与冷源协同匹配、冷源与环境协同匹配，而且不同环节所涉及的技术问题和优化策略各不相同。



图 2.1-1 数据中心典型冷却系统构成

2.1.2 信息设备基本参数

数据中心冷却系统的关键运行参数主要包括服务器进风温度、服务器出风温度及机房环境湿度。冷却系统的环境设定应以保障服务器进风条件为核心，同时优化出风组织并精准控制机房湿度。随着电子技术的进步，服务器、交换机、存储设备等电子信息设备对进风区环境温度的适应性显著提升。ASHRAE TC9.9《数据处理环境热管理指南》(2015版)^[6]推荐，采用通风冷却的IT设备，其进风干球温度范围为18~27℃。GB 50174—2017《数据中心设计规范》第5.1.1条明确规定^[7]：主机房和辅助区的温度、露点温度及相对湿度应满足电子信息设备要求；设备未确定时，应执行附录A规定。附录A中，对冷通道或机柜进风区域的温度要求同样为18~27℃。

在ASHRAE TC9.9《数据处理环境热管理指南》的第5版中^[8]（2021年版并在2024年有修订，如图2.1-2、表2.1-1所示）相对以往版本，增加及调整了高密服务器风冷及液冷部分的环境规格，对推荐的环境范围进行了更多优化，以助力数据中心的能源改善。等级A1通常是一个对环境参数（露点温度、温度和相对湿度）有严格控制且进行关键任务处理的数据中心；通常为这种环境设计的产品类型是企业服务器和存储产品。等级A2、A3和A4通常是一个对环境参数（露点温度、温度和相对湿度）有一定控制的信息技术空间；通常为这种环境设计的产品类型是大容量服务器、存储产品、个人计算机和 workstation。在这三个类别中，A2等级对温度和湿度的要求最窄，A4等级对环境的要求最宽。

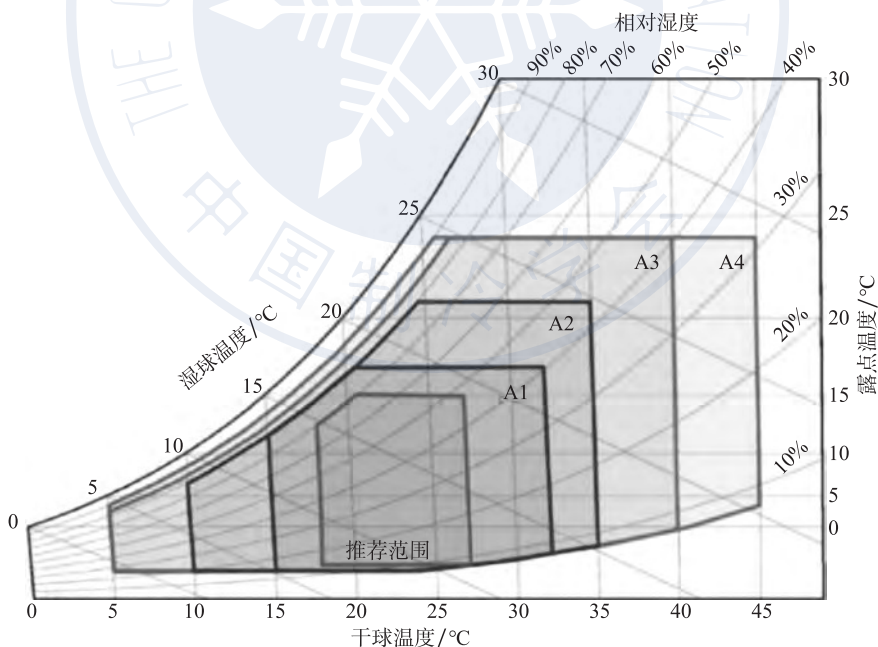


图 2.1-2 2021 年 A1、A2、A3 和 A4 等级的推荐和允许范围
(推荐范围适用于通过试样测量验证的低污染物水平)

表 2.1-1 2021 年风冷散热热管理指南

风冷设备环境规格							
等级	产品工作状态					产品非工作状态	
	干球温度/°C	湿度范围 (无凝露)	最大露点温度/°C	最大海拔/m	最大变化率/ (°C/h)	干球温度/°C	相对湿度/%
推荐 (适用于 A1 - A4 等级; 本书中有关数据中心指标的内容适用于此范围之外的情况)							
A1~A4	18~27	露点温度 -9°C ~ 15°C, 且相对湿度 70% 或 50%	—	—	—	—	—
允许							
A1	15~32	下限: 露点温度 -12°C, 相对湿度 8% 上限: 露点温度 17°C, 相 对湿度 80%	17	3050	5/20	5~45	8~80 ^k
A2	10~35	下限: 露点温度 -12°C, 相对湿度 80% 上限: 露点温度 21°C, 相 对湿度 80%	21	3050	5/20	5~45	8~80 ^k
A3	5~40	下限: 露点温度 -12°C, 相对湿度 8% 上限: 露点温度 24°C, 相 对湿度 85%	24	3050	5/20	5~45	8~80 ^k
A4	5~45	下限: 露点温度 -12°C, 相对湿度 80% 上限: 露点温度 24°C, 相 对湿度 90%	24	3050	5/20	5~45	8~80 ^k
B	5~35	下限: 相对湿度 8% 上限: 由露点温度 28°C 与 相对湿度 80% 共同约束, 取 更严格者	28	3050	无要求	5~45	8~80
C	5~40	下限: 相对湿度 8% 上限: 由露点温度 28°C 与 相对湿度 80% 共同约束, 取 更严格者	28	3050	无要求	5~45	8~80

注: 上标 k 为对高湿环境学腐蚀或吸湿性粉尘的注释。

表 2.1-2 所示为 2021 年高密度服务器热指南^[9]。H1 是针对高密度服务器的新类别, 是否需要产品使用此高密度服务器类别, 由信息技术设备 (ITE) 制造商自行决定。H1 类的最低湿度水平取露点温度为 -12°C 时的湿度值和相对湿度 8% 中的较高值 (湿度更大的值)。两者在约 25°C 处相交。在此交点 (约 25°C) 以下, 露点温度 (-12°C) 代表最低湿度水平, 而在此交点以上, 相对湿度 (8%) 为最低值。

表 2.1-2 2021 年高密度服务器热指南

风冷设备环境规格							
等级	产品工作状态					产品非工作状态	
	干球温度/℃	湿度范围 (无凝露)	最大露点 温度/℃	最大 海拔/m	最大变化率/ (℃/h)	干球 温度/℃	相对 湿度/%
推荐							
H1	18~22	露点温度-9℃~15℃，相对湿度 70%或 50%	—	—	—	—	—
允许							
H1	15~25	下限：露点温度-12℃，相对湿度 8% 上限：露点温度 17℃，相对湿度 80%	17	3050	5/20	5~45	8~80

针对高密度服务器（集成多高功率组件），推荐进风温度范围为 18~22℃，上限为 25℃，低于传统 A1~A4 类别的 32℃上限，以适应高密度散热需求。明确 IT 设备在任意 15min 时段内温度变化率不得超过 5℃，磁带存储设备温度变化率限制为 5℃/h，其他设备为 20℃/h。高海拔地区（900m 以上）需根据海拔高度调整干球温度上限，H1 类每升高 500m 降低 1℃，A1~A4 类调整幅度更严格。若数据中心环境通过银/铜试片测试显示腐蚀速率低于阈值（银<20nm/月，铜<30nm/月），推荐湿度上限可从 60% 提升至 70%；若存在催化型污染物（如氯、硫化氢），湿度上限需降至 50% 以下。低湿度环境下（相对湿度 8%），需采用防静电地板、接地移动设备及维护人员佩戴腕带等措施，以降低静电放电（ESD）风险。

服务器运行环境相关标准的形成是数据中心用户和 IT 设备制造商达成一致的结果。显然，更高的进风温度会提高服务器故障率、提高服务器自身的能耗，会导致服务器性能下降、噪声增大。温度升高的同时，湿度范围也放宽，这种高温高湿的环境会提高腐蚀风险。因此，数据中心运行时既要节能，也必须兼顾服务器的性能。IT 设备随着入口温度变化，其故障率变化如表 2.1-3 所示。

表 2.1-3 服务器入口温度与故障率的对比

干球温度/℃	故障因子		
	下限值	平均值	上限值
15.0	0.72	0.72	0.72
17.5	0.80	0.87	0.95
20.0	0.88	1.00	1.14
22.5	0.96	1.14	1.31
25.0	1.04	1.24	1.43
27.5	1.12	1.31	1.54
30.0	1.20	1.38	1.63
32.5	1.27	1.48	1.69

续表

干球温度/℃	故障因子		
	下限值	平均值	上限值
35.0	1.35	1.55	1.74
37.5	1.43	1.60	1.78
40.0	1.51	1.65	1.81
42.5	1.59	1.71	1.84
45.0	1.67	1.76	1.88

注：以服务器入口温度 20℃时的故障率为 1.00 作为对比因子。

服务器通常依据其出风温度及关键部件 [如中央处理器 (CPU)、图形处理器 (GPU)] 的多个传感器参数动态调节内部风扇转速。服务器出风状态对冷却系统性能影响深远：不同配置 (如处理器插槽数、整体功耗等) 的服务器，其进出风温差存在显著差异，高配置设备通常具有更大温差。研究表明，回风温度每升高 1℃，理论上可提升冷却系统有效冷却能力 4%~5%。近年来，服务器出风温度持续攀升，部分高密度机型的出风温度已高达 60℃。在此背景下，实施合理的冷热通道隔离与封闭措施，对于抑制气流短路、提升冷却效率至关重要。

数据中心冷却系统的运行管理日益依赖智能化监控与动态调节。系统需实时采集芯片温度、散热器温度、进出风/液温度、冷却液流速或风扇转速等关键参数，通过智能控制算法动态调节风速或流量，实现负载跟随与能效优化。

综上所述，数据中心信息设备的持续演进对冷却系统提出了日益严苛的要求。不同冷却技术需在热阻水平、能效表现、部署灵活性及运维复杂度等维度进行系统性权衡。液冷技术凭借其卓越的换热性能、优异的环境适应性及显著的能耗优势，正逐步在高密度、高可靠性应用场景中替代传统风冷方案，但是液冷技术有待进一步解决标准化和运维过程中的难题从而实现规模化和市场化。

2.2 末端定义与构成

数据中心冷却系统末端侧是指冷却系统中直接与发热设备 (如服务器、机柜等) 接触并进行热量交换的部分，其核心作用是将冷源侧提供的冷量高效传递给发热设备，实现精准散热。数据中心冷却系统末端侧经历了从机房级 (整体机房制冷) 到列间级 (贴近机柜排布冷却末端)、机柜级 (机柜内部背板散热)，再向服务器级 (芯片/部件精准散热) 的演变，如图 2.2-1 所示，通过冷源与热源逐步贴近的冷却层级细化，逐步实现冷量按需动态分配，降低能耗并提升能效。



图 2.2-1 数据中心冷却层级

数据中心末端侧冷却技术的选取主要受机柜布局及发热密度的影响。由于数据中心室内热源分布密集，冷负荷较高，常规较为粗放的送回风手段无法实现服务器的有效冷却，往往会导致送入房间的冷风与经过服务器的热回风彼此掺混，房间温度不均匀程度提升，易产生局部热点，导致服务器性能下降甚至超温停机，机房为保证服务器正常工作，只能进一步降低送风温度。研究末端侧冷却技术可以有效优化机房热环境，提高冷却系统的散热能力，降低冷却系统能耗。

传统的机房级冷却作为基础架构，通过空调机组对整个机房空间进行制冷。在此基础上，列间级冷却将制冷单元缩小至机柜行列尺度，采用封闭通道设计优化气流组织，显著提升了冷量利用效率。机柜级冷却则进一步将控温范围聚焦到单个机柜内部，通过柜内集成换热装置实现更精确的温度调节。冷板式液冷技术突破了空气冷却的局限，通过液体循环直接对关键发热部件进行针对性散热，实现了芯片级的温度控制。浸没式液冷采用介电液体完全包裹设备，通过液相介质的高效换热能力实现整体散热。这些冷却技术呈现出明显的空间尺度递进特征，从机房级、机柜级、单机柜级到芯片级逐级细化，各层级技术根据实际需求组合应用，共同构建了完整的数据中心冷却体系。

2.2.1 机房级冷却技术

机房级冷却以精密空调为核心，通过送风与回风系统在整个房间尺度内完成换热与空气循环。其设计目标是在满足设备进风品质的前提下，以尽可能小的风机功耗和温差损失完成冷量输送。因此，气流组织同时受传热与流动约束，冷热气流掺混控制与压损控制是关键。

该形式的末端通常设置在专用空调间或机房端部，距离服务器较远，送冷路径长、二次换热与旁路泄漏机会多，易形成局部热点，更适用于单机柜功率较低的场景，常见上限为每机柜约 6kW；在未做围闭或优化不充分时，为维持进风温度往往需要降低送风设定值，能效随之下降，典型全年 PUE 多高于 1.4。

下送风是最常见的气流组织形式。空调将冷空气送入架空地板形成静压箱，冷空气经孔板或格栅定向送至冷通道，穿越服务器后在热通道汇集并回流至空调。地板高度、静压水平与开孔率决定送风均匀性与可达性，一般需控制地板静压、优化风口布置与通道围闭完整性，避免回卷与短路。合理的冷热通道隔离与热通道围闭可显著放大有效温差，降低所需风量与风机功耗。

上送风常用于空间受限或小型机房。冷空气自顶部或风管送至机柜前侧，热空气自热通道回顶棚或回风管。若未进行围闭，顶部冷气流易与上升热气流混合，机柜进风温度偏高，需通过风管送风、定向送风口与风阀调试改善分布，并在投运前借助气流组织模拟软件校核风量与射程，减少负载变化时的再平衡成本。

水平送风以侧墙大面积送风、热通道吊顶回风为特征，无需活动地板，便于改造与施工。该形式依赖送风面风速分布与射程控制，使远端机柜仍获得足量、低涡度的冷风；同时配合热通道围闭与回风天花，限制高温回风在天花层闭环回收。设计中需通过计算或模拟验证送风口尺寸与布置，保证上下方向风速一致性并避免近端过冷、远端欠冷。

运行与控制层面，机房级风冷以房间尺度的传感与变频风机为主，动态响应慢于列间或机柜级方案。推荐以冷通道进风为主控量，辅以热通道回风监测与差压控制。在保障设备热安全的前提下，逐步提升送风设定与回风温度，可提高冷源侧制冷性能系数 COP 与自然冷源利用率。

总体而言，机房级风冷技术成熟、维护简便，是中低功率密度数据中心的基础方案。其性能高度依赖气流组织质量与围闭完整性；当机柜热密度提升至行级或更高水平时，应优先考虑向列间级、机柜级或液冷末端演进，以缩短传热链路、降低风机功耗并获得更高的能效与可控性。

2.2.2 列间级冷却技术

列间级风冷以机柜行列作为基本单元，将末端空调设备与服务器机柜并列布置，通过封闭的冷/热通道组织气流，形成就地取热、就地送冷的近端制冷方案，如图 2.2-2 所示。空调机组直接向冷通道送风，热空气在机柜后部汇集后回到列间机组完成换热，送回风路径明显缩短，有效降低了旁路泄漏与冷热掺混，提高了可利用温差和换热效率。与机房级风冷相比，列间末端贴近热源、风道阻力小、所需风机功率更低，能够更稳定地消除热点并改善远端机柜的进风品质。在典型配置与良好围闭条件下，适用的单机柜热功率可覆盖 6~10kW，并视介质与机型提升至更高水平，整体节能效果常优于房间级方案，全年 PUE 可降至 1.3 左右，具体取决于气候、围闭质量与系统联动策略。

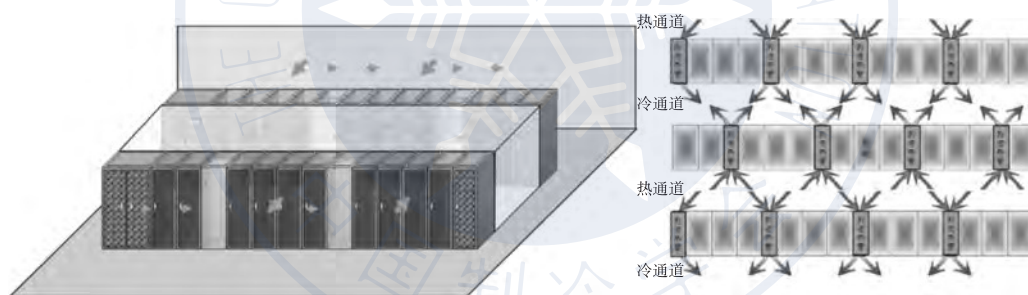


图 2.2-2 列间级风冷技术气流组织分布

该类末端按冷却介质与工况常见有冷水型、直膨型与热管回路型。大型与超大型数据中心多采用冷水型，便于与楼宇冷水或高温回水系统耦合，获得更高的能效与自然冷源利用时间；中小规模场景则常配置直膨机组以简化系统；当机房对明水管路进入区域有限制时，可采用热管或间接回路的布置以实现电隔离与泄漏风险控制。无论采用何种介质，封闭冷/热通道与回风路径的完整性是性能上限的决定因素，需要在设计阶段通过开孔率、通道围闭等细节保证气流不短路、不回卷。

列间级方案的控制与协同是运行效果的关键。由于多个末端机组服务于同一封闭模块，必须以冷通道进风温度与热通道回风温度为主控量，配合机组之间的主从或投票逻辑，避免多台设备对同一区域“抢负荷”引起的能耗波动与温度摆动。现代机组普遍配置 EC 风机与电子阀，能够依据实时负载自适应调节风量与换热能力；在投运前通过模拟方法校核送风射程与回风组织，可显著减少后期调试工作量并提升动态工况下的稳定

性。泄漏检测、电隔离、防凝露设计、冷凝水收集与旁路冗余等是工程落地时需要同步考虑的可靠性要点。

目前数据中心冷却系统未与服务器内部热管理耦合，导致机房热管理与服务器内部热管理不协调。为了充分利用数据中心冷却系统的节能潜力，需要在控制系统方面将颗粒度做小。一方面是将温度测点细化、精确化；另一方面，实现精准控制也是温度参数匹配的重要环节。在统一的温度监测和控制系统下，全局的温度监测和精确的风扇控制使得数据中心内部环境调节形成一个整体，有利于不同层级间冷却系统相互配合，可提升温度控制参数匹配的效率，实现精确供冷，冷量充分利用。

总体而言，列间级风冷在能效、可扩展性与改造便利性之间取得了良好平衡，是从房间级向更精细末端演进的过渡形态。在机柜热密度进一步提升或需要更高温度位运行时，可与机柜级背板换热、服务器级液冷等形态组合，逐步缩短传热链路、放大传热温差并降低风机功耗，实现面向高密度算力集群的持续可演进冷却架构。

2.2.3 机柜级冷却技术

机柜级机房送冷末端与服务器机柜为一体，机房空调末端以处理一台机柜的散热量为目的，容量配置以机柜为冷却单元，一般安装在服务器或机柜的背板处，称背板空调或机柜式空调；背板式空调适用单机柜耗电 $8\sim 40\text{kW}$ 的高热密度数据中心。机柜级风冷系统是风冷系统中散热能力最强的送冷形式，其所需的冷却介质温度相较前两种风冷形式更高，因此使用机柜级机房送冷末端的数据机房 PUE 进一步降低，为 1.2 左右，在气候寒冷地区，其 PUE 可低于 1.2。

机柜级风冷技术按冷媒介质一般分为两相背板（热管背板空调）以及冷水背板。热管背板空调运行原理示意如图 2.2-3 所示，通过机柜内的循环空气进行风冷换热，利用工质相变实现热量传递，通过热管背板将服务器的热量迅速传递到机柜外，热管背板安装在机柜的排风侧，液态制冷剂在重力或动力作用下输送至热管背板蒸发器吸收机柜内服务器热量，制冷剂吸热后气化，气态制冷剂通过连接管路流向室外换热器，在室外换热器中被冷源系统冷凝为液态，液态制冷剂借助重力或动力作用回流至室内热管背板蒸发器中，完成冷量输送循环。

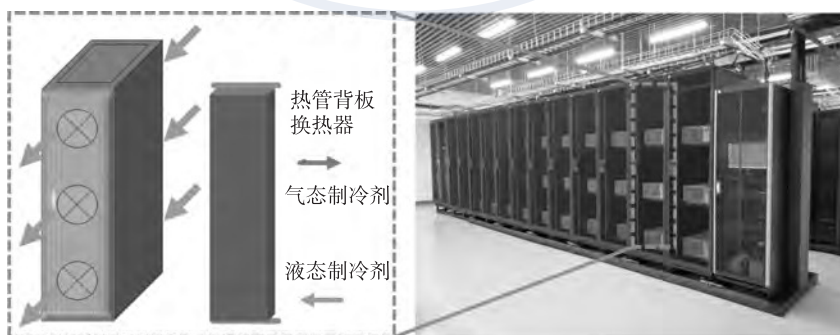


图 2.2-3 热管背板空调运行原理

水冷背板依靠低温水（冷却介质）通过空气强制对流对服务器进行冷却，不再是制

冷剂相变冷却。水冷背板式空气冷却系统蒸发器送出的冷空气与服务器换热，吸收服务器热量，由于贴近机柜，气流掺混小，蒸发器的出风温度近似服务器机柜进风温度，根据节能要求，蒸发器出风温度一般为 21~27℃，蒸发器冷水供水温度一般为 15~22℃，完成热交换后的热空气通过服务器排出，服务器排风温度近似等于水冷背板蒸发器回风温度，一般在 32~40℃之间，高温度的回风被水冷背板蒸发器内部低温冷水吸收热量，再次冷却成 21~27℃送风，通过服务器进入机柜内循环吸热冷却服务器。水冷背板空调蒸发器中温度较高的回水通过水泵动力作用与中间换热器进行换热，利用自然冷源或者制冷机组对中间换热器中的冷水回水进行冷却，利用自然冷源温度为室外温度低于 10~17℃，当室外温度高于上述温度时，就需要制冷机组进行补偿实现冷却。

机柜级风冷技术是当前最精细化的空气冷却方案，其核心思想是将制冷单元直接集成到机柜内部，实现“按需精准送冷”。该技术的关键问题在于如何在有限空间内设计高效、可靠的送冷系统。微通道背板热管空调是一种针对数据中心的高效制冷方案，通过贴近热源的机柜级精确制冷，有效降低能耗并避免局部过热。易军^[9]的实验研究表明，该系统在 65%~75% 充液率下性能最佳，最大换热量达 7~8kW，且蒸发器与冷凝器温差接近 0℃，制冷剂保持高效两相换热。基于守恒定律建立的数值模型验证了其准确性，并优化了结构参数对换热性能的影响。相比传统精密空调，该技术节能率达 14.33%，为数据中心提供更高效、低能耗的送冷方案。机柜级风冷的优势在于其极高的能效和适应性，尤其适用于超高密度 (>30kW/机柜) 的边缘计算和 AI 算力集群。但该技术的缺点是初期投资成本高，维护复杂度大，且对机柜内部布局有严格要求。

2.2.4 服务器级风冷技术

服务器级风冷技术是利用空气作为冷却介质，通过不同机制将芯片热量传递至环境的核心手段。其核心形式可分为自然对流、强制对流与热辐射散热，各具特点并适用于不同场景。

自然对流散热不依赖外部动力，利用空气因温度差异形成的自然流动带走热量。空气流经散热器翅片表面，通过对流效应将热量散发至周围环境。为提高散热效率，翅片通常采用高导热系数的金属材料，如金、铜或铝。出于成本控制考虑，铝材应用最为广泛。该方式结构简单、成本低且无噪声，适用于发热量较低的小型设备或芯片。然而，其散热性能易受环境温度与空气流速影响，在实际设计中需综合考虑翅片高度、厚度与间距的优化，有时也引入“烟囱效应”肋片结构^[10]，以提升散热能力并控制散热器质量。

强制对流散热通过风扇或泵驱动空气，形成强迫流动以增强换热。常见的商用翅片散热器通常在一侧或两侧加装风扇，通过强制气流显著提高散热效率，适用于中高功率密度场景，图 2.2-4 所示为强制对流散热的服务器级风冷示意。其缺点也较为明显，包括结构复杂、成本较高、噪声与振动较大^[11]。近年来出现了如微泵风冷技术，该技术摒弃传统扇叶，转而在芯片内部布置振动膜片。这些膜片以超声波频率振动，形成强烈气流并转化为高速脉动喷流，可高效地将热量从散热器底部排出^[12]。此类微泵风冷系统在提供高于传统风扇的风压的同时，运行噪声显著降低。



图 2.2-4 服务器级风冷示意

热辐射散热依靠电磁波辐射将热量直接传递到环境中，无需依赖介质。在翅片散热器中，高温翅片会向外辐射热量，尤其在高温或近真空等特殊环境下，辐射成为主要散热途径。辐射散热具有无需介质、适用于极端环境的优点；但其效率通常较低，且强烈依赖于环境温度和表面辐射特性。

2.2.5 服务器级液冷技术

服务器液冷技术主要分为直接液冷和间接液冷两大类，其中直接液冷包括浸没式和喷淋式，间接液冷包括冷板式和热管式，如图 2.2-5 所示。相比风冷，液冷增加了腐蚀、漏液、堵塞等风险，需要综合考虑工质选型、压力控制、密封设计等因素。微通道流动散热是常见的间接液冷换热，以冷板式液冷技术为主。该散热方式在很薄的金属、硅片或其他合适的基片上，用光刻、蚀刻及精确切削等方法，加工成截面尺寸仅有几十到上百微米的微通道，冷却介质在这些通道中流过并与基体进行换热。冷却工质直接影响散热器的性能，应具有高效、良好的热性能和稳定的化学性能，黏度低，无腐蚀性，还需要在操作条件下不易挥发且具有很好的环保性。

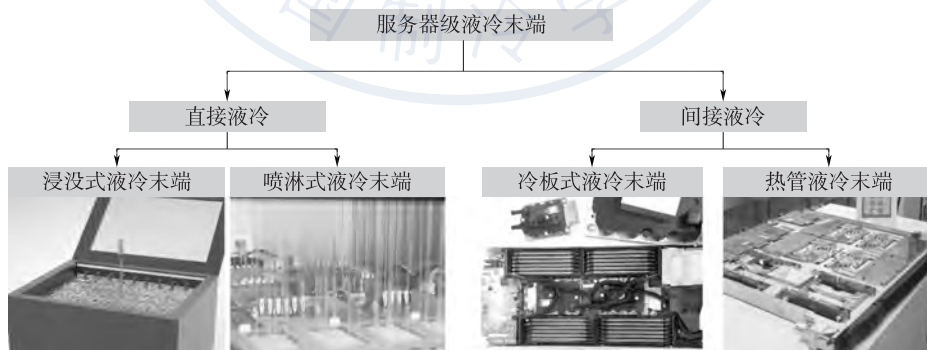


图 2.2-5 服务器级液冷末端不同技术路线

直接液冷是指将发热部件与冷却工质直接接触的冷却方式，包括喷淋式和浸没式液冷技术。喷淋式冷却借助特制的喷头将冷却工质精准喷洒至发热器件或与之相连接的固体导热材料上，并与之进行换热，吸热后的冷却工质将通过泵驱动进行制冷循环。浸没

式液冷是指将芯片和其他发热器件直接浸泡在绝缘、化学惰性的冷却工质中，通过循环的冷却工质将电子元器件产生的热量带走。根据冷却液在循环散热过程中是否发生相变，分为单相浸没式和两相浸没式液冷。

间接液冷包括热管液冷技术和冷板式液冷技术。热管散热是一种高效的两相散热技术，能够实现高传热率和低温差的长距离传热。热管利用工质的气液相变吸热放热的性质，将发热器件的热量迅速传递到散热翅片，具有极高的导热性、优良的等温性、热流密度可变性、热流方向可逆性、恒温性、环境的适应性等优良特点，可以满足高热流密度的芯片散热^[13]。

冷板式液冷技术通过精细化的管路设计，将高换热能力的冷却介质直接引入到服务器内部的高功率密度器件附近，同时，器件产生的热量通过导热硅脂传导至冷板表面，冷板表面吸收热量升温，进一步将热量传递至冷板内的冷流体中，通过冷流体将热量携带至室外散出，传热过程以导热及冷却液对流换热为主，相较空气对流换热过程热阻更低，因此，冷板式液冷技术是一种结合精准送冷与高效换热两种优化途径的新型送冷技术，其单机柜换热能力可达 70kW，使用冷板式液冷末端的机房 PUE 多在 1.1~1.2 之间。作为一种非接触式的间接冷却方法，单相冷板式液冷技术主要包括冷板、管路、分集液器、冷量分配单元（CDU）等部件。依据冷却液是否发生相变，可细分为单相冷板与两相冷板两种形式。在这两种形式中，单相冷板式液冷技术由于其技术成熟度较高，目前已成为液冷技术中的主导应用方式。单相冷板式液冷系统整体架构包括一次侧部分与二次侧部分，通常一次侧部分指室外冷源到 CDU 部分的管路，包含室外冷源、一次侧循环水泵、管路以及相关配套设施；二次侧部分指 CDU 部分至液冷服务器之间的管路，包含 CDU、液冷机柜、冷板装置、管路以及相关配套设施。冷板式液冷系统运行时，一次侧端来自室外冷源的低温冷却水进入到 CDU 中换热变为高温冷却水，后回到室外冷源进行换热又重新变为低温冷却水；二次侧端来自 CDU 的低温冷却液进入服务器中与发热元件换热变为高温冷却液，后回到 CDU 中换热重新变为低温冷却液。冷板装置内的流体介质进行换热，将服务器内主要散热元器件产生的热量带出，该部分的散热量约占服务器总散热量的 50%~80%，其余部分发热则需通过与前文所介绍的风冷送冷技术进行冷却。

浸没式液冷因其所采用的冷却介质为换热能力更高的冷却液而非空气，因此其换热能力显著高于机柜级风冷末端。由于换热过程热阻低，维持相同器件温度下浸没式液冷技术可接受的冷却液温度可达 40℃，因此，浸没式液冷末端往往可全年匹配自然冷却技术，PUE 大多低于 1.1。浸没式液冷技术的关键技术主要聚焦于冷却液性能优化和机箱内部流场设计两大核心领域。这两项关键技术的突破将直接决定浸没式液冷系统的换热效率、能耗水平和运行可靠性，是推动该技术大规模商用的重要基础。

2.3 输配系统类型与结构

输配系统的主要作用是将末端系统机房各个位置采集到的热量统一输送至冷源设备，再将热量排放至室外。根据输配介质的不同，可分为输配空气、输配水或其他单相液体、输配相变制冷剂三类。

2.3.1 输配介质为空气的输配系统

输配介质为空气的输配系统是数据中心冷却中一种基础且广泛应用的方案，尤其多见于传统大型数据中心。该系统通常由风管/风道、阀门、过滤器、风机等部件组成，其工作流程为：冷源设备制备的冷空气经由大型风道输送至机房的静压箱，再通过开孔进入机房内部，最终由服务器自带的风扇吸入，完成对内部发热元件的冷却。

该输配系统的一个显著优势是可在室外空气比焓较低的地区，直接引入过滤后的新风，部分或全部替代机械制冷，实现自然冷却，降低运行能耗^[14]。此外，由于循环介质仅为空气，彻底杜绝了水、氟利昂等液体冷媒在机房内泄漏的风险，既提升了系统的安全性，也降低了运维复杂性。正因如此，直接空气输配系统在早期数据中心设计中因其较高的可靠性和安全性而被广泛采用。

然而，该类系统也存在一定局限性。空气的比热容较小，单位体积携冷能力远低于液体或相变介质，因此输送相同冷量所需的风管和静压箱体积较大，占用了较多机房空间，降低了空间利用率。同时，远距离输送大风量空气以及对空气过滤品质的较高要求，导致风机能耗显著上升。在传统数据中心中，风机的电力消耗可占整个制冷系统能耗的30%~50%，成为制约机房能效提升的关键瓶颈^[15]。

2.3.2 输配介质为水或其他单相液体的输配系统

输配介质为水或其他单相液体的输配系统主要包括管路、阀门、水泵、水处理设备、定压补水装置等组成部分，通常与集中式冷源设备组合。集中式冷源通过大型冷水机组或利用自然冷源（如冷却塔、干冷器）制备低温冷水，经由输配系统将冷水输送至不同级别的冷却末端。在这些末端设备中，冷量被传递至发热器件，升温后的冷水则返回冷源设备重新冷却，形成一个完整的循环。

冷水系统凭借其布局灵活、调节能力强、易于集成及技术成熟等优势，已成为现代大型和超大型数据中心的主流冷却方案之一。水的比热容约为空气的4倍，密度约为空气的800倍，因此在输送相同冷量时，所需水的体积流量仅约为空气的1/3000。这一特性使得水管管径远小于风管，不仅显著降低了泵送能耗，还有助于省去静压箱等大型空气输配结构，从而提高机房空间利用率。此外，该类系统具备良好的兼容性^[16]，能够与房间级、列间级或机柜级的风冷换热设备结合，也可直接连接至冷量分配单元(CDU)，匹配各类液冷末端，实现更高效、更精准的冷却。

然而，冷水系统也面临多项挑战。首先，水管路直接进入机房，存在“跑冒滴漏”等介质泄漏风险；冷水温度过低可能导致管路表面结露，危及电气设备安全。因此机房往往采用去离子水等经过严格处理的水体，同时配备漏液检测与防护措施降低风险。除此之外，在寒冷地区，室外管路和设备在冬季存在冻结风险，往往需通过添加乙二醇等防冻液予以应对。其次，与普通水系统类似，该系统需应对结垢、杂质沉积等脏堵问题。此外，由于数据中心冷水温度通常高于常规空调系统，更易滋生微生物，导致生物污染，因此必须定期进行水处理与水质维护，否则将影响系统效率和使用寿命。最后，由于冷水系统常与冷却塔等蒸发冷却装置结合，存在大量水分蒸发与排污损失，使其在水资源紧缺地区应用受限。

2.3.3 输配介质为相变制冷剂的输配系统

输配介质采用相变制冷剂的输配系统，是数据中心冷却领域的一种高效解决方案。该系统主要由管路、阀门、氟泵（可选）、储液器等部件构成，常与分布式冷源配合使用。相变制冷剂在靠近热源的蒸发器中吸收热量后发生相变，由液态转为气态；气态制冷剂经管道输送至远端的冷凝器，在冷凝器中向外界环境或压缩制冷循环的蒸发器释放热量，重新冷凝为液态，最终返回蒸发器，完成循环。

相变制冷剂利用相变潜热进行热量传递，其单位质量流量所携带的冷量约为水的 9 倍，因此在输送相同冷量时，所需管径显著小于水系统管道。该系统可根据设计需求匹配氟泵等动力装置^[17]，也可通过合理的系统设计完全依赖重力驱动实现循环，从而使输配系统达到完全被动运行，无需任何主动部件，实现输配过程零能耗^[18]。同时，该系统具备良好的兼容性，能够与房间级、列间级、机柜级的风冷末端设备，或 CDU 灵活集成。

相较于水冷系统，相变制冷剂输配系统不存在因用水带来的泄漏风险、水质管理及节水问题，适用性更广，运维复杂度更低。然而，该系统也面临一些独特挑战：首先，制冷剂管路通常需承受较高压力，对管道材料强度及密封工艺提出更高要求；其次，系统相变温度与压力密切相关，长距离输送时易产生压降和冷量损失，需在前期设计阶段进行详尽分析与优化；最后，数据中心规模大、能耗高、发热量大，导致制冷剂需求量大，而部分制冷剂的臭氧消耗潜能（ODP）较高，未来可能受到环保政策限制，需综合考虑环境友好型替代工质。

2.3.4 各类输配系统对比

三类输配系统因其输配介质不同而各有优劣，如表 2.3-1 所示，输送相同的冷量，三者体积流量的排序为空气>水>相变介质，这意味着输送空气所需的管路体积要显著高于输送水的管路，相变介质的管径最小。

表 2.3-1 输配系统常用介质的物性对比

介质种类	比热容/ [kJ/(kg·K)]	温差/K	单位质量吸（放） 热量/(kJ/kg)	密度/(kg/m ³)	单位体积吸（放） 热量/(kJ/m ³)
空气	1.01	5	5.05	1.2	6.1
水	4.19	5	20.95	999.1	20931.1
R134a	193.2	0	193.2	1225.8	236824.6
R410A	208.9	0	208.9	1135.6	237226.8

尽管空气的黏度较低，但由于空气质量流量显著较高，因此空气的输配能耗仍相对较高。由于相变介质的黏度往往比水更低，输送阻力更低，因此采用相变介质的输配系统能耗往往小于单相介质。空气与水输配系统的能耗占冷却系统总能耗的比例约为 30%，输配系数约为 10~15（输送热量与动力部件电耗之比），当采用间接蒸发冷却空调机组时，冷却系统主要依靠风机驱动介质换热，阻力提升，制冷系统能耗降低，但输

配系统能耗会进一步提高,输配系数可降低至 8.18,同时风机能耗占比可达冷却系统总能耗的 74.4%,成为冷却系统主要的能耗瓶颈;相变介质输配系统的能耗占比约为 20%,输配系数可达 20 以上^[19],当相变介质循环采用重力驱动时,输配系统能耗为零。

综上所述,输配系统管路体积往往是空气>水>相变介质,系统能耗往往是空气≈水>相变介质。根据上述分析,从冷量输配能力及能耗的角度来看,介质为相变制冷剂的输配系统是最优选择,但在实际应用中,往往需要综合多种因素来考虑:空气输配系统可靠性高、安全性好,便于直接利用新风,但风道体积大,风机能耗高;水输配系统管道尺寸小,易与不同末端集成,易于设计集中型系统,但漏水问题、水质问题、节水问题、冻结隐患仍需额外解决;相变制冷剂输配系统管径小,能耗低,不耗水,但可能受环保法规限制,对系统设计及工质选择要求较高。

2.4 冷源特点及自然冷源利用过程

数据中心的机械制冷设备与自然冷源利用设备统称为数据中心的冷源设备,其能够在各种气候条件下持续高效地为数据中心提供所需冷量,确保机房热环境处于安全阈值内,根据其运行原理的差异,可将冷源技术划分为机械制冷技术、自然冷源利用技术、复合冷源利用技术等。

2.4.1 机械制冷技术

机械制冷技术是数据中心早期普遍应用的冷却技术,机械制冷循环包括蒸发器、压缩机、冷凝器、节流阀等主要部件。根据冷却介质的不同,机械制冷系统可分为冷水机组与直膨机组两大类。压缩机作为机械制冷系统的主要部件,其更新迭代也逐步推动着数据中心机械制冷技术的发展。根据压缩制冷原理,可将数据中心常用的压缩机分为转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机、离心压缩机与磁悬浮压缩机五大类^[20]。其中,转子压缩机和涡旋压缩机往往适用于单机制冷量不超过 200kW 的中小型制冷设备,而螺杆压缩机和离心压缩机则可应用于大型制冷系统。

相较于其他四种更成熟的压缩机,磁悬浮压缩机在离心压缩机的基础上进行了改良,通过采用电磁轴承技术实现转子无接触悬浮,彻底消除了机械摩擦和润滑油系统。相较于传统压缩机往往需要压比大于 1.4 的条件,该机型特别适用于小压比 ($\xi > 1.0$) 运行工况,可灵活应用于分布式制冷系统及集中式制冷系统,能更充分地利用自然冷源,因此相比传统压缩机而言,其在部分负荷下的能效提升显著。由于省去了油路系统和机械轴承,设备质量显著减轻,同时解决了润滑油导致的传热损失问题。此外,磁悬浮设计使得启动电流降至 2A,远低于传统机型的 500~600A,且支持变频调节,可精准匹配数据中心动态负荷需求。但该技术对控制精度要求极高,且初期投资较大,主要适合对能效和可靠性要求严苛的中大型数据中心应用。

2.4.2 自然冷源利用技术

自然冷却技术无需压缩机,通过对换热过程与换热部件的设计实现自然冷源的利

用,被认为是实现数据中心节能的最有效的方法之一,有着广阔的发展潜力。随着液冷技术的发展,所需冷源温度进一步升高,部分地区可实现全年自然冷却。根据换热环节,自然冷却技术可大体分为直接自然冷源利用技术与蒸发冷却技术两大类^[21]。

直接自然冷源利用技术包括新风冷却技术、重力式热管冷却技术、氟泵冷却技术、自然水利用技术几类。新风冷却技术通过引入室外低温空气为数据中心降温,分为直接与间接两种形式。直接新风冷却将室外空气经粗效过滤后直接送入机房。其结构简单、能耗低,但要求空气洁净度与湿度符合标准,适用于温湿度适宜且污染较轻的区域。间接新风冷却通过换热器隔离室内外空气流。室外冷空气冷却换热器内的循环风,避免污染物进入机房。

重力式热管冷却技术利用密闭管路内工质的相变循环传递热量。蒸发段置于机房内部吸收热量,工质汽化后上升至冷凝段(室外),通过自然冷风或冷水冷凝为液体,依靠重力回流至蒸发段。全过程无需机械泵驱动,无额外能耗,可靠性高。氟泵系统需在回路中增设氟利昂输送泵。当室外温度低于设定阈值时,由氟泵驱动制冷剂流经冷凝器与蒸发器,利用自然冷源直接冷却机房。

自然水直接利用技术则是以天然水体作为稳定冷源,通过换热实现冷却,根据水体类型不同可分为湖水冷却与海水冷却两类,湖水冷却抽取温度常年稳定的深层湖水,流经板式换热器,冷却数据中心的循环水系统。海水冷却则是直接或间接利用海水制冷。

蒸发冷却技术是自然冷源利用技术中的第二大类,是利用空气中含有的水分的相变潜热获取低于空气干球温度冷源的一类技术。蒸发冷却技术可大致分为直接蒸发冷却技术、间接蒸发冷却技术与喷淋冷却技术。

理想的直接蒸发冷却过程是绝热等焓的,在直接蒸发冷却过程中,将循环水均匀地喷淋在填料表面,使空气的状态沿等焓线变化,温度逐渐降低,从而获取低温冷风,但直接蒸发冷却制取的冷空气湿度较高,仍需搭配除湿装置来满足数据中心内部的环境需求。直接蒸发冷却技术制取冷水与制取冷风的原理相同,但获得的冷量形式不同,通过该技术制取的冷水极限温度可以达到对应空气的湿球温度。对于大型数据中心冷源设备相对较集中的要求,直接蒸发冷却制取冷水技术能够降低设备空间占用率且能耗较低。

间接蒸发冷却技术通过利用干通道对工作空气进行预冷处理,使被处理空气湿球温度进一步降低进而逼近露点温度。使用间接蒸发冷却技术制取冷水的换热过程如图 2.4-1 所示,一般而言,预冷式间接蒸发冷却出水温度低于环境空气湿球温度 2~3℃^[22]。因此,一般可通过露点效率来描述外界环境空气能够使被处理水温度降低的程度,间接蒸发冷却冷水机组的露点效率与机组回水温度、水流量、环境空气条件、空气流量以及换热芯体结构特征等因素有关,数值一般在 30%~50%。

在对冷凝器进行设计和改造时,可采用蒸发冷凝技术提高换热效率。如图 2.4-2 所示,蒸发冷凝技术在换热器进风之前设置有喷淋/喷雾段,不设置填料。空气直接与水滴进行热质交换,发生蒸发冷却过程,经过降温后再与换热盘管进行换热,吸收制冷剂热量后排出室外。这种方式的换热效率在三种方式中最低,但是此种方式由于不设置填料,对风机阻力影响较小,而且操作简便,因此此种方式也常在室外机组节能改造和解决高外温启动问题中得到广泛应用。

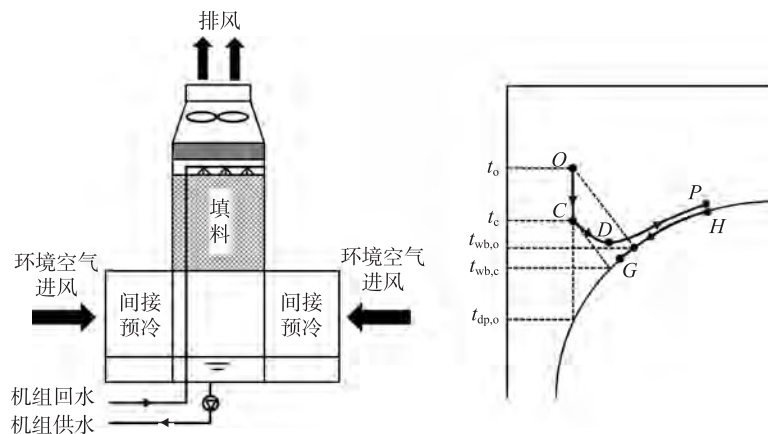


图 2.4-1 间接蒸发冷却空调机组原理图及热湿处理过程焓湿图



图 2.4-2 雾化装置与改造后的机组室外机

2.4.3 复合冷源利用技术

由于自然冷源利用对机房所在地附近的气候条件及地理位置有较高的要求，大部分数据中心无法满足全年利用自然冷源进行冷却的需求，因此，大多数地区都采用了“自然冷却+机械制冷”的复合冷却模式，在室外条件满足自然冷却需求时开启自然冷却模式，在室外条件不满足时开启压缩制冷模式。

大型和超大型数据中心的冷却系统，其压缩制冷模式的主要部件是冷水机组。如图 2.4-3 所示，风冷冷水机组通常加入风水换热器，而水冷冷水机组一般是在冷却水与冷水之间加入换热器。在空气温度或者冷却水温度足够将冷水温度降低到数据中心冷却要求时，则开启完全自然冷却模式；否则，开启蒸气压压缩制冷机组，独立或与自然冷却相结合为冷水进行降温。

对于中小型数据中心的冷却系统，通常采用直膨式制冷系统，与其匹配的主要是回路热管自然冷却技术。如图 2.4-4 所示，蒸气压压缩/回路热管一体式冷却系统可采用重力式回路热管或氟泵驱动回路热管，均可实现在高温时主要依靠压缩机带动的蒸气压

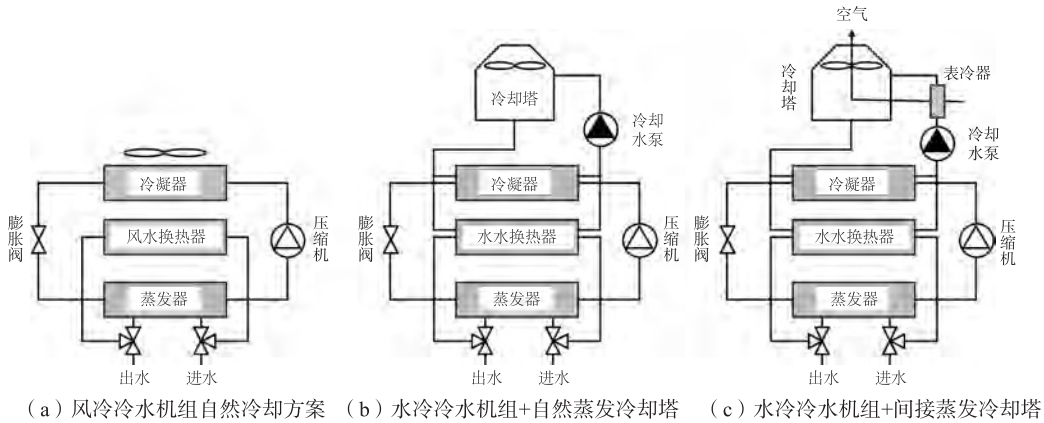


图 2.4-3 冷水机组复合冷源利用技术

缩回路进行主动制冷，在低温时分别依靠重力回路热管、液泵/气泵辅助回路热管实现自然冷却，在过渡阶段实现主动制冷与自然冷却的联合运行，全年都可以实现良好的节能减排效果。

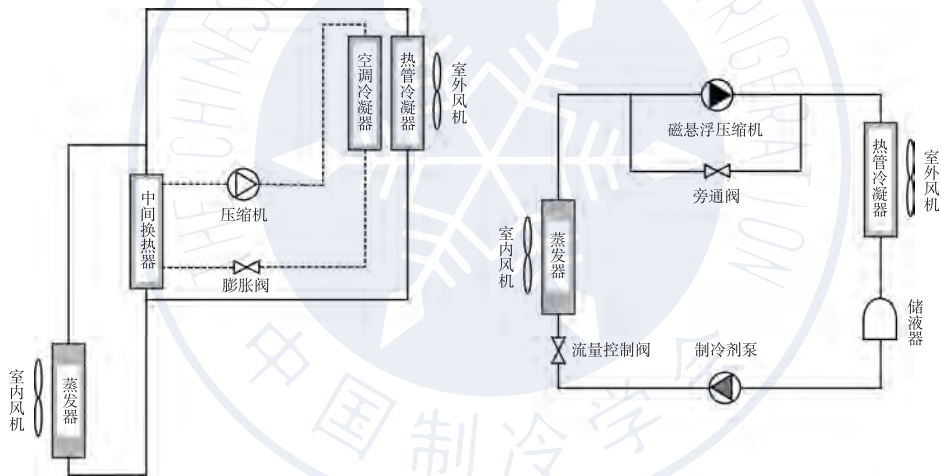


图 2.4-4 直膨机组复合冷源利用技术

2.5 当前存在的核心问题

在数据中心冷却系统中，末端与输配系统承担着冷热交换和冷量传递的关键任务。然而，随着算力需求快速增长，服务器热设计功耗不断上升，冷却系统面对的运行边界和工况也越发复杂，当前末端与输配系统在实际应用中暴露出一系列问题，制约着整体冷却效率的进一步提升。

数据中心的散热，本质上是热量从芯片经由一系列设备与传热介质，逐级传递至室外环境的过程。该过程由多个串/并联换热环节构成，共同组成完整的冷却系统。从热力学角度看，要提升节能性，关键在于两点：一是尽可能增大热源与最终冷源之间的有

效温差；二是尽可能减小每一个中间换热环节的传热损失。

2.5.1 换热过程的整体框架

在传统的数据中心冷却架构中，末端与输配系统面临的核心挑战，源于一条从芯片到室外环境逐级累加的热阻链，这一过程中的能量传递可以借助 $T-Q$ 图进行直观的分析。以常规的风冷集中式冷水系统为例，芯片产生的热量需依次经过机柜/机房空气、冷水、冷却水等多种工质，最终排放到室外大气中。各工质循环之间通过末端空调、板式换热器、制冷机组及冷却塔等设备进行热量交换。图 2.5-1 所示为整个散热过程的 $T-Q$ 图，从芯片工作温度到室外环境温度，形成了一个明显的温度阶梯。热量在传递路径上，每经过一个换热环节，都存在一个驱动力——温差。每一级换热过程中冷、热流体温度曲线所围成的面积，直观地反映了该环节因温差存在而导致的传热不可逆损失，图中不同颜色面积表示各换热环节损失。当前存在的核心问题就是研究如何减少各部分换热损失，在传递相同热量 (Q) 的前提下，降低所需的总温差，提高整个热量传输过程的效率。

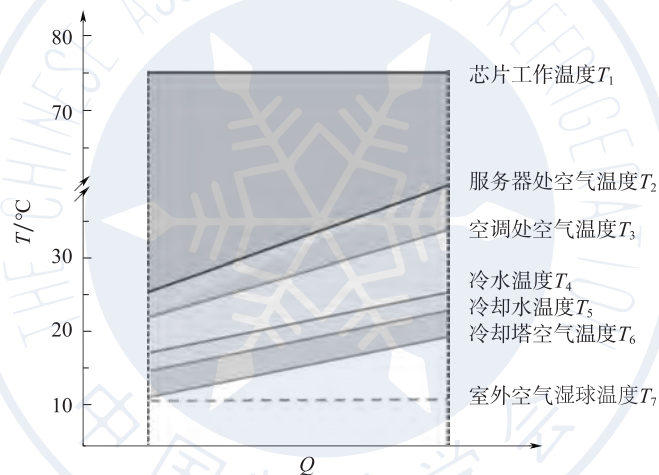


图 2.5-1 常规数据中心冷却过程 $T-Q$ 图

过增元等人^[23]提出焓的概念，用来描述物体在等容过程中对外界的热量传递能力，热量传递是一个不可逆过程，会导致焓耗散，焓耗散被用来衡量传热不可逆性。焓分析不受中间温度影响，相关结论仅与换热网络本质属性有关，能够指导参数和流程设计。数据中心冷却系统本质上是以热量传递为主，包含热功和热湿转换的换热网络。热量在传递路径上，每经过一个换热环节，都伴随热流体温度降低、焓减少，冷流体温度升高、焓增加，体系内总焓减少，即在传热过程中发生焓耗散 (ΔE_n)，焓耗散反映传热不可逆性引起的热量传递损失，耗散的大小可以用来分析传热过程由温差存在而导致的传热不可逆损失。

数据中心冷却链条的 $T-Q$ 图 (图 2.5-1) 提供了焓耗散的可视化呈现。从芯片工作温度 (T_1) 到室外环境湿球温度 (T_7) 的整条温度阶梯，构成了一个完整的传热系统。图中不同面积区域物理意义正是各个传热环节中发生的焓耗散。根据焓传递理论，传热过程的优化目标应遵循“最小热阻”或“最小温差”原则，其本质就是最小化总的焓耗

散^[24]。因此，需要在满足散热需求与可靠性约束的前提下，最小化整个传热链条的总焓耗散。

2.5.2 芯片至输配环节的关键制约

不同数据中心在服务器类型、业务运行模式、上架率以及规模布局等方面差异显著，导致其冷负荷特征呈现不确定性与空间非均匀性。在这种情况下，冷却系统若缺乏对末端与热源之间的有效匹配，易造成局部过冷或过热。

“芯片至输配”这一环节涵盖了从热源到进入数据中心级循环介质的全过程，主要包括芯片级散热、机柜/机房级气流组织以及末端空调换热。这是整个冷却系统中热流密度较高、温度梯度较陡、传热损失最为集中的区域。

2.5.2.1 芯片级散热的优化瓶颈

芯片级散热环节的焓耗散 (ΔE_{nl}) 往往占比较大，其对应的当量导热热阻 ($R_{E, chip-medium}$) 构成了制约算力与能效的第一道关口。要理解这一热阻的构成，首先需要明确其核心控制目标——芯片结温 (Junction Temperature, T_j)。所有集成电路都有一个集中的、发热量最大的小区域，即“结”，其温度是决定芯片性能、可靠性与寿命的最关键参数。电子系统热设计的主要目标，就是确保结温始终低于其最高允许值。这个最高值由半导体材料、封装工艺和可靠性要求共同决定。对于高端 CPU/GPU，典型上限在 95~105℃ 之间。在要求 7×24h 不间断高负载运行的场景中，为保证足够的安全余量和更长的使用寿命，工程实践中的目标结温通常低于此上限，普遍控制在 75~85℃ 的优化区间。过高的结温会指数级增加电子迁移等失效风险，而追求过低的结温 (例如低于 60℃)，从系统能效角度看则并无必要，反而会迫使整个冷却系统在不必要的低温区运行，牺牲了利用高温冷源和自然冷却的节能潜力。因此，精确的温控目标是在保障可靠性的前提下，尽可能地提高运行温度。

芯片封装热性能的量化，是通过一系列被称为“热参数”或“热指标”的热阻值来描述的。在风冷系统中，最关键的总体指标是结-空气热阻 (Junction-to-Air Thermal Resistance, R_{ja})。它定义为结温 (T_j) 与周围环境空气温度 (T_a) 之差与芯片总热量 (Q) 之比。 R_{ja} 衡量了从芯片内部热源到散热至空气的路径热障，它与在焓理论框架下讨论的当量导热热阻 ($R_{E, chip-air}$) 在物理意义上是等效的。

其中， R_{ja} 并非一个单一的热阻，而是由芯片内部多传热路径的复杂组合所构成。如图 2.5-2 所示，热量从“结”产生后，主要通过两条路径扩散：一是向上通过芯片封装顶部 (Case) 传导至外部的散热器，这条路径的阻力由结-壳热阻 (R_{jc}) 来表征；二是向下通过焊球阵列传导至印制电路板 (PCB)，这条路径的阻力由结-板热阻 (R_{jb}) 来表征。PCB 本身也因其较大的尺寸和铜箔层的存在，扮演了重要的二次散热面的角色。因此，总的 R_{ja} 是 R_{jc} 、 R_{jb} 以及散热器和 PCB 与空气之间对流换热热阻的综合体现。在传统的风冷架构下，由于空气较低的比热容与导热系数，导致最终的对流换热环节效率低下，从而使得总体的 R_{ja} 值居高不下。对于功耗为 800W 的 GPU，其在强制对流下的综合 R_{ja} 值通常仍在 0.025~0.040K/W 的范围内。它所导致的温差 $\Delta T = Q \times R_{ja} \approx 800W \times 0.025K/W = 20^\circ C$ 。这种较大的初始温差，是系统性低效的根源。

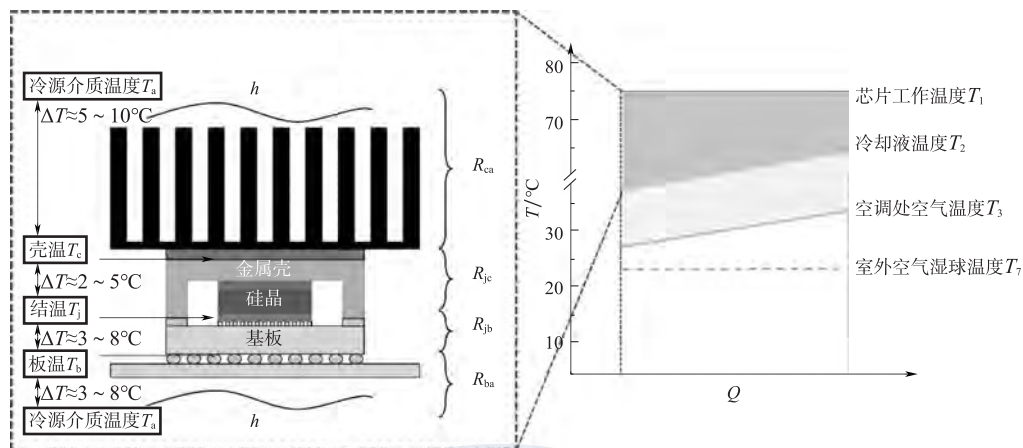


图 2.5-2 芯片级散热的热阻

芯片至散热底座或冷板入口之间的温差预算取决于器件封装、导热界面材料 (TIM) 与冷板/散热器效率。若采用高效单相冷板配合适当接触压力与优质 TIM, 可将 ΔT 降低至 5K 以内; 若为高端空气散热器, ΔT 通常在 6~10K, 需要通过提高风速与翅片区压降来换取较低的热阻, 但这会反向抬升风机功耗。液冷方案通过用液体替代空气, 显著降低了壳-介质界面及对流环节热阻, 从而降低总等效热阻。如图 2.5-3 所示, 芯片级散热技术本身也在不断演进, 其核心目标正是持续缩短传热路径、减少热阻环节。第一阶段的逐层散热模式中, 热量需要依次穿过芯片封装、TIM、散热基板等多个层级, 热阻累加效应明显。第二阶段通过将组件壳体与冷却流道集成, 让冷却液更直接地接触热源, 减少了传热环节。而更前沿的第三阶段嵌入式冷却, 则将微通道直接做进芯片或基底材料内部, 实现了从“贴附式”到“内生式”的散热革命, 最大限度地减少了传热路径。这一系列优化的核心是: 把换热界面不断前移、减少导热界面数量、提高对流换热系数, 从而在相同热流下压低“结→冷却介质”当量热阻, 释放更大的自然冷却潜力。

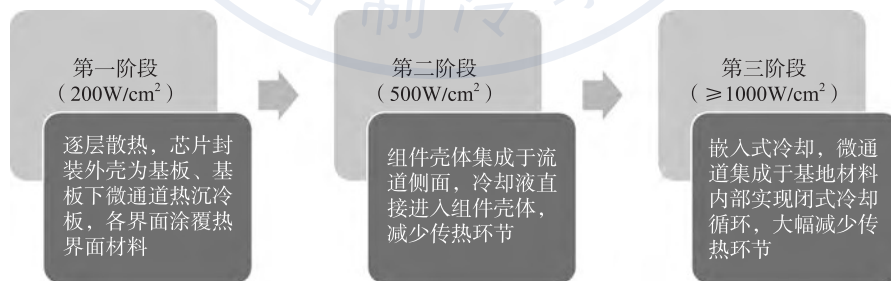


图 2.5-3 芯片级散热的逐级优化阶段

2.5.2.2 机柜级与机房级散热的优化瓶颈

机柜/机房级气流组织环节的焓耗散 (ΔE_{n2} 、 ΔE_{n3}), 体现为掺混与短路风导致的额外等效热阻: 服务器排出的热风与冷通道冷风混合 (ΔE_{n2}), 以及空调送出的冷风未有效接触热源即回风 (ΔE_{n3}), 这两种现象本质上都增大了有效传热过程的复杂性和不可

逆性。在气流组织不佳的数据中心，服务器实际进风温度较空调理论送风温度高 3~5K 的情况普遍，迫使空调进一步降低送风温度以补偿，从而放大后续环节的温差需求并加剧 ΔE_{n1} 的耗散。通过冷热通道封闭、机柜盲板补齐、优化送风口开孔率与布局（如冷通道宽度 $\geq 1.2\text{m}$ ）、设置风墙、列间空调/送风路径改造等措施，可显著降低该等效热阻，降低掺混导致的进风-送风温差。

末端空调换热环节的焓耗散（ ΔE_{n1} ），其大小主要取决于空调盘管自身的热阻。该热阻的宏观表现即为“换热端差”。传统机房精密空调（CRAH）的换热端差，即出风温度与进水平均温度之差，一般在 5~8K。这意味着，要获得 18℃ 的送风，冷水的平均温度必须维持在 10~13℃。这个温差构成了 ΔE_{n1} 的主要部分。采用换热面积更大、肋片设计更优或应用微通道技术的高效盘管，可以有效降低此热阻，将端差降低至 3~4K，从而允许在提供同样冷风的前提下，适当提升冷水的整体运行温度。

然而，以上优化措施都是在风冷框架内的“改良”。为从根本上解决空气作为传热介质效率低下的问题，并大幅削减因复杂气流组织而产生的热阻，液冷技术提供了一条较为颠覆性的路径。图 2.5-4 通过 $T-Q$ 图直观地展示了液冷技术如何从根本上优化散热过程。通过使用单相/两相冷却液直接/间接接触高热流密度器件，由气流掺混和短路造成的损失也随之锐减。液冷技术通过同时优化芯片级和机柜/机房级这两个关键环节，有效地“压扁”了整个传热温度阶梯。这带来的核心优势是，在维持相同芯片工作温度的前提下，冷却系统末端的介质温度可以被大幅提升。

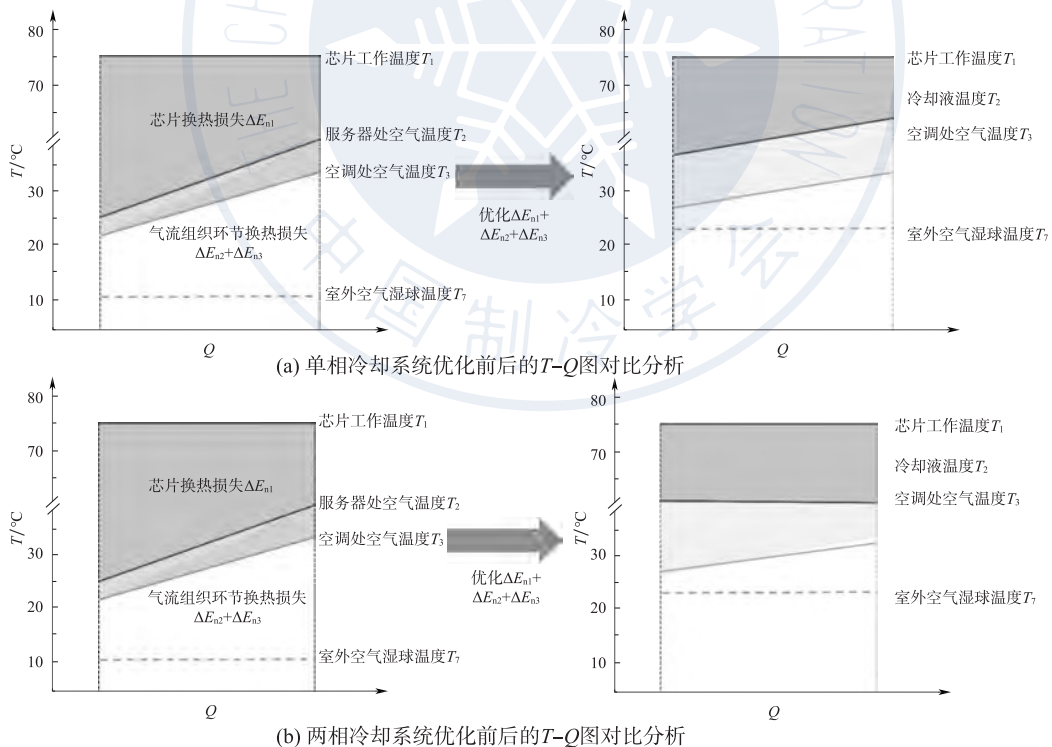


图 2.5-4 液冷与风冷散热过程的 $T-Q$ 图对比示意

正是基于这一原理，发展出了多种形态的液冷系统。例如，单相冷板式液冷通过冷

板与设备直接接触，温度控制稳定；而相变（两相）冷板式液冷利用液体相变时吸收大量热量的特性，能承载更高的热负荷，并允许冷却液在更高的饱和温度下工作，进一步降低了 ΔE_{nl} 。对于追求极致散热的场景，浸没式液冷将整个设备浸泡在冷却液中，实现了最彻底的热量捕获。

从能源利用的角度来看，液冷系统带来的介质温度提升具有重大意义。它直接影响到冷源的选择和余热的利用价值。较高的冷却液温度使得系统在更多时间、更多地区可以采用自然冷源（如冷却塔、干冷器）替代高耗能的制冷机。此外，回收热量的“品位”也更高，使得余热可用于区域供暖、工业加热等场景，从而显著提升数据中心的整体能源效率。图 2.5-5 统计了部分现有技术能够实现的各类液冷系统的主要节点的温度分布，从图中可知，各类液冷方式对应的芯片运行温度大多处于 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的范围，二次侧冷却液出口温度集中在 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，这意味着液冷系统可以从二次侧提取到 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的余热，用于后续的余热利用环节，一次侧介质的进口温度集中在 $33\sim 38^{\circ}\text{C}$ ，相较风冷系统提高了 15°C 左右，这意味着使用液冷系统在更多的地区可以实现自然冷却，从而降低冷却系统的总体能耗。

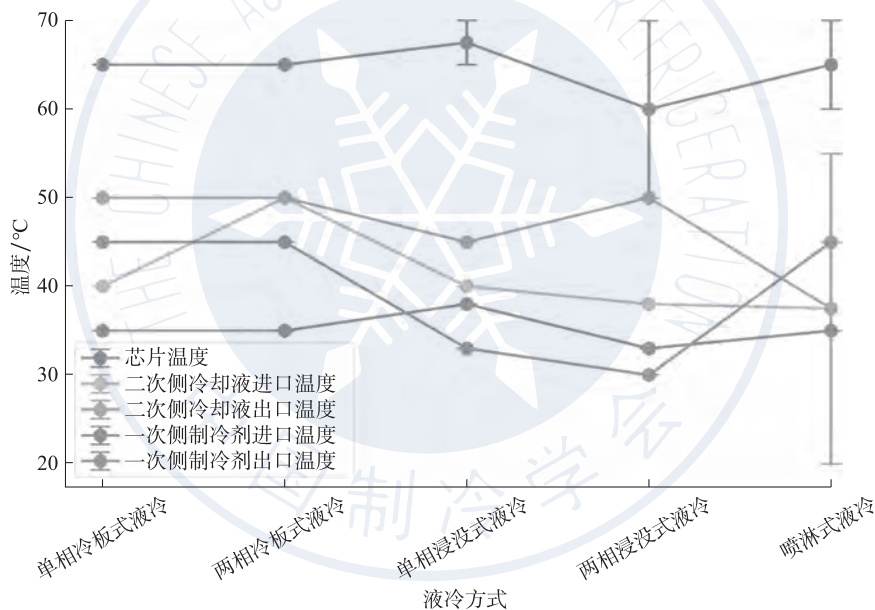


图 2.5-5 各类液冷系统的主要节点的温度分布 (参考值, 误差棒表示区间)

2.5.3 输配至冷源环节的约束与挑战

输配系统作为冷量的传递通道，其运行效率直接影响整个系统的能效水平。在不少数据中心中，水系统泵组长时间处于低效率区间运行，成为能耗“暗负荷”的主要来源。而这类问题往往源于系统在设计阶段未能充分考虑建筑高差、运行负载分布及工况波动等因素。对于具备自然高差条件的站址，可在方案阶段引入重力驱动的自然循环逻辑，适当减少甚至取消泵组配置，从源头上降低运行能耗与维护复杂度。此外，在水资源紧张地区，传统开式冷却塔的蒸发耗水也成为系统运行的长期负担。此类场景中，若

仍采用标准型水系统架构而未作适配调整，将在能耗、运维、水资源三方面形成持续矛盾。

当热量被前端系统收集并载入集中的输配介质后，便进入了“输配至冷源”的后端链条。这一环节的核心任务是将分散的热量进行长距离、大规模的搬运，并最终通过冷源设备排向外部环境。在传统的、以 $T-Q$ 图所示的集中式冷水系统中，此环节的焓耗散主要体现在中间换热损失 (ΔE_{n5}) 以及最终散热环节的焓耗散 (ΔE_{n6})，其挑战在于如何在低温（如 $7\sim 12^\circ\text{C}$ ）输配中，最大限度地降低温差损失。如图 2.5-6 所示，通过优化从末端空调到冷却塔的各级换热设备/介质，可以系统性地压缩这些累积的温差损失，从而为提升系统能效创造空间。

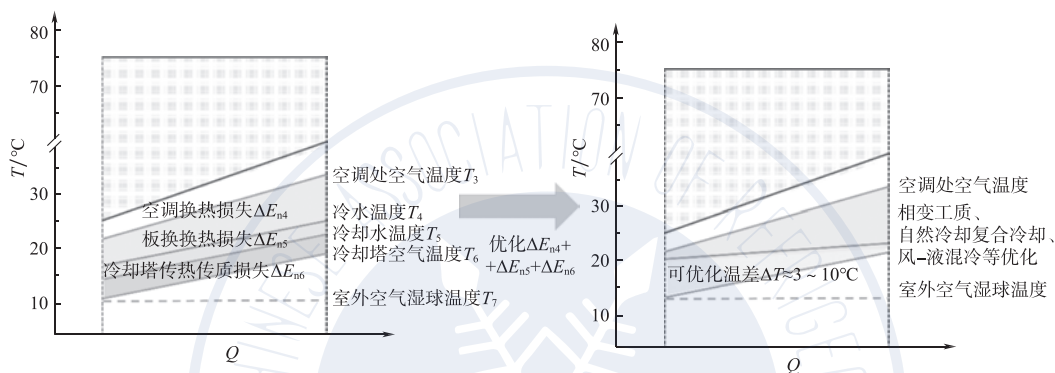


图 2.5-6 输配至冷源环节的优化空间

然而，随着以冷板式和浸没式为代表的液冷技术的崛起，整个冷却系统的运行温区被大幅抬高，这从根本上重塑了输配至冷源环节的技术范式，其约束与挑战也随之演变。在冷板式液冷系统中，输配介质由低温冷水转变为 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 的高温“温水”。这一转变带来的最大优势是极大地提升了与环境的换热温差，使得全年绝大部分时间都可以采用干冷器或绝热蒸发冷却器等自然冷却设备，彻底摆脱了对高耗能制冷压缩机的依赖。然而，新的挑战也随之而来。首先是“混合冷却”带来的系统复杂性。当前的冷板技术主要针对 CPU、GPU 等核心高热流密度部件，通常只能捕获服务器总热量的 $70\%\sim 80\%$ ，剩余的内存、硬盘、电源等部件仍需依赖风冷散热。这就催生了一种“水-风混合”的冷却架构，数据中心内部同时存在两条独立的输配环路：一条是输送 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 温水的高温环路，服务于液冷机柜；另一条是输送 $15\sim 20^\circ\text{C}$ 冷水（或空气）的低温环路，用于冷却 IT 设备和机房环境。这两套系统在温区、控制逻辑、负载响应特性上截然不同，如何实现两者的协同运行与优化调度，避免能源浪费和控制冲突，成为了一个全新的、复杂的系统工程问题。

其次是高温水力输配系统的精细化管理挑战。尽管泵送温水比驱动制冷机节能，但输配能耗本身依然是不可忽视的成本。为维持冷板端较小的温升（通常在 5°C 以内），需要相对较大的流量，这对一次侧（从 CDU 到室外冷源）的管路设计、水泵选型和变频调控提出了更高要求。管径设计不当会导致过高的沿程阻力，水泵长期偏离高效区运行会成为新的“暗负荷”。此外，长期在 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 下运行的温水系统，对管道材料的耐腐蚀性、微生物滋生控制等方面也提出了不同于传统低温冷水系统的新要求，这对其长

期可靠运行构成了潜在约束。

而作为液冷技术演进的更前沿形态，浸没式液冷则将这一范式推向了极致。通过将整个服务器浸泡在冷却液中，实现了对 IT 设备高热量捕获，从而解决了冷板式“混合冷却”的系统复杂性问题。设施侧的输配系统被简化为单一的、更高温度的液体环路。这使得数据中心可以最大化地利用自然冷源。然而，这种看似简化的架构背后，隐藏着更为独特的约束与挑战。

首要的挑战来自输配介质的物理特性。浸没式冷却所用的氟化液或矿物油等介电冷却液，其密度、比热容，特别是黏度，与水差异巨大。这些流体的黏度通常远高于水，这意味着在输送相同热量所需流量的情况下，其流动阻力会显著增大。这就要求采用更大管径的管道、更高扬程的专用泵，并对整个环路的压降进行精密的计算与优化，否则循环泵的能耗将侵蚀掉系统在冷源侧节省下来的能源。此时，系统的当量导热热阻不仅体现在换热界面上，更突出地体现在了因介质特性而急剧增加的“当量流体阻力”上。其次是系统接口的兼容性与热阻。冷却液价格昂贵且具特殊化学性质，不能直接进入通用的冷却塔或干冷器。因此，必须在二次侧（IT 设备侧）与一次侧（设施水侧）之间设置一个高效、可靠的专用板式换热器。这个换热器成为了新引入的热阻环节。它的性能直接决定了两次侧的温差，即系统的焓耗散。为将此温差降至最低（例如 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ），需要采用针对高黏度流体优化的、换热面积巨大的专用换热器，这不仅增加了初投资，也成为了系统设计中必须精细优化的关键节点。最后，是全生命周期的运维与材料管理。浸没式液冷系统引入了数吨甚至数十吨的特殊化学品进入数据中心，其管理、补充、过滤和废弃处理，都构成了一套全新的运维体系。材料的兼容性、密封的长期可靠性、微小泄漏的检测与处理，都成为了保障系统 $7\times 24\text{h}$ 稳定运行的非传统挑战。这种挑战已从传统的热工与水力问题，扩展到了化学品管理和环境安全的范畴。

在运行阶段，末端与输配系统往往面临动态适应能力不足的问题。由于缺乏足够的环境反馈与预测机制，系统对冷热负荷的响应存在滞后性，尤其在冷热源切换、负载剧变等情境下更为明显。部分系统虽具备多种运行模式，但缺乏有效的环境感知与决策逻辑，无法依据室外气象条件与室内负荷状态动态切换制冷路径，导致自然冷却能力未能得到充分利用。

此外，在多数中大型数据中心中，输配系统往往涉及多台同类型设备并联协同（冷机、冷水泵、冷却塔等）。即便设备型号相同，也会因运行状态、管网位置与水力条件差异造成负载分配不均，出现个别设备超负荷或低效运行。传统固定阈值+人工经验的启停方式已难以应对复杂负载变化下的联动优化需求；设备间微小差异的长期叠加会造成系统整体效率的隐性下降。

综上所述，从传统低温冷水到冷板式、再到浸没式液冷，“输配至冷源”的挑战已从“如何以更少能量制造足够低的冷源温度”，转变为“如何在更高温度平台上，高效、可靠地管理与输送不同物性的热载体”，并由单纯的换热温差扩展到混合系统调度、介质输配与关键接口的综合优化。面对多元冷却场景与更高性能要求，末端与输配系统正经历从“满足功能”走向“匹配负载、协调系统、降低能耗”的结构性的转变。只有深入理解内部机理与耦合特征，推动方案设计—运行控制的协同优化，方能突破瓶颈，实现更高能效与运行可靠性。

为此,对这一复杂系统的优化必须遵循热量传递的物理路径,进行分段剖析。优化的起点在于热量交换的“最前沿”,即直接与IT设备对接的各类冷却末端,确保热量能被高效捕获。在此基础上,进一步的分析则聚焦于负责大规模热量搬运的“动脉系统”,即整个输配网络及其核心部件,保障能量输送过程的低耗与稳定。只有将这两个环节协同起来,才能形成一个完整且高效的散热解决方案。

参考文献

- [1] MASANET E, SHEHABI A, LEI N, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates [J]. *Science*, 2020, 367 (6481): 984-986.
- [2] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告(2022) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [3] MYTTON D, ASHTINE M. Sources of data center energy estimates: a comprehensive review [J]. *Joule*, 2022, 6 (9): 2032-2056.
- [4] NVIDIA. NVIDIA Blackwell 架构 [EB/OL]. [2025-08-28]. <https://www.nvidia.cn/data-center/technologies/blackwell-architecture/>.
- [5] LAKSHMINARAYANAN V, SRIRAAM N. The effect of temperature on the reliability of electronic components [C] // 2014 IEEE International Conference On Electronics, Computing And Communication Technologies (CONECCT). 2014: 1-6.
- [6] ASHRAE TC9. 9. Thermal guidelines for data processing environments [M]. 4th ed. Atlanta Georgia: ASHRAE, 2015.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 数据中心设计规范: GB 50174—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [8] Thermal guidelines for data processing environments [M]. 5th ed. ASHRAE, 2024.
- [9] 肖湘武, 张泉, 凌丽, 等. 微通道背板热管系统最佳充液率实验研究 [J]. *低温与超导*, 2018, 46 (4): 45-50, 87.
- [10] KHEIRABADI A C, GROULX D. Cooling of server electronics: a design review of existing technology [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 622-638.
- [11] LUCCHESI R, OLSSON J, LJUNG A L, et al. Energy savings in data centers: a framework for modelling and control of servers' cooling [J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2017, 50 (1): 9050-9057.
- [12] KIM T, SONG C, PARK S I, et al. Modeling and analyzing near-junction thermal transport in high-heat-flux GaN devices heterogeneously integrated with diamond [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 143: 106682.
- [13] 王露, 王馨翊, 张博, 等. 高密度数据中心相变风辅液冷系统节能分析 [J/OL]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1-8 [2026-01-20]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.22.031>.
- [14] 董宇航, 杜航, 乔卫来, 等. 张家口市某数据中心间接蒸发冷却系统设计 [J]. *暖通空调*, 2024, 54 (11): 158-163.
- [15] 陈瑞, 许家翔, 曹军. 数据中心间接蒸发冷却复合空调系统的节能运行分析 [J]. *暖通空调*, 2024, 54 (10): 113-119.
- [16] 于传波. 数据中心水冷背板系统的实验及模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [17] 王耀南. 氟泵自然冷却技术对风冷空调系统能效和成本的影响分析 [J]. *制冷与空调*, 2025, 25 (7): 72-78.

- [18] CHEN X, WANG X, WANG L, et al. Multistage data center cooling system for temperature gradation and matching [J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124592.
- [19] 黄翔, 杨柳, 褚俊杰, 等. 蒸发冷凝-氟泵热管空调系统节能特性研究 [J]. *制冷与空调*, 2025, 25 (3): 40-43.
- [20] ZHOU F, GU W, MA G. Advancements in data center cooling systems: from refrigeration to high performance cooling [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 320: 114634.
- [21] 邵双全, 刘晴晴, 王宁波, 等. 中小型数据中心冷却系统节能诊断与改造方案 [J]. *制冷技术*, 2024, 44 (S1): 40-75, 94.
- [22] 耿志超. 干燥地区数据中心间接蒸发自然冷却空调系统的应用研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [23] GUO Z Y, ZHU H Y, LIANG X G. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50 (13/14): 2545-2556.
- [24] 过增元, 梁新刚, 朱宏晔. 焓——描述物体传递热量能力的物理量 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16 (10): 1288-1296.



第3章 数据中心末端设计与调优

近年来，数字经济的蓬勃发展推动数据中心进入规模化扩张与算力密度跃升的双重加速期。一方面，超大规模数据中心集群持续落地，单机柜功率密度已从传统的5~10kW攀升至30kW以上，部分AI算力集群更是突破50kW，高密度算力设备的集中部署成为行业常态；另一方面，算力需求的爆发式增长直接带来能耗总量的激增，数据中心冷却系统能耗占比已高达基础设施总能耗的30%~40%，“高算力”与“高能耗”的矛盾愈发凸显，成为制约行业绿色低碳发展的核心瓶颈。

在此背景下，冷却系统的高效设计与精准调优，已成为提升数据中心能源利用效率(PUE)、破解能耗困境的关键路径。本章将以系统级别分层为核心脉络，系统阐述数据中心冷却末端的设计要点与优化策略：从覆盖大范围空间的房间级冷却方案，到聚焦局部区域、适配中高密度算力的行间级冷却技术，再到直面超高密度机柜散热需求的机柜级末端设计，形成多维度、分层次的技术分析框架。

与此同时，为响应算力密度持续升级下的复杂散热需求，本章还将拓展两大前沿技术方向：一是融合“风冷高效覆盖”与“液冷精准散热”优势的混合冷却机房设计，探索多冷却方式协同运行的最优路径；二是引入人工智能(AI)技术的智能调优方法，通过算法模型实现冷却系统的动态感知与自适应调节，为数据中心冷却系统的高效化、智能化发展提供更具前瞻性的技术参考。

3.1 房间级末端

房间级末端空调作为数据中心热管理的核心执行单元，需同时满足“大面积均匀控温、自然冷源高效利用、低能耗运行”三大核心需求。当前典型技术路径包括三类：大风墙形式末端空调依托大面积出风口与多风机协同，构建覆盖式气流屏障，适配中高密度机柜的整体温控；氟泵房间级末端空调通过“压缩机-氟泵”双动力切换，最大化挖掘低温环境下的自然冷却能力，助力 $PUE \leq 1.3$ 的绿色数据中心建设；间接蒸发冷却式房间级空调则利用水的蒸发潜热与间接换热技术，在干燥地区实现低能耗制冷，运行成本仅为传统空调的40%~60%。三类技术基于不同换热原理与场景适配性，共同构成数据中心房间级温控的多元化解决方案，其技术特性与应用边界的精准匹配，是实现数据中心高效热管理的关键前提。

3.1.1 大风墙形式末端空调

3.1.1.1 工作原理

大风墙形式末端空调以“面状覆盖、定向输送、低阻直送”为核心设计逻辑，通过大面积出风口(长度可定制10~50m、高度与冷通道一致2.5~4m)形成连续的气流幕

墙，结合数据中心热通道封闭布局，构建冷热空气严格隔离的循环系统。其核心原理是：摒弃传统点式、管式送风，将冷风沿冷通道长边水平直送机柜前门，限定冷风在冷池内流动，避免向热通道泄漏；同时，服务器排出的热风被封闭在热通道内，经封闭吊顶回风格栅进入空调机房，最终回流至空调机组冷却，实现气流无死角、高利用率循环（如图 3.1-1 所示）。

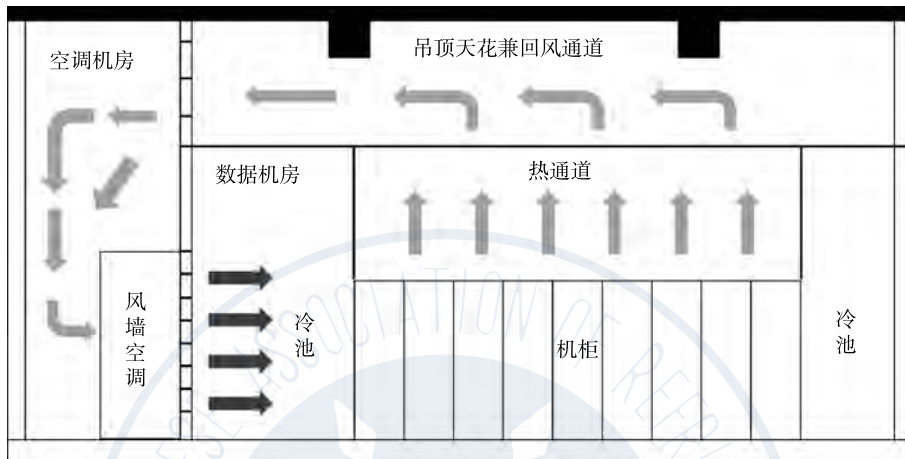


图 3.1-1 大风墙末端空调气流组织原理

3.1.1.2 工作流程

大风墙空调依托定制化气流组织方案，构建了高效的冷热循环散热体系，其具体工作流程如下：

(1) 冷风输送：大风墙空调箱机组安装于机房端部侧墙，通过定制长度的送风面板，向数据机房冷通道水平输送冷风，形成覆盖冷通道进风侧的“气流幕墙”。

(2) 机柜换热：冷风直接作用于机柜前门，为服务器提供稳定进风，服务器运行产生的热量通过机柜后门排至封闭热通道。

(3) 热风回风：热通道内的热风在气流压差作用下，进入机房顶部的封闭吊顶，通过吊顶内的回风格栅定向回流至空调机房。

(4) 循环冷却：回流的热风进入空调箱机组，经冷却系统处理后转化为冷风，再次通过风墙输送至冷通道，完成“输送-换热-回风-冷却”的闭环循环。

3.1.1.3 性能优势

在数据中心追求高效制冷、低能耗运营及简化运维的需求下，大风墙空调通过技术革新，从温控精准性、能耗控制及运维成本三大关键维度突破传统空调局限，形成差异化竞争优势，具体如下：

(1) 温控精准性高：风墙沿冷通道长边连续布置，能形成完整气流幕墙，全面覆盖冷通道进风侧，从根源避免气流死角；同时采用水平送风，气流平行地面直送机柜前门，既避免上下进风不均，又将送风限定在冷池内，减少向热通道泄漏——相较于传统地板下送风模式超过 30% 的冷却气流浪费，其气流利用率超过 90%。这种设计直接带来温控稳定性提升：机柜前门进风温差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ （传统列间空调 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ），可避免服务器

局部过热降频宕机；且单台风量达 10 万~50 万 m^3/h ，能满足 4~8 排 20~50kW/柜高密机柜需求，适配 AI 服务器等高热密度设备。

(2) 能耗优化显著：采用“风机+送风面板”直吹结构，无须传统吊顶风管、地下风管等复杂管路，气流从风墙直接输送至冷通道，仅需克服极短路径的阻力（气流阻力系数仅为传统风管系统的 1/5），这种短路径、低阻力的设计大幅降低风机运行负荷，使得制冷系统能耗较传统方案减少 20%~40%，能有效助力数据中心实现 PUE 达标。

(3) 运维成本更低：单台风墙可覆盖 10~20 排机柜，设备部署数量较传统列间空调减少 50%，既降低初期设备投入，又减少后期巡检、维护工作量，简化热管理运维流程。

3.1.1.4 适用场景

大风墙空调凭借温控精准、能耗优化及高密负载适配的核心特性，能精准契合不同数据中心的运营需求，尤其在以下三类场景中优势显著：

(1) 高密度数据中心（单机柜功率 $\geq 10\text{kW}$ ），尤其是单机柜功率密度 $\geq 20\text{kW}$ 的场景，如 AI 算力中心、高性能计算机房等。

(2) 对温控均匀性要求高、需避免局部热点的机房，如金融核心业务机房。

(3) 追求低 PUE（目标 ≤ 1.3 ）、绿色低碳运营的数据中心，需通过高气流利用率降低制冷能耗的场景。

3.1.2 氟泵房间级末端空调

3.1.2.1 工作原理

氟泵房间级末端空调融合机械制冷与自然冷源利用技术，核心系统由压缩机、氟泵、蒸发器、冷凝器及 PID 智能控制系统组成，通过双循环三模式切换实现高效换热。其核心原理是：利用制冷剂（常用 R410A、R32）的相变特性，在不同室外温度下切换动力源。低温环境下，以氟泵替代压缩机驱动制冷剂循环，通过冷凝器与室外冷空气换热实现自然冷却；高温环境下，启动压缩机进行机械制冷；过渡季节则采用压缩机+氟泵混合驱动，平衡制冷量与能耗，最大化挖掘自然冷源价值（如图 3.1-2 所示）。

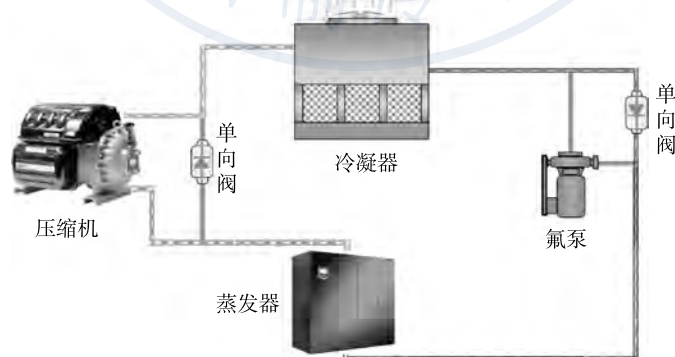


图 3.1-2 氟泵空调工作原理

3.1.2.2 工作流程

氟泵房间级空调通过氟泵自然冷却与压缩机机械制冷的协同设计，可根据室外温度

变化，通过 PID 控制系统切换三种运行模式，在不同季节既保障机房制冷需求，又最大化降低能耗，具体工作流程如下。

(1) 氟泵自然冷却模式（冬季）

- ① 室外温度较低（通常 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ ）时，压缩机不运行，氟泵启动；
- ② 氟泵驱动制冷剂在循环管路中流动，室内回风经蒸发器吸热后，制冷剂变为气态；
- ③ 气态制冷剂流至冷凝器，与室外冷空气换热后冷凝为液态，再经氟泵输送回蒸发器，完成自然冷却循环。

(2) 混合制冷模式（春秋过渡季）

- ① 室外温度适中（通常 $10\sim 25^{\circ}\text{C}$ ）时，压缩机降频运行，氟泵同步启动；
- ② 制冷剂由“压缩机+氟泵”共同驱动循环，冷凝器吸收的热量部分来自室外冷空气、部分来自压缩机机械制冷，在保证制冷量的同时降低压缩机能耗。

(3) 压缩机机械制冷模式（夏季）

- ① 室外温度较高（通常 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ）时，氟泵停止运行，压缩机满负荷启动；
- ② 压缩机驱动制冷剂完成“压缩-冷凝-节流-蒸发”的传统制冷循环，室内回风经蒸发器冷却后送入机房，确保高温环境下的制冷量稳定。

3.1.2.3 性能优势

氟泵房间级空调依托“自然冷源利用+智能控制”的创新设计，能够兼顾能耗经济性、运行稳定性及多气候区域适配，有效突破传统制冷方案的局限，其关键优势具体如下。

(1) 节能效果突出：低温季节完全依赖氟泵自然冷却，无须压缩机运行，制冷能耗较传统空调更低；全年综合能耗优化显著，助力数据中心实现 $\text{PUE}\leq 1.3$ 的绿色目标。

(2) 运行模式智能：搭载 PID 智能控制系统，可根据室内外温度、机房热负荷自动切换最优运行模式，无需人工干预，确保制冷稳定性与能耗经济性的平衡。

(3) 环境适应性强：通过“机械制冷+自然冷却”双动力设计，既能应对夏季高温环境，又能充分利用冬季、过渡季的自然冷源，适配不同气候区域的全年运行需求。

3.1.2.4 适用场景

氟泵房间级空调具有自然冷源高效利用、低 PUE 运营及中高密度负载适配等核心优势，能精准契合不同气候区域与数据中心的差异化需求，尤其在以下三类场景中适配性突出。

(1) 全年自然冷源利用周期长的地区，如我国华北、东北、西北等地区，年平均气温较低，冬季寒冷期超过 4 个月。

(2) 对 PUE 值要求严格的绿色数据中心，如国家“东数西算”工程中定位“绿色低碳”的节点机房。

(3) 高密度数据中心（单机柜功率 $\geq 10\text{kW}$ ），尤其适用于单机柜功率密度在 $20\sim 50\text{kW}$ 的机房，需兼顾制冷稳定性与能耗优化的场景。

3.1.3 间接蒸发冷却式房间级空调

3.1.3.1 工作原理

间接蒸发冷却式房间级空调利用水的蒸发潜热实现降温，核心部件包括换热芯体、喷淋蒸发系统、补冷系统（机械制冷）及循环风机，其核心原理是“间接换热、无空气

直接接触”。设备内部设有两个独立气流通道（室外空气通道、室内回风通道）：室外空气在专属通道内与喷淋水接触，通过蒸发冷却降温后，与室内回风通道的热风在换热芯体处间接换热；整个过程中，室内回风与室外空气不直接接触，既利用蒸发潜热降低能耗，又避免室外灰尘、湿气等进入机房，保障室内空气洁净度（如图 3.1-3 所示）。

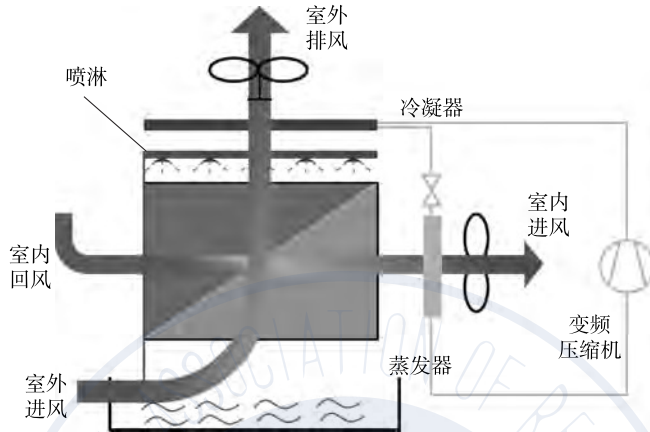


图 3.1-3 间接蒸发冷却工作原理

3.1.3.2 工作流程

间接蒸发冷却房间级空调依托“按需调节换热方式”的核心设计，兼顾环境适应性与运行经济性，可根据室外温度、湿度变化，自动切换干、湿、混合三种运行模式，确保不同季节均能高效满足机房制冷需求，其具体工作流程如下：

(1) 干模式（冬季）

- ① 室外干球温度低（通常 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ ），喷淋蒸发系统、补冷系统均不运行；
- ② 室外低温空气从二次进风口进入室外通道，流经换热芯体；
- ③ 机房高温回风从一次进风口进入室内通道，通过换热芯体与室外低温空气间接换热后降温，由一次送风机送入机房，完成换热的室外空气经二次排风机排出。

(2) 湿模式（春秋过渡季）

- ① 室外温度适中（ $5\sim 25^{\circ}\text{C}$ ）、相对湿度 $\leq 60\%$ ，喷淋蒸发系统启动，补冷系统关闭；
- ② 喷淋系统向室外通道的换热芯体布水，室外空气与水接触蒸发降温；
- ③ 降温后的室外空气通过换热芯体与室内回风换热，冷却后的回风送入机房，携带热量的室外湿空气经二次排风机排出。

(3) 混合模式（夏季）

- ① 室外干球温度高（ $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ）、湿度较高，喷淋蒸发系统与补冷系统（机械制冷）同步启动；
- ② 室外空气经喷淋蒸发降温后，先通过换热芯体对室内回风预冷；
- ③ 预冷后的回风再流经蒸发器（机械制冷）进一步降温，最终由一次送风机送入机房，确保制冷量满足需求。

3.1.3.3 性能优势

间接蒸发冷却房间级空调依托“蒸发潜热制冷+间接换热+机械补冷”的复合设

计，在三大关键维度形成差异化优势，能够兼顾运行成本控制、机房环境洁净保护及全年制冷稳定性，具体如下。

(1) 运行成本低：依赖水的蒸发潜热制冷，能耗远低于传统机械制冷空调，运行成本仅为传统空调的40%~60%，长期使用经济性显著。

(2) 机房洁净度高：室内回风与室外空气通过独立通道间接换热，不发生直接接触，可有效阻挡室外灰尘、污染物、湿气进入机房，降低服务器硬件故障率。

(3) 补冷系统可靠：配套机械制冷补冷系统，在高湿度、高温季节可切换混合模式，避免单一蒸发冷却能力不足的问题，保障全年制冷稳定性。

3.1.3.4 适用场景

间接蒸发冷却房间级空调依托对干燥室外环境的适配性、低能耗运行优势及机房洁净保护能力，能精准契合特定地域与机房类型的制冷需求，尤其在以下三类场景中适配性突出。

(1) 室外空气含尘量低、相对湿度 $\leq 60\%$ 的干燥地区，如我国西北地区，包括新疆、甘肃、宁夏等地。

(2) 中、低密度数据中心（单机柜功率密度 $\leq 10\text{kW}$ ），如企业级机房、边缘计算节点机房。

(3) 对运行成本敏感、无污染物引入需求的场景，如医疗数据机房、档案存储机房、需保障空气洁净度的机房等。

3.1.4 其他常见形式房间级空调

3.1.4.1 风管式房间级空调

(1) 工作原理

风管式房间级空调以风管系统为核心气流输送载体，通过“集中处理-分散输送”的逻辑实现机房温控。其核心原理是：空调机组对空气进行冷却处理后，由送风机将冷风送入主风管，再通过分支风管及定制出风口，将冷风按需分配至机房各制冷区域；吸热后的热空气通过回风管回流至空调机组，形成“冷却-输送-换热-回风”的闭环循环，通过调整风管走向与出风口位置，适配机房内分散或不规则的机柜布局（如图3.1-4所示）。

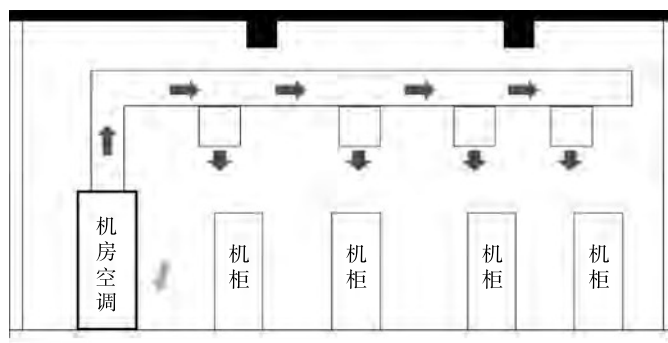


图 3.1-4 风管式空调气流组织工作原理

(2) 工作流程

在机房机柜分布较散、需避免局部区域温差过大的场景下，风管式房间级空调通过“主风管+分支管路”的输送结构，构建“冷却-输送-换热-回风”的完整气流循环，确保分散机柜均能获得稳定冷源，具体工作流程如下。

① 空气冷却：空调机组启动制冷系统，将进入机组的常温空气（或回风）冷却至目标温度（通常 18~24℃）。

② 冷风输送：送风机将冷却后的冷空气送入主风管，主风管通过分支管路连接至机房不同区域的出风口（如天花板出风口、侧墙出风口等）。

③ 区域换热：冷风从各出风口均匀送出，覆盖机房内分散的机柜，为服务器提供冷却风；服务器运行产生的热量使空气升温，形成热空气。

④ 热风回风：热空气在气流压差作用下，通过回风口进入回风管，沿回风管回流至空调机组，再次经过冷却处理后进入下一轮循环。

(3) 性能优势

面对机房机柜分散布局、不规则摆放，或老旧数据中心需低成本升级温控系统的需求，风管式房间级空调凭借灵活的送风设计、均匀的控温能力及便捷的改造适配性，有效突破传统空调的场景局限，具体性能优势如下。

① 送风灵活性高：可根据机房机柜布局（如分散式、不规则布局等）调整主风管、分支风管的走向，以及出风口的位置与数量，适配零散或局部的制冷需求，无需受限于固定送风面。

② 控温覆盖均匀：通过多出风口分散送风，可避免单一送风点造成的温度梯度，确保机房内各区域（尤其是边角区域）温度均衡，温差可控制在 2℃ 以内。

③ 改造适配性强：对于老旧数据中心的温控改造，无需大规模调整机柜布局，仅需新增或优化风管系统即可提升制冷能力，改造成本相对较低。

(4) 适用场景

风管式房间级空调凭借对分散布局的适配性、低密度场景的兼容性及老旧机房改造的便捷性，能精准匹配中小型机房、低密度负载及改造类场景的温控需求，尤其在以下三类场景中优势显著：

① 中小型数据中心（机房面积 $\leq 500\text{m}^2$ ），机柜分布不均或呈分散式布局（如企业办公楼下的附属机房）。

② 单机柜功率密度 $\leq 8\text{kW}$ 的低密度场景，如传统 IT 机房、办公用小型数据中心。

③ 老旧数据中心的温控系统改造，需在不调整机柜布局的前提下，提升局部区域制冷能力的场景。

3.1.4.2 柜式房间级空调

(1) 工作原理

柜式房间级空调采用一体化柜式结构，将制冷系统（压缩机、蒸发器、冷凝器）、送风系统（内置风机）、回风系统（回风口）高度集成于单个设备中，无需额外配套风管或静压室。其核心原理是“局部循环、就近制冷”：通过柜体内部的压缩机驱动制冷剂循环，在蒸发器处将室内热风冷却为冷风；内置风机将冷风直接送入设备周边的机柜区域，热风从柜体侧面或顶部的回风口进入机组，完成局部范围内的“制冷-送风-回

风”循环，实现小范围精准控温。

(2) 工作流程

在机房局部机柜密度较高、需就近精准供冷以减少气流损耗的场景下，柜式房间级空调依托紧凑的柜式结构与局部闭环气流设计，通过“制冷-送风-换热-回风”的高效循环，为周边机柜稳定输送冷源，具体工作流程如下。

① 制冷启动：柜式空调通电后，压缩机启动，驱动制冷剂在机组内部的管路中循环，蒸发器开始吸收热量。

② 冷风送风：内置风机运转，将蒸发器冷却后的冷空气从柜体正面或侧面的送风口送出，直接吹向周边机柜的进风侧。

③ 局部换热：冷风为周边机柜的服务器提供冷却，服务器排出的热风在局部气流循环作用下，向柜式空调的回风口流动。

④ 热风冷却：热空气通过柜体侧面或顶部的回风口进入空调内部，与蒸发器接触并释放热量，被冷却后的空气再次由风机送出，形成局部闭环循环。

(3) 性能优势

在机房追求快速部署、高效利用空间，且需针对局部热点精准补冷的场景下，柜式房间级空调依托一体化结构与紧凑设计，在安装便捷性、空间占用及补冷灵活性上形成显著优势，具体如下。

① 安装便捷性高：一体化柜式结构，开箱后无需复杂施工（如风管安装、机房改造），仅需定位摆放并接通电源即可启动，部署周期短（通常1~2天即可完成单台安装）。

② 占地空间小：设备体积紧凑（常见尺寸：宽800~1200mm、深600~800mm、高1800~2200mm），可灵活摆放在机房空闲角落，不占用机柜核心区域空间。

③ 补冷灵活性强：可作为高密度机房的“局部补冷设备”，针对机柜热点区域（如某几台高负载服务器）精准补充冷量，避免为满足局部需求而开启全域制冷造成的能源浪费。

(4) 适用场景

柜式房间级空调凭借安装快、占地小、可精准补冷的优势，能灵活适配从低密度常规机房到高密度机房局部补冷、再到临时应急机房的多样化需求，尤其在以下三类场景中适配性突出。

① 单机柜功率密度 $\leq 5\text{kW}$ 的低密度数据中心（如小型企业机房、边缘计算机房等，机柜数量 ≤ 20 台）。

② 高密度数据中心（如AI机房）的局部热点补冷，针对个别高负载机柜补充冷量，平衡全域温度。

③ 临时或应急用数据中心（如灾备临时机房、户外移动机房），需快速部署温控系统的场景。

3.1.5 房间级空调优化设计

房间级末端空调的优化需围绕“能效最大化、温控精准化、运行可靠化、场景适配化”四大核心目标，结合大风墙、氟泵、间接蒸发冷却三类技术的结构特性与应用场景

差异，从气流组织、模式控制、组件性能、维护体系四大维度展开系统性优化，确保在满足机房温控需求（温度 18~27℃、相对湿度 40%~60%）的同时，实现全生命周期能耗与成本最优。

3.1.5.1 风墙形式末端空调优化

大风墙空调“面状送风+冷池-热通道隔离”的运行模式虽然有很好的制冷需求，但实际应用中仍面临送风均匀性不足、风机能耗偏高、局部降温效果不佳等问题。这些问题直接影响机柜进风温度稳定性与数据中心 PUE 达标效率，因此需结合其“冷池+封闭热通道”的气流组织本质，从气流管控、能耗优化、空间适配三个维度制定系统性优化方案，以实现“温控精准化、运行低能耗、效果稳定化”的目标。

(1) 气流组织与通道压力协同优化

“防止冷热掺混、保障回风顺畅”为核心，基于“机房整体为冷池”的设计逻辑，通过冷通道顶部增设压力传感器，实时调节送风量以维持 5~10Pa 微正压，有效阻断热通道高温空气渗入（冷热混合率 $\leq 5\%$ ）；同时优化吊顶回风通道的回风格栅布局，确保热通道 35~45℃ 的排风均匀汇入吊顶，避免局部回风短路导致的换热效率损耗，从气流循环源头保障温控稳定性。

(2) 风机系统节能

以“动态适配负荷、降低无效能耗”为目标，将传统定频风机替换为永磁同步变频风机（较异步风机节能 20%~30%），并联动冷通道温度传感器采用 PID 动态调节算法：当冷通道温度 $< 20\text{℃}$ 时，风机转速降至额定值的 50%~60%；温度 $> 24\text{℃}$ 时，转速提升至 80%~100%，避免风机满负荷运行造成的能耗浪费，实现“按需供风”的节能效果。

(3) 送风口-机柜相对位置与冷通道宽度协同调整

以“优化气流扩散、提升降温效果”为关键，冷通道宽度直接决定送风口与机柜的相对距离，宽度适宜时，冷风有充足空间均匀扩散并完整覆盖机柜前门，避免气流死角；宽度过窄则导致冷风来不及铺展就抵达机柜，引发进风温度不均。同时，宽通道能减少冷量输送损耗，保障机柜获取稳定低温冷风；窄通道则压缩气流空间，加剧冷量损耗并导致机柜进口温度升高，削弱降温效果。因此，需结合机柜布局匹配适宜通道宽度，从空间适配层面提升降温效果。

从优化气流组织角度而言，调整冷通道宽度以优化送风口与机柜相对位置，是风墙空调降温效果优化的关键手段：宽通道能保障冷风均匀覆盖与低温输送，窄通道则易引发机柜进口温度上升，需结合实际机柜布局匹配适宜宽度。

在风墙参数、位置不变的前提下，对不同冷通道的机房进行 CFD 仿真，结果见图 3.1-5 和图 3.1-6。可以发现，冷通道宽度对机柜降温效果影响显著：冷通道较宽（2m）时，机柜平均进口温度最大值仅 25.1℃，冷风降温效果更优；当冷通道宽度缩至 1.7m 时，机柜平均进口温度最大值升至 27.6℃，降温效果明显下降。

3.1.5.2 氟泵房间级末端空调优化

氟泵空调的核心优势在于自然冷能挖掘，优化需聚焦“模式切换阈值校准、系统阻力降低、维护简化”，最大化发挥其节能潜力。

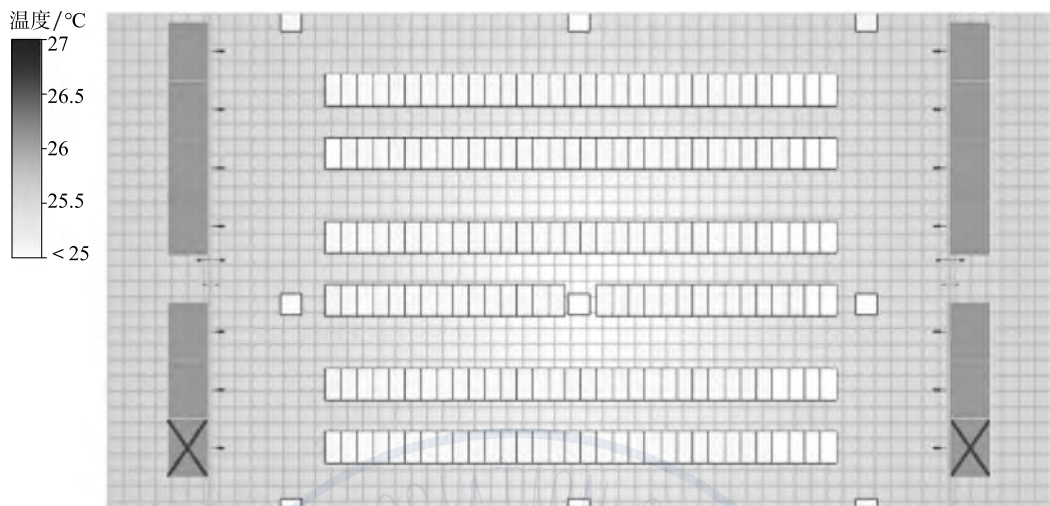


图 3.1-5 冷通道宽度 2m 时机柜进风温度

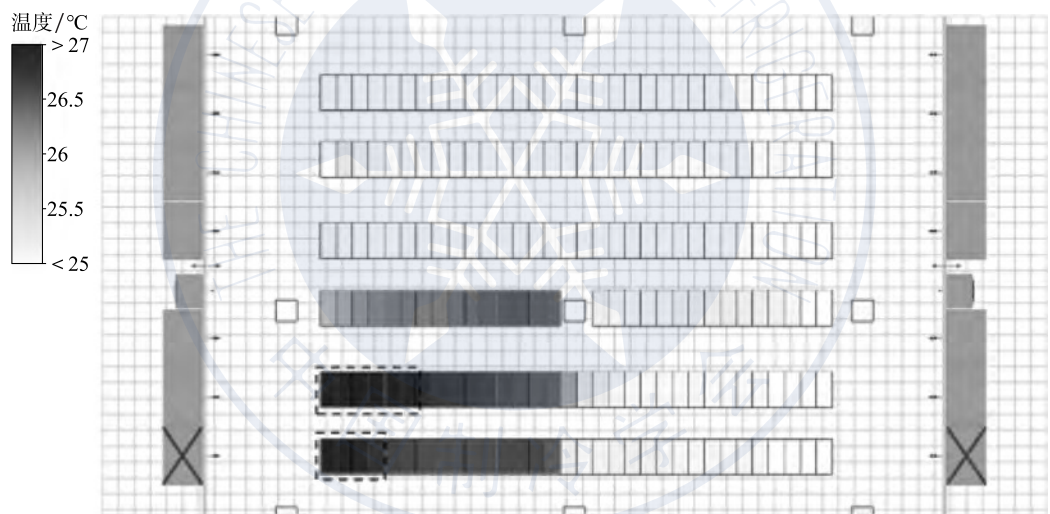


图 3.1-6 冷通道宽度 1.7m 时机柜进风温度 (虚线框内的温度高于 27°C)

(1) 模式切换逻辑精准化

① 动态阈值校准。摒弃固定温度阈值 (如传统 12°C 启动氟泵模式), 采用“室外温湿度-机房负荷”双参数联动控制: 当室外干球温度 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 且机房负荷 $< 70\%$ 时, 启动纯氟泵模式; 当室外温度 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 或负荷 $70\%\sim 90\%$ 时, 切换至混合模式 (压缩机降频 $30\%\sim 50\%$ + 氟泵运行); 当室外温度 $> 15^{\circ}\text{C}$ 或负荷 $> 90\%$ 时, 启动纯压缩模式。通过动态阈值, 可延长氟泵模式运行时间 $20\%\sim 30\%$, 年节能率提升 $5\%\sim 8\%$ 。

② 切换冲击抑制。在模式切换 (如氟泵 \rightarrow 混合) 时, 采用“阶梯式调节算法”: 氟泵转速先提升至额定值的 80% , 再逐步启动压缩机并调整频率 (每 30s 提升 10% 频率), 避免系统压力骤变导致的机组振动与电流冲击 (冲击电流降低 $40\%\sim 50\%$)。

(2) 系统管路设计优化

氟泵与管路匹配：选用低扬程高流量氟泵（扬程 15~20m，流量适配系统需求），并优化管路设计。将管路直径扩大 10%~15%（如从 DN25mm 增至 DN32mm），减少沿程阻力；在氟泵入口增设 Y 形过滤器（精度 100 目），防止制冷剂杂质堵塞泵体，延长氟泵寿命至 8~10 年。

上述针对氟泵空调的模式切换精准化、系统管路优化等思路，并非孤立的技术设计，而是得到了学界多项研究成果的理论支撑，且在实际工程改造中已验证其节能实效。以下为相关研究结果与典型案例介绍。

① 研究成果

吴浩等^[1]提出利用自然冷源的数据中心制冷方法、装置、设备及介质，结合风冷氟泵空调与冷却塔供冷模块，通过确定不同启动临界温度（共有四个启动临界温度），根据室外环境温度实现自然冷源的阶梯级利用，以延长利用时长、提升能效。周峰等^[2]提出数据中心冷热一体式氟泵热回收系统及其控制方法，包括数据中心余热供暖系统、氟泵自然冷却系统和蒸气压缩制冷系统，通过切换集成阀组件，可实现数据中心余热供暖、氟泵自然冷却等五种运行模式，以满足不同工况需求。

通过论文检索平台对主题“氟泵”/“泵驱动”和主题“数据中心”进行检索，并筛选 2015—2025 年相关度较高的论文，现有中英文论文的研究主要包括系统性能研究、节能对比分析以及部件特性分析等。周峰等^[3]搭建了数据中心自然冷却用混合工质氟泵冷却系统实验装置，研究多种不同工况下 R410A 混合工质系统的性能。结果表明，系统制冷量和能效比均随冷热源温差的增大而增大，在泵频率 5~30Hz 范围内，系统换热量先增加后略有下降，之后趋于平缓，峰值出现在 10~15Hz，而单一工质 R22 的峰值频率为 25Hz。周峰等^[4]研制了不同型号气泵及其复合冷却机组，通过实验对比，分析全年温差跨度下 2 种型号气泵部件的吸排气压力和质量流量的变化，以及复合冷却机组的性能表征差异。结果表明，相同工况下，大力矩气泵（1#）吸排气压比小于小力矩气泵（2#）。实验温差范围内，大力矩气泵吸排气压比下降 53.56%，小力矩气泵吸排气压比下降 32.89%，大力矩气泵驱动复合冷却机组制冷量和能效比均高于小力矩气泵机组。温差为 30℃时，大力矩气泵机组制冷量为 14.8kW，小力矩气泵机组的制冷量为 9.2kW。

李翠翠等^[5]通过改变系统温差、泵频率、换热面积、高低温水源温度，对工质泵的冷损失性能进行实验研究。结果表明，高温水源温度不变时，冷损失率在温差为 16℃、频率为 15Hz 及较大换热面积时最小。低温水源温度不变时，不同温差下，当蒸发器和冷凝器个数均为 5 个时系统冷损失率最小，且不超过 3.20%。高温水源温度越高，冷损失率越低，实验高温水源温度为 26℃时，冷损失率最低，且不超过 2.82%。

② 典型案例

在北京市某公共机构数据机房的节能改造工程中^[6]，安装一套泵驱动自然冷却机组，利用春、秋和冬季室外自然冷源为机房降温，减少原空调的使用时间，降低机房冷却耗电量。泵驱动自然冷却机组主要由两套冷凝器（室外侧）、一套蒸发器（室内侧）、一台工质泵、一个储液罐和八台风机组组成，这些设备通过管路连接起来，并将内部抽成真空后充入循环工质。

泵驱动自然冷却机组全年运行模式如下：夏季，开启机房原有空调进行制冷，泵驱动自然冷却机组关闭。冬季，开启泵驱动自然冷却机组进行冷却，通过机组自动控制系统，调整风机频率以及泵流量，控制室内温度恒定，机组处于部分负荷运行，同时原有精密空调处于待机备用状态。春、秋过渡季节，当室外气温低于 15°C 时，开启泵驱动自然冷却机组进行冷却，原有空调处于待机备用状态；当室外气温高于 15°C 时，优先开启泵驱动自然冷却机组进行冷却，冷量不足部分开启原有空调进行补充。

当室外气温低于 10°C 时，安装的泵驱动热管自然冷却机组可完全替代原有空调，且运行效果良好，在室外温度为 -1.3°C 、室内温度 20.75°C 条件下，机组实测的EER达到11.88。改造前后机房年总耗电量及节能率如表3.1-1所示。

表 3.1-1 机房年总耗电量及其节能率

改造前年总耗电量/(kW·h)	改造后年总耗电量/(kW·h)	年节省电量/(kW·h)	节能率/%
46482.50	35939.95	10542.55	22.7

3.1.5.3 间接蒸发冷却式房间级空调优化

间接蒸发冷却式房间级空调凭借“水蒸发潜热制冷+间接换热”的核心优势，在干燥地区数据中心实现了低能耗（运行成本仅为传统空调40%~60%）与高洁净（室内外气流无直接接触）的双重价值，但实际运行中仍面临三大核心挑战：环境湿度波动易导致换热芯体结垢、辅助制冷与主系统协同不足造成能耗浪费、大风量高速气流易引发机房气流紊乱。这些问题直接制约其制冷效率与运行稳定性，因此需结合“环境适配-系统协同-气流管控”的逻辑，从湿度应对、制冷联动、静压优化三个维度制定针对性方案，以最大化发挥其节能优势，适配不同工况下的数据中心温控需求。

间接蒸发冷却空调应从核心控制逻辑、硬件管路设计到气流组织形式展开多维度优化——既要通过动态化的模式切换逻辑延长节能运行时长、抑制系统冲击，也要依托适配性的管路设计保障设备可靠性，更需结合机房实际场景优化气流组织以提升冷却效果。

(1) 环境适配性优化

湿度联动控制：在机组内集成高精度温湿度传感器（精度 $\pm 2\%$ ），当室外相对湿度大于60%时，自动关闭喷淋系统，切换至干模式运行；若室外相对湿度大于70%且机房回风温度高于 24°C ，启动“干模式+辅助除湿”（通过转轮除湿器降低回风相对湿度至50%以下），避免换热芯体结垢与霉菌滋生。

(2) 辅助制冷协同优化

负荷联动控制：将间接冷却系统与机械制冷系统通过PLC控制器联动，当间接冷却后回风温度高于 22°C 时，自动启动机械制冷（蒸发器），并根据回风温度调节制冷量（如温度 $22\sim 24^{\circ}\text{C}$ 时，制冷量输出50%~70%；温度高于 24°C 时，满负荷输出），避免过度制冷导致的能耗浪费。

冬季余热利用：在冬季干模式下，若机房回风温度低于 18°C （余热不足），利用机械制冷系统的“热泵模式”（切换四通阀），将室外空气中的热量转移至回风，使送风温度维持在 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，无需额外加装电加热器（节能率30%~40%）。

(3) 静压室与送风通风率协同优化

间接蒸发冷却式房间级空调作为典型的大风量设备（结合厂家参数，额定制冷量

200kW，机型风量通常达 6 万~9 万 m^3/h ），受设备体积限制，实际应用中难以使送风口完全正对机房冷通道，易因高速气流（部分机型初始风速超 10m/s ）直接送入导致气流紊乱，因此需配套建设送风静压室，如图 3.1-7 所示，通过“缓冲降速+压力平衡”优化气流组织。结合 CFD 仿真分析，静压室的气流优化效果需重点关注以下两点。

① 静压室结构与通风率的匹配关系：静压室的静压效果主要受自身宽度与送风百叶通风率影响——若静压室过窄，即使调整百叶，高速气流也无法充分降速，直接送入机房后易形成局部热点；通过降低送风百叶通风率，可显著改善静压室内压力分布均匀性，进而带来更均匀的出风速度，同时延长空气输送距离，确保冷气流覆盖更远的冷通道区域。

② 通风率与机外余压的平衡：需注意“低通风率虽提升静压效果，但会增加风阻”——若通风率过低导致风阻超出空调机外余压承载范围，反而会造成出风速度骤降、冷量输送不足。同时在前期的建筑设计阶段应确保静压室宽度不小于 1.2m ，避免因空间限制削弱静压效果。

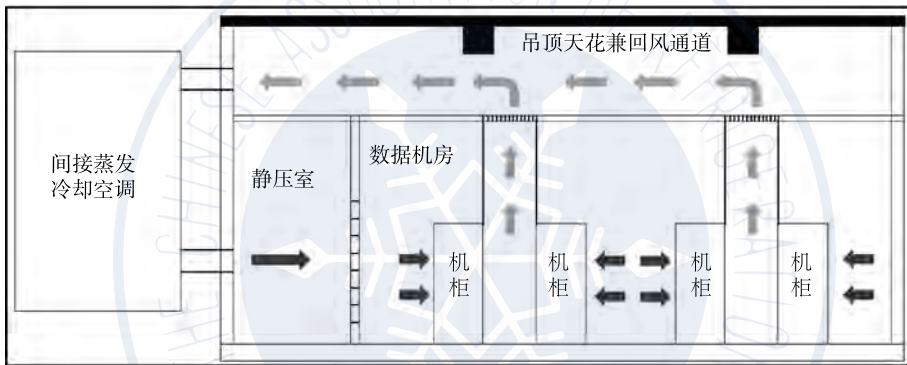
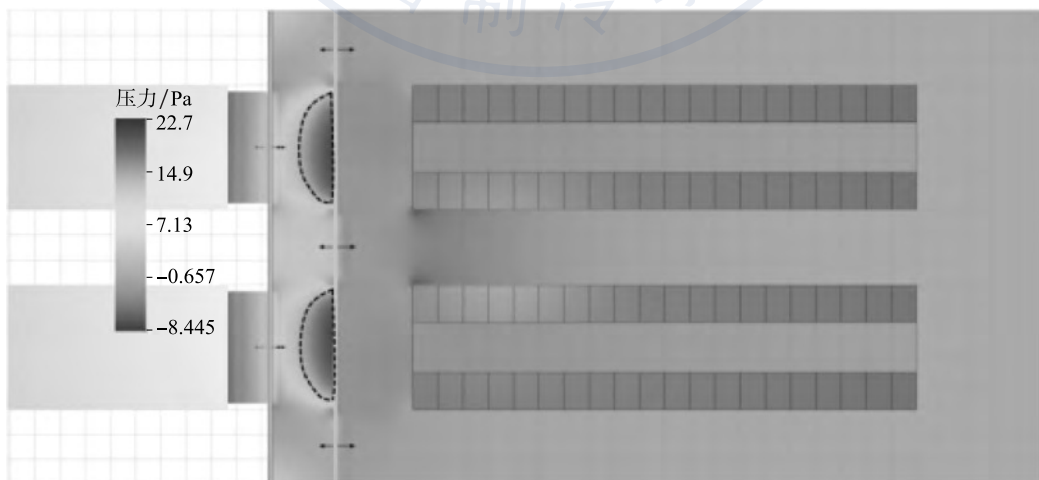
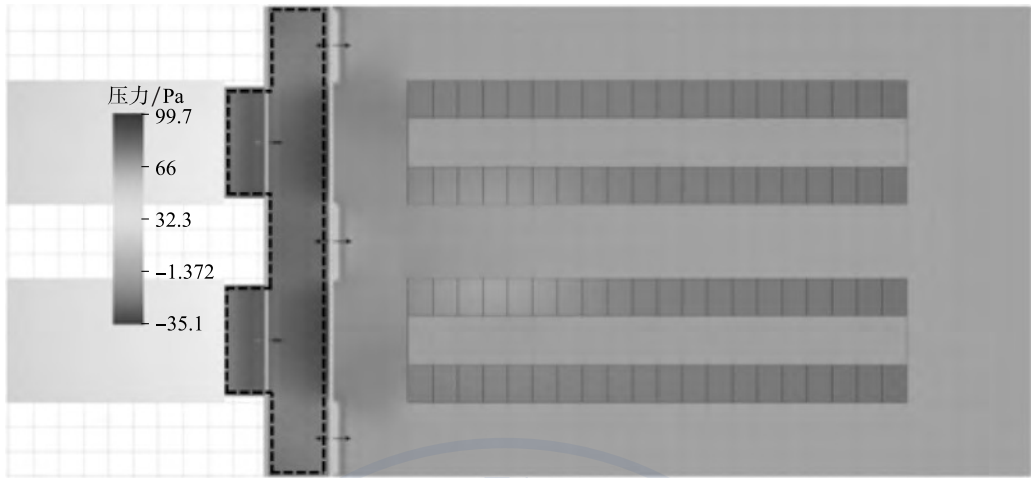


图 3.1-7 间接蒸发冷却气流路径示意图

对送风百叶不同通风率进行 CFD 仿真，可以得出不同通风率下的静压室压力，如图 3.1-8、表 3.1-2 所示。



(a)通风率较高时



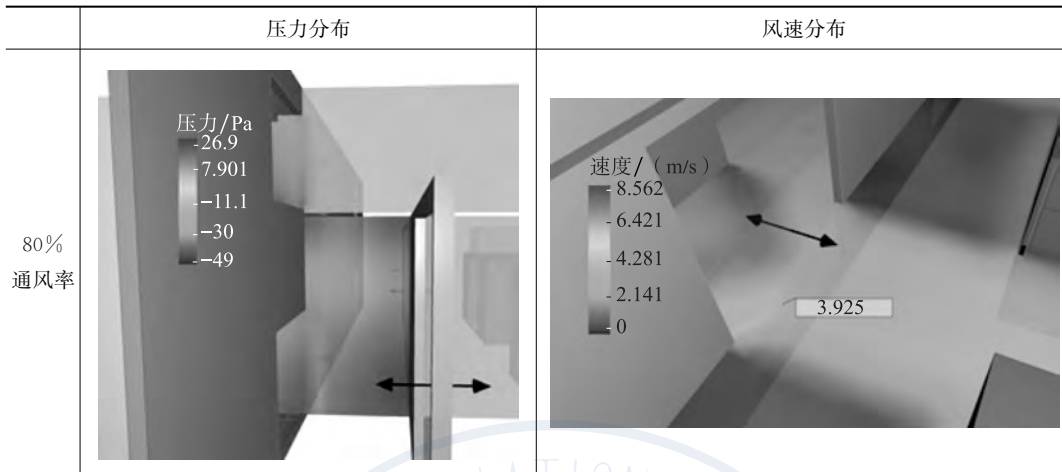
(b)通风率较低时

图 3.1-8 静压室不同送风百叶通风率下的静压效果对比 (虚线框范围为高压区)

表 3.1-2 不同百叶通风率的静压室压力和风速分布

	压力分布	风速分布
30% 通风率		
50% 通风率		

续表



3.1.5.4 房间级末端优化总结

无论采用上述哪一类房间级空调末端形式，为满足机房对温控高可靠、低能耗、充分利用的核心需求，应从系统保障、能效管控、气流利用三大维度开展关键优化：通过设备冗余配置构建故障容错机制，依托能效监测实现运行参数动态优化，结合气流组织设计最大化提高冷量利用效率。

(1) 设备冗余配置：采用 $N+1$ 冗余设计（如满足负荷需 5 台机组，配置 6 台），且冗余机组与主用机组型号一致，故障时 30s 内自动切换；关键部件（风机、压缩机、氟泵）采用双备份，避免单点故障导致的系统瘫痪。

(2) 能效监测：在空调机组出口加装风量传感器和冷量计量装置，实时监测机组实际制冷量与能耗，通过大数据分析优化运行参数（如调整风机转速、模式切换阈值）。

(3) 气流组织设计：气流组织设计需立足数据机房实际散热需求，综合考量机房内机柜布局、送风口与机柜的相对位置关系等核心因素。设计核心目标为优先实现冷风直接、高效输送至机柜进风面，同时通过气流路径优化规避热气流回流现象，最终实现冷量利用效率最大化，减少冷量无效损耗。

总的来说，房间级末端空调的优化需因地制宜、因负荷制宜：大风墙空调需聚焦气流均匀性，适配中高密度机房；氟泵空调需强化自然冷源利用与模式切换精度，助力低 PUE 目标；间接蒸发冷却空调需提升环境适配性与换热效率，拓展干燥地区应用场景。通过“技术特性-场景需求”的精准匹配与多维度系统性优化，可实现数据中心热管理的温控精准、能耗最优、运行可靠，为数字基础设施的高效运行提供核心支撑。

3.2 行间级末端

随着数据中心、通信机房等场所的快速发展，其 IT 设备密度不断提高，对制冷系统的要求也日益严苛。行间级空调作为一种贴近热源、高效节能的制冷设备，在保障设备稳定运行方面发挥着重要作用。深入研究行间级空调的不同形式，对于优化制冷系统设计、提高能源利用效率具有重要的现实意义。

本研究旨在全面介绍行间级空调的不同形式，分析各种形式的工作原理、性能特点、适用场景等，为相关工程设计、设备选型以及技术研发提供参考依据。

3.2.1 小风墙形式末端空调

3.2.1.1 工作原理

数据中心小风墙是一种就近制冷方式，是针对局部热点和机柜精准送风的空调解决方案，核心目标是减少送风距离，提高冷却效率。小风墙空调是给单个或多个机柜配备的专属冷气扇。其特点为体积小，通常直接安装在目标机柜的正面或背面。小风墙近距离、精准地将冷风送进机柜的进风口或在机柜背部吸收热风。

小风墙形式末端空调的核心结构设计围绕高效气流组织与紧凑空间适配展开，其结构细节（如图 3.2-1 所示）如下。

（1）近距离、高换热、小风扇：由多组平行导流风扇与换热盘管构成模块化结构，贴近机柜布置，风机耗能低，能够保证空气与换热盘管充分换热。

（2）多风扇配置、精确控制：常规有多台小风扇，矩阵式布局。风扇具备无级调速功能，可独立控制或对接机房监控系统。能够根据室内热负荷变化实时调整转速，避免传统定频风扇因启停频繁导致的能耗浪费与温度波动。

（3）紧凑化结构、安装灵活：整体小风墙空调体积小，可直接装在机柜旁，不占通道空间，对机房整体布局改动小，且能够快速部署。



图 3.2-1 小风墙空调参考图

3.2.1.2 工作流程

小风墙形式末端空调的制冷过程遵循强制对流换热原理，具体工作流程可分为以下三个步骤，且各环节形成高效的闭环系统（如图 3.2-2 所示）。

（1）空气吸入：设备启动后，多台风扇同步运转，在进风侧形成负压，将机房的热空气吸入设备。由于风扇采用矩阵式布局，且配备导流格栅，热空气经导流后均匀进入设备内部。

（2）热交换：热气流垂直到换热盘管，减小气流阻力，提升气流与盘管的接触换热效率。热空气与换热盘管进行换热，盘管内制冷剂通过蒸发相变吸热，将热空气降

温，转化为 18~25℃ 的冷空气。

(3) 冷空气输送：冷空气在矩阵风扇推动下，以水平送风朝机柜送出，吸收设备热量后升温，再被吸入小风墙设备重复循环，实现就近循环制冷。

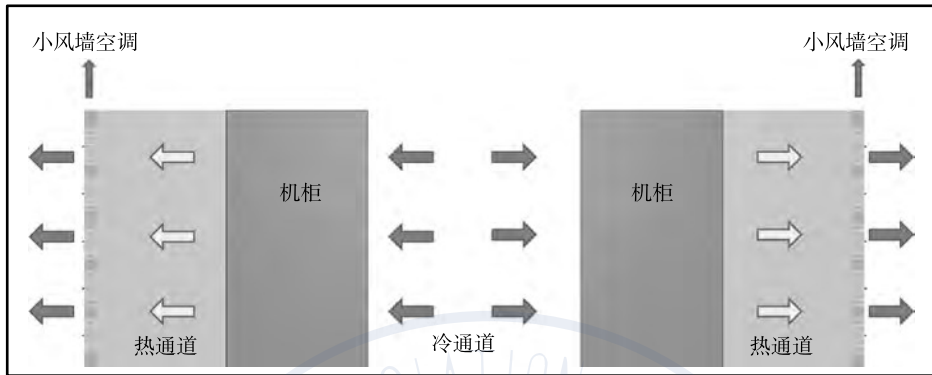


图 3.2-2 小风墙气流原理

3.2.1.3 性能优势

相较于传统的房间级空调，小风墙形式末端空调在气流组织、制冷效率、负荷响应等方面具备显著优势，具体如下。

(1) 气流组织更合理：通过导流板与多风扇协同实现“层流送风”，出风均匀度超 90%，避免了传统空调送风不均匀导致的机房局部热点问题；冷空气可直送机柜，形成“机柜-空调”的近距离循环，冷量利用率比传统空调高 25%~30%，大幅降低了冷量损失（如图 3.2-3 所示）。

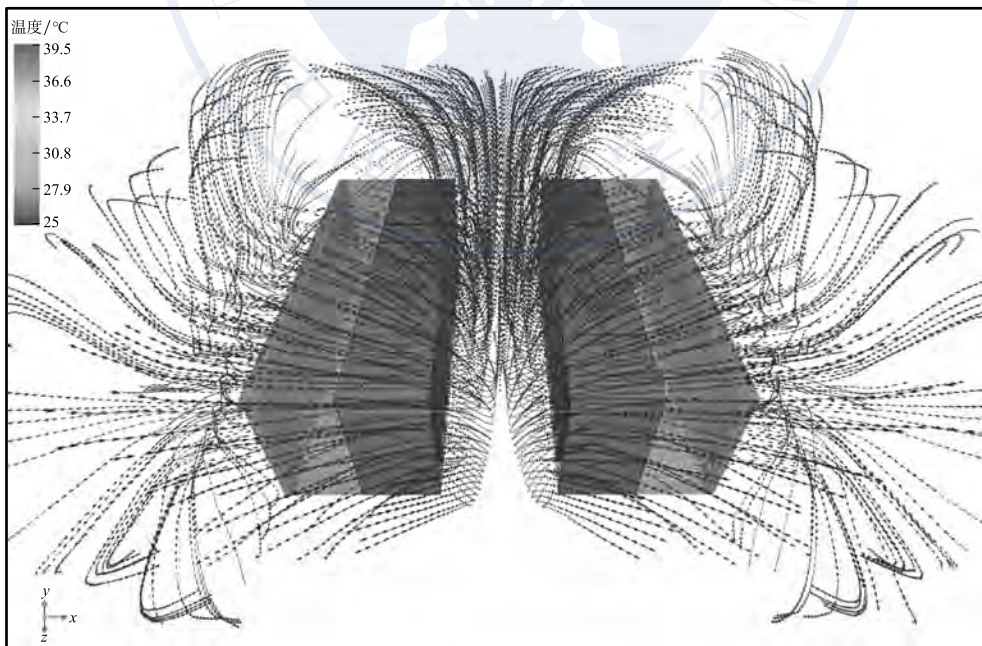


图 3.2-3 小风墙空调进出口流线

(2) 制冷效率更高：设备的能效比（EER）达 3.2~3.8，较传统房间级空调（EER 为 2.5~3.0）提升 20%~30%。优势主要源于三方面：一是高效的换热盘管设计，提升了换热效率；二是风扇的无级调速功能，可根据负荷变化动态调整能耗；三是紧凑的结构设计，减少了气流输送过程中的冷量损失。

(3) 负荷响应更快：设备采用“就近制冷”模式，送风距离更短；风扇具备快速调速能力，当局部热负荷变化时，设备可在 3~5s 内调整风扇转速与制冷剂流量，快速提升制冷量，确保局部温度稳定。

(4) 运行更可靠：多风扇冗余设计，单风扇故障时，其余风扇可自动提速弥补风量损失，能够保证制冷量正常输出，避免了传统单风扇空调风扇故障即停机的问题。并配备多重保护功能，实时监测运行，异常自动报警，大幅提升了设备的运行可靠性。

3.2.1.4 适用场景

小风墙形式末端空调的适用场景需结合其“紧凑化、局部制冷、高效响应”的核心特点，具体可分为以下几类，各场景均需满足特定的使用条件。

(1) 高密度算力集群：小风墙适用于高密度算力集群，单机柜功率不小于 25kW，传统空调难以满足散热需求。小风墙可安装在机柜列间，将冷风精准送入机柜进风口，能有效解决局部热点问题，实现冷量按需分配，提高制冷效率。

(2) 模块化数据机房：机房采用模块化设计，空间紧凑且对制冷效率要求高。小风墙结构紧凑，单个模块宽度通常为 300~600mm，可灵活嵌入机柜列间，不占用过多空间，还能根据每个模块的负载情况独立控制制冷量，与模块化数据机房的设计理念相契合。

(3) 老旧机房改造升级：老旧机房可能存在空间有限、制冷系统老化等问题。小风墙安装灵活，无需对机房布局进行大规模改造，可直接安装在机柜之间，针对局部热点区域进行制冷优化，能在不改变原有机房整体架构的前提下，有效提升制冷效果，解决散热难题。

(4) 边缘计算机房：边缘计算机房通常规模较小、空间紧凑，且对设备的部署灵活性和制冷效率有较高要求。小风墙体积小、安装便捷，可根据边缘计算设备的发热情况进行灵活配置，实现高效的局部制冷，满足边缘计算机房的需求。

3.2.2 氟泵行间级末端空调

3.2.2.1 工作原理

氟泵行间级末端空调以“氟泵循环”为核心动力，结合制冷剂相变实现热量转移，系统包含氟泵、压缩机、蒸发器、冷凝器、电子膨胀阀及控制系统。其核心运行逻辑和房间级氟泵空调系统相同，仅空调末端存在区别。行间级空调靠近机柜制冷，送风距离更短，空调送风到机柜进口的温升更小，其送风温度可适当提高，能够更长时间利用氟泵系统制冷，大幅降低机房的制冷能耗。

3.2.2.2 工作流程

氟泵行间级末端空调根据环境温度与机房热负荷的变化，可灵活切换三种工作模式，确保在不同场景下实现节能与制冷效果的平衡（如表 3.2-1 所示）。行间级空调的

氟泵系统相比于房间级空调，能够拥有更好的节能效果。

表 3.2-1 不同制冷模式对比

制冷模式	触发条件 (室外气温)	核心工作部件	运行逻辑	主要优势
氟泵制冷模式	$T < 10^{\circ}\text{C}$	氟泵	无需压缩机运行，仅通过氟泵驱动制冷剂循环	利用自然冷源，大幅节能
混合制冷模式	$T = 10 \sim 25^{\circ}\text{C}$	氟泵(主) + 压缩机(辅)	氟泵与压缩机协同工作，氟泵提供基础循环动力，压缩机根据实时制冷需求进行补冷	高效过渡，协同节能
压缩机制冷模式	$T > 25^{\circ}\text{C}$	压缩机	氟泵停止，制冷系统完全依靠压缩机驱动制冷循环	保障高温、高负载场景高效冷却

行间级空调+氟泵系统可通过调整氟泵转速，动态匹配机房热负荷需求，避免“过度制冷”导致的能耗浪费。且该模式完全依靠氟泵驱动，能大幅度延长自然冷源的利用时长。

3.2.2.3 性能优势

氟泵行间级末端空调凭借多模式切换与氟泵技术的结合，在节能性、适应性、稳定性等方面具备突出优势，且各优势均经过长期实际运行验证，具体表现如下。

(1) 节能效果显著：通过三种工作模式的灵活切换，设备可最大限度地利用自然冷源，减少压缩机的运行时间，从而降低整体能耗。

(2) 场景适应性强：无论是高温炎热的夏季，还是低温寒冷的冬季，设备均可通过模式切换实现稳定制冷。同时，设备的额定工作温度范围宽（ $-15 \sim 45^{\circ}\text{C}$ ），可适应不同地区的气候条件，无需额外配备辅助加热或冷却设备，大幅提升了设备的通用性。

(3) 制冷稳定性高：设备配备动态控制系统，可实时监测环境温度、机房热负荷等，并根据参数变化动态调整工作模式与运行状态。同时，当出现氟泵故障、压缩机过载、制冷剂泄漏等异常情况时，可自动报警并切换至备用运行模式，确保制冷系统的稳定。

3.2.2.4 适用场景

氟泵行间级末端空调的适用场景需结合其多模式切换、节能性强、宽温适应的特点，适用以下场景。

(1) 温度变化范围大的机房：适用于我国北方及高海拔地区，这些地区夏热冬冷，全年温度变化剧烈。在这类机房中，氟泵空调可通过模式切换，夏季以压缩机模式应对高温高负荷，冬季以氟泵模式利用自然冷源，春秋季节以混合模式实现节能运行。

(2) 有自然冷源可利用的地区：部分南方地区（如四川、云南等），虽然夏季炎热，但冬季气温较低（ $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ），且春秋季节时间较长，同样具备丰富的自然冷源。在这类地区的机房中，氟泵空调可在冬季与春秋季节长时间运行氟泵模式或混合模式，大幅降低能耗。

(3) 对运行成本敏感的机房：适用于中小型企业机房、边缘数据中心等对运行成本控制要求较高的场景。这类机房通常预算有限，且制冷系统为长期运行的主要耗能设备，降低制冷能耗可显著减少整体运营成本。

3.2.3 水氟冷源行间级末端空调

3.2.3.1 工作原理

水氟冷源行间级末端空调由自然水制冷循环和蒸气压缩制冷循环两部分组成（如图 3.2-4 所示）：自然水制冷循环以水与空气温差换热的方式，通过低温水将高温空气冷却，将室内的热量排放到室外；蒸气压缩制冷循环以制冷剂相变的方式，通过制冷剂的蒸发汽化与冷凝液化循环过程，把室内的热量排放到室外。

当冷源供水温度高于机组进风温度时，机组通过压缩机系统进行制冷运行，压缩机系统制冷剂在蒸发器中蒸发相变带走室内回风热量，冷源供水经过板式换热器带走压缩机制冷剂中的热量。当冷源供水温度低于室内机组进风温度、高于自然冷切换温度时，冷源供水先经过表冷器与室内回风进行热量交换，再经过板式换热器与压缩机制冷剂进行热量交换，在表冷器中，由于冷源供水温度低于机组进风温度，对进入机组的高温空气进行预冷，此时表冷器无法提供足够的冷量，压缩机系统开启为机组补充冷量，两种制冷系统同时运行。当冷源供水温度低于等于自然冷切换温度时，机组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，冷源供水经过表冷器与机组进风进行热量交换，实现制冷，达到机组最高能效。该空调系统将自然水制冷循环和蒸气压缩制冷循环有机结合，可以根据冷源供液温度、机组送回风温度、IT 设备负载率等情况，进行智能切换，灵活适配智算中心各类应用场景。

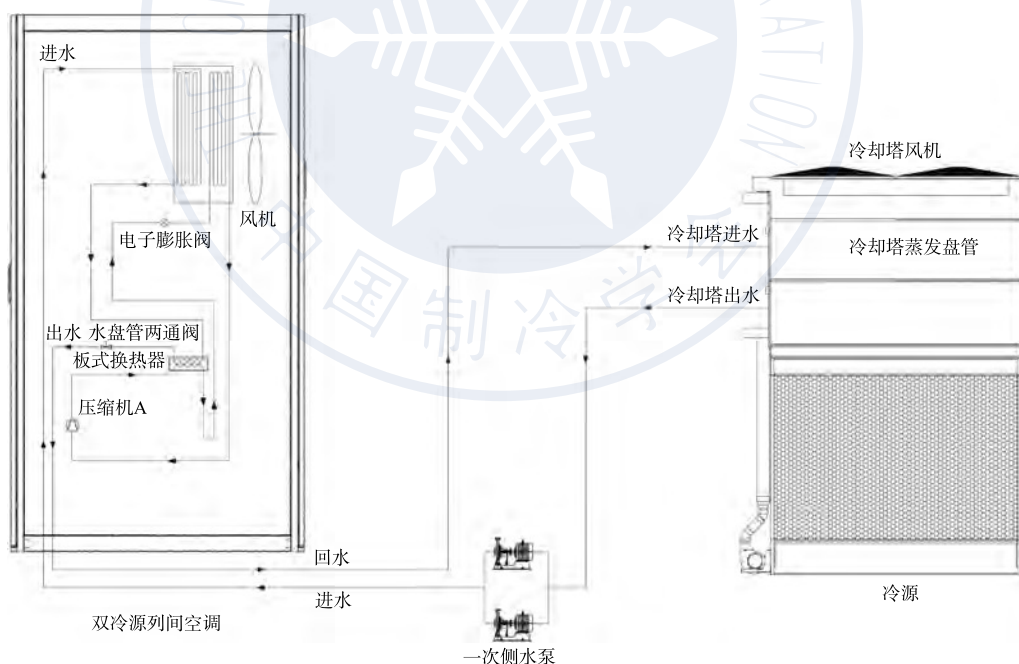


图 3.2-4 水氟双冷源行间空调系统示意图

3.2.3.2 工作流程

水氟冷源行间级末端空调的工作流程形成“室内取热-中间换热-室外散热”的闭环

系统，各环节衔接紧密，热量传递效率高，主要分以下步骤进行。

(1) 室内热量吸收阶段（末端氟冷系统）：机房内机柜运行产生的热空气在末端风机的负压作用下，被吸入末端氟冷空调内部。热空气流经蒸发器时，与蒸发器内的低温制冷剂进行强制对流换热，制冷剂吸收热量后由液态蒸发为气态，热空气温度快速降低。降温后的冷空气在风机推动下直接吹向机柜，吸收机柜持续产生的热量后进入下一轮循环，形成“机柜-末端空调”的局部气流循环。

(2) 热量传递至转换主机阶段（制冷剂循环）：末端氟冷系统中吸热汽化的气态制冷剂，通过制冷剂管路输送至水氟转换主机。气态制冷剂在管程内流动，通过换热管壁与壳程内的冷却水进行间接换热，释放热量后逐渐冷凝为液态，完成热量从制冷剂到冷却水的传递。

(3) 冷却水携带热量至室外阶段（室外水冷系统）：水氟转换主机壳程内的冷却水吸收制冷剂释放的热量后，在循环水泵的驱动下，通过冷却水管路输送至室外冷却塔。冷却塔将室外冷空气与高温冷却水充分换热，冷却水的热量被冷空气带走。降温后的冷却水经收集后，再次由循环水泵输送回水氟转换主机，形成冷却水循环。

(4) 室外热量排放阶段（冷却塔散热）：冷却塔内吸收了冷却水热量的空气，在风机作用下从冷却塔顶部排出，将热量释放到室外环境中。

3.2.3.3 性能优势

水氟冷源行间级末端空调融合了氟制冷与水散热的双重优势，在制冷效率、稳定性、适应性等方面表现突出，具体如下。

(1) 制冷效率高，能耗低：水氟冷源换热得益于氟侧就近制冷与水侧高效散热的协同，设备整体能效较传统风冷式行间级空调可提升 40%~50%。水侧散热不容易受到室外高温影响，即使在夏季 40℃ 的极端高温环境下，设备制冷量仍能保持额定值的 95% 以上，与传统风冷空调相比在同等环境下有较大优势。

(2) 性能稳定，温控精准：系统采用“末端氟冷+水氟转换”的二级换热设计，可有效缓冲室外环境温度波动对末端制冷的影响。通过 PLC 控制系统实时调节制冷剂与冷却水流量，机房温度控制精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，能为机柜提供稳定的温湿度环境，减少因温度波动导致的设备故障。

(3) 适应高负荷场景，扩容性强：设备单台制冷量覆盖范围广，可通过多台并联方式满足大型机房的高负荷需求。末端设备采用模块化设计，可根据机柜布局灵活摆放，适配不同密度的机柜。各设备独立运行，互不干扰，便于后期根据热负荷增长逐步扩容。

3.2.3.4 适用场景

水氟冷源行间级末端空调能够实现冷源高效转化，兼顾了水系统的大冷量输送优势与氟系统的精准换热能力，适用场景聚焦于“高负荷、高稳定性需求”。除常规中高密度数据中心，更适合在大型数据中心、核心机房等场景中充分发挥其优势，具体适用场景如下：

(1) 大型数据中心：大型数据中心服务器数量众多、热量散发集中，水氟冷源行间级末端空调可安装在机柜列间，就近制冷，冷量损失少，能有效应对高负荷散热需求。水氟冷源转化主机通过“水系统大温差输送”降低输送能耗，行间级末端空调就近换热

减少冷量损耗，两者结合可有效降低数据中心 PUE 值。

(2) 金融行业核心机房：金融行业交易频繁，数据处理量大，要求数据中心不间断长期运行。水氟冷源行间级空调具有高稳定性，可保障金融业务持续开展，同时能适应高负荷散热需求，维持机房稳定的温度和湿度环境，确保数据安全和业务连续。

3.2.4 行间级空调优化设计

行间级空调冷却系统，也叫列间级空调冷却系统，空调末端布置在服务器机柜附近。配置行间空调的机房，一般需要封闭冷（热）通道，形成冷通道和热通道。行间冷却气流组织目前常规有两种形式：一种是将列间空调穿插在服务器之间，封闭冷/热通道进行冷却；另一种是小风墙空调直接布置在机柜后门位置，将冷气流就近送入机柜冷却。

行间机房空调为水平送风机组，主要适用于中高热密度数据中心。行间空调贴近热源，可以高效率冷却服务器设备，不产生局部过热问题，可以实现更大的循环风量，且由于空气路径短、系统阻力小，需要的风机动力相对较小。行间级空调冷却系统同时采用封闭冷、热通道的方式，隔离机柜进排风、热风，避免冷热空气混合，有效地控制因冷风气流和热风气流短路而导致的冷却效果降低。

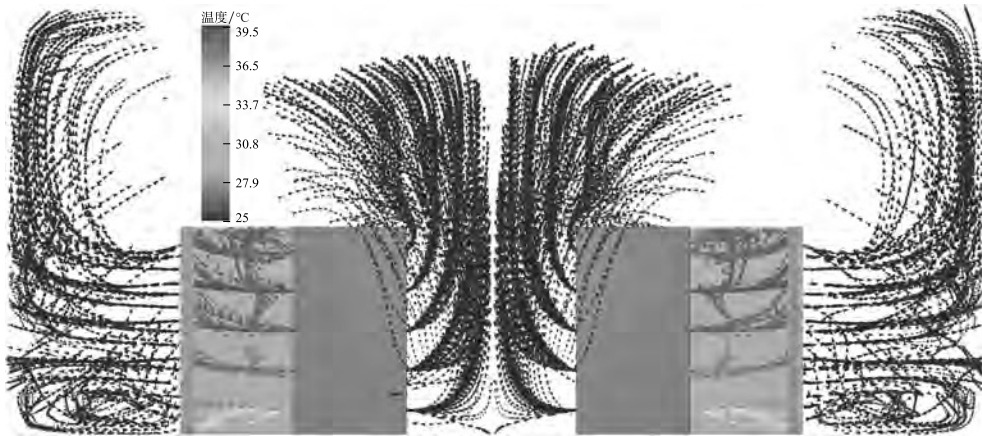
3.2.4.1 行间级空调气流路径优化

数据中心小风墙是一种就近制冷方式，是针对局部热点和机柜精准送风的空调解决方案，核心目标是减少送风距离，提高冷却效率。小风墙空调是给单个或多个机柜配备的专属冷气扇，体积小，通常直接安装在目标机柜的正面或背面。对于小风墙行间级空调，其气流特点是对机柜排出的热风进行冷却，然后再送到机柜进风口处。小风墙行间级空调结合封闭冷/热通道，能够把冷热气流分开，有效减少冷热气流的直接掺混。因此对于小风墙空调的气流组织形式又分为封闭冷通道和封闭热通道的形式。

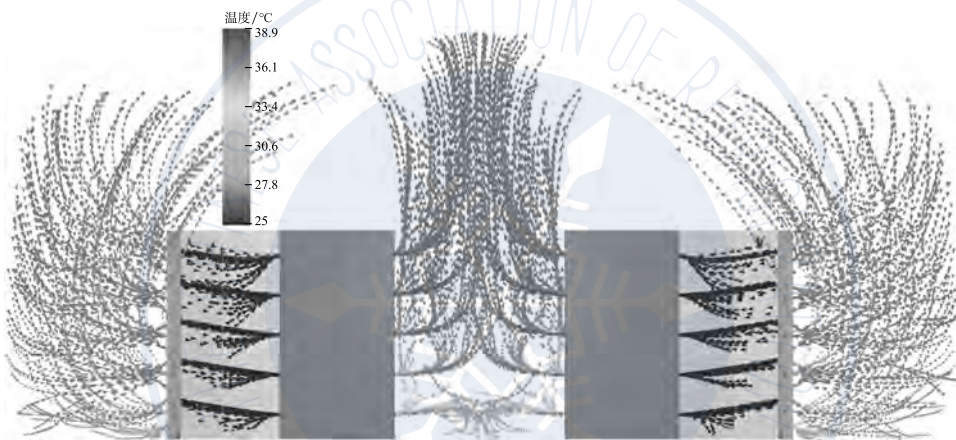
两种气流组织形式如图 3.2-5 所示。小风墙空调封闭热通道时，机柜排出的热气流被限制在热通道内，经小风墙空调冷却后送出冷风，机房整体处于冷环境中，机柜从冷区域吸入冷风，完成气流循环。小风墙空调封闭冷通道时，冷气流被限制在冷通道内，机房整体环境处于热环境中；机柜排出热风直接送到热环境中，小风墙空调从环境中吸收热风进行冷却，把冷风水平送到机柜进风口，对机柜进行冷却完成气流循环。对于不同小风墙布局的机房需结合 CFD 仿真进行设计，找到最适合小风墙冷却的气流组织形式。

3.2.4.2 行间级空调关闭位置优化

对于布局在机柜之间的行间级空调末端，常采用 $N+1$ 冷备形式的行间级空调模块。由于行间级空调的影响区域较小，不同的空调关停方案对冷通道内的气流组织影响较大，可以利用 CFD 仿真模拟软件，对空调的关停方案进行验证与寻优，使同一模块内的行间级空调制冷功率分配更均匀，同时防止局部热点区域的产生。不同关闭方案如图 3.2-6 所示，不同关闭位置的机柜进口温度存在明显变化，根据结果可以提前制定轮流关闭方案，避免因关闭空调导致部分机柜进口温度升高。此外还能够优化行间级空调在机柜列的位置，寻求行间级空调布置的最优方案。

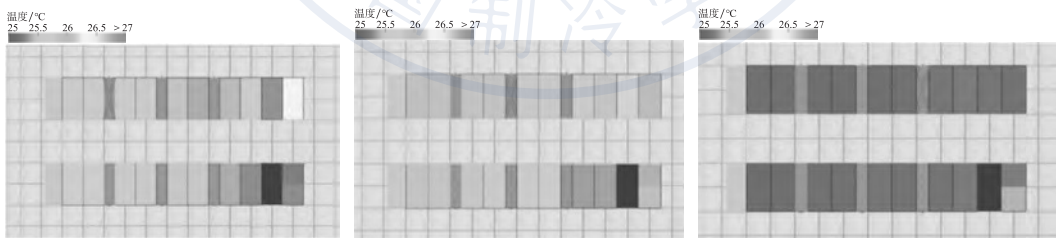


(a) 小风墙空调封闭热通道布局



(b) 小风墙空调封闭冷通道布局

图 3.2-5 小风墙空调布局方案对比



(a) 关闭左侧空调

(b) 关闭中间空调

(c) 关闭右侧空调

图 3.2-6 不同关停方案机柜温度对比

3.2.4.3 行间级空调温度控制优化

在数据中心的散热体系中，行间级空调作为贴近 IT 设备的“贴身管家”，其温度控制精度直接影响服务器运行稳定性与能源效率。传统房间级空调常面临局部热点、负荷分布不均、响应滞后等问题；而行间级空调靠近机柜，送风更加均匀，响应更加迅速，

同时通过多维度的优化设计，可实现温度的精准调控，为高密度算力设备构建恒温运行环境。

房间级空调距离机柜较远，为了保持机柜较好冷却，通常需要保持较高的空调风量输出。而行间级空调靠近机柜，其送风更加均匀，从空调到机柜进风口处的温度变化较小，因此在机房运行过程中能够适当降低空调风量，依然能够保持较好的冷却效果（如图 3.2-7 所示）。

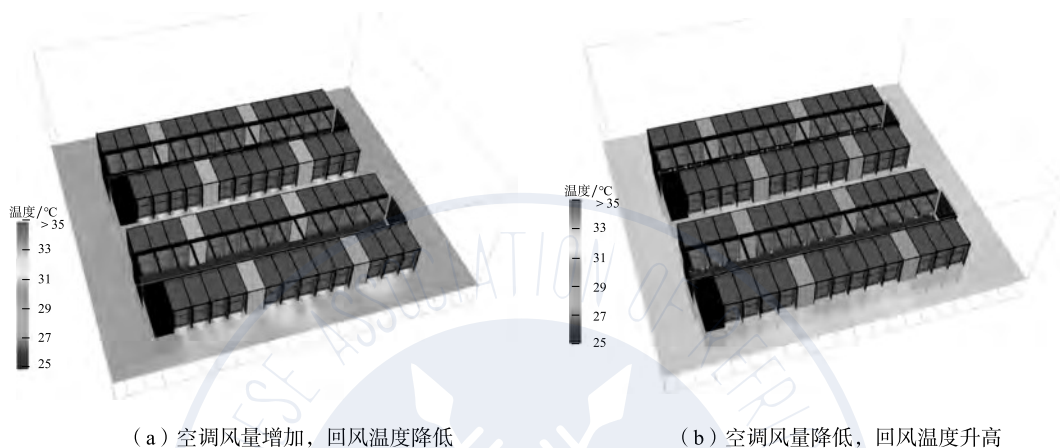


图 3.2-7 行间级空调不同风量下机房温度场对比

随着科技的不断进步和节能环保要求的日益提高，行间级空调将朝着更加高效、智能、节能的方向发展。未来可能会出现更多新型的行间级空调形式和优化技术，如结合可再生能源的行间级空调系统、基于人工智能的智能调控系统等，进一步提高行间级空调的性能和适应性。

3.3 机柜级末端

在完成了房间级与行间级末端系统的探讨后，我们进一步将视角聚焦于更精细的散热单元——机柜级冷却系统。机柜级末端制冷以其贴近热源、高效精准的温控能力，成为高密度数据中心的优选方案。下文将系统阐述热管背板、水冷背板以及机柜级空调系统的结构原理与设计调优策略。

3.3.1 机柜级末端结构原理

3.3.1.1 热管背板空调

(1) 结构构成

热管背板空调系统主要由以下几个部分构成（如图 3.3-1 所示）。

- ① 热管蒸发段：安装在机柜后部，直接吸收服务器排出的热风中的热量。
- ② 热管冷凝段：通常与机房冷水系统连接，通过冷却水将热量带走。
- ③ 重力驱动工质回路：内部充注环保型氟利昂等工质，依靠重力及相变实现循环。
- ④ 风机模块：用于驱动空气流经蒸发段翅片，增强换热。

- ⑤ 机柜集成结构：与 IT 机柜一体化设计，形成封闭或半封闭式热通道。

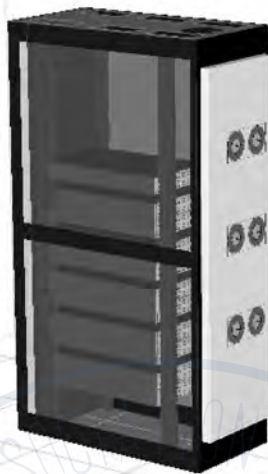


图 3.3-1 热管背板空调

(2) 冷却原理

热管背板空调的冷却过程是一个基于相变传热的连续闭环循环，其工作原理可分为六个有序步骤。

① 热风吸入与热量吸收：服务器排出的热空气被风机强制吸入背板蒸发段，热量通过翅片式换热器传递给蒸发段内的液态工质。

② 工质蒸发与相变：液态工质吸收热量后发生相变，蒸发为低温低压的气态工质。

③ 蒸汽流动与热量转移：气态工质在微小的压差驱动下，自发且迅速地流向处于较高位置的冷凝段。

④ 蒸汽冷凝与热量释放：在冷凝段中，气态工质与盘管内的冷水进行换热，释放出汽化潜热，重新冷凝成液态。热量最终被冷水带走。

⑤ 工质回流：液态工质在重力作用下，沿管壁自然回流至蒸发段，为下一次吸热蒸发做好准备。

⑥ 冷风利用：经过冷却后的空气温度降低，可被重新送入服务器进风侧，完成一个高效的密闭气流循环。

该系统实现了近乎零距离的精准冷却，彻底杜绝了冷热气流的混合，显著提升了换热效率和机房温度均匀性。

3.3.1.2 水冷背板空调

(1) 结构构成

水冷背板空调系统主要组成（如图 3.3-2 所示）如下。

- ① 微通道换热板：安装在机柜后门或侧部，采用铝合金或铜材质实现高效导热。
- ② 冷水分配单元（CDU）：分配和调节冷却水流量与温度。
- ③ 循环水泵：提供动力驱动冷却水循环。
- ④ 控制系统：包括温度传感器、流量调节阀和 PLC/DDC 控制器。

- ⑤ 快速接头与管路：构成密闭水循环系统，支持即插即用和维护操作。
- ⑥ 机柜适配结构：与标准机柜兼容，确保密封性和结构稳定性。

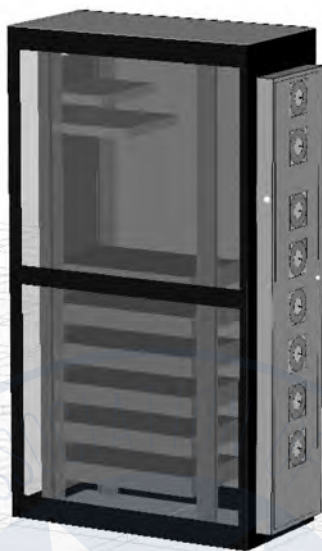


图 3.3-2 水冷背板空调

(2) 冷却原理

水冷背板采用液-气显热交换原理，其冷却过程是一个由水循环和空气循环耦合的有序过程。

① 空气侧循环，热量捕获：服务器排出的热风，在风机驱动下强制流过水冷背板内部的微通道换热器。

② 热量传递，液气换热：空气流动过程中，其携带的显热通过换热器的金属壁面传递给在微通道内流动的冷却水。

③ 水侧循环，热量输送：吸收热量后温度升高的冷却水，被循环水泵驱动，流经封闭管路输送至房间级冷却设备（如干冷器）或建筑冷却系统。

④ 热量释放：高温冷却水在外部冷却设备中将热量释放到最终热汇（通常是室外空气或冷却塔）。

⑤ 冷水回流与循环：降温后的冷却水再次回流至机柜背板，重新开始吸热，形成一个完整的闭式水循环。

⑥ 冷风排出：被冷却后的空气从背板排出，完成对机柜的散热。

该系统通过水的高比热容特性进行高效热量搬运，特别适用于高密度场景（ $\geq 10\text{kW}/\text{机柜}$ ），并大幅降低了传统风冷系统的风机能耗。

3.3.1.3 机柜级空调

(1) 结构构成

机柜级空调系统通常包含如下组件（如图 3.3-3 所示）。

- ① 一体化制冷单元：内置压缩机、蒸发器、冷凝器、膨胀阀等完整制冷部件。
- ② 风机系统：多为 EC 风机，支持多级调速或智能按需调节。

- ③ 控制系统：集成温度、湿度传感器及智能控制模块。
- ④ 换热盘管：用于空气-制冷剂或空气-水换热。
- ⑤ 柜内送风/回风风道：确保气流组织定向且均匀通过服务器。
- ⑥ 可选混合冷却接口：支持接入楼宇冷源或辅助冷却装置。



图 3.3-3 机柜级空调

(2) 冷却原理

机柜级空调是一个独立的紧凑型蒸气压缩制冷系统，其冷却过程遵循清晰的制冷循环逻辑。

① 回风与吸热（蒸发过程）：机柜内的热回风被风机吸入，流经蒸发器盘管。盘管内低温低压的液态制冷剂吸收空气的显热后蒸发，变为低温低压蒸气，同时空气被冷却。

② 制冷剂压缩：低温低压的制冷剂蒸气被压缩机吸入，压缩成高温高压的蒸气。

③ 热量释放（冷凝过程）：高温高压的制冷剂蒸气进入冷凝器（风冷或水冷），将热量释放给机房环境或冷却水，冷凝成高压常温的液体。

④ 节流膨胀：高压液态制冷剂流经膨胀阀，节流降压后变为低温低压的气液两相混合物，重新进入蒸发器。

⑤ 送风：被蒸发器冷却后的冷风，由风机送入服务器进风区域，为 IT 设备提供冷却。

⑥ 循环与调节：上述过程连续循环，控制系统根据柜内实时温度动态调节压缩机转速、风机风量或电子膨胀阀开度，实现精确按需制冷。

该系统具备部署灵活、响应快速的特点，形成一个完全独立于机房环境的微循环制冷系统，尤其适用于局部高密度或老旧机房改造场景。

3.3.2 热管背板空调设计与调优

热管背板空调作为数据中心高效冷却解决方案的代表，近年来在高密度机房中得到

广泛应用。其核心工作原理是利用相变传热机制和重力驱动循环实现热量的高效转移。热管背板安装在机柜背部，内部充填环保型氟利昂工质，通过工质的蒸发-冷凝循环，将服务器排出的热量直接传递给冷水系统。这种近端制冷方式彻底改变了传统房间级制冷的气流组织模式，从源头上解决了高热密度机柜的散热难题^[7]。

3.3.2.1 温度场与气流组织分析

在理解其基本工作原理的基础上，进一步通过 CFD 数值模拟深入分析热管背板系统的温度与气流特性。以上海地区某实际数据机房为例，研究人员建立了精细的三维模型，将热管背板空调与传统的冷水型列间空调进行了对比分析。模拟结果显示，在相同的 23℃ 出风温度条件下，热管背板空调展现出卓越的温度均匀性：机房内 1.5m 高度截面的温度分布稳定在 23℃ 左右，整个机房环境温度基本一致，无明显热点区域。相比之下，采用列间空调的机房呈现出明显的温度梯度——冷通道内温度维持在 23℃，而机房环境温度高达 32~38℃，机柜背面上部甚至达到 38℃ 的高温^[7]。

热管背板系统通过创新结构设计，构建了高度有序的封闭气流微循环路径：机房冷通道的冷风从机柜前门自然进入，流经服务器发热部件完成散热后转化为热风；热风无需扩散至机房环境，直接被机柜背部集成的热管背板蒸发器捕获，经高效换热快速冷却后，重新转化为冷风参与循环，实现“冷风进-换热-热风捕集-冷风回流”的闭环气流路径，全程无热空气外泄。

该设计具备两大核心优势：一是热风与热管背板蒸发器实现零距离接触，换热响应速度快，避免热风在机柜内部滞留；二是完全阻断热空气向机房环境的扩散，从源头消除热空气与冷风掺混的可能，确保机房整体气流稳定。

3.3.2.2 末端风机能耗的优化策略

在完成温度场与气流组织分析后，能耗表现成为评估系统性能的另一关键维度。热管背板空调在节能方面的优势在 CFD 模拟中得到量化验证。由于其紧贴热源的安装方式，送风距离极短，显著降低了空气输送阻力。模拟数据显示，单台热管背板空调的风扇功率仅需 160W，而同等制冷量下单台列间空调的风机功率高达 1.6kW。在一个配置 90 台机柜的实际机房中，热管背板系统的总风机功耗仅为 14.4kW，而相同制冷需求的列间空调系统（21 台运行）风机总功耗达 33.6kW。经计算，采用热管背板每年可节约电量 168.192kW·h，节能效果十分可观^[7]。

通过 CFD 模拟能够精准预测热管背板系统对冷源侧能效的优化作用。得益于热管背板的技术特性，一方面可保障机房环境温度均匀稳定，另一方面能彻底解决热空气渗漏问题，其背板出风温度可在规范允许范围内，从传统的 18℃ 安全提升至 27℃ 上限值。

这一出风温度的提升，会直接推动冷水供回水温度同步上调（例如从常规的 12℃ 供水、18℃ 回水，调整为 18℃ 供水、23℃ 回水）。根据冷源系统运行规律，冷水供回水温度每升高 1℃，冷水机组的运行效率可提升 3%~5%；同时，更高的水温还能延长自然冷却模式的启用时间，减少机械制冷的依赖，最终实现冷源侧的显著节能。

3.3.2.3 系统设计与故障应对的优化方向

在追求高效节能的同时，系统的可靠性与故障应对能力同样至关重要，尤其对于热管背板这类精密制冷设备。热管背板系统的工质充填率对其性能有决定性影响。实验研

究表明，充液率优化在 65%~75% 范围内时，系统可获得最大制冷量。CFD 模拟结合实验验证表明：充液率不足会导致蒸发段干涸，换热能力急剧下降；而充液率过高则会引起冷凝段积液，增大回流阻力。在最佳充液率条件下，系统换热量随蒸发段进风量增加而迅速增大，但风量超过合理值后，空气侧压降呈二次幂增长，风机能耗急剧上升^[8]。

针对风机故障这一高风险场景，CFD 模拟提供了有价值的应对策略。当热管背板中下部风机故障时，对机柜内温度分布影响相对较小；而顶部风机故障会导致热空气聚集，形成局部热点。模拟显示，通过智能风量调节策略——将故障风机周围正常风机的风量提升 45%，可使服务器最高温度降低约 10%，有效避免设备过热^[8]。此外，双盘管备份设计通过 CFD 验证表明，当某一盘管故障时，备用盘管可立即接管热负荷，对机房温度场和气流组织的影响微乎其微，实现了真正的在线维护能力^[7]。

3.3.3 水冷背板空调设计与调优

在全面了解热管背板技术后，转向另一种近端冷却技术——水冷背板空调，其在超高密度场景中展现出独特优势。水冷背板空调作为近端冷却技术的代表，通过将冷却装置直接集成于机柜背部，实现了对 IT 设备散热源的精准温控，显著提升了冷却效率并降低了能耗^[9]。CFD 数值模拟技术作为研究水冷背板空调系统气流组织、温度分布和传热特性的强大工具，能够有效指导系统设计与优化，降低实验成本，缩短开发周期。

水冷背板空调系统是一种机柜级冷却解决方案，其主要由微通道换热板、循环水泵、控制系统和冷水分配单元组成。系统直接安装在机柜背面，通过高导热金属板吸收服务器排出的热量，热量经内部水道中的冷水带出机房。这种设计实现了热量短路径转移，大幅减少了空气输送能耗，特别适用于单机柜功率超过 10kW 的高密度场景^[9]。

3.3.3.1 运行参数优化

在确立系统设计基础后，运行参数的优化成为提升系统性能的关键环节。基于 CFD 模拟的运行参数优化可以有效提升水冷背板空调系统的整体性能。

冷却水温度优化：提高冷却水温度可显著延长自然冷却时间，但会降低系统换热量。CFD 模拟显示，进水温度从 15℃ 升至 25℃ 时，系统换热量降低约 19%，但全年自然冷却时间可增加 30% 以上^[9]。对于采用高温服务器的数据中心，可将进水温度设定在 20~25℃ 范围内，以实现能效最大化^[10]。

冷却水流量优化：增加水流量可提高换热系数，但泵功也会增加。CFD 模拟表明，水流速在 1.2~1.8m/s 范围内时，可实现传热效率与泵功消耗的最佳平衡^[9]。超过此范围，继续增加流量的收益递减。

风量优化：风量对空气侧换热和风机能耗有直接影响。研究表明，风机的额定风量达到 2000m³/h 后，增大风量对冷却效果的提升明显减弱。在 2000~2400m³/h 范围内，平均温度和最高温度的变化量均在 0.5℃ 左右，表明存在一个经济风量区间^[8]。

3.3.3.2 系统布局与集成策略

完成运行参数优化后，系统级的布局与集成策略对于实现整体高性能至关重要。水冷背板系统的布局和集成方式对机房整体热环境有重要影响。

多排机柜布置优化：当机柜采用面对面顺序排列时，沿气流方向会出现渐进式温升现象。CFD模拟显示，第一排机柜进风温度为25℃，第二排升至26℃，第三排则达到27℃^[10]。这种温升源于前排机柜排风与机房空气混合不充分即被后排机柜吸入。通过优化机柜布局和增加导流装置，可减轻这种温升效应。

混合冷却策略：对于功率密度超过15kW/机柜的应用，纯水冷背板可能仍会导致机柜上部温度偏高。CFD模拟验证了水冷背板+辅助制冷的混合方案的有效性：在机柜顶部增加一套补风系统，当温度超过设定阈值时启动，可有效消除局部热点。这种混合设计使单机柜功率容量提升60%^[9]。

与房间级空调的协同工作：水冷背板与房间级空调协同工作时，需要优化控制策略以避免能量竞争。CFD模拟可用于制定温度设定点优化和运行模式切换策略，实现整体能效最大化^[10]。

3.3.3.3 故障场景模拟与容灾设计

在追求高性能的同时，系统的可靠性设计与故障应对能力不可或缺。通过CFD模拟故障场景，可以评估系统的可靠性和容灾能力。

水泵故障模拟：模拟水泵在完全或部分失效工况下的温度响应特性。CFD模拟显示，在水泵完全失效的情况下，系统可在5~8min内从正常工况升至危险温度^[9]。这为应急系统的响应时间设计提供了依据。

风机故障模拟：分析不同位置风机故障对机柜内热环境的影响。CFD模拟表明，顶部风机故障会导致热空气聚集，形成局部热点。通过智能风量调节策略——将故障风机周围正常风机的风量提升45%，可使服务器最高温度降低约10%^[8]。

管路阻塞模拟：模拟部分流道阻塞情况下的流动和传热特性，评估系统冗余设计需求^[11]。CFD模拟可识别易发生阻塞的关键部位，指导过滤系统和维护方案的设计。

3.3.4 机柜级空调优化设计与调优

在前两节分别探讨热管背板和水冷背板系统后，进一步深入机柜内部，研究更精细层次的空调末端设计与调优方法。机柜级空调优化设计是数据中心末端冷却的精细化进阶，它通过调整机柜内部环境参数和布局结构，实现冷却效率的进一步提升。CFD数值模拟在相关研究及工程应用领域中，呈现出难以被其他方法替代的独特优势与核心价值，能够精准捕捉机柜内部复杂的气流分布和温度场特性，为优化设计提供科学依据。

3.3.4.1 冷却设备布局优化

机柜级冷却效果首先取决于冷却设备的空间布局，合理的布置方式是实现高效散热的基础。冷却装置的空间排布方式对机柜内部温度均匀性有决定性影响。研究表明，将冷却装置置于两排服务器中间时冷却效果最优。在这种布局下，温度合格系数可达100%，标准差和均匀系数比冷却装置位于服务器下方的初始结构下降了66.67%^[12]。

CFD模拟结果清晰显示了不同布局下的温度分布差异：当冷却装置位于底部时，机柜上部的服务器进风温度明显偏高，出现垂直温度梯度；而当冷却装置位于中部时，上下部服务器的冷却效果更加均衡，最大温差可降低8℃以上^[13]。这是因为中部位置更接近热源，减少了气流输送距离，提高了冷却效率。

对于高功率密度机柜 ($\geq 10\text{kW}$)，纯背板冷却可能仍会导致机柜上部温度偏高。CFD 模拟验证了混合冷却方案的有效性：在机柜顶部增加一套补风系统，当温度超过设定阈值时启动，可有效消除局部热点。这种混合设计使单机柜功率容量提升 60%，同时维持水温 28°C 以上，为全年自然冷却创造条件^[14]。

3.3.4.2 风机运行参数优化

在确定最优布局后，风机运行参数的精细化调优成为进一步提升系统性能的关键。风机的风量和风压是影响冷却效果的关键运行参数。研究表明存在一个经济风量区间，超过此区间继续增加风量带来的收益有限但风机能耗会显著增加。

风机风压的优化同样重要。研究表明，当风机的额定风压为 250Pa 时，机柜的冷却效果最好，标准差和均匀系数最小，分别为 0.66°C 和 0.016 ^[12]。风压过低会导致气流无法充分穿透高密度服务器，风压过高则可能引起气流短路或产生过大噪声。

基于 CFD 模拟结果，可以开发自适应风量控制策略：根据服务器实时负载动态调节风机转速，在保证冷却效果的前提下最大化节能。实测数据显示，这种策略可比定风量运行节能 $25\% \sim 30\%$ ^[13]。

3.3.4.3 备份容灾方案的 CFD 分析

在优化正常运行性能的同时，必须充分考虑系统故障时的备份与容灾能力，确保数据中心连续稳定运行。机柜级冷却系统的故障恢复能力是确保数据中心连续运行的关键。研究提出了行级备份与房间级备份两种容灾方案，并通过 CFD 模拟对比了其性能。模拟结果显示，采用行级备份容灾方案的设备冷却效果显著优于房间级精密空调的容灾方案，能够保证设备工作在正常的温度范围内^[14]。

具体而言，行级备份方案能够保证故障空调附近机柜的进出风温度与周围机柜相同，但房间级备份方案会出现故障空调附近局部高温，存在热点^[14]。这种差异在高温天气下尤为明显，房间级备份时故障机柜进风温度可能超过 35°C ，而行级备份可将温度控制在 28°C 以内。

CFD 模拟还分析了不同因素对容灾效果的影响，包括单机柜功率、故障空调位置和备份空调位置等^[14]。结果表明，行级备份方案在高功率密度场景下 ($>10\text{kW}/\text{机柜}$) 优势更加明显，能够提供更可靠的冷却保障。

3.3.4.4 系统集成与性能评估

完成各子系统的优化设计后，最终需要通过系统集成与全面性能评估来实现整体效能最大化。将优化后的机柜级冷却系统与数据中心基础设施管理系统 (DCIM) 集成，可实现全局优化。CFD 模拟在此过程中发挥关键作用，通过构建数字孪生模型，评估不同控制策略下的整体性能。

某实际案例中，通过 CFD 指导的机柜级优化使空调系统全年冷负荷系数 (Cooling Load Factor, CLF) 降低 $15\% \sim 18\%$ ，PUE 改善 0.12 ^[13]。这证明了 CFD 优化在提升能效方面的显著效果。

性能评估不应仅限于热性能和能耗，还应考虑可靠性、维护性和总拥有成本 (TCO)。CFD 模拟可以帮助评估这些综合指标，例如通过分析不同组件的工作状态预测其寿命，或通过模拟维护操作评估系统的可维护性。

3.4 混合冷却（风冷+液冷）机房末端

随着数字经济发展不断驱动算力规模持续增长，作为算力载体的算力中心建设规模与运行强度持续提升。算力中心主要发热源是承担大数据量计算或复杂计算的算力型服务器的主芯片（CPU、GPU）和内存，且对于CPU、GPU和内存的性能要求高，功耗和发热量也相对较高，若仅依赖单一冷却方式，易出现散热瓶颈。机房在采用传统风冷冷却时由于机柜功率过高会产生局部热点，导致服务器降频或宕机，为维持低温环境，空调需持续高负荷运行，能耗增大。液冷虽换热效率更高，但针对低功率设备如网络交换机、存储设备等，又会因“冷量冗余”反而增加泵能耗，且全液冷方案成本过高，不利于存量数据中心的转型升级。

3.4.1 混合冷却机房工作原理

混合冷却机房采用“风冷+液冷”的形式，将液体模块冷板与高发热量部件（如CPU、GPU等）直接接触，以高效吸收热量，同时，服务器机箱内仍保留风冷系统，用于辅助冷却其他部件（如图3.4-1所示）。混合冷却融合风冷与液冷技术的优势特性，冷却效率较全风冷方案显著提升，有效降低能耗。此外，混合冷却对既有设施具有良好的兼容性，可依托现有风冷系统的布局，针对性部署液冷模块于高功率密度区域，避免全系统改造的高额投入，降低初期建设与运维成本。

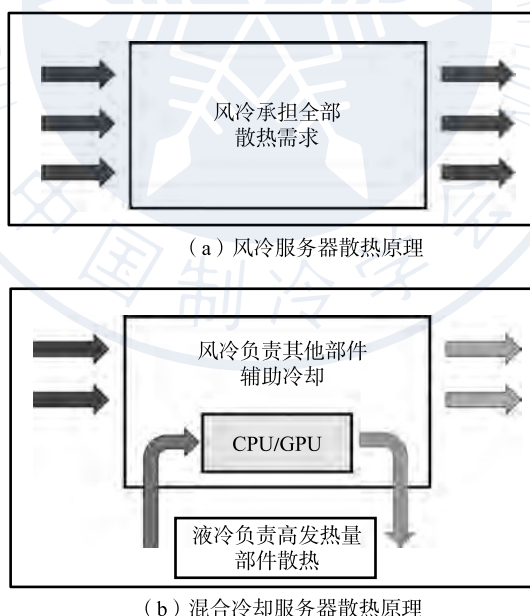


图 3.4-1 风冷机房与混合冷却机房服务器散热原理对比

在数据中心冷却技术体系中，混合冷却（风冷+液冷）机房与传统风冷机房并非对立的优劣选项，而是针对不同场景需求设计的差异化解决方案。二者的技术特性与功能优势，均围绕具体应用场景的核心诉求展开——混合冷却机房的双介质协同散热能力，

适配了高热密度、高稳定性需求的场景（如 AI 机房、超算中心），其能耗与效率优势需在特定负载条件下才能充分发挥；传统风冷机房的简洁布局与低成本维护特性，则更契合中低功率、散热需求宽松的场景（如中小企业机房、边缘节点），在这类场景中无需为冗余的冷却能力承担额外成本。

因此，评判两种机房方案的关键，不在于技术本身先进与否，而在于是否与场景的功率密度、运维成本、稳定性要求等核心要素相匹配。选择时需结合机房的设备配置、负载特性、长期规划等实际条件综合考量，让冷却技术精准适配场景需求，而非单纯以混合或传统作为选择标准，这才是数据中心冷却系统设计的核心逻辑。

3.4.2 混合冷却机房与传统风冷机房的主要差异

本节将围绕核心维度，解析混合冷却机房与传统风冷机房的区别，为后续优化提供前提支撑。

（1）冷却原理与散热路径差异

从散热介质来看，混合冷却机房采用双介质协同散热模式：液冷系统（以冷却液为介质）专门针对设备核心热源（如 CPU、GPU）进行散热，而风冷系统（以空气为介质）则负责机房环境温度调节及低功率设备的散热需求；传统风冷机房仅依赖空气这一种单一介质，需覆盖所有设备散热与机房环境控温的全部需求。

在热量传递路径上，混合冷却机房的核心热量传递流程为：设备发热部件产生的热量先传递至液冷系统（冷板或浸没液），再通过冷却液输送至 CDU（冷却液分配单元），经 CDU 处理后由液冷管路输送至室外冷源完成散热；同时，机房环境热量则通过空气对流进入空调系统，最终由空调排至室外。传统风冷机房的热量传递路径更为单一，所有设备产生的热量均先扩散至空气中，再由空气携带进入空调系统，经空调整冷后排至室外，全程仅通过“设备-空气-空调”这一单向路径完成散热。

从散热协同机制分析，混合冷却机房形成“主-辅”协同模式：液冷系统承担 70%~90% 的高热负荷，是核心散热手段，风冷系统则作为辅助，仅处理液冷未覆盖的余热量，两者配合可避免单一冷却方式的局限性；传统风冷机房无协同机制，全机房的散热需求仅依赖空调单一设备调节，当负载波动或设备功率升高时，易出现散热能力不足的问题。

（2）能耗表现差异

在核心能耗设备构成上，混合冷却机房的能耗设备更为多元，除传统的空调系统外，还包括 CDU 循环泵、冷却塔风机及液冷机柜配套的辅助设备（如泄漏检测装置、散热风扇），这些新增设备均会产生额外能耗；传统风冷机房的核心能耗设备以空调系统为主，包括空调压缩机、送风机，部分场景会搭配通风地板风机，整体能耗设备类型更简单。

从高负载工况的能耗表现来看，混合冷却机房的 PUE（能源使用效率）可控制在 1.2~1.5 之间：由于液冷系统替代了部分空调的高功率运行需求，相比传统风冷机房能耗降低 30%~50%，尤其在设备功率密度较高时，节能优势更为明显。传统风冷机房在高负载工况下，空调需满负荷运转以满足散热需求，且为应对高热量需进一步提升风量，导致能耗显著升高，PUE 通常在 1.8~2.2 之间，部分高温地区甚至会超过 2.2。

在低负载工况下，混合冷却机房可通过动态调整冷却系统运行状态实现节能：关闭部分 CDU 或冷却塔等大功率设备，仅依靠风冷系统维持基础散热，此时 PUE 可降至 1.2 以下，避免“大马拉小车”的能耗浪费。传统风冷机房即使在低负载工况下，为维持机房整体温度稳定，空调仍需保持一定运转功率，无法大幅降载，PUE 仍需维持在 1.5 以上，能耗冗余较为明显。

(3) 空间布局差异

在核心设备布局要求上，混合冷却机房需为新增设备预留专门空间：通常每 10~15 个液冷机柜需配置 1 台 CDU，单台 CDU 占地约 1~2m²，且液冷管路（供回液管、分支管）需沿地面或吊顶敷设，整体占用机房 5%~10% 的空间，布局时需兼顾设备安装与管路走向。传统风冷机房的布局仅需规划空调、机柜与通风地板的位置，无额外设备或管路的空间需求，布局逻辑更简洁。

从机柜间距要求分析，混合冷却机房的机柜间距需从传统的 1.0~1.2m 增至 1.5~1.8m，一方面需预留液冷管路的检修空间，另一方面需为气流流通提供充足通道，避免因管路遮挡导致气流受阻。传统风冷机房的机柜间距可灵活调整，通常控制在 1.0~1.2m 即可满足散热需求，仅需为空调检修预留 0.8m 左右的空间，对机房面积的利用率更高。

在空间兼容性上，混合冷却机房对老旧机房改造的兼容性较低：由于需新增液冷管路，往往需要凿墙或改造吊顶以完成管路铺设，可能对原有机房结构造成破坏，改造难度与成本较高。传统风冷机房的改造兼容性更强，仅需根据散热需求调整空调型号、数量或优化通风地板布局，无需对机房结构进行大规模改动，改造周期更短、成本更低。

(4) 适用场景差异

混合冷却机房适用于高热密度、高散热需求的场景，包括：①高密度数据中心（如云计算数据中心、超算中心），设备功率密度 $\geq 10\text{kW}/\text{机柜}$ ，需稳定控制核心部件温度；②AI 训练与推理机房，GPU 服务器集群发热集中，单设备功率达 300~500W，需快速带走局部高热量；③金融核心机房，关键业务设备（如数据库服务器）需 7×24h 稳定运行，对散热可靠性要求高；④老旧机房改造，在原有风冷基础上新增液冷，无需大规模重建即可提升散热能力。

传统风冷机房：适用于中低功率、散热要求宽松的场景，包括：①中小企业机房，设备数量少（通常 < 50 台），单机柜功率 $< 3\text{kW}$ ，对 PUE 要求不高（1.8 以内可接受）；②边缘计算节点（如基站机房、区域数据中心），设备分散且负载波动小，无需复杂冷却系统；③办公区小型机房（如企业 IT 机房），空间有限且设备以低功率 PC 服务器为主，风冷系统安装维护成本更低。

3.4.3 混合冷却机房优化设计

通过上一节的对比分析可知，在末端空调层面，混合冷却机房与传统风冷机房的核心差异，源于液冷设备的引入：一方面，液冷设备的部署直接改变了机房的整体布局；另一方面，液冷设备及配套管路的存在，显著增加了末端空调的送风阻力，这两大变化共同影响了空调系统的运行效率与气流组织逻辑。

图 3.4-2、图 3.4-3 呈现了混合冷却机房与传统风冷机房两种典型的结构及风路分布。其中，混合冷却机房采用下送风设计，这也是当前国内混合冷却机房的主流方案，其核心优势在于可将包间内的液冷管路集中布置于地板下方，通过物理空间的隔离，大幅降低因管路泄漏可能对 IT 设备造成的直接影响，提升机房运行的安全性。

传统风冷机房则采用风墙水平送风设计，该方案通过扩大送风口面积，既能有效降低送风过程中的压力损失，满足高功率机柜对大风量的散热需求；同时可减缓大风量空调的初始送风风速，避免因高风速引发的气流紊乱问题，保障机房内气流组织的稳定性与均匀性。

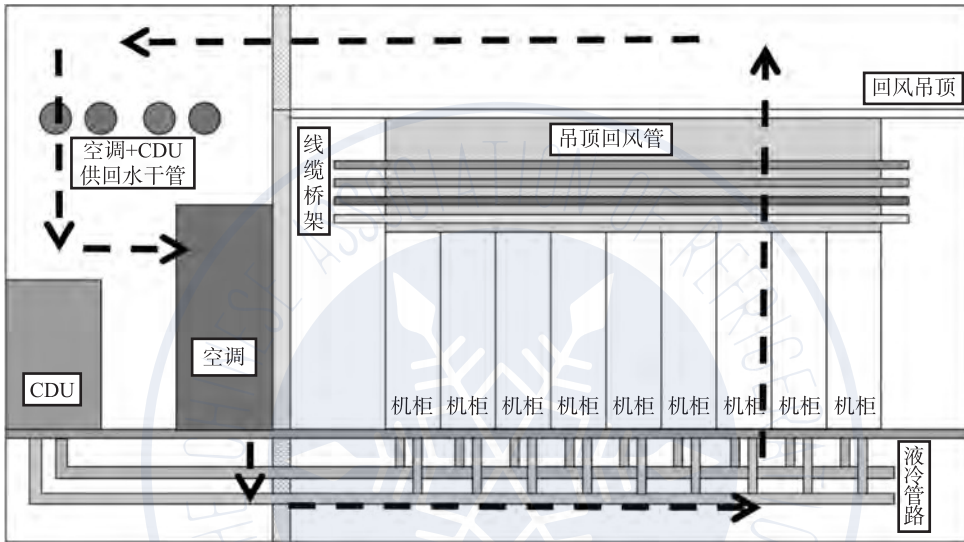


图 3.4-2 混合冷却机房结构与风路图（地板下送风，封闭热通道吊顶回风）

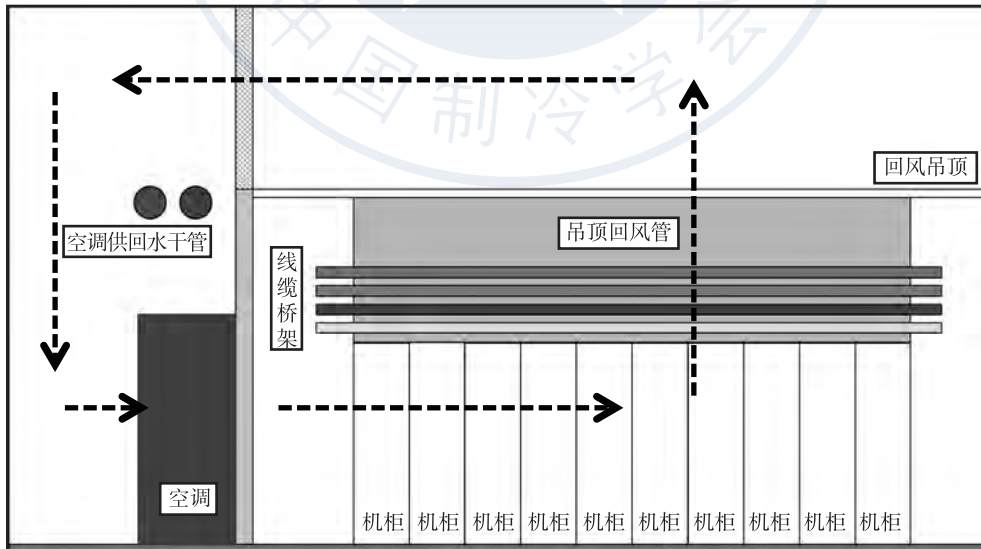


图 3.4-3 风冷机房结构与风路图（风墙水平送风，封闭热通道吊顶回风）

通过图 3.4-2、图 3.4-3 对比可以看出，混合冷却机房由于增加了液冷设备和管路，以及地板下送风的形式，导致送风路径上的阻力大幅增加，具体差异如表 3.4-1 所示。

表 3.4-1 混合冷却与传统风冷对比

对比维度	混合冷却机房	传统风冷机房
阻力产生源	新增 CDU（冷却液分配单元）占用空调间空间，液冷管路（供回液管、分支管）沿机柜敷设，部分管路横穿风道，形成物理遮挡	无额外阻力源，仅需考虑由空调、机柜、通风地板组成的气流路径自然阻力
空调送风阻力变化	送风阻力增加 15%~30%：CDU 机身阻挡冷通道气流扩散，管路局部收缩风道截面积，导致冷空气流经时压力损失增大	送风阻力稳定：仅受房间结构、机柜通风孔阻力影响，阻力基本恒定（通常<50Pa）
对空调运行的影响	空调需提升送风静压（从传统 100~200Pa 增至 150~300Pa）以克服阻力，否则易出现冷量输送不足，局部机柜冷风供应短缺	空调送风静压无需额外提升，可按标准工况（100~200Pa）设计，运行参数稳定
气流组织干扰程度	高：管路可能阻断冷通道“下送上回”气流路径，CDU 体积过大影响空调回风，导致局部气流紊乱	低：气流沿“冷通道进风-机柜散热-热通道回风”单向循环，无额外干扰源，气流均匀性好

因此，在混合冷却机房的末端设计优化中，需聚焦两大核心问题并重点突破：其一，精准控制送风沿程阻力，需确保空调机外余压完全匹配实际运行需求，避免因余压不足导致风机性能衰减，进而无法为服务器提供足额散热风量；其二，优化气流组织合理性，需通过科学设计规避气流紊乱问题，防止局部热点产生，保障 IT 设备稳定运行。

要解决上述问题，需分两步开展关键分析。第一步，需明确整个送风路径的压力损失情况。但此类压力损失受遮挡物尺寸、机房布局等多重变量交叉影响，不确定性极强，既难以通过理论公式精准推导，传统依赖经验估算的方式也存在显著局限——不仅误差较大，还易引发两种极端问题：要么机外余压不足，直接影响散热效果；要么过度选型，造成不必要的成本浪费。第二步，需对机房内气流组织进行精准分析与评估。但空气具有“无形无感”的特性，传统方式难以直观捕捉气流流动轨迹，更无法准确定位气流组织不合理的区域，导致优化方案缺乏针对性。

针对这一系列痛点，CFD 技术成为理想解决方案。通过对机房设计方案进行三维精细化建模和全流程数值模拟，该技术既能直观、精准地计算出送风路径各环节的压力损失分布，为空调选型提供科学依据，实现“按需配置”，同时兼顾散热效率与成本控制；又能清晰呈现机房内气流组织的动态变化，精准定位潜在的气流紊乱区域与局部热点风险，为气流优化设计提供明确方向。

图 3.4-4 为采用 CFD 技术开展送风压力损失计算的示意图。从图中可清晰直观地看到，CFD 模拟结果精准呈现了空调回风在流经各类遮挡物（如液冷管路、设备支架等）时，沿程压力损失的分布状态与变化趋势，为后续针对性优化送风路径、匹配空调机外余压提供了可视化的科学依据。

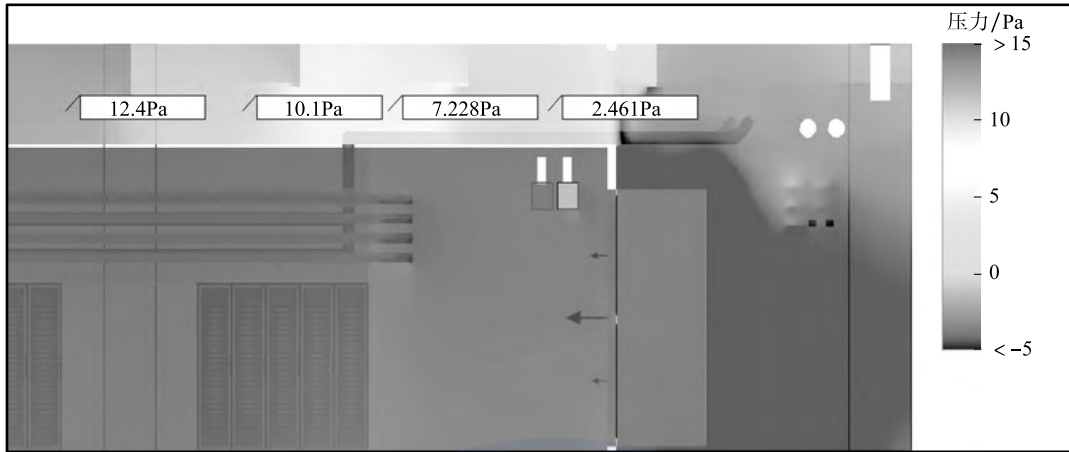


图 3.4-4 利用 CFD 技术模拟风路压力损失

当沿程阻力过高时，则需要通过增加机柜间距，降低液冷管径等方式增加通风空间，降低阻力。但机柜间距的增加也意味着机柜数量的减少，液冷管径的降低也意味着液冷管路内沿程阻力的增加，从而影响液冷系统运行。因此设计人员需要在机柜密度、液冷管径与沿程阻力之间做到平衡，以做到安全运行与经济效益的最大化。建议利用上述 CFD 技术进行多方案验证，以找到最优设计方案。

图 3.4-5 为通过 CFD 技术模拟的管线密集区域气流组织示意图。可见，借助计算机数值模拟技术，原本“无形无感”的气流运动被转化为直观可见的可视化结果（如气流速度分布、流向轨迹等），能够帮助设计人员精准捕捉该区域（因管线密集易出现的）气流拥堵、短路或涡流等问题，为提前制定针对性优化方案、规避后续运行中的局部热点隐患提供清晰依据。

对于混合冷却机房而言，除前文所述针对末端设备与机房布局的优化外，还可从控制层面进一步挖掘能效提升潜力。这一层面优化的核心逻辑，是打破风冷、液冷系统“各自为战”的独立运行模式，通过与液冷系统、机房全局监控平台的深度联动，构建基于机房整体热负荷变化的动态调节体系，实现全系统的协同高效运行。

具体可通过两类关键策略落地：其一，引入负荷预测算法。依托对历史数据（包括服务器实时功耗曲线、业务负载波动规律、室外环境温湿度变化等）的深度分析，构建预测模型，提前 1~2h 精准预判机房内热负荷的变化趋势。基于这一预判，风冷侧末端空调可主动调整运行状态——例如，当模型预测即将进入业务高负载时段、机房热负荷将显著攀升时，空调可提前 15min 启动压缩机预冷模式，预先将机房环境温度稳定在合理区间，避免临时满负荷运行带来的能耗峰值与温度骤升风险，实现“预判式”节能与控温。

其二，实现分区精准控温。在风冷末端空调系统中集成多组分布式温度传感器，分别部署于液冷机柜区、非液冷设备区、冷热通道等关键区域，实时采集各分区温度数据。借助 AI 算法对多维度数据进行分析，精准识别不同区域的温度差异与散热需求，进而自动调节对应分区送风口的风量与送风温度。例如，针对液冷已承担主要散热、余热较少的液冷机柜区，可分配 40% 的送风量；针对依赖风冷散热的非液冷设备区，分



图 3.4-5 利用 CFD 技术模拟局部气流组织

配 60% 的送风量，以此替代“一刀切”的统一控温模式，有效避免局部区域过冷造成的能耗浪费或过热引发的设备隐患。

3.5 空调末端 AI 调优

随着数据中心由传统通算向着智算与超算的快速发展，数据中心机房面临两大能耗问题：

(1) 功率密度指数级攀升：智算 GPU 集群（单机柜 40kW 左右）与超算异构节点（单机柜不低于 100kW）的普及，使机房热负荷较传统通算（不高于 10kW/机柜）提升 4~10 倍，制冷系统能耗问题日益突出。

(2) 发热时空随机性加剧：智算中心 AI 训练任务的突发性负载波动与超算中心模拟的瞬态热点，导致热量分布从稳态均匀转向动态混沌，传统按最大负荷设计的冷却系统冗余度高达 30%~50%，能源浪费巨大。

然而传统末端控制方式在新型算力需求下略显“力不从心”：一方面粗放的恒值控制，无法应对局部瞬态过热控制的安全与节能需求；另一方面系统与热环境间动态响应缺失，导致末端设备被迫持续高功率运行，加剧能源浪费。

本节基于上述问题，围绕新算力需求下空调末端的 AI 调优方案展开介绍（如图 3.5-1 所示）。通过 IT 负载调优为各机柜建立合理的运行参数标准，避免机柜运行状态偏离最优区间，保障其稳定高效运行；末端空调群控调优借助算法模型，将有限的冷却

资源精准分配至热负荷较高的机柜，实现资源的优化配置；机柜在线监测系统则为各机柜构建全周期运行状态监测体系，通过对机柜运行状态的实时评估，确保负载调控标准与资源优化配置方案的有效落地；CFD 融合模型寻优机制则在运行前将各典型工况的 CFD 仿真结果进行数学分析后形成各典型工况的控制阈值，将阈值嵌入算法寻优模型中，一方面可提升算法结果的准确性，另一方面也完善了传统算法计算域较片面的不足。

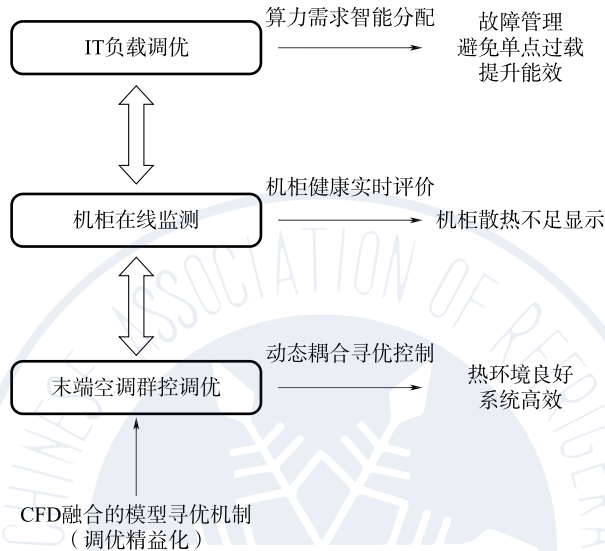


图 3.5-1 数据中心末端 AI 调优功能关系

3.5.1 机柜在线监测

通过实时对机柜进出口温度的采集，结合多指标评价机制对采集参数的分析，可实现对机柜健康状态的实时监测。常见的机柜健康性评价指标如下：

(1) 机柜冷却指数 (Rack Cooling Index, RCI) 是由 Magnus K. Herrlin 最先提出的，根据机柜进风温度是否高于或低于推荐范围，来评价机柜被冷却的效率及机柜设备所处的热环境的“健康”程度。推荐或允许的温度范围根据指导书或标准定义，如 ASHRAE TC 9.9 指标或 NEBS 标准，ASHRAE TC 9.9 指标中 A1~A4 级别数据中心推荐进口温度为 18~27℃。

根据进风温度是高于推荐温度的范围上限，还是低于推荐温度的范围下限，可以将机柜冷却指数分为 RCI_{HI} 和 RCI_{LO} 。总过热为进口温度高于最大推荐温度的总温度，总过冷为进口温度低于最小推荐温度的总温度。 RCI_{HI} 为进风温度高于推荐温度范围上限的总过热百分比， RCI_{LO} 为进风温度低于推荐温度范围上限的总过冷百分比。计算公式如下：

$$RCI_{HI} = \left[1 - \frac{\text{总过热}}{\text{最大允许过热}} \right] \times 100\% = \left[1 - \frac{\sum (T_x - T_{\max\text{-rec}})_{T_x > T_{\max\text{-rec}}}}{(T_{\max\text{-all}} - T_{\max\text{-rec}})n} \right] \times 100\% \quad (3.5-1)$$

$$RCI_{LO} = \left[1 - \frac{\text{总过冷}}{\text{最大允许过冷}} \right] \times 100\% = \left[1 - \frac{\sum (T_{\min\text{-rec}} - T_x)_{T_x < T_{\min\text{-rec}}}}{(T_{\min\text{-rec}} - T_{\min\text{-all}})n} \right] \times 100\% \quad (3.5-2)$$

式中： T_x ——机柜平均进风温度；

n ——总的机柜进风口；

$T_{\max\text{-rec}}$ ——指导书或标准定义的最大推荐温度；

$T_{\max\text{-all}}$ ——指导书或标准定义的最大允许温度；

$T_{\min\text{-rec}}$ ——指导书或标准定义的最小推荐温度；

$T_{\min\text{-all}}$ ——指导书或标准定义的最小允许温度；

图 3.5-2 为数据中心热环境总过热与总过冷的定义，图 3.5-3 为数据中心热环境最大允许过热与最大允许过冷的定义。

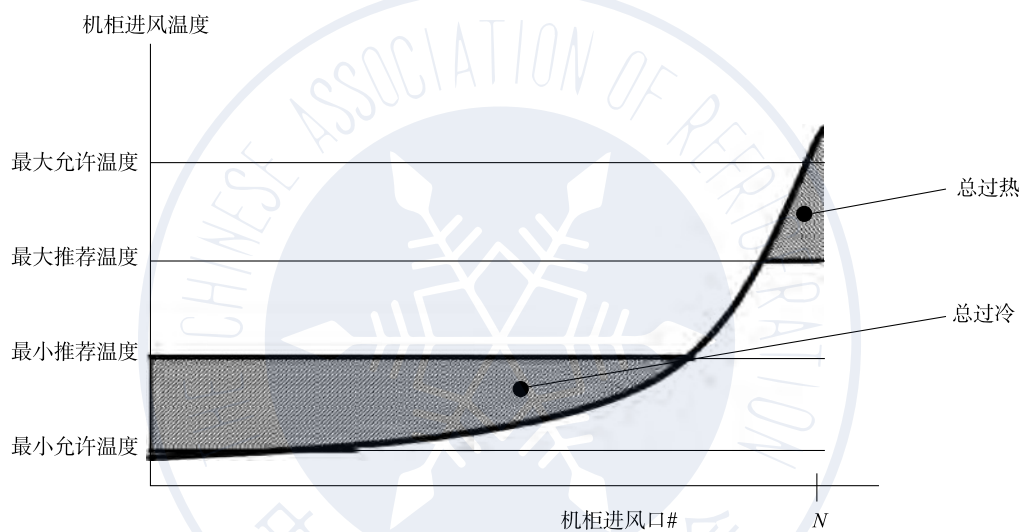


图 3.5-2 总过热与总过冷

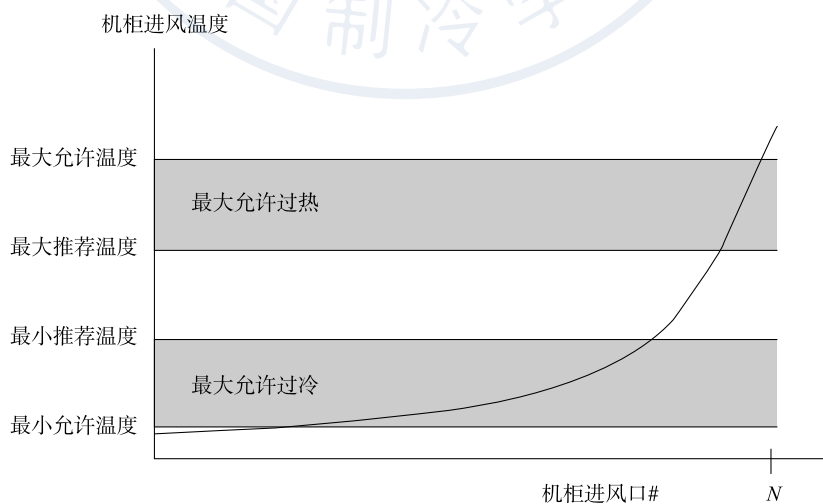


图 3.5-3 最大允许过热和最大允许过冷

表 3.5-1 表征了 RCI 指标评价等级。RCI=100% 为理想状态，表示数据中心内没有进风温度过热或过冷，所有进风温度都在指导书或标准定义的推荐温度范围内；当 $RCI_{Hi} < 100\%$ 时，表明数据中心内至少有一个进风温度高于指导书或标准定义的最大推荐温度；当 $RCI_{Lo} < 100\%$ 时，表明数据中心内至少有一个进风温度低于指导书或标准定义的最小推荐温度。RCI 在 91%~100% 范围内都是可以接受的，当 $RCI \leq 90\%$ 时，机柜整体冷却较差，一般情况下是不可以接受的。

表 3.5-1 RCI 评价等级

级别	RCI
理想	100%
优秀	$\geq 96\%$
可接受	91%~95%
较差	$\leq 90\%$

(2) 回风温度指数 (Return Temperature Index, RTI) 是由 Magnus K. Herrlin 最先提出的，是评价数据中心气流组织和能源管理水平的指标，在一定程度上反映了冷热气流混合的强度。计算公式如下：

$$RTI = \frac{T_{Return} - T_{Supply}}{T_{out} - T_{in}} \times 100\% \quad (3.5-3)$$

式中： T_{Return} ——空调加权平均回风温度；

T_{Supply} ——空调加权平均送风温度；

T_{out} ——机柜加权平均出风温度；

T_{in} ——机柜加权平均进风温度。

如表 3.5-2 所示，优化设计的目标值为 $RTI=100\%$ 。 RTI 大于 100% 说明热环境以热空气再循环现象为主，热空气再循环是热气流从机柜出风口出来后，没有直接回到空调回风口，而是通过冷通道重新进入机柜，导致机柜进风温度增高，RCI 指标降低，设备稳定性和可靠性降低。 RTI 小于 100% 说明热环境以冷空气短路现象为主，冷空气短路是指空调送风流量较大，冷气流从地板出风口出来后，没有直接进入机柜进风口，而通过热通道直接进入空调回风口，导致空调回风温度降低，冷量浪费。应当注意 $RTI=100\%$ 是优化设计的目标值，而不是理想值， $RTI=100\%$ 并不一定代表气流组织和能源管理水平最优，也有可能是热气流再循环现象和冷气流短路现象基本均衡，因此应结合 SHI 和 RHI 进行综合分析。

表 3.5-2 RTI 评价等级

级别	RTI
目标值	100%
热气流再循环	$> 100\%$
冷气流短路	$< 100\%$

3.5.2 末端空调群控调优

通过数据采集层、AI 算法决策层与执行层的搭建，在数据采集层部署温度传感器

($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 精度)、湿度传感器 ($\pm 1\%$ 精度), 实时采集机柜进/出风温度与湿度, 通过协议对接空调 PLC 系统, 获取压缩机频率、风机转速等运行参数; 通过在后端建立算法与大数据服务器实现系统负荷预测、自适应控制与热环境预测分析 (CFD 寻优机制), 具体的核心调优功能有:

(1) 动态负荷匹配: AI 模型每 5min 预测一次未来冷负荷需求, 每 10min 下发一次信号, 实现自动调整空调运行参数。当预测到 IT 负载率大幅度变化时, 系统预警通知运维人员启停空调设备。

(2) 多目标优化: 建立 PUE、机房热环境、机柜健康性的多目标优化模型, 通过算法求解最优运行状态, 实现系统能耗、机房热环境、机柜健康性三方之间的动态优化。

(3) 分级目标设定: 按照房间级、行间级与机柜级分级设定末端设备的控制目标。房间级空调应当以房间温度的均匀性配合机房内气流组织预测来进行优化, 并据此进行数据采集层温湿度点位的设定; 行间级空调应以行级微环境进出风口温度来优化各机柜的散热表现, 气流组织主要关注冷热通道的气流畅通; 机柜级空调则直接针对单个机柜热源, 采用多直流风机阵列 (每个风机独立控制), 实现机柜内部温度均匀。

在核心功能基础上, 根据机柜散热方式可以分为风冷与液冷两种控制方式。

(1) 风冷机柜的末端空调控制: 风冷机柜运作机制是借助冷空气作为冷却介质, 将服务器等设备产生的热量传递给散热器, 再通过空调末端所制取的冷风进行热量释放。风冷机柜空调末端常采用闭环反馈控制系统, 由于风冷机柜的空调末端在空调系统中仅承担冷风将机柜热量转移的功能, 其主要控制对象为末端空调中的风机, 行业中常采用闭环反馈控制, 通过实时对回风温度设定值和实际回风温度的差值的反馈控制每台末端的风机频率, 改变末端送风量大小而实现散热量控制。

(2) 液冷机柜的末端空调控制: 与风冷不同, 液冷机柜的主要冷却介质为低温冷水 (根据机柜散热过程中热量转换形式不同又分为显热去离子水与潜热盐水)。液冷机柜空调末端不仅要承担冷却介质的输送任务, 还要承担制冷任务, 因此其控制对象较多, 一般包括控制冷却介质流量的水泵频率控制与控制制冷量的压缩机频率控制。其系统控制机理依旧为闭环反馈控制, 通过实时对冷水回水温度与回水温度设定温差的反馈, 调整末端水泵与压缩机频率的变化。

上述行业常见控制逻辑在功能实现方面具有一定简洁性, 然而其控制过程将散热效果视为单一因素的简单变量, 但是实际系统中, 散热效果是冷却介质送出温度、回流温度与机柜负载率等多方因素共同影响的复杂变量, 传统控制方案割裂了送出温度 (与制冷主机的压缩机频率有关) 和回流温度的相关性, 常出现能源浪费的情况。例如, 在机柜负载率过大时, 造成了风机频率激增而送风温度无法匹配下降的问题, 使得空调散热效果变差。在机柜负载率变低时, 造成了送风温度无法匹配上调, 消耗了多余的冷源, 造成了额外能源的浪费。

由此, 采用 AI 智能算法为核心的多因素寻优控制可实现散热量与空调设备两者之间的动态优化控制。通过分析和理解当前机柜的工作状态, 针对空调末端的工作情况进行分析, 判断服务机柜负载大小及散热量需求, 基于后端模拟预测结果, 平衡分析输配能耗与主机制冷能耗, 基于分析结果优化风量与送风温度, 以确保系统能耗的节省。若判断该设备处于负载较高的状态, 则会主动降低送风温度设定值, 使得水阀开度增加,

以提升可消耗的冷源总量，降低服务器散热压力。同时基于集中式制冷主机对多个空调末端的情况，算法设有 AI 集群管理功能，对服务器机房的多个末端进行群聚分类，通过不同工作组的划分与各组空调的工作情况监控分析，智能判断是否有空调末端工作在高压过负载状态下。若发现当前工作组内存在过载空调，则将主动对工作组内的其他处在低频率的空调设备进行激活，基于 AI 的负荷计算，重新进行冷量分配，使得系统能效实现优化。

3.6 本章小结

本章围绕数据中心冷却末端的设计与调优展开，聚焦“高算力与高能耗”矛盾破解，以系统类型为脉络，结合前沿技术方向，形成全面技术框架。

在不同类型的冷却方案上，房间级末端空调以大风墙、氟泵、间接蒸发冷却三类技术为核心，适配不同场景：大风墙空调通过面状送风提升气流利用率，氟泵空调借多模式切换最大化自然冷源利用，间接蒸发冷却空调依托低能耗优势适用于干燥地区，同时从气流组织、能耗、空间适配等维度优化，保障温控精准与能效。行间级末端空调针对中高热密度需求，小风墙空调以近距离精准送风减少冷量损失，氟泵行间级空调凭多模式适应宽温域，水氟冷源行间级空调融合水氟优势提升效率，通过气流路径、关停位置、温度控制优化，强化散热效果与稳定性。机柜级末端空调聚焦超高密度场景，热管背板、水冷背板及机柜级空调各具技术特点，通过布局、运行参数、容灾方案优化，结合 CFD 模拟等手段，提升散热效率与可靠性。

前沿技术方面，混合冷却机房融合风冷与液冷优势，通过对比与 CFD 模拟优化，解决高功率密度散热与能耗问题；空调末端 AI 调优构建多维度系统，实现负载、监测、群控、模型寻优协同，提升冷却系统智能化与能效。

整体而言，本章通过分层方案与前沿技术结合，为数据中心冷却系统高效、绿色、智能发展提供技术支撑，助力破解行业能耗瓶颈。

参考文献

- [1] 招商银行股份有限公司. 利用自然冷源的数据中心制冷方法、装置、设备及介质: 202411193542. 5 [P]. 2024-11-29.
- [2] 北京工业大学. 数据中心冷热一体式氟泵热回收系统及其控制方法: 202311071053. 8 [P]. 2023-11-24.
- [3] 周峰, 申超亚, 马国远, 等. 数据中心混合工质氟泵自然冷却系统性能分析 [J]. 西安工程大学学报, 2022, 36 (4): 40-46.
- [4] 周峰, 徐步青, 薛连政, 等. 数据中心气泵驱动复合冷却机组工作特性 [J]. 西安工程大学学报, 2023, 37 (5): 32-38.
- [5] 李翠翠, 周峰, 金英, 等. 泵驱动两相循环回路中工质泵的冷损失特性分析 [J]. 制冷学报, 2020, 41 (2): 1-8.
- [6] 周峰, 王绚, 马国远. 数据机房泵驱动自然冷却机组工程运行节能分析 [J]. 制冷与空调, 2016, 16 (11): 72-76.

- [7] 洪馨. 热管背板空调在某数据机房的实际应用分析 [J]. 工程建设与设计, 2020 (12): 58-60.
- [8] 陶嘉楠. 基于热管背板的数据中心机柜冷却系统研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [9] 于传波. 数据中心水冷背板系统的实验及模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [10] 赖柏年, 张剑麟, 陈文, 等. 数据中心水冷空调末端的 CFD 模拟及应用分析 [J]. 制冷与空调 (四川), 2017, 31 (6): 565-575.
- [11] 陆谦逸. 基于脉动热管的数据中心机柜冷却系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [12] 孙晓晴, 韩宗伟, 付琪, 等. 冷却装置嵌入式数据中心机柜供冷效果研究 [J]. 制冷学报, 2021, 42 (1): 74-81.
- [13] 付琪. 基于按需供冷理念的数据中心高效末端及其冷却效果研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [14] 黄志林, 董凯军, 苏林, 等. 数据中心机柜级冷却数值模拟及空调容灾分析 [J]. 新能源进展, 2018, 6 (1): 76-82.



第 4 章 输配系统形式与优化设计

4.1 管网系统

4.1.1 管网形式及系统组成

数据中心空调水系统是保障 IT 设备稳定运行的重要基础设施，其核心功能在于通过冷源制备冷量，并经由输配系统将冷量高效传递至末端设备，最终实现机房环境的热量移除。输配系统作为连接冷源与末端的桥梁，直接影响系统的能效、安全性及可靠性。其主要组成部分包括冷水循环系统、冷却水循环系统及相关设备。冷水循环系统负责将冷水机组产生的低温冷水输送至末端设备，吸收机房热量后回流至冷水机组；冷却水循环系统则通过冷却塔将冷水机组冷凝器释放的热量散发至大气环境^[1]。

在数据中心空调系统中，管网系统起到承上启下的关键作用，将冷水机组、水泵、冷却塔及末端设备等独立组件整合为一个完整的制冷系统。管网设计与系统架构的优劣直接关系到设备运行能耗及整体系统效率，是整个空调系统的核心枢纽。通过合理的水泵、冷水机组及管网组合，可形成多种水系统架构，以适应不同的运行需求及节能目标^[2]。

数据中心水冷制冷系统的典型流程包括以下几个环节^[1,3-4]：首先，在机房末端，热空气（约 30~35℃）通过精密空调与低温冷水换热后降温至 20~25℃，再由风机送至机柜冷通道以冷却 IT 设备；其次，冷水在吸收热量后温度升高至 21~26℃，经冷水泵加压回流至冷水机组蒸发器，与制冷剂换热后降至 15~20℃，重新输送至末端循环；同时，制冷剂在蒸发器内吸收冷水热量后，经压缩机压缩并在冷凝器内释放热量至冷却水（冷却水温度由约 32℃升至约 38℃）；最后，高温冷却水通过冷却水泵输送至冷却塔，与室外空气换热后降至约 32℃，回流至冷水机组冷凝器完成循环。以开式冷却塔为例，其通过水的蒸发散热将热量释放至大气，需根据当地气候条件（如湿球温度）、水质特性及噪声控制要求进行选型设计，北方寒冷地区尤需关注防冻措施。图 4.1-1 为数据中心典型水冷制冷系统示意图，图 4.1-2 为典型冷水系统流程图。

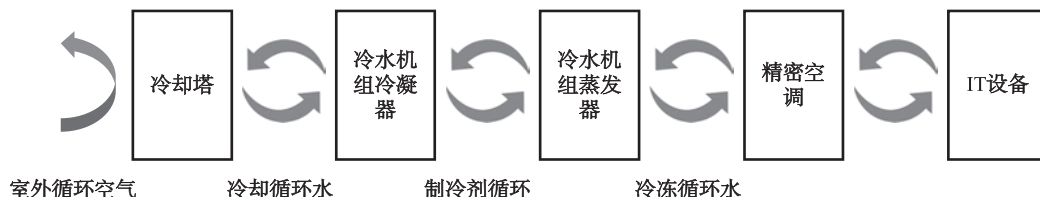


图 4.1-1 数据中心典型水冷制冷系统示意图

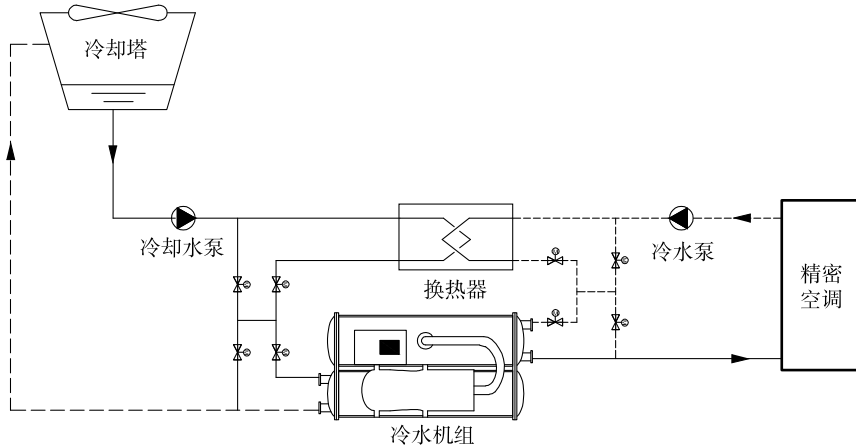


图 4.1-2 典型冷水系统流程

4.1.1.1 管网系统主要构成

数据中心水管网系统是由多个子系统协同构成的复杂网络，其组成要素的合理配置直接影响系统的整体性能。从功能角度分析，管网系统主要包括输送、调控、保障和辅助四大子系统^[1]。

输送子系统主要由主干管网、支管网络和泵组组成。主干管网承担着长距离、大流量的冷量输送任务，其管径设计需要综合考虑流量需求、压力损失和投资成本等因素。在大型数据中心，主干管通常采用 DN200~DN500mm 的大口径钢管，以确保足够的输送能力。支管网络则负责将冷量精确分配到各个末端设备，其设计重点在于实现流量的均匀分配和压力的稳定控制。泵组作为输配系统的“心脏”，为流体输送提供动力。

调控子系统是管网系统的“神经中枢”，主要由各类阀门和调节装置组成。阀门用于系统的通断控制和设备隔离，蝶阀因其结构紧凑、阻力较小而广泛应用于大口径管路。平衡阀是实现水力平衡的关键设备，静态平衡阀通过预设开度实现流量分配，动态平衡阀则能够自动适应系统压力变化。电动调节阀结合自控系统可实现精确的流量调节，是变流量系统的核心组件。

保障子系统确保管网系统的安全稳定运行，主要包括过滤除污设备、监测仪表和安全保护装置。Y 型过滤器用于去除水中的机械杂质，防止管道堵塞和设备磨损。压力表和温度计提供实时的运行参数监测，为系统调控和故障诊断提供数据支持。膨胀罐和补水系统则负责吸收温度变化引起的体积膨胀，补充系统的泄漏损失，维持系统压力稳定。

辅助子系统主要包括保温隔热、防腐处理、水质处理等设施。管道保温不仅能够减少冷量损失，提高系统效率，还能防止管道结露，保护建筑结构。防腐处理对于延长管网使用寿命至关重要，特别是在冷却水系统中，需要采用耐腐蚀材料或进行表面防腐处理。水质处理系统通过化学加药、物理过滤等手段，防止管路腐蚀、结垢和微生物滋生，确保系统长期稳定运行。

这四大子系统协调配合，共同构成了数据中心水管网的完整体系。在实际工程中，需要根据数据中心的规模、负荷特性和可靠性要求，对各子系统进行合理配置和优化设计。

4.1.1.2 冷水与冷却水系统构成

冷水系统负责将冷水机组产生的低温冷水输送至末端设备，吸收机房热量后回流至

冷水机组完成循环。其主要由冷水泵、分水器、集水器、膨胀水箱、水处理装置及管路组成，如图 4.1-2 右侧所示。冷水从冷水机组蒸发器流出（通常为 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ ），经冷水泵加压后通过管网送至末端设备，与机房热空气换热后温度升高（温升 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ ），再回流至冷水机组蒸发器进行降温循环。冷水系统可进一步分为冷源侧环路（冷水机组至分集水器）和负荷侧环路（分集水器至末端设备），其中冷源侧环路通常采用定流量或最小流量控制设计以保障冷水机组运行稳定，而负荷侧环路可根据需求采用定流量或变流量设计。

冷却水系统用于将冷水机组冷凝器释放的热量通过冷却塔散发至大气环境，主要由冷却水泵、冷却水管道及冷却塔组成。高温冷却水（约 38°C ）从冷水机组冷凝器流出，经冷却水泵加压后送至冷却塔，通过与室外空气的直接接触（以蒸发散热为主）降温至约 32°C ，再回流至冷水机组冷凝器循环使用，如图 4.1-2 左侧所示。冷却水系统通常为开式系统，需注重水质处理及防冻设计，尤其在寒冷地区需采取措施避免冷却塔结冰。

4.1.1.3 设备与管网配置形式

数据中心水系统设备的配置关系直接影响系统的可靠性、能效及运行灵活性^[5-6]。以下从冷水系统和冷却水系统的设备配置角度进行分析。

(1) 冷水系统设备配置

① 单级泵一对一架构：该架构中，每台冷水机组对应一台冷水泵，系统设备及管路均设置冗余备份，冷水机组与水泵采用 $N+1$ 配置，末端空调采用 $N+X$ ($X=0、1、2$) 配置，管路设计为环网形式。每台冷水机组串联一个蓄冷罐，形成一对一的冷水机组-水泵-蓄冷罐关系。图 4.1-3 (a) 展示了典型的流程。此配置避免水流旁通，确保冷水机组效率较高，但设备互换性较差。优点在于任意单台冷水机组故障时可通过蓄冷罐进入放冷模式，维持系统水温稳定。

② 单级泵多对多架构：该架构中，多台冷水机组与多台水泵并联后形成多对多关系，系统设备采用 $N+1$ 配置，管路为环网设计，蓄冷罐数量可减至 $1\sim 2$ 台，通过旁通调节阀控制充放冷，如图 4.1-3 (b) 所示。此配置设备备用性及互换性较高，任意设备故障不影响系统运行，但未运行冷水机组可能产生旁通现象，需设置电磁阀关闭以提升效率。

(2) 冷却水系统设备配置

① 单机单泵单塔方式：每台冷水机组对应一台冷却水泵及一台冷却塔，如图 4.1-4 (a) 所示，系统控制简单，适用于部分负荷运行，避免因水流旁通导致冷水机组 COP 下降。缺点在于设备备用性较差，单点故障可能影响系统运行，适用于对可靠性要求不高的场景。

② 多机多泵多塔方式：多台冷水机组、冷却水泵及冷却塔并联后串联运行，如图 4.1-4 (b) 所示，设备互为备用，提升系统可靠性，可充分利用冷却塔散热能力以降低冷却水温度并提高冷水机组效率。缺点在于运行操作复杂，需关闭未运行机组水路以避免旁通现象，且不同规格设备间的流量匹配难度较大。数据中心常采用环网设计，通过阀门隔离实现在线检修。

③ 单机单泵对多塔方式：结合单机单泵灵活性与多塔节能性，冷却塔集水盘间设置均压管以维持水位一致，避免部分冷却塔溢水或补水不足的问题，但存在管路单点故障问题。连接方式如图 4.1-4 (c) 所示。适用于机房等级较低的场景。

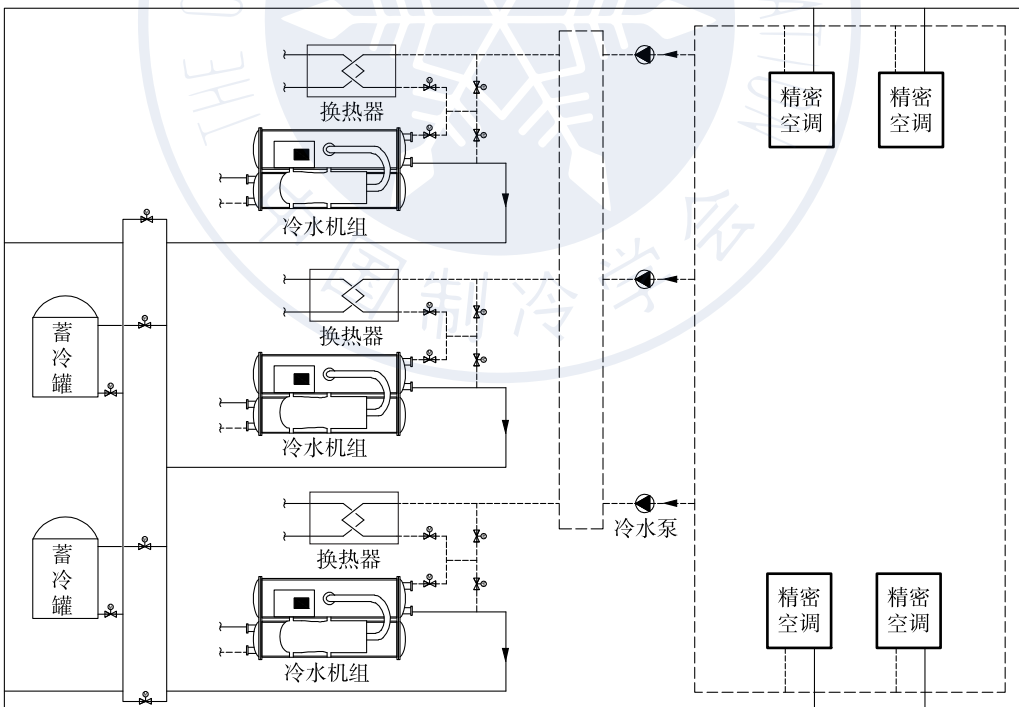
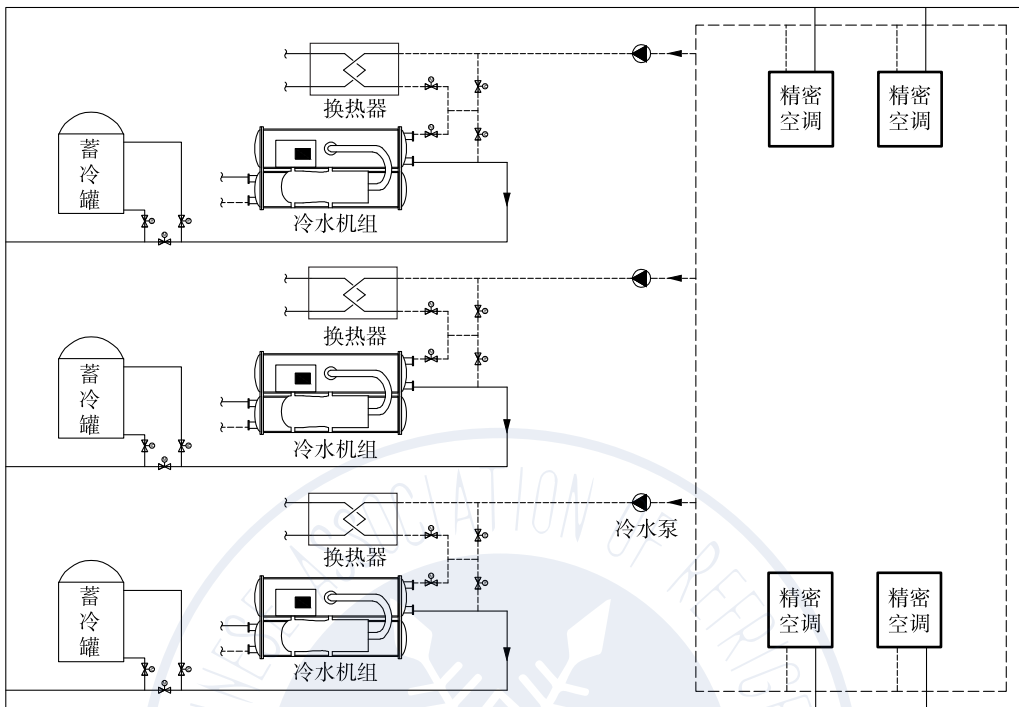
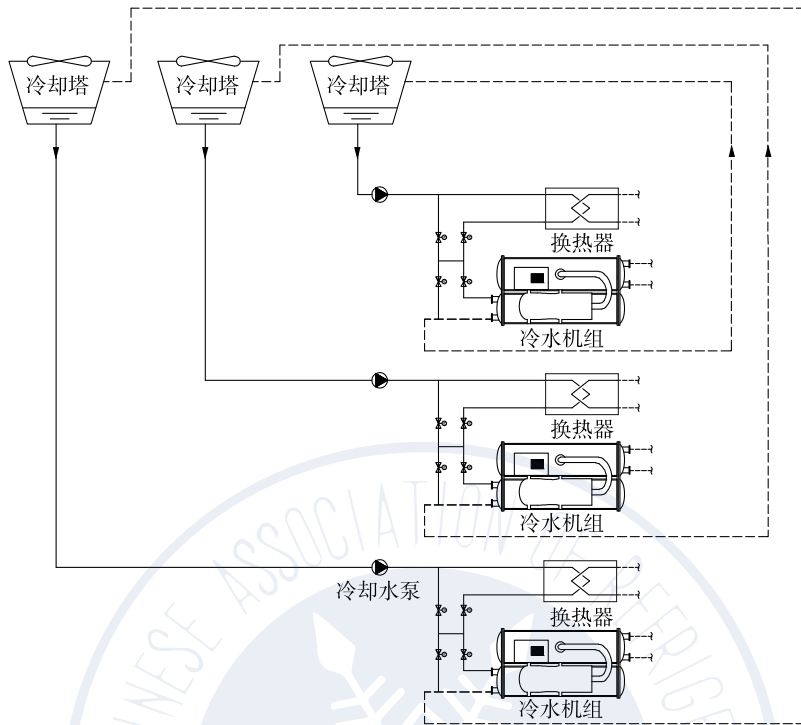
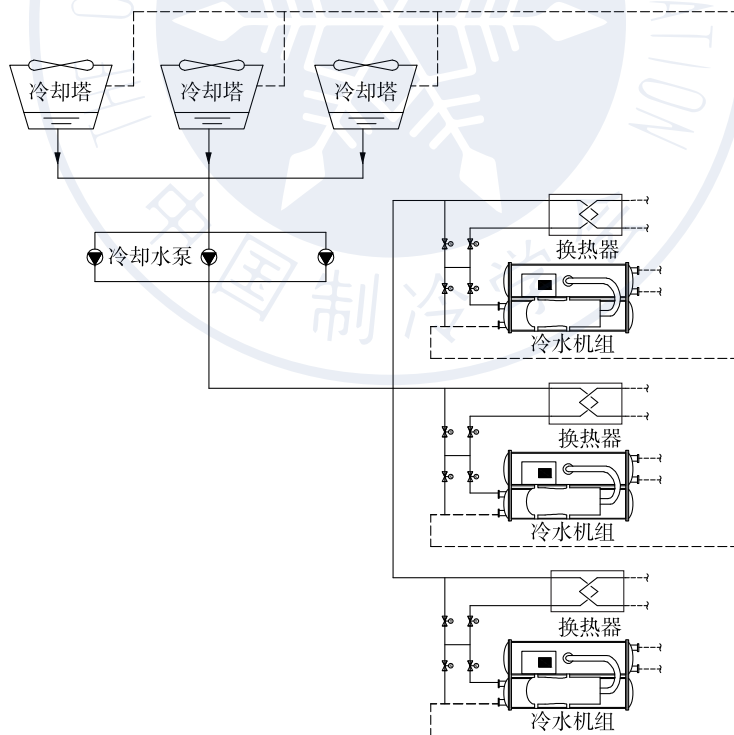


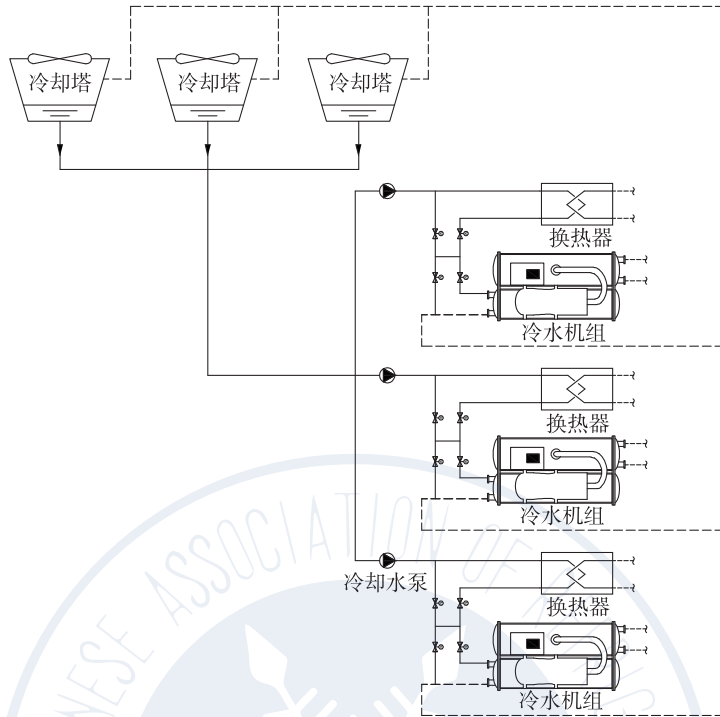
图 4.1-3 冷水系统设备配置示意图



(a) 单机单泵单塔方式示意图



(b) 多机多泵多塔方式示意图



(c) 单机单泵对多塔方式示意图

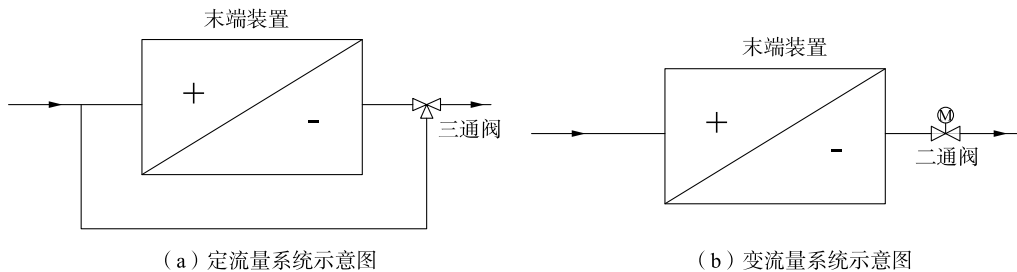
图 4.1-4 冷却水系统设备配置示意图

4.1.1.4 水系统架构形式分类

数据中心水系统管路根据不同特征可分为多种形式，以下从流量特性、泵组设置、系统开放性、及管路数量等维度进行分类与分析^[6-8]。

(1) 定流量与变流量系统

变流量和定流量一般指的是系统的负荷侧环路，也就是末端机房空调到分集水器的管路。定流量系统通过恒定水流量、改变供回水温差来适应末端负荷变化，末端设备常采用三通阀调节 [如图 4.1-5 (a) 所示]，实现直通与旁通切换以控制冷量输出。此形式系统简单、运行稳定、各用户间互不干扰，但输送能耗始终维持在设计最大值，节能效果不佳。变流量系统则保持供回水温差恒定，通过改变水流量适应负荷变化，末端设备采用二通阀调节 [如图 4.1-5 (b) 所示]，配合变频水泵可显著降低输送能耗，尤其在部分负荷条件下节能潜力较大，但对控制系统要求较高。



(a) 定流量系统示意图

(b) 变流量系统示意图

图 4.1-5 定流量和变流量末端示意图

表 4.1-1 总结了定流量系统和变流量系统的特点。当前大型数据中心多采用一次泵负荷侧变流量设计，通过变频水泵动态调节流量。

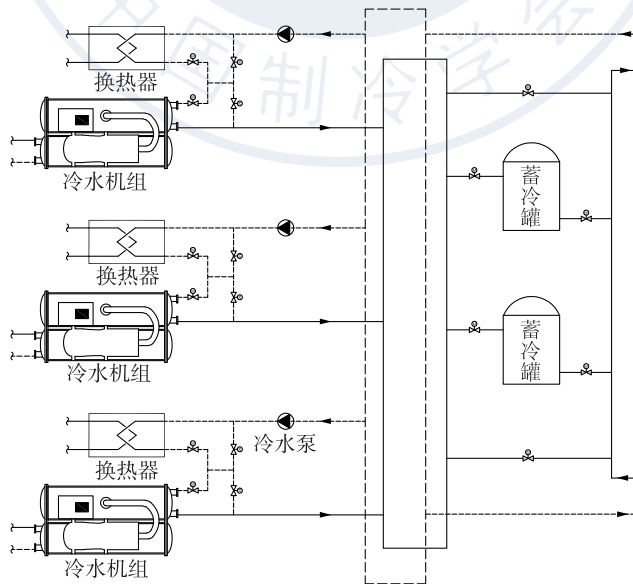
表 4.1-1 定流量与变流量系统对比

类别	定流量系统	变流量系统
调节方式	恒定水流量，改变供回水温差（三通阀调节）。当室温未达设定值时，供水全部流经末端；室温达标或超标时，供水通过旁通管直接回流，保持总流量不变	恒定供回水温差，改变水流量（二通阀调节）。室温未达标时阀门开度增大，供水增加；室温达标时阀门关小，供水减少
优势	系统简单，不需要复杂的自控设备；运行稳定，用户间互不干扰	水泵能耗随负荷减少而降低，节能显著；管径可考虑同时使用系数，初投资较低
劣势	输送能耗高，运送效率低	控制设备复杂，要求较高

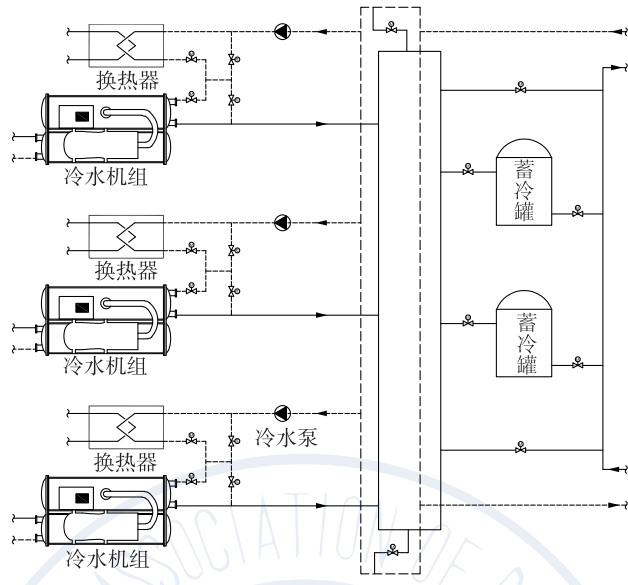
(2) 一次泵与二次泵系统

一次泵系统采用单组循环水泵克服冷水机组、末端设备及管路阻力，冷源侧与负荷侧共用一组循环水泵，系统简单，操作维护方便，投资与占地面积小，适用于多数现有数据中心。一次泵系统可进一步细分为定流量与变流量两种，分别如图 4.1-6 (a) 和图 4.1-6 (b) 所示。变流量系统通过变频水泵与压差旁通装置实现负荷侧流量调节，同时保持冷源侧流量稳定，节能潜力大。

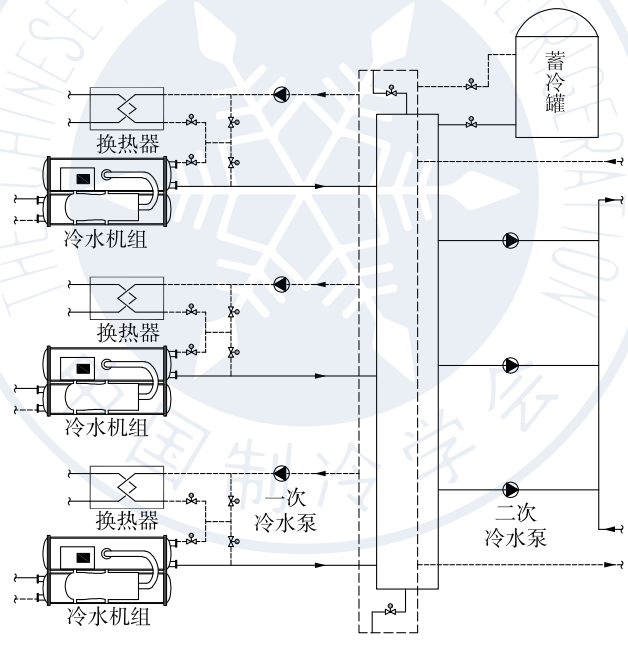
二次泵系统将系统分为一次环路（冷源侧，定流量设计）与二次环路（负荷侧，变流量设计），如图 4.1-6 (c) 所示。通过两级泵分别负责冷水制备与输送，减少冷水制备与输送间的相互干扰。一次泵（通常定频）负责冷源侧环路，克服冷水机组及管路阻力；二次泵（通常变频）负责负荷侧环路，根据末端负荷变化调节流量，节能效果显著。二次泵系统适合系统规模大、环路阻力差异显著的场景，且二次泵可由 UPS 驱动，与蓄冷罐连接，在冷水机组故障时保障应急供冷，UPS 容量需求较一次泵系统小。但其投资高，占地面积大，管路复杂。



(a) 一次泵系统——定流量



(b) 一次泵系统——变流量



(c) 二次泵系统

图 4.1-6 一次泵和二次泵系统示意图

表 4.1-2 总结了一次泵系统和二次泵系统的特点。

表 4.1-2 一次泵与二次泵系统对比

类别	一次泵变流量系统	二次泵变流量系统
经济性	设备少, 投资较低	设备多, 投资较高
占地面积	机房面积小, 投资低	占地面积大, 管路复杂

续表

类别	一次泵变流量系统	二次泵变流量系统
能耗	水泵变频节能效果显著	一次泵定频耗能固定，总能耗较高
系统复杂性	管路简单，旁通控制复杂	管路复杂，控制相对简单
应用场景	节能要求高、控制成熟	系统大、阻力高的远距离供冷场合

(3) 开式与闭式系统

开式系统与闭式系统的分类基于循环水是否与大气接触。开式系统管路通过水箱或水池与大气相通，通常用于冷却水系统。由于水与大气接触，含氧量高易导致管道腐蚀，同时水泵需克服额外静水压力，扬程与能耗较大。典型应用包括淋水式冷却塔的冷却水系统场景。

闭式系统管路不与大气接触，仅在最高点设置膨胀水箱以调节水量与压力，多用于冷水系统。其优势在于管道与设备不易腐蚀，水泵扬程仅需克服管路阻力，能耗较低，系统设计较为简单。但其蓄冷能力有限，低负荷时冷水机组需频繁启停，且补水可能需额外加压设备。闭式系统适用于水冷盘管机房空调冷水系统。

数据中心冷却水系统多采用开式系统以利用冷却塔散热，冷水系统则采用闭式系统以保护管道及设备。

(4) 同程式与异程式系统

同程式系统：各并联环路的管长基本相等，水阻接近一致，无需额外调节即可实现水力平衡，确保末端空调机组冷水量分配均匀，制冷效果稳定。工程项目中常见的同程式水系统有水平管路同程、垂直管路同程、水平与垂直管路均同程的形式。其优势在于水力稳定性好，调节方便，但管道长度增加导致水阻与能耗上升，初投资与占用空间较大。

异程式系统：各并联环路的管长不等，水阻差异较大，导致冷水分配不均，部分末端可能供水不足，制冷效果参差不齐。其优势在于管路简单，施工难度小，初投资低，但需通过平衡阀精确调试以改善水力稳定性。

4.1.1.5 自然冷却与蓄冷系统连接形式

(1) 自然冷却连接方式

自然冷却技术通过利用室外低温环境减少冷水机组运行时间以实现节能，分为冷水机组+板换并联式与冷水机组+板换混合式两种形式，如图 4.1-7 所示。并联式自然冷却通过阀门切换实现机械制冷与冷却塔自然冷却两种模式，管路简单，控制要求低，适用于可靠性要求较高的场景；混合式自然冷却增加“预冷却”模式，在过渡季节通过冷却水预冷冷水回水以分担部分冷负荷，节能效果更佳，但系统复杂，状态切换稳定性较低。

(2) 蓄冷罐连接形式

数据中心设置一定数量的蓄冷罐蓄冷，可以带来多方面的好处：一是保证电力系统故障或者冷水机组故障时，对服务器提供不间断冷却；二是保证制冷系统运行的平稳，防止出现低负荷情况下冷水机组喘振和运行困难的问题；三是可以利用夜间谷段低电价进行蓄冷，在白天电价较高的峰段期间，将蓄藏的低温冷水释放出来供数据中心空调系统制冷使用，达到削峰填谷的目的，可以降低部分电费。

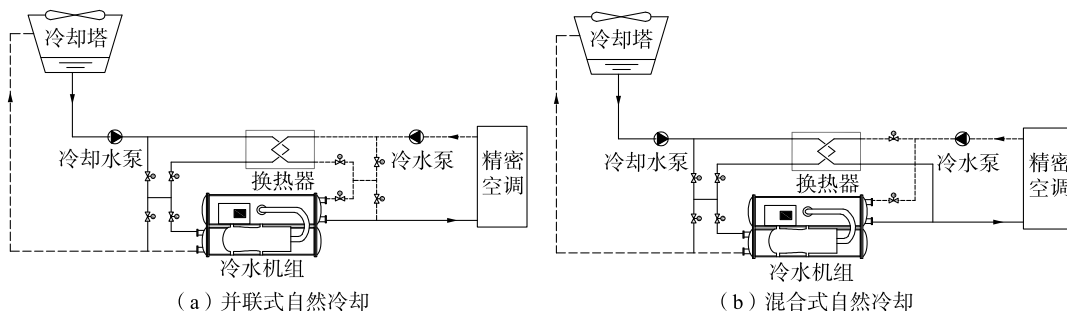


图 4.1-7 自然冷却系统连接形式示意图

蓄冷罐接入形式分为串联与并联两种：串联形式中，蓄冷罐在线运行，放冷无需切换，适用于一次泵系统，冷水机组可以置于蓄冷装置下游或者上游，如图 4.1-8 (a) 和图 4.1-8 (b) 所示；并联形式中，蓄冷罐与冷水机组处于独立环路，如图 4.1-8 (c) 所示，运行模式灵活，可实现联合供冷及应急放冷，适用于二次泵系统，二次泵由 UPS 驱动以保障应急供冷。

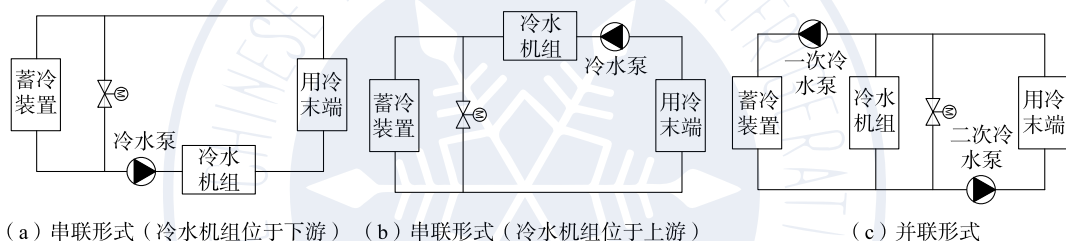


图 4.1-8 蓄冷罐连接形式示意图

4.1.2 管网安全冗余设计

数据中心作为信息技术基础设施的核心，其冷却系统的连续性和可靠性直接关系到 IT 设备的稳定运行与业务连续性。任何管路故障、泄漏或维护中断都可能导致机房过热，进而引发设备宕机，造成重大经济损失和安全事故。在这一背景下，管网安全冗余设计成为数据中心冷却系统不可或缺的一部分，旨在通过多路径、多备份的系统架构，确保单点故障不影响整体运行，从而满足高可用性标准^[2]。

4.1.2.1 设计理念与必要性

数据中心冷却系统的核心目标是保障 IT 设备在各种运行场景下的热环境稳定，而管网作为冷量输送的动脉，其安全性直接决定了系统的整体可靠性。国家标准 GB/T 50174—2017《数据中心设计规范》明确要求 A 级数据中心需实现“全年无间断运行”，并在一次意外事故或单系统设备检修后仍能保证电子信息系统的正常运行。这意味着管网设计必须具备足够的容错能力，以应对管道泄漏、设备故障、电源中断等多种风险。

管网安全冗余设计的核心理念在于多重保障，通过架构冗余、设备备份及应急机制的综合应用，构建一个即使在最不利条件下也能维持供冷的系统。这种设计不仅是对技

术规范的响应，更是对数据中心业务连续性需求的深刻理解。尤其在金融、云计算、通信等关键行业，冷却系统的一次短暂停摆可能导致数百万级的经济损失，冗余设计因此成为数据中心基础设施的生命线。

4.1.2.2 管网冗余的常见形式

管网冗余设计在实际应用中形成了多种形式，每种形式都针对不同的风险场景和可用性需求，提供了从基础保障到极致容错的解决方案。以下从环状管网系统、双管路系统及其他冗余形式三个方面进行详细阐述。

(1) 环状管网系统

环状管网系统是数据中心管网冗余设计中最常见的形式之一，其核心在于将冷水供回水管道连接成闭合回路，形成多路径保障机制。在这一设计中，冷水可沿环路双向流动，送达末端空调设备，如图 4.1-9 所示。当环路某段管道或阀门发生故障时，水流可自动切换至另一方向，持续为空调提供冷源，实现“故障无感”。为便于维护与故障隔离，环网通常在分支管及设备连接处配置蝶阀，并根据系统冗余能力设置分段阀门，将管网划分为若干独立区域，确保局部检修或增容不影响整体运行。

环状管网的运作机制带来了显著优势：其一，可靠性卓越，通过 $N+1$ 或更高冗余级别有效规避单点故障导致的全系统瘫痪；其二，在线维护，分段隔离设计使得检修无需停机，运维灵活度大幅提升；其三，水力均衡，环状结构减少了管网最不利点的压力损失，系统运行更稳定。此外，环网设计还支持灵活扩展，新冷却单元可接入环路任意点，适应数据中心分期建设或扩容需求。适用于中大型数据中心及对可用性要求严苛的场景（如 Tier III+ 级别）。

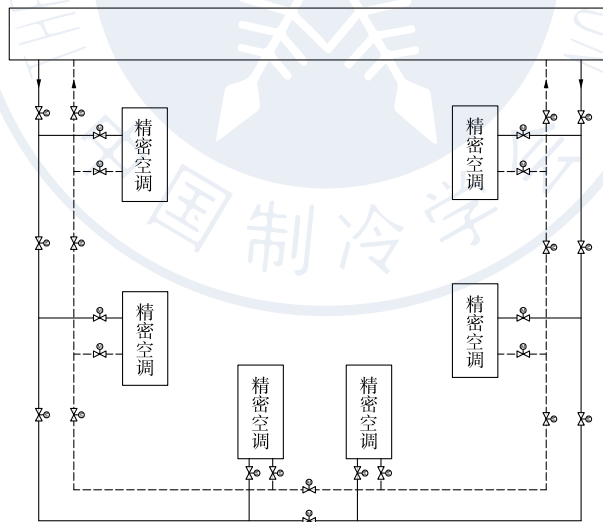


图 4.1-9 环状管网系统示意图

(2) 双管路系统

对于业务连续性要求极高的场景，双管路系统提供了更高层次的冗余保障。该系统配置两套完全独立的冷水供回水管路，分别连接不同冷源设备，如图 4.1-10 所示，正常运行时共同分担负荷，各承担约 50% 的冷却任务。当任意一路系统发生故障时，另

一路又可独立接管全部或大部分负荷，确保冷却不中断。双管路设计在物理上可实现两套系统的完全隔离，进一步降低了共因故障风险。

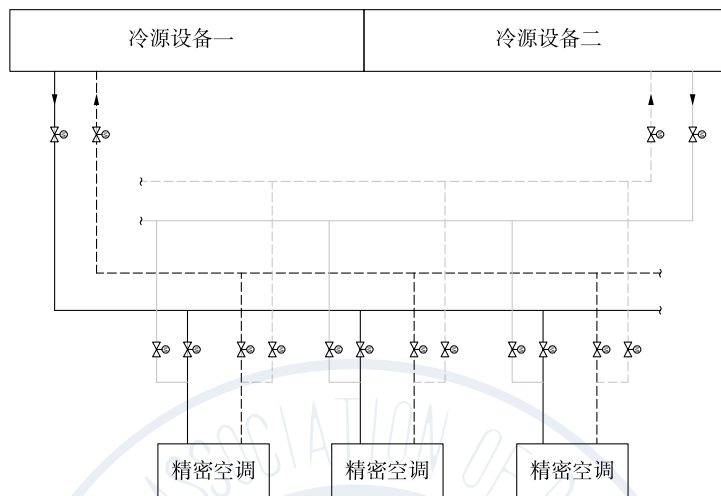


图 4.1-10 双管路系统示意图

双管路系统的典型应用案例可见于金融数据中心及云计算核心节点。部分 A 级数据中心采用双冷源配置，每套系统设计负荷为机房冷量的 70%~100%。在单套系统故障停机检修时，另一套系统虽可能无法完全满足满载需求，但通过配合机房分级管理（允许部分非关键设备临时停机）及缩短检修时间，仍可保障核心业务安全。双管路系统的优势在于：最高级别冗余，满足 Tier IV “容错”要求；维护便捷，单路系统可完全停运检修；流量分配清晰，独立管道简化水力计算与平衡调试。适用于超大型金融数据中心及国家算力枢纽等具有极高可靠性需求的场景。

然而，与环状管网相比，双管路系统设计更为复杂，初投资显著增加，需在可靠性与经济性间谨慎权衡。

(3) 其他冗余形式

除环状管网与双管路系统外，数据中心管网冗余设计还涌现出多种创新形式，以适应不同规模与需求的场景。

① 双盘管系统：在机房空调侧配置两种换热盘管（如冷水盘管与热管冷却盘管），两者均具备独立满足机房冷却的能力，当一系统故障检修时，另一系统可无缝接管满足供冷需求。

② 分区冗余与互备：将管网划分为多个独立区域，各区域具备独立运行能力，并通过主干管互联互通，确保局部故障不扩散至全局。

③ 设备级冗余：关键设备如水泵、阀门、冷却塔、冷水机组、空调末端等采用 $N+1$ 或 $2N$ 配置，例如水泵一用一备互为切换，确保单台设备失效不影响系统运行。

这些形式为数据中心管网设计提供了更多灵活性，设计者可根据具体项目需求组合应用，以实现可靠性与成本的优化配置。

4.1.2.3 冗余设计相关标准与规范

管网安全冗余设计并非单纯的技术选择，而是需严格遵循国际与国内相关标准，确

保设计符合行业共识与合规要求。以下从多个权威规范角度，梳理冗余设计的关键指导原则。

(1) Uptime Institute Tier 等级要求：Uptime Institute 的 Tier 标准是数据中心可用性评级的全球基准，其中 Tier III 要求系统具备“可并发维护”能力，即单点故障或维护不影响运行；Tier IV 进一步要求“容错”，即多点故障仍不影响业务。管网冗余设计需根据目标 Tier 级别确定冗余层次，如 Tier IV 数据中心通常采用双管路与双冷源配置。

(2) ASHRAE TC9.9 指南：ASHRAE 技术委员会 9.9 针对数据中心环境提出，冷却系统应具备冗余路径与设备备份，确保在最不利条件下仍维持关键负荷供冷，同时建议结合动态监控技术优化冗余资源利用率。

(3) GB/T 50174—2017《数据中心设计规范》：该规范明确指出，冷水供回水管路宜采用环形管网或双供双回方式；A 级数据中心需设置蓄冷设施，蓄冷时间应满足电子信息设备运行要求（通常不短于 15min）；控制系统、末端冷水泵及空调风机需由不间断电源（UPS）供电；当水源可靠性不足时，建议采用双冷源供应方式。这些要求为国内数据中心管网冗余设计提供了明确指引。

这些标准与规范共同构成了管网冗余设计的指导依据，设计者在实践中需结合项目定位与业务需求，确保设计既满足规范要求，又避免因过度冗余导致资源浪费。

4.1.2.4 冗余设计的能效与经济性权衡

尽管管网安全冗余设计显著提升了系统可靠性，但其带来的初投资增加、空间占用加大及运行能耗上升等问题不容忽视。例如，双管路系统在保障 Tier IV 级别可靠性的同时，可能导致管道材料成本翻倍；设备 N+1 配置虽提升容错能力，但备用设备长期闲置可能造成资源低效利用。因此，设计时需结合数据中心业务等级、负载重要性及投资预算，科学确定冗余级别，避免过度设计。

近年来，部分数据中心通过“动态冗余策略”实现了可靠性和能效的平衡。例如，根据实时负荷调整冗余设备运行状态，在低负荷时关闭部分备用设备以降低能耗；或利用智能监控系统预测故障风险，动态分配冗余资源。这种策略不仅维持了高可用性，还显著降低了运行成本，为管网冗余设计提供了新的思路。此外，结合蓄冷技术（如水蓄冷）可在保障应急供冷的同时，利用夜间低电价蓄冷，白天释放冷量，削峰填谷，进一步优化经济性。

4.1.3 管网特性及水力计算

数据中心冷却系统的输配管网作为冷量传递的关键环节，其设计与运行特性直接影响系统的供冷效率、能耗表现及可靠性。管网特性涵盖了管路几何布局、流体阻力分布、压力梯度变化及流量分配规律等多个维度，而水力计算则通过量化这些特性，为优化设计提供理论依据，确保在各种运行工况下末端设备的冷量需求得以满足，同时降低因水力失调引发的能耗浪费与系统不稳定风险。随着数据中心向大规模、高密度计算负载方向演进，管网系统的复杂性显著提升，传统的设计方法已难以应对动态负载与多工况场景的挑战，对水力计算的精度与适应性提出了更高的要求。近年来，智能化技术的引入为管网动态优化开辟了新的可能性，如何在设计阶段通过精确的水力分析识别潜在

问题，并在运行阶段实现实时平衡调控，成为数据中心冷却技术领域亟待深入研究的课题。

4.1.3.1 现网水力平衡问题

水力平衡是数据中心冷却系统管网设计与运行的核心目标之一，指在管网各支路中实现流量与压力的合理分配，确保末端设备获得设计所需的冷水量，从而维持机房环境温度的稳定。然而，在实际运行中，现网水力平衡问题普遍存在，尤其在大型、高密度数据中心中表现更为突出，成为影响系统效率与可靠性的重要瓶颈。以下从问题表现、成因分析及发展趋势三个方面，探讨现网水力平衡问题的现状与挑战。

(1) 问题表现及工程影响

水力失调在数据中心冷却系统中主要表现为流量分配不均与压力分布异常，具体情况如下^[9]：

① 流量分配不均：由于管网各支路阻力特性差异，部分靠近冷源的末端设备可能获得过量冷水，导致供冷过度，室内温度过低；而远离冷源或处于管网不利点的末端设备则供水不足，制冷效果不佳，机房局部过热风险增加。严重时，温差可达 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，远超设计标准（通常要求温差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ）。从工程角度看，这种不平衡直接威胁 IT 设备的运行稳定性，增加了宕机风险。

② 压力分布异常：管网中压力损失计算不准确或阀门调节不当，可能导致部分支路压力过高，增加管道泄漏风险；或支路压力过低，无法满足末端设备运行需求，影响冷却效果。

③ 能耗效率下降：水力失调迫使水泵长期处于高负荷运行以弥补不利点的流量不足，导致输送能耗显著增加。据统计，水力失调可能使水泵能耗增加 $15\%\sim 30\%$ ，与数据中心绿色节能目标背道而驰。

④ 系统稳定性降低：流量与压力的不平衡还可能引发系统振荡，水泵频繁启停或阀门调节失灵，从而加剧 IT 设备运行环境的不确定性。

这些问题在高密度数据中心中尤为显著。随着单机柜功率密度从 5kW 提升至 20kW 甚至更高，冷却系统对流量分配的精准性要求不断提高，传统管网设计与运行方式已难以适应新的需求。

(2) 成因分析

从工程实践的角度分析，现网水力平衡问题的产生源于设计、施工、运行与维护全生命周期中的多重因素叠加。

① 设计缺陷：部分数据中心在设计阶段未充分考虑管网的实际运行工况，例如忽略管路长度、管径、弯头及阀门阻力对流量的影响，导致理论计算与实际运行偏差较大。尤其在异程式系统中，支路管长与阻力差异显著，若未配置平衡阀或计算不准确，水力失调几乎不可避免。

② 施工质量问题：管网施工过程中，管道连接不严密、阀门安装位置不当或管内杂质未清理干净，可能增加局部阻力，破坏设计水力平衡。此外，部分项目为降低成本选用非标材料或简化管路布局，进一步加剧了水力失调风险。

③ 运行调节不足：数据中心运行阶段，负载动态变化是常态，例如 IT 设备功率波动或机柜分期投运使得管网流量需求呈现非线性变化，但传统管网系统缺乏实时调节能

力，定流量设计无法适应变负荷需求，导致部分支路流量过剩或不足。即便采用变流量系统，若控制策略不完善或传感器精度不足，也难以实现精准平衡。

④ 维护管理缺失：长期运行后，管网内可能出现结垢、气泡或阀门老化等问题，改变系统阻力特性，但部分数据中心缺乏定期检测与维护机制，未及时调整平衡阀或清洗管道，导致水力失调逐步恶化。

表 4.1-3 对水力失调的主要成因与影响进行了总结。

表 4.1-3 水力失调的主要成因与影响

成因类别	具体问题	主要影响
设计缺陷	阻力计算不准确、异程式管网未平衡	流量分配不均、末端供冷不足
施工质量	连接不严、材料非标、杂质残留	局部阻力增加、系统稳定性下降
运行调节	负载动态变化、控制策略滞后	流量过剩或不足、能耗增加
维护管理	结垢、气泡、阀门老化未处理	阻力特性改变、失调逐步恶化

(3) 发展趋势与应对挑战

针对现网水力平衡问题，数据中心行业在技术创新与工程管理层面均展现出积极的应对态势，为提升系统性能提供了新的工程思路。随着物联网与大数据技术的深度融合，智能化动态平衡技术在管网运行管理中的应用日益广泛。通过在管网关键节点部署高精度流量计、压力传感器及电动调节阀，实时采集系统运行参数，并基于控制算法动态调整水泵频率与阀门开度，可有效缓解水力失调问题。部分先进数据中心已引入基于人工智能的预测模型，利用历史负载数据与环境变量，提前优化流量分配策略，显著提升了系统的响应速度与平衡精度。

在设计与施工环节，模块化管网设计逐渐成为一种趋势。预制管段与标准化组件的应用不仅提升了施工精度，减少了现场安装误差，还通过精确的水力计算优化模块间的阻力匹配，降低了后期调试的复杂性。模块化设计还具备支持分期扩容的优势，避免了扩建对现有管网水力平衡的干扰。此外，面对高密度计算负载的快速增长，液冷技术与近端冷却方案（如冷板液冷与浸没式液冷）的兴起，从源头上减少了对传统水管网的依赖，简化了水力平衡的工程难度。然而，这也对混合冷却模式下的管网设计提出了新要求，例如如何在空气冷却与液体冷却并存的系统中协调流量分配，仍需进一步的工程探索。

从能效优化的工程视角出发，水力平衡的目标已不再局限于流量分配的均匀性，而是与绿色数据中心的节能目标紧密结合。部分项目通过变流量系统与自然冷却技术的集成，在低负荷工况下降低水泵功率，同时利用环境低温减少冷水机组运行时间，实现了平衡与节能的协同优化。然而，智能化技术的应用增加了系统复杂性与维护成本，模块化设计的初期投资较高，而高密度冷却技术的推广则对设计团队的跨领域能力提出了更高要求。此外，数据中心运行环境的多样性（例如不同气候区、负载特性的差异）也意味着水力平衡解决方案难以采用通用模式，需结合具体工程条件进行定制化分析与设计。

综上所述，现网水力平衡问题不仅是数据中心冷却系统设计与运行的痛点，也是影

响系统效率与可靠性的关键因素。解决这一问题需从设计、施工、运行及维护全生命周期入手，结合智能化技术与模块化理念，适应高密度计算与绿色节能的发展趋势。未来，随着数字孪生技术在数据中心领域的深化应用，通过虚拟建模与实时仿真优化管网水力特性，或将成为破解水力平衡难题的重要路径。

4.1.3.2 水力计算方法

水力计算作为数据中心冷却系统管网设计的核心环节，旨在通过量化流体在管网中的阻力、压力分布及流量分配特性，为系统优化设计与运行调节提供科学依据。其主要目标在于确保冷水系统在各种工况下均能满足末端设备的冷量需求，同时避免水力失调引发的能耗增加与系统不稳定风险。在数据中心冷却系统的工程实践中，水力计算不仅需要考察管网的几何参数与流体物理特性，还需结合实际运行场景（如负载波动、单点维护等）进行多工况分析，以提升系统的适应性与可靠性。

(1) 水力计算的基本原理与方法

水力计算的核心在于通过流体力学原理，分析冷水在管网中的流动行为，确定各支路的流量、压力损失及系统总阻力，从而为水泵选型、管径设计及阀门调节提供依据。在数据中心冷却系统中，管网通常涉及多支路、多环路的复杂结构，水力计算需综合考虑沿程阻力与局部阻力的影响。沿程阻力主要源于流体与管壁间的摩擦，与管路长度、内径、流速及流体黏度等因素相关；局部阻力则由弯头、阀门、变径等构件引起，通常通过局部阻力系数进行量化。总阻力的计算可通过基本公式表达：

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_i \quad (4.1-1)$$

式中： ΔP ——管路的总阻力，Pa；

ΔP_m ——沿程阻力，Pa；

ΔP_i ——局部阻力，Pa。

沿程阻力可进一步通过达西-魏斯巴赫公式计算：

$$\Delta P_m = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.1-2)$$

局部阻力则通过局部阻力系数 ζ 计算：

$$\Delta P_i = \zeta \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.1-3)$$

式中： ΔP ——管路的总阻力，Pa；

ΔP_m ——沿程阻力，Pa；

ΔP_i ——局部阻力，Pa；

f ——摩擦系数，与雷诺数及管壁粗糙度相关；

ρ ——管道内流体密度， kg/m^3 ；

v ——管道内流体流速， m/s ；

d ——管道内直径， m ；

l ——管道长度， m ；

ζ ——局部阻力系数。

在工程应用中，水力计算方法主要包括手算法、图表法及计算机辅助算法。手算法适用于简单管网，通过逐段计算阻力与流量分配，适合初步设计阶段，但对于复杂系

统效率较低；图表法依托经验数据与标准化阻力曲线，简化了计算过程，但精度受限于图表适用范围；计算机辅助计算法则通过专业软件（如 PIPE-FLO、Hydraulic Calculator）对管网进行建模与仿真，能够处理多工况、多变量场景，近年来在数据中心设计中得到广泛应用。此外，基于伯努利方程的能量守恒分析也是水力计算的重要理论基础，可用于分析管网中压力与流速的变化规律，为水泵选型提供依据。

在数据中心冷却系统的水力计算中，需特别关注最不利环路的确定与多工况分析。最不利环路通常指管网中阻力最大、流量分配最困难的支路，其阻力特性直接决定了水泵的扬程需求。多工况分析则需考虑负载变化、单点维护及故障隔离等场景，确保系统在非设计工况下仍能维持水力平衡与冷却效果。以下通过一个典型案例，具体阐述数据中心双环路冷水系统的水力计算方法及其工程应用。

（2）典型案例：基于最不利维护点的双环路冷水系统水力计算

A 级数据中心的基础设施应在一次意外事故后以及单系统设备维护或检修时仍能保证电子信息系统的正常运行^[10]，其冷水系统一般按双环路设置，如图 4.1-11 所示，在局部管道出现检修工况时，冷水系统仍然可以通过阀门关断，屏蔽故障管段，使冷水管路系统正常运行。国内工程师王泽青提出基于最不利维护点的水力计算方法^[11]，并通过水力计算软件 PIPE-FLO 进行了验证，以降低数据中心设计水泵扬程。

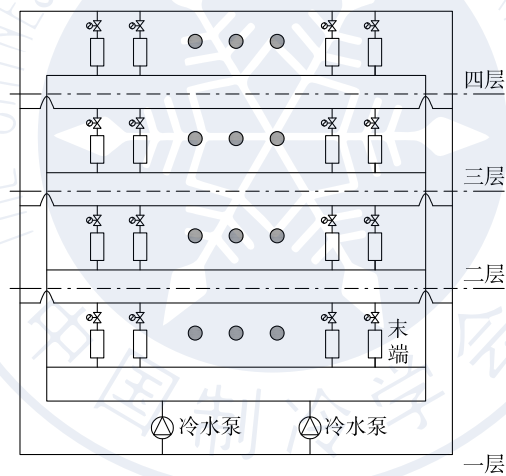


图 4.1-11 冷水系统原理简图

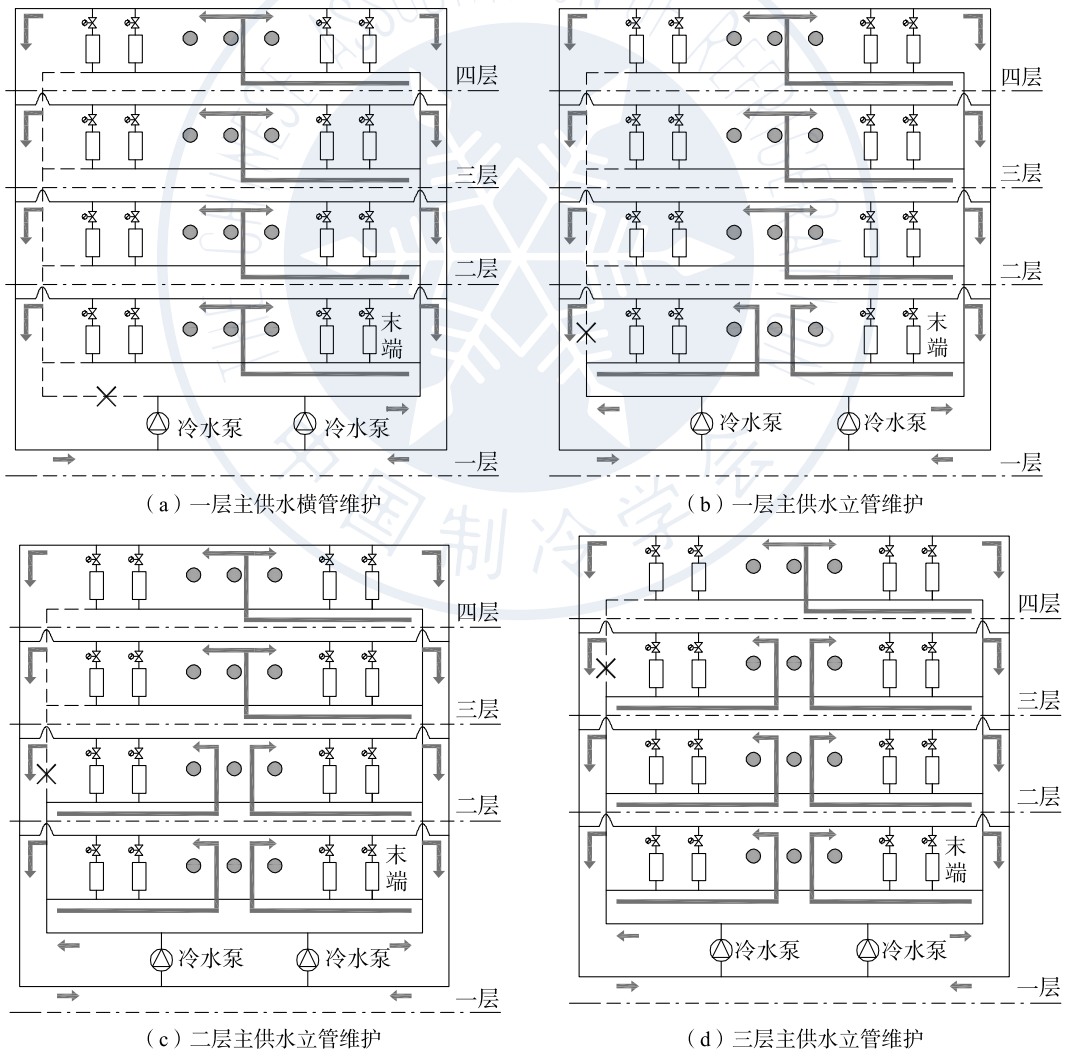
基于最不利维护点的双环路冷水系统，某一管道出现故障，通过关闭阀门，将该管道隔离并对该管段进行维护，保证冷水系统不间断运行。如图 4.1-12 (a) 所示，当一层主供水横管维护时，系统中的水流方向如黄色箭头所示。各层的水流变成单母管供水和双母管回水。由于各层供水横管需要承担各自的负荷，而主供水母管上的水流量负责整个系统的负荷，因此主供水母管的管径远大于各层供水横管的管径。当水系统规模较大时，两者的管径差异更加明显。在每层供水横管承担本层水流之后，水流进入主供水母管并流向另一层供水横管，但水量非常有限。这样形成了单路供水和双路回水的情况。

如图 4.1-12 (b) 所示，当一层主供水立管损坏时，各层水流显示成：一层双路供水、双路回水，其余各层单路供水、双路回水。如图 4.1-12 (c) 所示，当二层主供水立管损坏时，各层水流显示成：一层和二层双路供水、双路回水，三层和四层单路供

水、双路回水。如图 4.1-12 (d) 所示,当三层主供水立管损坏时,各层水流显示成:一、二、三层双路供水、双路回水,四层单路供水、双路回水。如图 4.1-12 (e) 所示,当一层最外侧供水横管损坏时,各层水流显示成:二、三、四层双路供水、双路回水,一层单路供水、双路回水。如图 4.1-12 (f) 所示,当一层次外侧供水横管损坏时,各层水流显示成:二、三、四层双路供水、双路回水,一层单路供水、双路回水。更多故障情况下的水力流向,可以对应推导得出。

根据以上分析很容易得出一层主供水横管损坏,系统单路供水情况最多。越接近顶层主供水立管损坏,系统各层双路供水情况增多,单路供水情况减少。从而得出结论:越接近主供水管道损坏系统阻力增加越多^[11]。

从图 4.1-12 (e)、(f) 的对比发现,当各层供水横管的最外侧供水管道损坏时,整层末端空调变成单路供水,而当次外侧供水管道损坏时,有一台末端空调从一侧单路供水,该层其他末端空调从另一侧单路供水,从而两者相比之下,最外侧供水横管损坏,该层管道阻力最大。



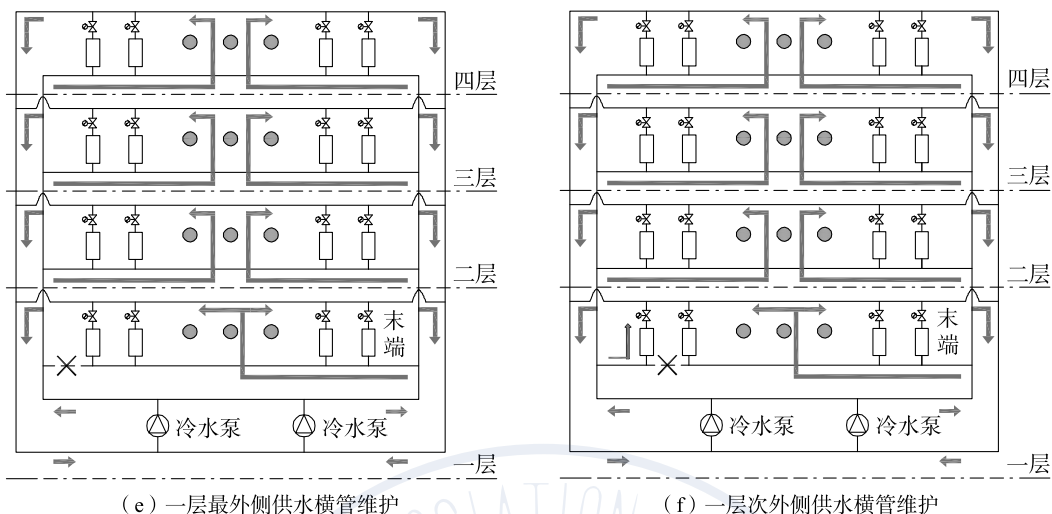


图 4.1-12 冷水系统各管段维护主要水流示意图

为实现数据中心双环路冷水系统单点维护工况水力工程计算，做出如图 4.1-12 (a) 所示的相关简化：

- ① 最不利维护点对应的供水主管虚线段无水流，双环路系统主管段呈现单路供水、双路回水的状态。
- ② 整个双环路冷水系统水力平衡，最不利单点维护时，如图 4.1-12 (a) 所示，两路回水主管为总回水流量的二分之一。
- ③ 各楼层主管两侧回水流量相同，如图 4.1-12 (a) 所示，根据各末端空调流量确定最不利末端环路。

基于上述简化模型，可逐段确认供回水管路的流量分布，并通过最不利环路的阻力计算，确定单点维护工况下的水泵扬程需求。最不利环路的总阻力 ΔP 由沿程阻力 ΔP_m 与局部阻力 ΔP_l 组成，计算公式如前所述。通过对管网各段的阻力特性分析，可进一步优化管径设计与阀门配置，降低系统总阻力。

在上述案例中，采用 PIPE-FLO 软件对简化模型进行仿真计算，得出最不利维护点（一层主供水横管维护）下的系统总阻力显著高于设计工况，需相应提高水泵扬程以确保流量分配的稳定性。同时，计算结果显示，通过合理配置平衡阀与动态调节阀，可在部分维护工况下降低系统阻力 10%~15%，有效减少水泵能耗。该方法的应用表明，基于最不利维护点的水力计算不仅提升了系统设计的可靠性，还为节能优化提供了工程依据。

(3) 水力计算的发展趋势

随着数据中心冷却系统复杂性的增加，传统水力计算方法在处理多变量、动态工况场景时逐渐显露出局限性，亟须借助先进技术进一步提升计算效率与精度。首先，数字孪生技术的应用为管网水力计算提供了新思路，通过构建虚拟管网模型与实时运行数据的耦合，可实现系统阻力的动态预测与优化调整。其次，基于人工智能的计算方法在复杂管网分析中展现出潜力，例如通过机器学习算法对历史运行数据进行训练，预测最不利环路与阻力分布，减少人工计算的工作量。此外，CFD 仿真技术在微观尺度上的应

用,也为管网局部阻力的精确计算提供了支持,尤其适用于高密度液冷系统的设计优化。

从工程实践的角度看,水力计算方法的发展还需更加注重多目标协同优化,即在确保水力平衡的基础上,兼顾能耗、成本与系统可靠性。例如,在绿色数据中心建设背景下,可将水力计算与自然冷却、变流量控制等技术集成,动态调整水泵扬程与流量分配,实现节能与平衡的双重目标。同时,针对数据中心运行环境的多样性,水力计算方法需具备更高的适应性,通过模块化建模与参数化设计,满足不同气候区、负载特性下的定制化需求。

综上所述,水力计算方法在数据中心冷却系统设计与运行中发挥着不可替代的作用。通过结合基本理论、计算工具及典型案例分析,可为管网优化设计提供科学依据。未来,随着智能化与仿真技术的不断进步,水力计算方法将在精度、效率及工程适用性方面实现进一步突破,为构建高效、可靠的冷却系统提供强有力的技术支撑。

4.1.4 管网阻力优化

在数据中心冷却系统的输配管网设计中,管网阻力对系统能效与运行稳定性的影响不容忽视。如前文4.1.3小节所述,水力计算为识别最不利环路与量化系统阻力提供了科学依据,而在此基础上,进一步优化管网阻力则是提升整体性能、降低能耗的关键。管网阻力优化不仅关乎水泵选型与流量分配的合理性,还直接影响数据中心冷却系统在高负载与动态工况下的适应能力。随着数据中心向高密度、绿色化与智能化方向迈进,管网阻力优化需从设计理念到运行策略进行全面革新,以应对复杂管网结构与多变运行场景带来的挑战。本节将延续前文对水力计算方法的分析,聚焦管网阻力优化的具体实践,探讨如何通过设计改进、运行调节与技术创新降低阻力,并结合行业发展趋势与应用场景,提供工程实践指导。

4.1.4.1 管网阻力优化的必要性与目标

管网阻力作为冷却系统水力特性的核心指标,直接决定了水泵的能耗需求与系统的流量分配效率。前文已通过水力计算分析了阻力构成(沿程阻力与局部阻力)及其在维护工况下的变化规律,而阻力优化则旨在通过针对性措施,将系统阻力控制在合理范围内,避免因阻力过高导致的水力失调与能耗浪费。在数据中心冷却系统中,阻力优化的主要目标包括:一是降低水泵运行能耗,减少输送功耗在系统总能耗中的占比;二是提升流量分配的均匀性,确保各末端设备获得足够的冷量,避免局部过热;三是增强系统的动态响应能力,使管网在负载波动或单点维护时仍能维持稳定运行。特别是在当前绿色数据中心建设与高密度计算需求的双重驱动下,管网阻力优化已成为实现低PUE(电源使用效率)与高可靠性的重要抓手。

4.1.4.2 管网阻力优化的设计策略

延续前文对最不利维护点与多工况水力计算的讨论,管网阻力优化在设计阶段需以计算结果为依据,重点关注管网布局与构件选型的改进,以从源头上降低阻力。

(1) 管网布局的结构优化:合理规划管网路径是降低沿程阻力的首要手段。针对数据中心多层、多模块的布局特点,应优先采用对称式或分区式管网设计,减少主供水母

管与支路间的长度差异，避免远端支路因路径过长而阻力过高。针对超大规模数据中心，通过将冷源位置居中布局并优化主管走向，系统总沿程阻力较传统设计降低约 10%，水泵扬程需求随之减少。此外，减少不必要的弯头与转角设计也能有效降低局部阻力，建议在设计中尽量采用直线管道或大半径弯管，局部阻力可相应减少 5%~8%。

(2) 管径与构件选型的精细化设计：管径设计需基于水力计算结果，平衡流量需求与流速控制，避免因管径不当导致的阻力异常。针对双环路系统，可在主供水母管与各层横管间采用渐变管径设计，确保流量分配的同时降低流速过高带来的沿程阻力。同时，阀门、接头等构件的选型应优先考虑低阻力特性，例如选用流线型蝶阀，可将局部阻力系数降低约 30%。此外，针对前文提到的维护工况下单路供水比例增加的情况，设计时可在关键节点预留动态平衡阀，通过调节阀门开度校正阻力分布，提升系统适应性。

(3) 模块化与预制化设计：模块化设计在前文案例中已被证明能提升水力计算的精度，而在阻力优化中，其优势在于通过标准化管段与预制组件减少现场安装误差，避免因连接不规范导致的额外阻力。模块化设计还支持分期扩容，避免新增模块对现有管网阻力特性的干扰。以某模块化数据中心项目为例，采用预制管网模块后，系统局部阻力较传统施工方式降低约 15%，同时安装精度提升显著，为后续运行优化奠定了基础。

4.1.4.3 管网阻力优化的运行与维护策略

设计阶段的阻力优化为系统奠定了良好基础，而运行与维护阶段的动态管理则进一步确保了阻力特性在全生命周期内的稳定性。这与前文水力计算中提到的多工况分析相呼应，强调在实际运行中针对负载变化与维护需求进行阻力调节。

(1) 运行中的动态流量调节：数据中心冷却系统的负载特性具有显著波动性，例如在夜间或低利用率时段，冷却需求可能下降 50% 以上。若仍按满载工况运行水泵，管网流速过高将导致不必要的阻力增加。为此，变流量控制技术成为运行优化的核心手段，通过变频水泵与智能阀门联动，根据末端需求实时调整流量，可在低负荷时将系统阻力降低 20%~30%。此外，结合前文提到的最不利维护点分析，可在维护工况下通过智能控制系统动态切换水流路径，优先保障关键支路流量，降低维护对系统阻力的整体影响。

(2) 维护中的阻力监测与干预：长期运行后，管网内可能出现结垢、气泡积聚或部件老化等问题，导致阻力逐渐增加。针对这一问题，需建立定期检测机制，通过在关键节点部署压力与流量传感器，实时监测阻力变化趋势，发现异常时及时干预。此外，气泡积聚引发的局部阻力异常也需关注，可通过自动排气装置定期排除管内气体，避免气蚀风险。维护策略还需结合前文水力计算中的简化模型，针对最不利环路进行重点检查与优化，确保系统在极端工况下仍能维持低阻力运行。

4.1.4.4 结合冷却系统发展的应用场景分析

数据中心冷却系统的发展趋势为管网阻力优化提供了多样化的应用场景，以下结合具体方向探讨优化策略的前沿实践，与前文分析形成呼应。

(1) 高密度液冷环境下的阻力优化：液冷技术在高密度计算场景中的应用日益广泛，其管网阻力特性与传统风冷系统差异显著。液冷管网中的微通道设计与高黏度冷却

液使用使得局部阻力占比更高，优化重点在于简化流道结构与减少连接点阻力。通过优化冷板内部流道转角与选用低阻力快速接头，可显著降低局部阻力。同时，液冷与风冷混合系统需通过分区管网设计避免阻力冲突，确保两种冷却模式下的水力平衡。这与前文提到的多工况分析相呼应，强调在技术革新中仍需以水力计算为基础进行阻力优化。

(2) 绿色数据中心中的节能优化：绿色数据中心强调低碳运行，管网阻力优化需与自然冷却技术结合，在环境温度较低时通过自由冷却 (Free Cooling) 模式减少冷水机组运行，降低冷水流量与管网阻力。然而，自然冷却模式对管网设计提出新要求，需增加旁通管路与动态调节机制，确保模式切换时阻力特性稳定。这与前文提到的动态流量调节策略相一致，凸显了运行优化在节能目标中的重要性。

(3) 智能化技术在阻力优化中的应用：智能化是数据中心冷却系统的重要发展方向，管网阻力优化可借助数字孪生与人工智能技术实现更高效率。前文已提及水力计算的数字化趋势，而在阻力优化中，数字孪生可通过虚拟建模与实时数据耦合，动态预测管网阻力变化，为运行调节提供依据。人工智能算法则可基于历史数据训练预测模型，提前识别潜在阻力异常，优化水泵与阀门参数。智能化技术的应用为阻力优化提供了新工具，也为前文提到的多目标协同优化提供了技术支撑。

4.1.4.5 管网阻力优化的未来方向

展望未来，管网阻力优化将在智能化与全生命周期管理的方向上持续深化。首先，数字孪生与 CFD 仿真技术的集成将进一步提升阻力分析精度，支持复杂管网系统的动态优化。其次，新型材料与制造技术的应用为阻力优化提供了新可能性，例如低摩擦涂层与 3D 打印流道的应用可从硬件层面降低沿程与局部阻力。此外，阻力优化还需更加注重与能效、成本及可靠性的协同平衡，例如通过与 PUE 目标挂钩，将阻力优化融入绿色数据中心评价体系。这与前文提到的水力计算方法的发展方向相呼应，强调从理论到实践的多维度提升。

综上所述，管网阻力优化是数据中心冷却系统提升能效与可靠性的重要环节，与前文水力计算方法相辅相成，通过设计改进、运行调节与技术创新，可有效降低系统阻力、优化流量分配。结合高密度液冷、绿色节能与智能化发展趋势，阻力优化需不断适应新场景与新需求，未来将在全生命周期管理与多目标协同方向上实现突破，为构建高效、低碳的冷却系统提供技术保障。

4.2 泵与泵组特性

4.2.1 循环水泵在数据中心的重要性

4.2.1.1 循环水泵在数据中心的能耗占比

随着 AI 算力需求激增与高密度服务器广泛应用，数据中心冷却系统能耗占比持续攀升。循环水泵作为冷却系统的核心组件，其能耗在当代数据中心整体冷却能耗中占比达 30%~50%，其能效优化直接影响数据中心整体能源消耗。以风冷为主的传统冷却系统中，水泵能耗占比约 30%；液体冷却系统中该占比更高，通常可达 50%。

4.2.1.2 循环水泵在数据中心的重要性

(1) 影响核心设备的安全与稳定运行

循环水泵是数据中心冷却系统的“心脏”，可驱动冷却液循环吸收服务器热量，将设备温度稳定控制在安全阈值内。数据中心运行时会持续产生大量热量，若循环水泵故障，冷却介质循环将立即中断，制冷系统短时间内便会失效，导致服务器热量无法转移、机房温度骤升，最终引发 IT 设备宕机甚至烧毁，造成重大业务损失。

(2) 影响数据中心的 PUE

PUE 是数据中心的核心理能效指标，计算公式为“总能耗/IT 设备能耗”，数值越低代表能效越高，水冷系统中循环水泵的 PUE 因子约为 0.05。

(3) 影响数据中心的高密度与规模化发展

随着 AI、云计算、大数据的发展，数据中心单机柜功率从传统的 5~10kW 提升至数百 kW，单位面积的发热量呈指数级增长，对水泵的流量、压力、稳定性、集成性等要求也相应提高。因此数据中心向高密度、规模化发展过程中，水泵合理选型至关重要。

4.2.1.3 循环水泵在数据中心存在的问题

当前数据中心循环水泵主要存在两方面突出问题：一是能效低下，此问题在冷却系统中表现普遍，能耗浪费严重的核心原因在于多数老旧数据中心设备老化，如泵头水力系统陈旧、电机能效等级趋近淘汰标准，且采用“定频水泵+手动阀”的传统流体控制方式调节流量，导致系统匹配性不足；当 IT 负载变化时，冷水泵、冷却水泵、冷水机组、冷却塔的流量与压力参数无法适配，从而降低冷却输配系统整体效率。二是可靠性风险，安全冗余设计层面，除需考虑设备与功能模块间的冗余备用外，更应重视设备自身安全冗余设计（含设备可靠性、平均故障时间、售后保障等），而该部分易被忽视；日常维护层面，需对水泵进行周期性保养，以防范各类问题，如密封泄漏（多由机械密封件老化、磨损或损坏引起，造成冷却液泄漏）、机械部件磨损（叶轮、轴承磨损会导致水泵扬程下降、噪声增大，甚至卡死无法启动）、电机电气问题（电气部件老化、过载、短路等易致电机无法正常启动或运行）。

4.2.2 数据中心水系统与水泵的耦合关系

数据中心水系统与水泵的耦合关系是系统稳定高效运行的核心，两者密不可分——任何水泵均无法孤立工作，介质流入与流出水泵过程中需途经管道、阀门等装置，其耦合效果直接决定数据中心运行状态。

从能量供给与阻力克服维度，水泵的核心功能是将电机机械能转化为输送介质的能量，以克服水系统中液体所受的全部阻力，这要求水泵扬程与水系统总阻力精确匹配。水系统阻力涵盖管道摩擦、阀门、过滤器、冷水机组蒸发器/冷凝器、板式换热器、空调盘管等局部阻力及沿程阻力；若水系统阻力计算值低于实际阻力，水泵需提供更高扬程才可克服阻力，易导致流量偏小、数据中心冷却不足，此时需提升转速以增加流量；若实际阻力低于计算值，水系统流速会升高、工况点偏向大流量，进而造成能耗增加，需降低转速以减小流量。

在流量分配与精确控制层面，水系统设计需将精确流量分配至各冷却末端，以满足机柜依据服务器动态负荷调整的实时制冷需求，而水泵的流量输出需与所有末端同时工作的总需求相适配。数据中心中常采用变频器驱动水泵，通过监测系统压力或温度变化，变频器可动态调整水泵转速以改变流量，最终实现按需制冷。

从系统冗余与可靠性保障角度，数据中心对水系统及水泵均提出 $N+1$ 或 $2N$ 冗余设计要求，备用水泵需与运行水泵及其控制系统实现深度耦合：当运行水泵出现故障或需维护时，控制系统需在瞬间（或短时间内）自动启动备用水泵，确保水循环不中断，这一过程要求水泵的电气控制、阀门联动（防止水锤）等环节完美配合，对系统耦合设计提出极高标准。

在系统能效影响方面，冷却系统能耗是数据中心 PUE 的重要组成部分，而水泵作为冷却水系统主要耗能设备，其与水系统的耦合直接关系能效水平：一方面，水泵功耗与转速三次幂成正比，采用变频器驱动并与系统需求耦合是节能关键；另一方面，水系统设计（如管道长度、弯头数量、阀门选型）若存在阻力过大问题，会迫使水泵在更高扬程下运行，导致能耗激增，因此优化水系统设计是节能核心；此外，多台水泵并联运行时，若无法处于最优工况点，同样会造成能耗上升。

在系统保护与安全联动层面，水泵运行状态是冷却输配系统健康的重要指标，其控制逻辑与系统安全深度耦合：水泵启动需与系统注水状态联动以实现干转保护，避免无水运行；寒冷地区水泵的运行与停止需与电伴热系统启动耦合，防止管道结冰；水泵出现过载等故障时，故障信号需即时上传至数据中心基础设施管理系统，触发报警并自动启用备用设备；同时，通过实时监控水泵振动、绕组温度、轴承温度等运行状态并开展有效分析，可提前预警设备运行风险。

4.2.3 数据中心泵关键性能参数

4.2.3.1 循环水泵技术原理与分类

泵是将电机机械能转化为液体能量的机械，可提升液体的位能、压能与动能（高速液流）。电机通过泵轴驱动叶轮旋转，对液体做功，液体经泵后获得的能量增量即为扬程，扬程通常以液柱高度（m）计量，且与介质密度无关。根据流体与机械的相互作用方式，水泵可分为容积式与叶片式：容积式泵中介质处于封闭且容积变化的工作腔，机械与流体间以静压力作用，不连续施加能量，如活塞泵、齿轮泵、螺杆泵等；叶片式泵的能量转换发生在带叶片的转子与连续绕流叶片的介质之间，以惯性力作用连续施加能量，是数据中心泵送系统的常用类型。介质在叶轮中的流动遵循流体力学原理，通常以比转速 n_s 划分泵类型，如公式（4.2-1）所示。

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (4.2-1)$$

式中： n_s ——比转速；

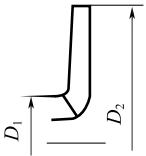
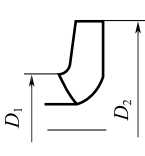
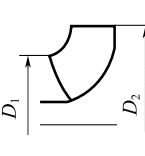
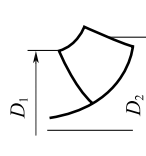
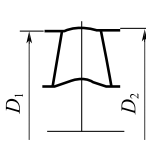
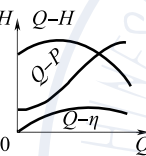
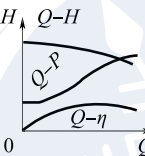
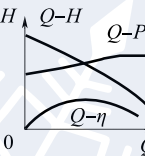
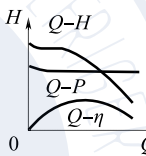
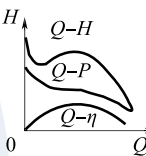
Q ——流量， m^3/h ；

H ——扬程，m；

n ——转速， r/min 。

表 4.2-1 对不同泵的特性曲线进行了总结。

表 4.2-1 不同泵的特性曲线

	离心泵			涡流泵	轴流泵
	低比转速	中比转速	高比转速		
比转速 n_s	$10 < n_s < 80$	$80 < n_s < 150$	$150 < n_s < 300$	$300 < n_s < 800$	$500 < n_s < 1500$
叶轮形状					
尺寸比 $\frac{D_2}{D_1}$	≈ 3	≈ 2.3	$\approx 1.8 \sim 1.4$	$\approx 1.2 \sim 1.1$	≈ 1
叶片形状	圆柱形叶片	入口处扭曲 出口处圆柱形	扭曲叶片	扭曲叶片	轴流泵翼型
特性曲线形状					

结合数据中心对液体流量及扬程的中等需求（比转速介于 $10 \sim 300$ ），其用泵需求属离心泵范畴。

按叶轮数量，离心泵可分为单级与多级离心泵：单级离心泵结构简单可靠（如图 4.2-1 所示）；当扬程要求较高时，单个叶轮需较大外径，易导致圆盘摩擦损失增加、性能不稳定，此时可采用多级泵（如图 4.2-2 所示），其通过单个小直径叶轮逐级增压达到所需扬程，适用于扬程较高且尺寸要求严苛的场景（如 CDU）。按叶轮对液体的吸入方式，离心泵可分为单吸式与双吸式：单吸式离心泵叶轮仅一个入口（如图 4.2-1 所示），转子系统简单，但部分不平衡轴向力需支撑系统承担，且流量需求增大时入口流速升高，会导致汽蚀性能急剧下降；双吸式叶轮通过增加入口面积降低叶片处流速以改善汽蚀（如图 4.2-3 所示），且叶片对称布置可平衡轴向力，适用于大流量、高抗蚀场景，但转子系统与泵壳设计更复杂。由于数据中心冷却循环系统多为闭式系统，对汽蚀要求不高，在满足性能需求的前提下选择单吸泵即可。

当前数据中心一次侧与二次侧用泵均以变频控制为标配，可根据负载调整泵转速，确保泵始终处于高效区以降低功耗。变频控制分为集成式与外置式：一体式变频器将变频控制集成于泵体，水泵与变频器作为整体安装，优点是参数匹配性好，缺点是若安装空间狭小则操作维护不便；分体式变频器将泵与外置变频器连接，变频器可置于便于操作的位置，优点是操作维护性好，缺点是与水泵的匹配性可能不足。二者在变频控制功能上无本质差异。



图 4.2-1 单级单吸泵



图 4.2-2 多级单吸泵



图 4.2-3 单级双吸泵

4.2.3.2 水泵流量-扬程曲线与系统装置曲线匹配

水泵特性曲线（如流量-扬程、功率-流量、效率-流量曲线）反映水泵自身性能（如图 4.2-4 所示），系统装置曲线反映管路系统在不同流量下的总阻力（即所需扬程），两者交点为水泵实际工作点，需满足系统压力与流量要求。水泵高效区通常为最高效率点的 90% 以上，选型时应确保系统工作点落在此区间内。数据中心冷却系统水泵分为一次侧与二次侧冷却循环水泵：一次侧水泵流量根据数据中心规模不同介于几百至一千多 m^3/h ，扬程范围 20~40m；二次侧水泵流量介于几至几百 m^3/h ，扬程范围 15~60m。选型时系统设计参数均需处于水泵设计的高效区范围内。

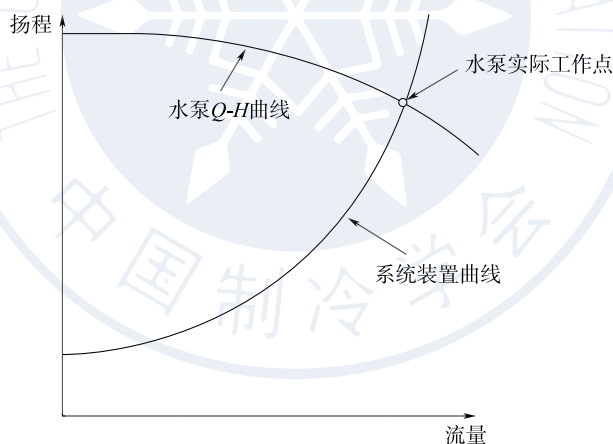


图 4.2-4 水泵流量、扬程特性曲线

4.2.3.3 能效要求

数据中心用泵应选用高效水泵，建议能效指标达到二级以上（依据 GB 19762—2025《离心泵能效限定值及能效等级》），且能效指标值 $\text{MEI} \geq 0.7$ ；配套电机同样需达到二级以上能效（异步电机依据 GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》，永磁同步电机依据 GB 30253—2024《永磁同步电动机能效限定值及能效等级》）；同时水泵与电机需满足变频控制和自适应调节要求，多泵并联运行时可根据负载变化自动调节，确保水泵始终处于高效区运行。

4.2.3.4 必需汽蚀余量 NPSHr 与装置汽蚀余量 NPSHa

汽蚀会对水泵造成多方面危害：机械层面会破坏过流部件，使叶轮、泵壳表面出现麻点、蜂窝状蚀坑，进而导致叶片变薄穿孔、泵体泄漏，破坏水力模型；性能层面会改变流道流场，导致扬程、流量、效率显著下降，严重时性能曲线陡降，引发出口压力与流量波动，使运行不稳定；运行层面会因气泡溃灭产生爆裂噪声（类似石子敲打泵壳）与高频冲击力，引发水泵及管路强烈振动；腐蚀层面会破坏金属表面保护性氧化膜，加速化学腐蚀，形成“汽蚀-腐蚀”协同恶化效应。

汽蚀余量（NPSH）是衡量泵入口处液体总水头超过汽化压力水头的富余能量参数（单位：m），用于防范汽蚀现象：NPSHr（必需汽蚀余量/泵汽蚀余量）由泵本身结构决定，数值越小则抗汽蚀性能越强；NPSHa（装置汽蚀余量/有效汽蚀余量）由安装条件决定，数值越大则装置越不易发生汽蚀。水泵选型时，为保障安全通常要求 $NPSHa \geq NPSHr + (0.5 \sim 1.0)m$ 的安全余量。

4.2.3.5 噪声与振动限值

水泵噪声需遵循国家标准 GB/T 29529—2013《泵的噪声测量与评价方法》，振动需遵循 GB/T 29531—2013《泵的振动测量与评价方法》，数据中心对水泵振动与噪声要求严格，其振动和噪声等级需达到 B 级以上。

4.2.3.6 可靠性指标

表 4.2-2 对水泵的可靠性指标进行了总结。

表 4.2-2 水泵的可靠性指标

水泵主要零部件		设计寿命
水泵核心部件	水泵泵壳	>10a
	水泵轴/叶轮	
电机核心部件	定转子绕组	>10a
	电机轴	
易损件	机械密封	$L_{10} > 20000h$
	电机轴承	$L_{10} > 20000h$

备注： L_{10} 指的是连续运转下零部件失效率达到 10%（可靠性 90%）时的额定寿命。

4.2.3.7 故障模型与影响分析

表 4.2-3 对水泵的故障模型与影响进行了总结。

表 4.2-3 水泵的故障模型与影响分析

故障模式	直接/局部影响	系统级影响 (冷却系统)	最终业务影响 (IT 设施)	常见原因与检测预防措施
1. 机械密封失效	冷却水/冷水泄漏；泵坑积水	系统失水需补水；水位过低可能导致泵汽蚀或停机；湿气可能影响其他电气设备	通常不会立即导致过热，但若冗余泵也未启动，则风险增加	原因：磨损、安装不当、干转
				检测：定期巡检、泵坑液位传感器
				预防：高质量密封、正确安装、避免干转

续表

故障模式	直接/局部影响	系统级影响 (冷却系统)	最终业务影响 (IT 设施)	常见原因与检测预防措施
2. 轴承故障	振动噪声加剧；温升过高；卡死	振动传递至管路；能耗增加；最终导致转子卡死，电机过载跳闸，泵完全停机	单泵故障，若冗余泵及时启动，无影响；否则冷却能力下降，水温攀升	原因：润滑不良、装配不当、疲劳、杂质侵入
				检测：振动分析、温度监测、听音棒
				预防：定期保养、使用合格油脂、保持清洁
3. 叶轮汽蚀/腐蚀	效率下降；振动噪声异常(带爆破声)	扬程和流量不足，无法克服系统阻力，导致末端设备流量不够	机房空调制冷效果下降，机柜进风温度升高，可能导致服务器过热保护关机	原因：NPSH _a < NPSH _r 、水质差(如 Cl ⁻ 离子腐蚀)、pH 值不当
				检测：噪声分析、性能监测(流量-扬程曲线)
				预防：正确的系统设计(确保 NPSH _a)、水质管理、选用耐腐蚀材料
4. 叶轮磨损/堵塞	效率下降；扬程和流量降低	同“汽蚀/腐蚀”，冷却能力无法满足设计需求	同“汽蚀/腐蚀”，机柜温度上升	原因：水质差、杂质多、管道内有焊渣等异物
				检测：性能监测、定期拆检
				预防：管道彻底冲洗、采用 Y 型过滤器并定期清理、水质管理
5. 电机故障	泵完全停止运行	该泵回路流量为零	依赖该泵的冷却回路失效。若冗余泵组自动启动，则影响消除；否则冷却系统容量急剧下降	原因：绕组烧毁(过载、缺相、绝缘老化)、轴承问题传导至电机、电压不稳
				检测：电流监测、电机绕组温度监测、绝缘测试
				预防：正确的电机选型(防护等级 IP54/IP55 以上)、电气保护(过载、缺相)、定期维护
6. 泵性能下降	效率缓慢降低，能耗缓慢增加	长期运行后，冷却系统始终处于“勉强满足”或“不满足”需求的状态	在高温天气或高负载时，冷却能力瓶颈显现，引发局部热点	原因：上述 2~4 点的缓慢累积
				检测：建立泵的基准性能曲线，定期对比运行数据(流量、扬程、电流)
				预防：预测性维护，而非等到坏了才修

4.2.3.8 其他水泵设计关键问题

随着液冷成为数据中心冷却主流，液冷水泵设计提出新要求：材料选择方面，水基

冷却液适配不锈钢（如 304、316L）以保障耐腐蚀性，氟化液/矿物油需选用高耐腐蚀材料（如镍基合金、钛合金）或 PVDF、PFA 等塑料涂层/全塑料泵，密封材料需匹配冷却液化学性质（水基溶液用橡胶密封，氟化液用 PTFE 或氟橡胶）；密封技术方面，机械密封为传统方式，但存在磨损与泄漏风险，需定期维护，磁力驱动通过磁场耦合传递扭矩实现动密封变静密封，屏蔽泵将电机转子与叶轮封装于冷却介质浸润的屏蔽套内，二者均无泄漏风险，适合高安全性需求场景，但成本较高且需防范退磁与涡流损耗。

此外，水泵需采用模块化设计，泵组、电机、控制器支持快速在线更换（热插拔）以缩短维护时间，同时配置 $N+1$ 冗余泵，主泵故障时备用泵需在 15s 内自动切换，配合智能监控系统确保冷却不间断；需集成振动、温度、压力等传感器实现预测性维护，实时监测设备健康状态；结构上需紧凑设计，尤其在机架内或 CDU 中部署的泵，以节省空间、提升部署密度；功能上需向集成化与智能化发展，将电机、变频器、传感器与智能控制单元整合为系统，而非独立部件。

4.2.4 泵与系统集成优化

4.2.4.1 水泵变频及并联优化控制

数据中心冷却与冷水泵的负荷随季节、昼夜变化显著，对流量调节精度要求较高。传统定速水泵需通过调节阀门或挡板开度控制流量，即使需求流量减小，电机仍保持全速运行，大量能量消耗于克服阀门阻力，系统效率极低；而采用变频控制可大幅提升系统能效，其核心原理在于水泵功耗与转速呈三次幂关系（功率 \propto 转速³）——若流量仅需额定值的 80%，转速同步降至 80%，此时功率需求仅为额定功率的 51.2%，节能效果突出；反之，转速轻微超速会导致功耗急剧上升，因此变频控制通过直接降低水泵转速调节流量，可同步大幅削减电机功耗。

此外，变频控制能实现平滑软启动以保护设备：一方面可消除启动冲击电流，工频启动时电机冲击电流可达额定值的 5~8 倍，对电网及配电设备造成冲击，而变频器能使电机从 0 转速缓慢启动，将启动电流控制在额定值的 1.2 倍以内，显著减轻电网负荷；另一方面可减少机械冲击，缓慢升速避免水泵与管道系统因突发转矩产生“水锤效应”，有效保护水泵叶轮、轴承、密封件及管道阀门，延长系统整体使用寿命。同时，变频控制可提升系统控制精度，在数据中心冷却系统中，变频器能精确控制电机转速实现流量无级调节，对需恒定流量、压力或温度的工艺过程至关重要，通过调节水泵流量维持供回水温差恒定，进一步强化高效节能效果。

在多台泵并联优化控制方面，变频水泵机组运行中常出现同一工况下“单泵高负荷运行”与“双泵低负荷运行”均满足需求的情况，为基于最低能耗确定水泵运行台数与频率，需对水泵效率曲线进行综合运算，制定最优并联运行方案。具体而言，水泵控制器内置水泵运行参数，同时通过通讯读取水泵压力、频率、功率等实时数据，系统结合现场工况与水泵运行曲线判断当前是否处于高效区，根据水量需求自动调节运行水泵的最优台数，确保系统能耗最低（如图 4.2-5 所示），其工作原理如下：当系统存在水量需求时，管路系统压力下降，管路出口传感器实时监控压力并传输信号至控制系统，当压力低于设定值时，系统先启动一台水泵；若该水泵通过转速调节可满足水量需求并稳定

压力至设定值，则保持单泵运行；若无法满足需求，已运行水泵将全速运转，若出口压力仍持续下降，系统会依次启动第二台、第三台水泵，直至满足水量需求、压力回升至设定值。

由于每台水泵均有最高效率点，流量超出该点后效率会逐步降低，因此当出口压力达到设定值且转速稳定、水量需求平衡时，系统会结合压力传感器反馈数据与控制器内置的水泵曲线公式，自动计算当前工况下不同台数水泵运行的功率，选择总功率最小的方案确定运行台数；若后续水量需求降低，系统维持恒压的同时会降低水泵转速，控制器实时监测水泵是否处于高效区，若发现运行效率低且减少水泵台数可满足当前流量需求，则逐台停止运行水泵，确保系统始终处于最低能耗状态。

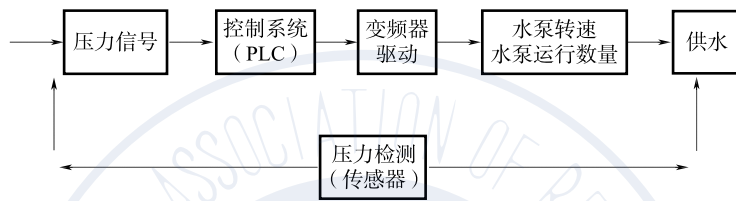


图 4.2-5 水泵控制器工作原理

4.2.4.2 数据中心预制水力模块解决方案

集装箱式数据中心冷却系统是数据中心基础设施向预制化、模块化、产品化演进的重要突破，其将传统需现场烦琐组装的大型制冷系统（含冷水机组、泵、管道、控制系统、配电单元等）高度集成于一个或多个加固的标准 ISO 集装箱内，在工厂完成预制制造、预安装与预测试，最终以完整“即插即用”“冷却工厂”的形态交付至项目现场。该模式从根本上颠覆了传统以土木工程为主的建设方式，为解决数据中心快速部署、能效提升、弹性扩展等核心挑战提供了高效解决方案。

集装箱式冷却系统并非单一技术，而是高度集成的系统架构，其中冷水式集装箱冷却站是最成熟且常见的集成形式（如图 4.2-6、4.2-7 所示），可将整个中央冷站的全部功能模块集成于箱体内，核心组件包括变频冷水机组、一次/二次泵组、定压补水装置、水处理系统、板式换热器（用于自由冷却）、配电系统、智能控制系统及全部连接管道与阀门。其工作流程为：箱内系统生产低温冷水（如 18℃/24℃），通过预制管道接口泵送至机房空调末端完成热量交换，再返回箱内冷却，形成闭环循环，该形式适用于中大型数据中心，具备容量大、能效高的特点，是替代传统机房中央冷站的理想选择；而在采用风冷冷却的数据中心中，冷却系统无需冷水机组与板式换热器，设计结构更简洁，应用同样广泛。此外，数据中心水处理系统（如图 4.2-8、4.2-9 所示）作为保障冷却系统水质安全稳定的关键辅助设施，也可预制成集装箱式专门模块，通常将加药系统、旁滤系统、反渗透系统、软化水系统等集成于同一集装箱，或根据系统需求分布至不同模块。

集装箱式冷却系统的价值远超物理形态，为数据中心运营商带来全方位收益。表 4.2-4 对集装箱式冷却系统的优势进行了总结。

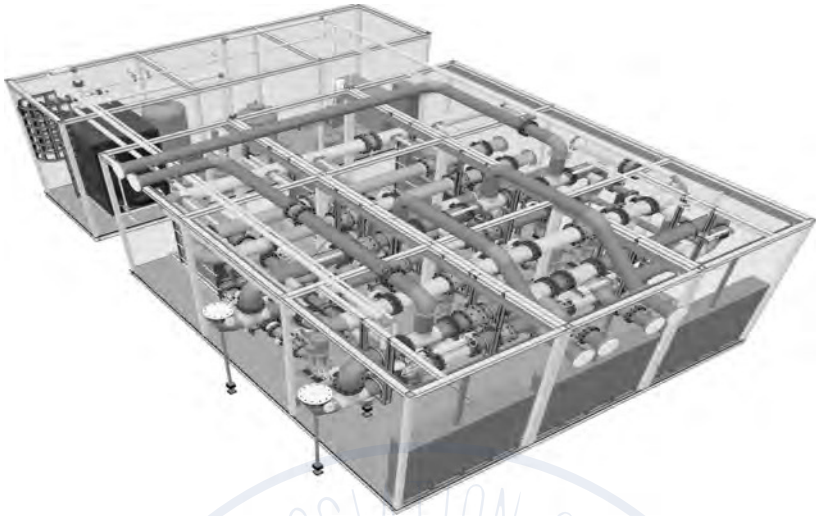


图 4.2-6 冷水式集装箱冷却站

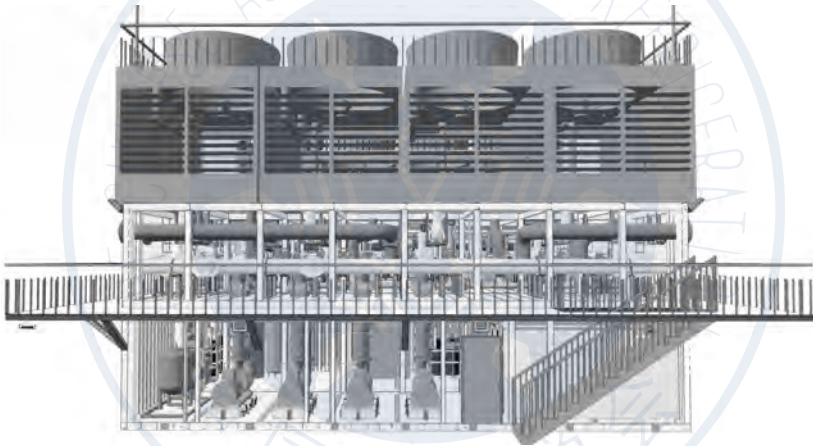


图 4.2-7 数据中心水力集成模块

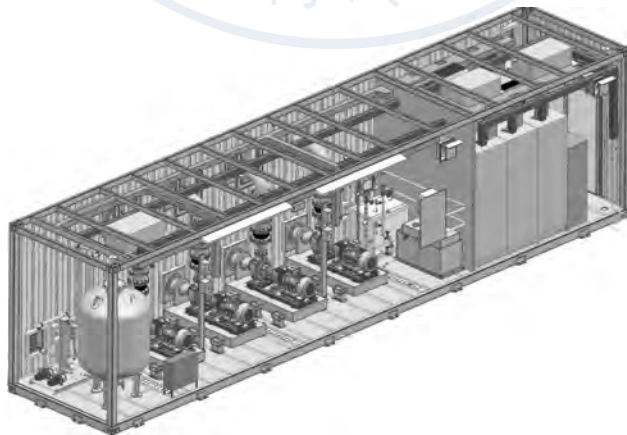


图 4.2-8 集装箱式水处理模块

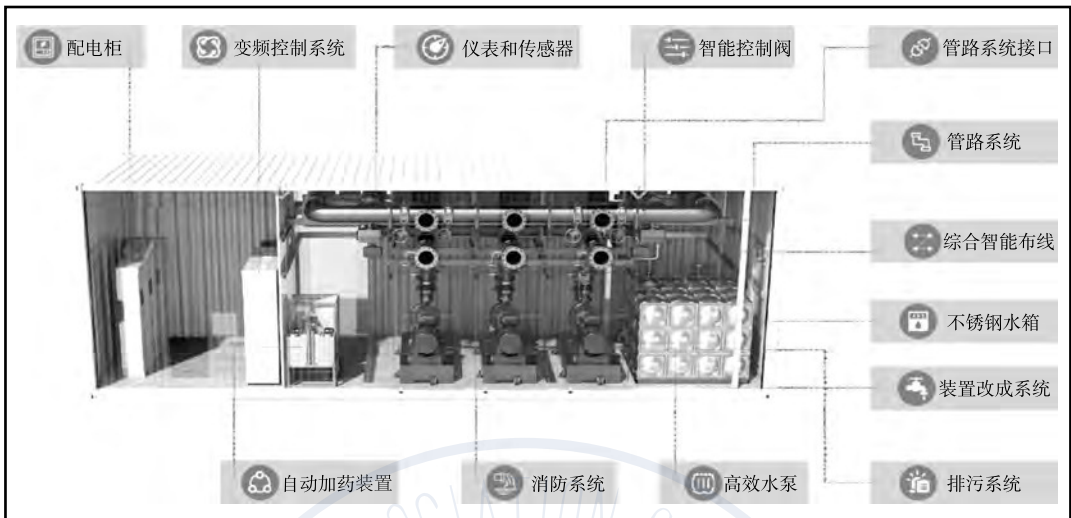


图 4.2-9 集装箱式水处理模块内部系统分布图

表 4.2-4 集装箱式冷却系统的优势

优势	具体体现与价值
极速部署	工厂与现场并行作业：基础施工与设备生产同步进行，将数月甚至一年的现场安装调试周期缩短至数周。现场仅需完成箱体吊装、就位以及水电接口的简单对接，极大加速业务上线速度
卓越能效与低 PUE	全局优化设计：工厂集成确保了各组件间的完美匹配，减少了能量传输损耗。集成板式换热器，充分利用自然冷却；采用变频驱动和 AI 智能控制算法，根据实时负载与室外气象条件动态调整运行状态，实现全年超低 PUE
无与伦比的灵活性与可扩展性	“乐高式”按需增长：数据中心初期可部署满足当前需求的冷却容量，未来随 IT 负载增长，直接增加新的集装箱冷却模块即可，实现无缝的、线性的容量扩展，完美匹配投资与业务增长
投资与成本确定性	总拥有成本（TCO）优化：初始投资结构清晰，避免了传统模式因现场施工变更、工期延误导致的成本超支。快速的部署速度意味着更早的业务收入，而超高的能效则直接转化为长期且巨大的运营电费节省
高可靠性与智能化运维	工厂测试保障：整套系统在出厂前经历严格的 FAT（工厂验收测试），模拟真实运行工况，提前发现并解决潜在问题，质量远胜于现场组装。内置 N+1 冗余、分布式架构避免单点故障。集成智能管理系统，支持远程监控、能效分析、预测性维护和无人值守

该系统典型应用场景包括：大型数据中心园区（作为集中制冷站模块化单元，分阶段建设降低初始投资风险）、模块化数据中心（MDC，与集装箱 IT 模块对应组成全模块化解决方案，适用于偏远或临时地点）、边缘数据中心（为 5G、IoT 等边缘计算提供标准化、无人化冷却保障）、老旧数据中心扩容改造（室外快速部署解决机房空间或冷却能力不足问题）、应急与灾备中心（具备快速部署与迁移能力，为灾难恢复提供临时

关键冷却支持)等。

在集装箱式冷却系统实施与实践过程中,需重点关注以下事项:场地规划环节,需提前规划箱体运输通道、安置区域、基础平台及与主机房的水路、电路连接路由;气候适应性方面,需选择与当地气候匹配的技术路线(如冷水式适用广泛,间接蒸发冷却在干燥地区效益更高);管路防冻措施上,寒冷地区室外管道需采用电伴热等防冻手段,并纳入监控系统;智能运维体系建设中,需搭建匹配的集中监控与管理平台,充分发挥系统智能化潜能,实现从“被动运维”向“预测性运维”的转型。

4.2.5 液冷系统 CDU 应用

随着数据中心发热密度持续增长,液冷技术逐步推广应用,CDU作为液冷系统的“心脏”与热管理中枢,是高效散热系统的刚需组件,在高算力场景中具有不可替代性。

当前 AI 大模型参数从万亿级向十万亿级跃进,驱动单机柜算力密度持续提升,以英伟达 GB300 为例,其算力较前代提升 50%,对应的散热需求同步激增;同时算力提升带动功耗增长,英伟达 GB300 芯片单卡功耗达 1400W,整机柜功率超 132kW,传统风冷在散热密度与能效上已逼近物理极限,无法满足高算力需求。据统计,全球数据中心单机柜平均功率 2023 年增至 12.8kW,预计 2026 年功率超 30kW(风冷极限)的机柜占比将达 29%。此外,“双碳”政策对数据中心能效提出明确要求,规定 2025 年新建大型数据中心 PUE \leq 1.25、枢纽节点 PUE \leq 1.2,而液冷技术可将 PUE 降至 1.1 以下,较风冷节能 30%以上,成为构建绿色数据中心的核​​心解决方案。当前主流液冷技术中,冷板式液冷通过冷板间接导热,兼容现有架构且改造成本低,是市场主流;浸没式与喷淋式液冷则通过直接接触散热,效率更高,但对成本与密封要求严苛,适用于超高密度场景(如 AI 训练集群)。

从核心功能与工作原理来看,CDU 首先承担循环动力源角色,其内置主循环泵(通常含冗余设计),为冷却液在封闭循环中的流动提供所需动力与压力。在流量分配与管理上,CDU 可将外部冷却源(干冷器、冷却塔或冷水机组)一次侧冷却水(或其他工质)的冷量,通过板式换热器等高效换热器传递给流向服务器的二次侧冷却液(去离子水、乙二醇水溶液或专用绝缘冷却液)——其中一次侧回路为热量排向环境的路径,二次侧回路为直接带走 IT 设备热量的路径,CDU 的核心作用是隔离一、二次侧,实现冷量交换且不混合工质,并精确控制二次侧的流量、温度与压力。温度控制方面,CDU 通过调节一、二次侧间旁通阀开度精确控制二次侧冷却液入口温度,同时借助变频泵调节转速以控制二次侧流量,间接影响温升与散热能力,此外还能维持二次侧回路压力稳定,确保支路流量均衡、防止汽蚀,并通过膨胀水箱或压力维持装置补偿液体体积变化。过滤与净化环节,CDU 可去除二次侧冷却液中的颗粒杂质,保护服务器冷板微通道及浸没槽内精密部件,同时去除溶解气体以避免高温低压区域形成气泡,还能监测并维持水基冷却液的电导率、pH 值等参数,防止腐蚀与结垢。监控与告警上,CDU 集成温度、压力、流量等多种传感器,实时监控运行状态,提供本地显示与远程通信接口(如 Modbus、BACnet、SNMP)以实现集中管理,异常时及时告警;可靠性设计上,泵、电源、控制器等关键部件通常采用 N+1 或 2N 冗余,确保单点故障时系统持续运行,满足数据中心高可用性需求。

在液冷系统中，CDU 的核心应用价值体现在以下七方面：

(1) 应对高密度散热挑战：可为单机柜功率密度超过风冷极限 ($>20\text{kW}$ ，甚至 100kW 以上) 的 AI 服务器、HPC (高性能计算) 集群、GPU 服务器有效散热，解决 CPU/GPU 等芯片 TDP (热设计功耗) 持续攀升 ($>400\text{W}$ ，甚至超过 700W) 带来的局部热点问题。

(2) 提升能源效率、降低 PUE：液体的比热容和导热系数远高于空气，散热效率更高；同时避免了传统风冷中大量用于驱动空气流动的服务器风扇与机房空调风扇功耗，使冷却系统整体能耗大幅降低，PUE 可降至 $1.1\sim 1.2$ 甚至更低 (接近理论极限 1.0)，显著节省电费。

(3) 降低机房噪声：消除高转速服务器风扇的轰鸣声，机房噪声可降低 $20\sim 35\text{dB}$ ，有效改善数据中心工作环境。

(4) 提高空间利用率：一方面允许部署更高密度的 IT 设备，另一方面减少或省去传统风冷所需的地板下送风空间、大型空调机组及风道占用空间，优化数据中心空间布局。

(5) 提升 IT 设备可靠性：通过更稳定、精确的温度控制，避免芯片因过热而降频或宕机；同时消除振动和灰尘对服务器内部组件的影响，为芯片提供结温 85°C 以下的最佳运行条件，延长设备使用寿命。

(6) 支持灵活部署与模块化：CDU 通常设计为机架式或独立柜式，便于在数据中心内灵活部署 (靠近机柜分散布置或集中布置)，且支持模块化扩展，能根据业务需求动态调整冷却容量。

(7) 适应多种液冷方案：在冷板式液冷中，为每个服务器的冷板提供稳定冷却液；在浸没式液冷 (单相/两相) 中，负责管理整个浸没槽的冷却液循环、温度控制与过滤净化，其中在两相浸没场景下，还额外承担蒸汽冷凝和回流控制的关键角色。

4.2.6 泵新兴技术与前沿技术

作为数据中心冷却系统的“心脏”，泵的效率与可靠性直接决定设施的 PUE、运营成本及稳定性，其技术的持续创新已成为推动数据中心向绿色化、高效化迈进的关键环节，核心技术发展呈现多维度趋势。

在核心技术创新层面，磁悬浮泵引领可靠性与高效性升级。该类型泵利用电磁力使叶轮完全悬浮，实现无物理接触、无润滑油运行：一方面消除机械摩擦与密封损耗，效率较传统泵提升 $10\%\sim 30\%$ ；另一方面因无磨损件，轴承理论寿命无限长，大幅降低维护需求与停机风险，且运行静音性优异，可显著改善工作环境。同时，磁悬浮泵通常集成变频驱动，能根据冷却负荷实时精确调节流量与扬程，有效规避过量泵送导致的能源浪费，当前尤其适用于大型数据中心的中央冷水循环系统。

智能化与物联网的深度融合，推动泵从孤立机械部件向智能数据节点转型。现代泵集成振动、温度、压力、泄漏检测等多种传感器，通过实时采集运行数据并结合 AI 算法分析，可实现状态监测与预测性维护，提前预警轴承磨损、汽蚀等潜在故障，支撑计划性维护以杜绝突发停机；数字孪生技术的应用则为物理泵构建虚拟模型，便于在数字空间开展模拟运行、优化策略测试及故障推演，为实际运营提供指导。最终，智能泵能

与冷水机组、冷却塔、阀门等冷却系统组件联动，由中央管理系统统一调度，实现系统级能效最优化。

新材料、新工艺与高效设计的协同发展，持续突破泵的能效边界。硬件层面，采用碳纤维、高性能工程塑料等轻质高强耐腐蚀材料制造叶轮及部件，可有效降低旋转惯性与能耗；借助 CFD 开展高效水力模型设计，能显著优化水力部件结构，减少能量损失。同时，变频驱动已成为高效泵的标准配置，通过调节电机转速精确匹配负荷需求，从根本上消除节流阀带来的能量损失，为精细化能源管理奠定基础。

在系统应用适配层面，泵技术正积极响应数据中心整体变革需求。一方面，为适应液冷技术变革，泵的应用场景从集中式向分布式转变：面对 AI、GPU 服务器带来的单机柜超 50kW 超高功率密度，液冷（冷板式、浸没式）成为必然选择，其中冷板式液冷需大量集成于 CDU 或机柜附近的小型、低扬程、高可靠性精密水泵，浸没式液冷则要求泵能循环单相或相变冷却液，并与绝缘冷却液具备优异兼容性与密封性，整体呈现从传统“大泵”向分布式“小泵”转型的趋势，对泵的紧凑性、可靠性及一致性提出更高要求。另一方面，为赋能模块化部署与热回收利用，冷却系统日趋模块化与预制化，要求泵及配套组件具备标准化接口与即插即用的智能化功能，便于工厂预集成；同时，随着数据中心废热回收（用于区域供暖、农业等）探索增多，作为循环关键部件的泵需在更高温度区间稳定运行，其材质与密封技术面临新挑战的同时也迎来发展机遇。

4.3 阀门与阀组特性

数据中心水系统是保障 IT 设备散热稳定的核心载体，而阀门作为流量控制、压力调节、回路切换的关键组件，其选型合理性、设计科学性与优化调节直接影响系统能效、运维效率及运行安全性。本节从阀门类型特性、阀组配置优化、智能阀门设计三个维度，系统梳理数据中心水系统阀门的技术要求与应用规范。

4.3.1 阀门类型与流量特性

4.3.1.1 阀门类型

数据中心水系统采用的阀门类型多样，每种阀门都有其独特的结构特点、性能优势和适用场景。根据其功能和控制方式，阀门主要分为关断类阀门和调节类阀门两大类。关断类阀门如闸阀、蝶阀、球阀等，主要用于管路介质的截断或接通。调节类阀门主要包括电动调节阀、平衡阀等，用于精确控制流量和压力。

(1) 闸阀

闸阀是指启闭件（闸板）由阀杆带动，沿阀座密封面作升降运动的关断类阀门^[1]。其核心特点是启闭件（闸板）的运动方向与流体的方向相垂直，如图 4.3-1 所示。闸阀在管路中主要作切断用，口径 \geq DN50mm 的切断装置多选用它，有时口径很小的切断装置也选用闸阀。闸阀有以下优点：①流体阻力小；②开闭所需外力较小；③介质的流向不受限制；④全开时，密封面受工作介质的冲蚀比截止阀小；⑤体形比较简单，铸造工艺性较好。闸阀也有一些缺点：①外形尺寸和开启高度都较大，安装所需空间较大；②开闭过程中，密封面间有相对摩擦，容易引起擦伤现象；③闸阀一般都有两个密封

面，给加工、研磨和维修增加一些困难。

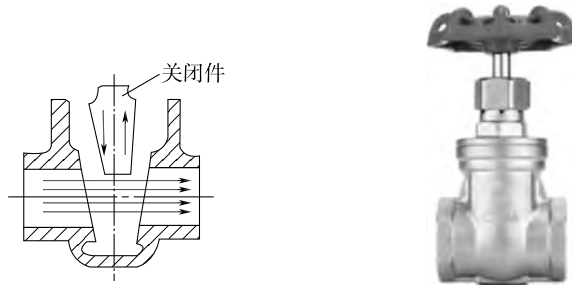


图 4.3-1 闸阀

(2) 蝶阀

蝶阀是启闭件（蝶板）绕固定轴旋转的关断类阀门。蝶阀主要由阀体、蝶板、阀杆、密封圈和执行机构等核心部件组成，如图 4.3-2 所示。蝶阀主要有以下特点：①结构简单，外形尺寸小，结构长度短，体积小，质量轻，适用于大口径的阀门；②全开时阀座通道有效流通面积较大，流体阻力较小；③启闭方便迅速，调节性能好；④启闭力矩较小，由于转轴两侧蝶板受介质作用基本相等，而产生转矩的方向相反，因而启闭较省力；⑤密封面材料一般采用橡胶、塑料，故低压密封性能好。

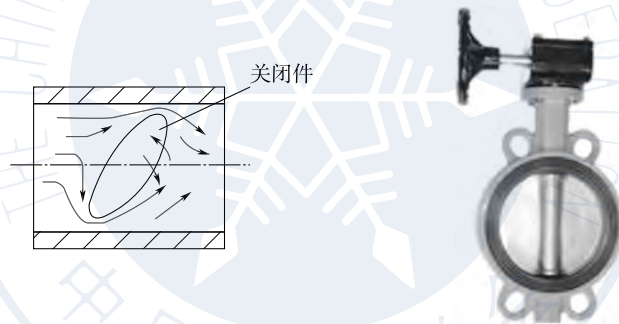


图 4.3-2 蝶阀

(3) 球阀

球阀是启闭件（球体）绕垂直于通路的轴线旋转运动的关断类阀门，如图 4.3-3 所示。球阀在管路中主要用来做切断、分配和改变介质的流动方向。它具有以下特点：①结构简单、体积小、质量轻，维修方便；②流体阻力小，紧密可靠，密封性能好；③操作方便，开闭迅速，便于远距离控制；④球体和阀座的密封面与介质隔离，不易引起阀门密封面的侵蚀；⑤适用范围广，口径从小到几毫米，大到几米，从高真空至高压压力都可应用。

(4) 电动调节阀

电动调节阀是数据中心水系统中实现精确流量控制和自动化运行的关键设备。它通过接收控制系统的信号来调整阀门开度，从而实现对流体介质的流量、压力、温度等参数的精确调节。

电动调节阀由电动执行机构和阀体两部分组成，如图 4.3-4 所示。电动执行机构负责接收控制信号并转换为机械运动，而阀体则直接与流体接触，通过改变流通面积来调



图 4.3-3 球阀

节流量。空调水系统中常用的电动调节阀主要有电动蝶阀、电动调节球阀和电动二通阀等。电动蝶阀通常用于需要比较频繁进行通断的场合，例如冷水机组、冷却塔进出水管路，部分配合压差控制器、压差传感器，作为电子压差旁通阀使用。电动调节球阀一般用于换热器或末端空调机组，通过调节对应的开度来控制流量实现对换热量的控制。电动二通阀一般安装于水冷机房空调末端回水管路，对进入水冷机房空调末端的水流进行通断控制，一般配合温控器使用，由室内温控器控制阀门关闭和开启，使室温始终保持在温控设定的温度范围内。



图 4.3-4 电动调节阀

电动调节阀具有以下特点。

① 精确控制能力：电动调节阀可以接收 $4\sim 20\text{mA}$ 或 $0\sim 10\text{V}$ 的模拟量信号，实现连续无级调节，精确控制阀门开度，从而准确控制管道中介质的流量。

② 反馈功能：高质量的电动调节阀通常配备阀位反馈信号（ $4\sim 20\text{mA}$ 或 $0\sim 10\text{V}$ ），可以实时将阀门开度信息传送给控制系统，实现闭环控制。

③ 节能效果：通过精确控制流量，电动调节阀可以使制冷机组及水泵在节能状态下运行，节省运行维护费用。特别是在变流量系统中，电动调节阀能够根据实际负荷需求调整流量，避免能源浪费。

④ 智能通讯能力：现代智能型电动调节阀（如智慧能量阀）支持 Modbus RTU 协议与 RS485 通讯模式，可接入楼宇自控系统（BAS）或云端平台，实现远程监控、故

障预警与数据分析。

(5) 平衡阀

平衡阀是数据中心水系统中用于水力平衡调节的重要装置，通过手动或自动方式调节阀门阻力，使水系统各支路的流量分配符合设定要求，解决冷热不均问题。平衡阀主要分为两大类：静态平衡阀和动态平衡阀。

① 静态平衡阀

通过改变阀芯与阀座的间隙（开度），调整阀门的流通能力来改变流经阀门的流动阻力以达到精确调节流量的目的，解决系统静态水力失调问题，其结构如图 4.3-5 所示，通常为 Y 型结构设计。由于系统在设计上无法满足使得每个末端的总阻力都相等，但系统又只能选择一台水泵，那么势必会出现某些末端需求阻力无法被满足，而静态平衡阀则可以很好地弥补这个问题，使得加上静态平衡阀的阻力后每个末端的总阻力都相同，从而实现静态平衡。静态平衡阀具有低阻力、全流量、流量稳定易调节的特点，且具备锁定记忆功能，防止水流冲击以及人为误操作而影响原有调节流量值。



图 4.3-5 静态平衡阀

在数据中心水系统中，静态平衡阀可以安装于立管、水平支管或者末端支路中。单独使用时，一般装于回水管；配合压差阀使用时，安装于供水管，保证系统中各个管路的流量与设计流量一致。如图 4.3-6 所示，在系统回水立管和回水水平管处安装了静态平衡阀。

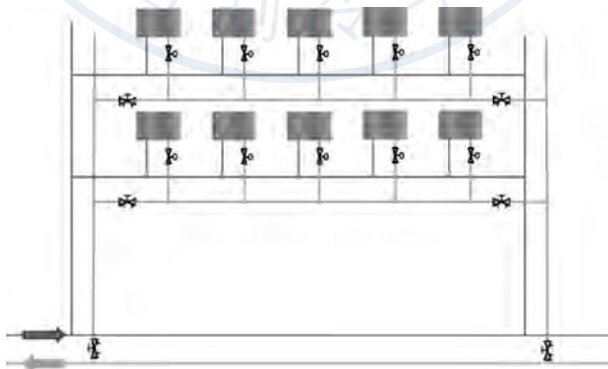


图 4.3-6 系统分支管路处安装静态平衡阀示例

② 动态平衡阀

用于解决系统运行过程中，末端流量调节存在相互干扰的情况，通常应用于末端设

备平衡，如在精密空调的支管处设置动态平衡阀，以保证水系统的水力平衡。主要分为动态压差平衡阀、动态流量平衡阀和动态平衡电动调节阀（也叫一体阀）。

动态压差平衡阀可以保持控制环路压差恒定不变，结构如图 4.3-7 所示。其依靠自身高低压气室压力变化改变阀门开度，自动恒定压差，无需外部动力源；具有长行程的调节弹簧，压差调节范围大、压差调节性能优良。动态压差平衡阀一般配合静态平衡阀使用，安装于回水管，根据被控压差端，选择导压管安装的合适位置。末端使用时，若装于调节阀的进口处，可单独控制调节阀的压差，使调节阀的阀权度最大。若装于静态平衡阀的出口，可以控制整个末端设备的压差；支管使用时，可以保持整个支管的压差恒定。动态压差平衡阀在空调水系统中的应用如图 4.3-8 所示。



图 4.3-7 动态压差平衡阀



图 4.3-8 系统末端设备支管处安装动态压差平衡阀示例

动态流量平衡阀用于在正常工作压差范围内自动恒定流量，其体积小、质量轻、节省空间，通过精密的过流孔设计，流量误差可以达 $\pm 5\%$ 范围内，结构如图 4.3-9 所示。

动态平衡电动调节阀是集动态压差平衡阀、电动调节阀的功能于一体的阀门，也叫一体阀，可根据调节部位信号，自动控制阀门的开度，从而达到介质流量、压力的调节，相当于在电动调节阀的两端设置了一个恒压装置，保证电动调节阀两端的压差恒定，从而保证它不会因系统压力波动而改变流量。其具有压差控制范围大、流量调节精度高、节能性高、阀门行程自适应等特点，可避免调节动作时相关干扰，如图 4.3-10 所示。通常装于末端设备处替代原有的电动调节阀，不能装于支管或立管上，如图 4.3-11 所示。



图 4.3-9 动态流量平衡阀



图 4.3-10 动态平衡电动调节阀（一体阀）

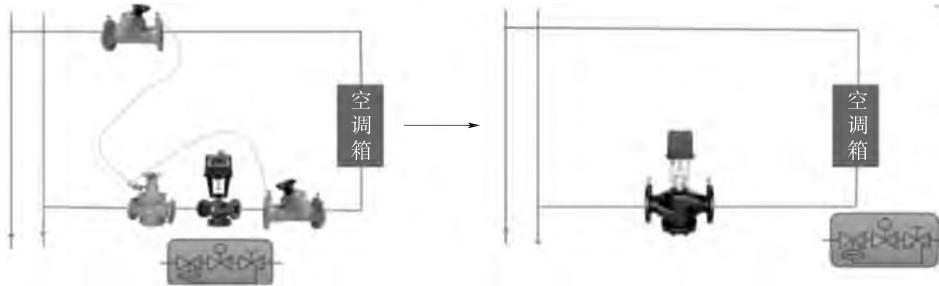


图 4.3-11 系统末端设备处安装一体阀示例

静态平衡阀与动态平衡阀的特性对比如表 4.3-1 所示。

表 4.3-1 静态平衡阀与动态平衡阀的特性对比

特性	静态平衡阀	动态平衡阀
调节方式	手动调节	自动调节
控制原理	改变阀芯与阀座间隙	自力式或智能控制
是否需要外部动力	否	是
精度	依赖手动调节精度	较高
成本	较低	较高
适用系统	一般用于定流量系统	一般用于变流量系统

4.3.1.2 阀门流量特性

流量特性曲线是反映阀门阀芯开度与通过流量之间关系的核心指标，它描述了阀门调节流体流量的能力和行为方式。流量特性由公式 (4.3-1) 计算。

$$\frac{G}{G_{\max}} = f\left(\frac{l}{L}\right) \quad (4.3-1)$$

式中： $\frac{G}{G_{\max}}$ ——相对流量，是调节阀在某一开度时的流量与阀门全开时的流量之比；

$\frac{l}{L}$ ——相对开度，是调节阀在某一开度时的行程与阀门全开时的行程之比。

在数据中心水系统中，阀门流量特性的选择直接影响到冷却效果的精确控制、系统稳定性和能源效率。从工程应用角度，阀门流量特性可分为理想流量特性和工作流量特性。理想流量特性是指在阀门前后压差固定不变的情况下，流量与开度之间的关系；而工作流量特性则考虑了实际管道系统中压力变化的影响，反映了阀门在真实工况下的性能表现，其可以通过阀门的阀权度来调节。

阀门流量特性主要有四种理想类型：

(1) 直线特性：单位行程变化引起的流量变化相等。流量小时，流量的相对变化大，不易微调与控制；而流量大时，流量的相对变化小，不易反应，易导致调节的不灵敏，适用于调节负荷变化不大、精度要求不高的系统中。

(2) 等百分比特性（对数特性）：单位行程变化引起流量变化的百分率相等，适用于负荷变化较大的场景中。

(3) 抛物线特性：流量特性是一条二次抛物线，特性介于直线与等百分比特性之间，适用于冷、热水的三通调节。

(4) 快开特性：在小开度时就有较大流量，随开度增大流量迅速达到最大。适用于双位调节或程序控制中。

目前，在暖通空调水系统中主要采用的是直线流量特性和等百分比流量特性。如图 4.3-12和图 4.3-13 所示。

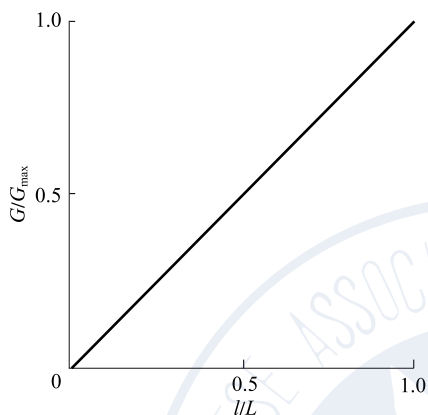


图 4.3-12 理想的直线流量特性曲线

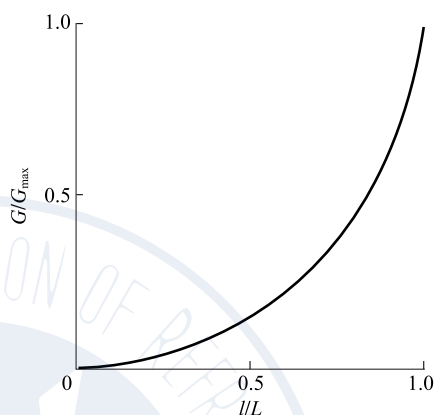


图 4.3-13 理想的等百分比流量特性曲线

4.3.2 调节阀选择方法与阀组优化调节

4.3.2.1 电动调节阀的选择

在电动调节阀选择时，首先要选择合适的流量特性，使其与被调对象相适应。如图 4.3-14 所示，末端设备需要快速地把冷量传递出去，因此就需要它在小开度的情况下有较大的流量增长，其曲线就是一条上凸的曲线。而自控系统需要的是线性的控制特性，因此就要求电动调节阀的特性是一条下凹的等百分比特性曲线。

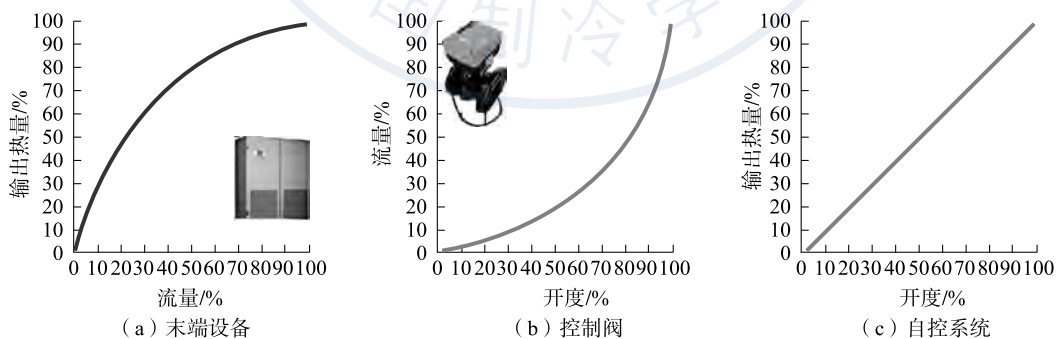


图 4.3-14 末端设备、控制阀、自控系统的特性曲线示例

在空调水系统实际运行中，调节阀前后的压差、换热器的压降都是时刻在变化的，如当水泵频率不变、调节阀关小过程中，阀门两端的压差会增加，阀门的特性曲线随着它两端压差的增大会慢慢向上扭曲，从而导致自控系统的不稳定。因此需采用阀权度 S

对其流量特性进行修正。采用公式 (4.3-2) 对阀权度进行计算。

$$S = \frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P} \quad (4.3-2)$$

式中： ΔP_{\min} ——调节阀全开时的压力损失，Pa；

ΔP ——调节阀所在串联支路的总压力损失，Pa。

式 (4.3-2) 中，分子为调节阀选型完成后在设计流量下全开时的压降，而分母则是一个变量，其最小值是调节阀所在回路的资用压头（此时的 S 为设计阀权度），最大值为水泵扬程（此时的 S 为最小阀权度）。如图 4.3-15 所示， $\Delta P_v = 10\text{kPa}$ ， $\Delta H = 40\text{kPa}$ ，水泵扬程为 320kPa ，则此处调节阀的设计阀权度为 0.25，最小阀权度为 0.03。

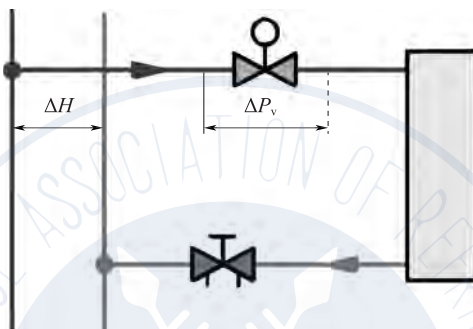


图 4.3-15 调节阀与换热器串联的调节系统

阀权度的大小意味着调节阀流量特性曲线向上突出的程度，从图 4.3-16 可以看出，0.25 是可以接受的最小阀权度，它对整个自控系统没有帮助但也没有危害。因此定义控制阀的最小阀权度为 0.25。由于最小阀权度是在系统仅剩一个末端运行时该回路控制阀的阀权度，这样的极端情况很少发生，因此常用调节阀的设计阀权度作为选型的依据，其值取 0.5。

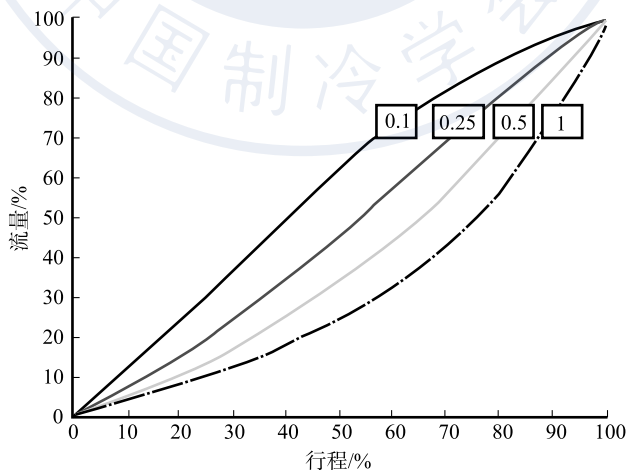


图 4.3-16 调节阀不同阀权度下的流量特性曲线

电动调节阀的口径大小应根据它的流通能力来选择（流通能力为当调节阀全开，阀

两端压差 $\Delta P=10^5$ Pa, 流体密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 时, 每小时流经调节阀的流量, 以 m^3/h 或 t/h 计, 用符号 K_v 来表示), 而非按照接管管径直接选型。首先, 根据设计阀权度为 0.5 的原则确定调节阀前后的最小压差, 再计算出调节阀在开度最大时所需要的流通能力 K_v , 然后查询阀门样本中满足这一流通能力 K_v 阀门的口径。

假设有一个精密空调的末端压降为 50kPa , 其设计流量值为 $14\text{m}^3/\text{h}$, 管径为 $\text{DN}80\text{mm}$ 。根据设计阀权度为 0.5 的原则, 此时调节阀两端压降也为 50kPa 。根据公式 (4.3-3) 可以计算出调节阀所需的 K_v 值。

$$K_v=10q\sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4.3-3)$$

式中: K_v ——调节阀的流通能力, m^3/h ;

q ——通过调节阀的流量, m^3/h ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

ΔP ——调节阀两端的压差, Pa。

根据公式计算得到电动调节阀的 K_v 值为 $19.8\text{m}^3/\text{h}$ 。根据计算得到的 K_v 值, 可以查询调节阀厂家的样本手册选择阀门。由于调节阀的 K_v 值是根据雷诺数 (是流体力学中表征流体流动状态的无量纲数, 定义为惯性力与黏性力的比值, 用于区分层流和湍流) 来设计的, 因此各个口径之间的 K_v 值是非连续的, 当 K_v 值为 $19.8\text{m}^3/\text{h}$ 时, 可以在表 4.3-2 中选择 $\text{DN}25\text{mm}$ 或 $\text{DN}32\text{mm}$ 的调节阀。

表 4.3-2 调节阀不同口径对应的 K_v 值

型号	口径/mm	$K_v/(\text{m}^3/\text{h})$
W-ECBV2015C* -25T	15	6.3
W-ECBV2020C* -25T	20	10
W-ECBV2025C* -25T	25	16
W-ECBV2032C* -25T	32	25
W-ECBV2040C* -25T	40	32
W-ECBV2050C* -25T	50	50

如果选择 $\text{DN}25\text{mm}$ 的调节阀, 此时对应的阀门压降为 76.56kPa , 阀权度得到了保证。但如果这个调节阀是用在最不利回路的, 则水泵扬程也会相应增加。倘若选择 $\text{DN}32\text{mm}$ 的调节阀, 此时对应的阀门压降为 31.36kPa , 设计阀权度为 0.38, 在系统运行过程中可能会出现阀权度小于 0.25 的情况, 使得控制变得不稳定。

而很多工程设计情况下设计师按照同管道管径选型, 选择 $\text{DN}80\text{mm}$ 的调节阀, 此时其压降值仅为 1.96kPa , 对应阀权度为 0.038, 系统控制会变得极其不稳定。因此, 调节阀的选型需要考虑设计流量和末端的压降值, 而不可直接根据管径来选择阀门口径。总结电动调节阀的选型过程为: 确定阀权度→确定阀前后最小压差→计算流通能力 K_v →根据 K_v 值查阀门口径^[12]。

电动调节阀通过上述选型方法, 比直接按管道管径选型得到了较好的调节性能, 但无法完全按照计算得到的 K_v 值来进行选型, 随着系统的运行, 会出现偏离系统设计流

量的情况。此时，可以在末端精密空调箱的供回水管之间安装动态压差平衡阀及静态平衡阀的阀组，保持末端压差恒定，如图 4.3-17 所示。

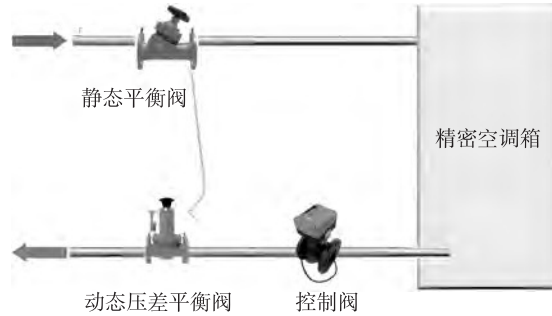


图 4.3-17 精密空调箱供回水管之间安装动态压差平衡阀及静态平衡阀示例

如图 4.3-18 所示，从动态压差平衡阀的内部结构可以看出，它可以吸收外部的干扰，保证系统供回水之间的压差处在恒定的状态，不会受其末端运行的影响。静态平衡阀装在供水管上，用于连接毛细管及测量流量，动态压差平衡阀装在回水管上。上游的压力 P_1 通过毛细管导到动态压差平衡阀膜片的上方，下游的压力 P_2 导到膜片的下方， P_1 和 P_2 之间的差值就是末端精密空调和控制阀的压降值，即控制阀阀权度的分母。 P_1 和 P_2 之间的差值等于动态压差平衡阀里弹簧的弹力值，当系统的资用压头 ΔH 增大时，多余的压降被动态压差平衡阀吸收掉，维持 P_1 和 P_2 的差值恒定不变，从而使得末端精密空调和控制阀不会受到系统的影响。

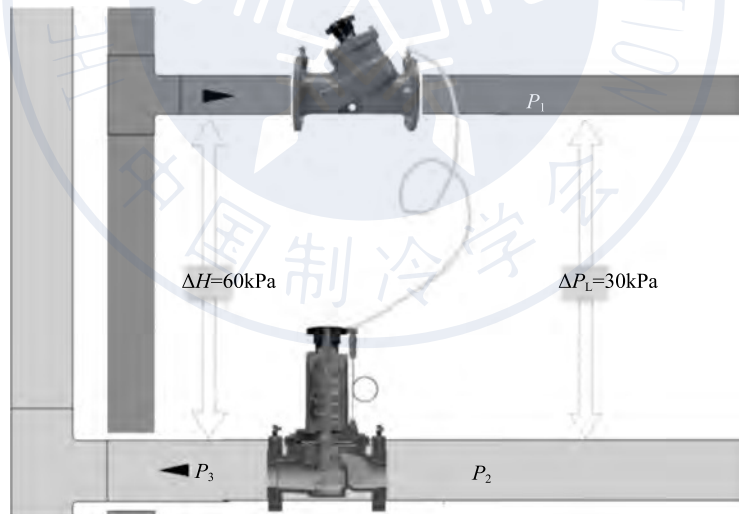


图 4.3-18 精密空调箱动态压差平衡阀和静态平衡阀工作原理

4.3.2.2 阀组优化调节

数据中心水系统的流量调节、压力平衡、故障隔离等需依赖多阀门组成的“阀组”实现，阀组配置需结合系统拓扑（如串联/并联回路）、控制目标（如流量分配、压力保护）设计，核心在于通过阀门协同提升系统调节精度与运行可靠性。

阀组调节在数据中心冷水空调系统中的典型应用方案如下。

(1) 冷源侧：在制冷机冷水进水管上安装静态平衡阀，根据制冷机的制冷能力来调节分配冷水的流量比例，以及在冷水集水器的回水管上安装静态平衡阀，用来根据各区域不同的负荷来分配流量；或是在制冷机冷水进水管安装动态流量平衡阀，根据制冷机的制冷能力来定制流量，以及在分、集水器之间安装动态压差平衡阀，用于保持分、集水器之间的压差恒定。如图 4.3-19 所示。

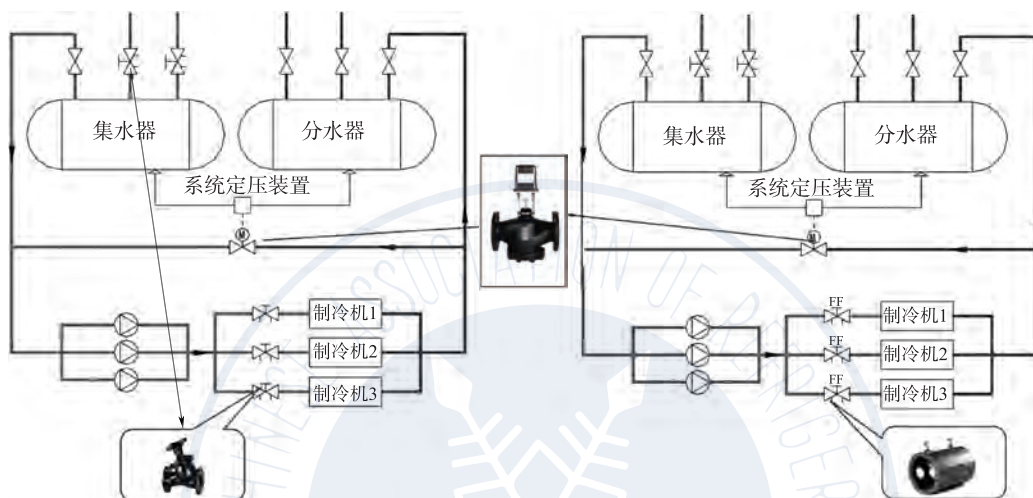


图 4.3-19 数据中心空调系统冷源侧阀组典型应用方案

(2) 末端侧：如图 4.3-20 所示，在数据中心机房末端，有一组多台空调箱（空气处理机）并联环路（图中只画出两路）。每路通过动态平衡电动阀来调节目标区域的回风温度，其中区域一的设定温度为 25°C ，区域二的设定温度为 27°C 。假定处于夏季工况，区域一已调至平衡状态，即目标区域的温度 T_1 已稳定在 25°C ，这时动态平衡电动阀的开度维持在某一位置保持不变，以输出一个恒定的流量。区域二还处于不稳定状态，测量回风温度 T_2 为 24°C ，低于设定温度 27°C ，这时测量温度会和设定温度在温度控制器进行比较，输出信号将动态平衡电动阀关小以减少流过空气处理机 2 的冷水量，这时制冷量会减少，使测量温度 T_2 升高，接近设定温度，同时，系统立管 C、D 两点的压差会增大，空气处理机 1 环路动态平衡电动阀 DV1 两端 C、B1 两点的压差也相应增大。但是由于动态平衡电动阀的动态平衡功能（动态平衡阀芯 PV1 的定压差作用），该阀电动调节阀芯两端 A1、B1 点的压差并不发生变化，因此空气处理机 1 环路的流量维持不变，制冷量不变，相应的区域一仍处于平衡状态。

4.3.3 智能控制阀的设计

随着数据中心智能化、自动化、精细化运维的趋势，传统阀门逐步向“感知-通讯-决策-执行”一体化的智能阀门升级，核心是通过集成传感器、通讯模块、智能算法，实现阀门状态实时监测、远程控制、故障预测，降低人工运维成本，提升系统可靠性。

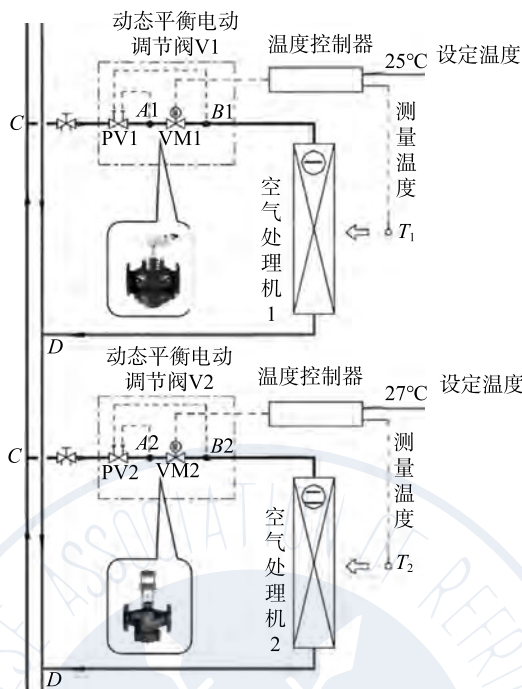


图 4.3-20 数据中心空调系统末端侧阀组典型应用方案

智能控制阀是通过能量计实时采集系统中的流体参数，如流量、温度、压力等，智能执行器则根据这些数据对调节球阀进行精准操控，从而实现对中央空调、采暖等系统中流体的智能化管理。通过各类传感器捕捉的信息，经过内部智能算法处理，转化为对阀门开度的调节指令，确保系统按照设定的参数稳定运行，达到高效节能的控制效果。

智能控制阀相比传统阀门具备以下优势：

(1) 在应用角度上，智能控制阀打破了传统阀门无法了解真实状况的缺陷。传统阀门对于开关的真实状态、平衡阀的平衡功能是否实现、管路系统的流量能否达到设计与控制需求并不能明确的获知，只能通过实际效果进行分析与反推。而智能控制阀通过直接读取阀门内的供回水温度、流量、压力等参数并予以计算分析，可以有效实现水路系统的透明化，了解管路中的各类状态，真正实现了管路的参数透明可视化与参数化。

(2) 通信技术上，打破了传统阀门单一的控制模式，融合了电压、电流等模拟量输入反馈、多种数字协议以及蓝牙连接等多种通信方式，实现了与不同设备的无缝对接，为智能化系统集成提供了极大便利。

(3) 在故障处理与保护机制上，采用了自动故障诊断与报警技术，能快速定位故障并提供相关信息，便于维修；过载保护功能则有效避免了电机因异物卡住而烧毁，延长了设备使用寿命。此外，手动操作设计与高等级防护的结合，既保证了特殊情况下的应急操作，又使设备能在恶劣环境中稳定工作，体现了设计的全面性和创新性。

以某智能控制阀产品为例，该产品由三大核心部分组成：能量计、智能执行器和执行元件。能量计负责对流体的流量、温度、热量等关键参数进行监测与计量，为系统控制提供精准的数据依据；调节球阀作为执行元件，根据智能执行器的指令改变开度，从

而调节流体的流量等参数，其材质和结构根据不同通径规格进行优化，以适应不同的工作环境；智能执行器是整个阀门的“大脑”，接收能量计传来的数据，通过内置的智能控制算法发出控制指令，同时具备通信、故障诊断等多种功能，协调各部分协同工作。

该智能控制阀具有以下亮点：

(1) 控制功能丰富，涵盖开度、流量、能量、回水温度、温差等多种控制方式，压差控制可选配，能满足不同系统的控制需求。

(2) 产品功能多样，能实现普通电动球阀与座阀的阀位控制，还能进行最大流量设定，完成静态平衡，也可以进行流量控制，实现动态流量平衡功能，同时能够读取管路中的温度、流量、热量、压力等参数，一个产品多种功能，同时替代热表+电动阀门+静态平衡阀+动态平衡阀+一体式动态平衡电动调节阀等产品组合，是一款多合一的智能化阀门产品。

(3) 数据反馈与存储功能完善，就地和远程均可读取开度、流量、温度等各类信息，并能按设定周期存储相关数据，便于后期分析。

(4) 在通信方面，支持模拟量通讯、多种主流协议（Modbus-RTU、BACnet-MS/TP、CJ188）与上位机对接，还可通过蓝牙与 Android 手机连接，适配性极强。此外，具备自动故障诊断报警、过载保护功能，当阀门出现故障或被异物卡住时，能及时响应并采取保护措施；电动部分瘫痪时，可通过手动摇柄操作，保障系统基本运行。

(5) 智能控制算法上，能够根据不同的控制目标（如流量、能量、温差等）自动调整阀门运行状态，且支持多种控制特性曲线的选择，可根据系统实际需求灵活配置，大大提高了控制的精准度和适应性。

4.4 输配系统运行调优

4.4.1 制冷系统及流体仿真

数据中心的制冷系统，无论采用哪种形式，必定存在环境→冷源→输送→末端→服务器的多个循环，这些循环通过流体进行换热，带走热量，保持系统平稳运行，不发生热失控。而流体介质就是承载冷（或者热）进行输送和分配的载体，其可以为液态、气态或者气液混合态的物质，最常用的是水、空气、氟利昂等，少量使用油或者其他化学物质。

由于流体的物理特性和工程实际使用的习惯，目前行业还仅处于“简单运用来追求最终结果”的水平，一般只关注与结果相关的表征数据，例如循环风系统的进出风温度和气流速度，水系统的压力、温度、流量等基本参数，很少再深入对流体研究，并且流体约束在管道或其他空间很难观测，于是在流体方面一般采用定性或粗糙定量的方式，几乎不能采取精确定量的模式进行采样和管理。

同时，由于数据中心系统庞大且各子系统相互耦合，数据均具有相关性，容易造成子系统分析过于片面，例如在机房级的热仿真时只进行局部的模拟，不会与大冷源系统进行关联，很容易发生仿真的孤点性和静态性，与实际应用偏差较大，无法为运行管理提供最有效的保障。

仿真主要包括制冷系统仿真、空气流体仿真和液流体仿真几类，在不同场景下需要

协同联动仿真。为了确保仿真模型的科学性，需要通过现场测试和历史运行数据对模型进行校准与验证，并明确能效评价指标，用于评价不同策略的效果。仿真既可为运营阶段的 AI 节能优化控制提供验证环境，亦可为设计阶段提供优化指导。

4.4.1.1 制冷系统仿真

(1) 制冷系统的复杂性

① 构架的多样性：数据中心供电构架基本趋同，但冷源的构架差异很大，尤其是管路，世界上几乎找不到一模一样的冷源系统。

② 用户需求的差异：用户的 SLA 要求存在一定的差异，在送水温度、温差等要求上，会存在不同。

③ 环境的多样性：由于地理位置的差异和逐年气候变化，外界环境一直处于动态变化中，而冷源系统的运行受气候的影响非常大。

④ 运行风格的差异：偏安全性的运行会将余量放大，偏节能的运行又会逼近临界点，其运行的实际情况差异会很大。

(2) 系统级仿真的目的和意义

① 提供系统可视化：真实反映系统的全貌，将抽象数据可视化，便于快速了解系统的构架及各子系统的逻辑关系，以及当前各器件的运行状态（如图 4.4-1 所示），例如压力、温度、流量、平衡度等，通过简单数据表方式呈现，与图形化和系统化的展示相比，人的感知是不同的。

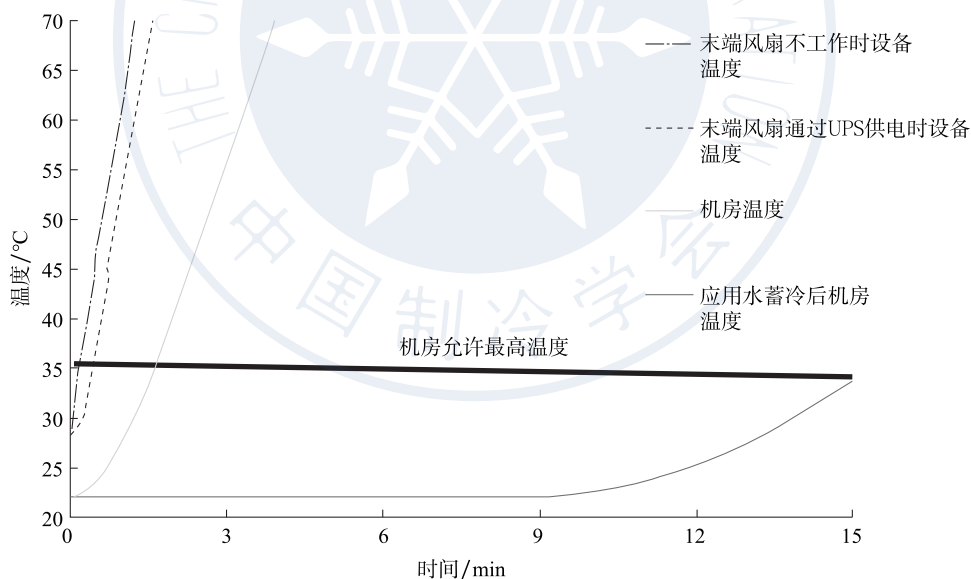


图 4.4-1 数据中心供冷故障时机房及服务器温升仿真模拟

② 预测系统行为：在未实际构建系统前或者不能轻易改变的系統，通过模型预测其特性、性能及演化趋势，辅助优化设计方案或控制策略。

③ 探索复杂系统规律：数据中心是一个庞大系统，IT 侧电力消耗决定了主要发热量，末端的散热与仿真是一个孤立的系统，而冷源侧又形成一个独立系统，室外环境又是一个孤立系统，将各领域的数据打通关联，形成相互关系并在时间维度上进行平衡，

是最科学和真实的。对多变量交互的混沌系统，通过多次仿真揭示统计规律与关键影响因素，辅助决策。

④ 替代高风险实验：针对高风险或不可逆的实际系统，仿真提供安全的虚拟试验环境，避免事故或不可控风险。例如失冷模拟，现实中不可能通过真实操作取得经验数据。

(3) 系统级仿真的实施

空调系统仿真聚焦于设备和系统内部的流体动力与换热过程，通过构建冷水机组、冷却塔、水泵、末端空调等核心设备的机理模型以及系统模型，能够精确模拟制冷剂循环、冷却水流动、空气换热等物理现象，量化设备在不同负荷、流量、温度参数下的能耗特性与换热效率。例如，针对冷水机组，仿真可解析压缩机转速、蒸发温度、冷凝温度与制冷性能系数 COP 的关联和影响；对于冷却塔，能模拟不同风量、水温、湿度之间的耦合关系。仿真模型应进一步考虑建筑负荷、IT 设备散热负荷以及人员行为对系统的影响，保证模型输入完备；模型输出不仅包括能耗，还应结合环境舒适度和设备安全指标。空调系统仿真可为 AI 节能算法提供不同控制参数下设备和系统的运行和能耗情况，验证和迭代控制算法，支撑运营阶段的节能优化。此外，通过模拟不同冷水机组、冷却塔、水泵等设备组合下的空调系统全年运行情况，可为设备的设计选型及系统配置提供参考。具体仿真实施过程如下。

① 搭建系统构架：对于一个数据中心的制冷系统，必须搭建从室外环境开始直到服务器的全流程构架，且能表明所有设备之间的逻辑关系。有多个系统的，需要分别搭建，例如某数据中心建有左右两个制冷系统，就应建立两个仿真系统，如果再复杂一点，两个水冷系统在楼层中有相互搭接的情形，也应在系统构架中表达。

② 系统的可拆分：由于系统可分解成孤立的子系统，在实际应用中存在只需要关注局部的场景，例如只分析水冷系统的冷却部分，此时应采取的方法是：忽略整体，放大局部，细化数据，能够提供子系统的精确分析。

③ 稳态计算与动态计算：目前大部分仿真基于既定参数进行稳态计算与模拟，但实际运行一直处于动态平衡中，将稳态仿真作为一个瞬态点并加时间切片，形成长时间的动态仿真成为重要需求。

④ 注重节点与细节：例如在水冷系统中，除冷却塔、冷水机组、水泵、末端空调等关键设备需要相关参数外，对于阀门、过滤器、水处理、放气装置等，均应有采样与数据表达。

⑤ 外部信息：制冷系统具有自我调节能力，很多设备会根据自身采样数据进行调节，但往往滞后。与制冷系统最密切相关的外部信息是环境和服务器运行情况，能够最快获取环境变化情况及各颗粒度的用电情况，对于系统提前预判非常重要。

⑥ 管理相关：管理与系统运行的关系为有输入、有输出。制冷系统对管理的输出，常见的有制冷负载系数（Cooling Load Factor, CLF）、分项能耗、单项参数波动分析、告警时其他相关参数等。制冷系统获取管理相关信息有益的场景有，机房服务器上下架信息、周期维护作业计划、质保信息、用水量等。这些输入与输出的功能不断扩展强化，对系统运行辅助价值很大。

(4) 系统级仿真的应用案例

项目位置：新加坡，常年气温 31.5℃。

项目业主：世界顶级托管数据中心运营商，新加坡 Green Mark 认证白金用户。

项目背景：5.5 MW 数据中心，冷站 COP 优化前为 3.92，通过 AI 推荐冷水机组供水温度和冷水泵流量设定，优化后 COP 达到 4.76。

应用情况：实际系统上线一年，相比历史策略实现冷站节能约 134MW·h，减少电费约 200 万元人民币，减少碳排放约 600t。

4.4.1.2 空气流体仿真

(1) 空气流体仿真的目的和意义

用户机房是产生数据中心价值的核心所在，随着功率密度不断提高，其风险也随之加大。虽然目前智算数据中心已经开始商用且有液冷部署，但目前大部分机房为风冷，而且预测在未来很长一段时间风冷依旧为主导，以下重点讨论风冷，兼顾液冷。

① 提供气流可视化：将与服务器最直接的环境（冷却）情况，从简单的点数据表现为可视的立体模型，更直观地审视温度及流场。

② 发现异常：能够最简单地发现高温区域，也能发现过冷区域，为解决气流平衡问题提供基础信息。

③ 风险实验：对变更或冷却故障提供模拟，更科学地预知风险的极限，避免以教训方式形成经验。

(2) 空气流体仿真的实施

空调流体仿真着眼于整个数据中心机房环境的物理场模拟，通过将服务器集群、机柜布局、空调送回风方式等要素转化为三维流场模型，仿真可直观呈现机房内空气流速、温度梯度、热积聚区域等关键信息。根据使用场景不同，气流组织仿真可分为两类：第一类为传统 CFD 仿真，通过前处理、求解器和后处理，实现不同工况下的机房空间的物理场模拟，仿真精度高但仿真时间较长，可用于气流组织的设计优化。例如，CFD 仿真能识别因机柜排列不合理导致的局部过热，或因送风口风速分布不均造成的冷量浪费，为机房设计提供优化方向；第二类为 AI-CFD 仿真，通过人工智能模型学习不同工况下的 CFD 仿真数据，构建 AI-CFD 智能代理模型，在保障物理场预测精度的前提下，缩短预测时间，支撑运行阶段的实时控制优化。例如，通过实时预测机房局部“热点”分布，动态调整末端空调送风量，使冷量精准匹配服务器散热需求，减少过度制冷现象。除此之外，在气流组织仿真中还应考虑机房封闭程度、送风路径、回风短路等复杂场景，以及对仿真结果进行实验验证，以指导气流控制策略。

两类仿真技术的结合，可为冷却系统设计和 AI 优化运行控制搭建“微观机理-宏观环境”的全维度认知框架：空调系统机理提供设备能耗的量化规律，气流组织仿真揭示空间热环境的分布特征。两类仿真需要在相同的时间步长和接口参数下耦合，并通过验证确保耦合精度；同时，仿真结果的实实验证是不可或缺的一环。

① 空间资源建模：将独立服务器机房作为单体进行建模，附加以机架 U 位（1U=44.45mm）作为最小颗粒度资源，进行唯一编码，为气流场仿真提供基础。

② 热源建模：机房热量主要来自服务器电耗发热以及墙体热传递，在高密度情况下建筑热可以忽略或者用估算法简化处理。热量的计量，大部分采用服务器定值法，但精确的方法应该是关联列头柜（小母线）分路计量。热量的数量和位置模型越精准，冷却仿真就越真实。

③ 气流仿真：基于流体力学方程（如纳维-斯托克斯方程）及热力耦合进行离散化求解，模拟气流速度、压力、温度等参数的时空分布。展现方式为立体或切面图（如图 4.4-2 所示），能细化连续的流场或温度场，温度偏差为 1°C ，仿真准确度达到 85% 以上。



图 4.4-2 机房 CFD 模拟图

④ 运用场景：设计阶段的预测、运维阶段的可视查询以及排除故障、变更阶段的预演、优化阶段的调优^[13]，均可作为使用场景。

详细内容参照第 3 章中 CFD 气流模拟相关介绍。

4.4.1.3 液流体仿真

液体流动载冷或换热，在传统水冷系统中非常通用，在液冷系统中一般也是如此。由于在应用层将其简化成均质均流，默认为比较简单，所以深度研究较少。但随着应用的增多，结合一些发生的疑难问题，液流仿真的进一步研究成为必要。

① 数据的系统性：冷源侧从简单模型上看，是提供连续、符合使用需求参数的介质冷水，包括温度、压力、流量。这些参数的符合或者更优，仅满足了系统的安全性，但不一定满足节能性。

② 异常情况：水流在管道或设备中聚集气体发生气塞情况，会导致水流中断、系统效率下降或设备损坏的问题。输送管道中，因阀门突然启闭、水泵骤停或启动等操作导致流体流速急剧变化，引发压力剧烈波动，正水锤的冲击爆管、负水锤的局部瘪塌（如图 4.4-3 所示），都可能产生重大危害。这些问题是否会发生、危害程度等，需要仿真进行验证。



图 4.4-3 某数据中心蓄冷罐负压吸瘪

③ 水阻问题：在降低 PUE 指标的极致压力下，某些数据中心已经将 CLF 降低至 0.15，在冷水制冷系统中，水泵能耗约占空调系统总能耗的 20%~30%。而水泵能耗与管路阻力密切相关，建模仿真系统阻力（如图 4.4-4 所示），对于系统优化从而降低能耗，非常有益。

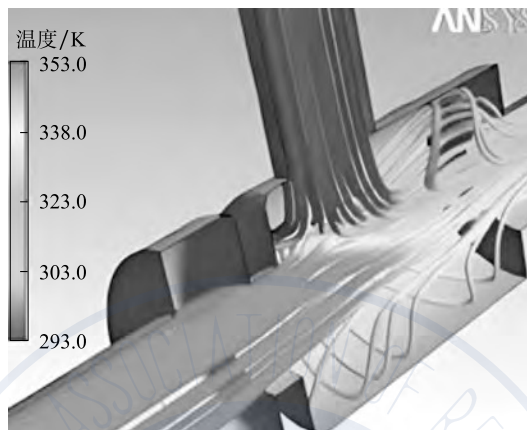


图 4.4-4 管路三通局部液流仿真

④ 流量平衡问题：由于管路的复杂性，任何液流系统都不可能做到绝对均流。但所有末端都是以流量指标作为最关键的运行指标，为保证最不利末端的流量，系统只能加大流量，导致大部分设备流量过盈，这可能会造成很大的浪费。目前还没有成熟的仿真系统能够清晰反映全面流量状态，为调优提供基础，实现精准流量控制。

⑤ 热惰性问题：由于液体比热容远大于气体，造成水系统的热惰性比较大。从冷水机组侧看，远端已经出现过冷或过热的情况，通过水体传递到冷水机组传感器需要时间，待冷水机组感应时可能已经失控。所以三维空间的数据仿真还不能满足要求，需要加入时间维度。瞬态过程计算的模拟时间应远低于实际场景发生的时间，使模拟计算具有使用价值。

⑥ 换热密度极限：随着超算的应用，每机架功率达到 100~130kW，Rubin Ultra 甚至可以达到 600kW，一个 15~20MW 的数据中心压缩到仅 1000m² 的空间内。依赖单相冷却液显热交换^[14]，热流密度上限范围约为 170W/cm²，利用相变液冷，实验室理论验证最高值达 1000W/cm²，在实际应用中往往连一半都很难实现，突破这一高热流瓶颈，传统经验已经失效，仿真流阻、热阻、均温等成为有效手段。

4.4.2 空调系统 AI 调优策略

4.4.2.1 AI 调优技术

(1) 技术流程

冷却系统 AI 调优技术，通过人工智能技术对水冷、风冷和液冷等数据中心冷却系统的运行策略进行优化，对冷源和末端设备进行精细化和智能化控制，降低 PUE，提升全局能效并保障算力服务稳定。AI 调优主要由三个过程组成，分别为数据采集、AI 决策以及控制执行，如图 4.4-5 所示。

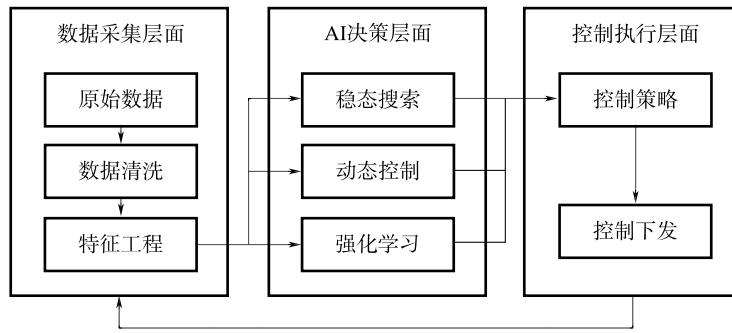


图 4.4-5 调优系统流程

① 数据采集层面：通过对 BA 和动环系统的对接，采集系统运行数据，对异常数据进行清洗、异常值检测、缺失值完善以及特征参数优化，保障 AI 调优数据端的可靠可信，供 AI 优化模型进行分析决策。同时要重视传感器的校准与时间同步、数据安全与隐私保护，确保数据来源可靠；可建立实时异常数据预警机制，供运维人员及时干预。

② AI 决策层面：实时分析运行数据，可根据用户需求和系统热惯性差异，优化 AI 节能优化控制间隔；在决策目标方面应综合考虑能效、热安全和设备可靠性等多目标优化，结合模型约束，预留人工干预和故障应急策略；在优化周期内，AI 节能算法可结合物理约束和安全边界，智能分析和计算当前负荷下的安全和节能优化控制策略。

③ 控制执行层面：AI 节能算法可将计算得到的冷水机组出水温度等运行和设定参数的优化建议，结合专家经验，选择手动下发控制，或下发 BA 自动控制等方式，实现完整的 AI 调优系统的控制闭环。在控制执行过程中，应设置设备安全上限和下限，提供人工复核或紧急切换到传统控制模式的能力，以防止 AI 决策失效或硬件故障；同时还需评估控制指令的执行延迟对节能效果的影响。

(2) 优化控制方法

冷却系统 AI 调优技术的优化控制方法（AI 决策层面核心技术），依据是否依赖预设物理模型及控制逻辑的动态性，主要可划分为有模型的稳态搜索、有模型的动态控制和无模型的强化学习三种核心路线，每种路线在适用场景与优化效果上各有侧重。

① 有模型的稳态搜索：以系统机理模型或仿真模型为基础，聚焦于在稳定工况下寻找全局最优参数组合。其核心逻辑是：基于冷水机组能效曲线、冷却塔逼近度模型、机房气流分布 CFD 仿真等预设模型，将冷却系统的可控参数（如冷水出水温度、水泵流量、风机转速等）作为变量，通过智能优化算法（如遗传算法、粒子群优化）或动态规划方法在参数约束范围内进行全局优化搜索或求解，最终输出一组能使系统效率最高或 PUE 最低且满足 IT 散热需求的稳态参数。这种路线的优势在于计算过程可解释性强，能充分利用已知的物理规律规避无效搜索，但对模型精度依赖较高，且难以应对负荷快速波动的动态场景。此外，该方法需要对模型进行定期校准，因设备老化和环境变化（设备维护等）可能导致模型偏差；优化结果应通过仿真或试运行验证其可行性，并确保优化范围不突破设备安全运行极限。

② 有模型的动态控制：在稳态搜索的基础上引入时间维度，通过模型预测与反馈调节实现动态适应性优化，以模型为预测核心，结合 BA 和动环系统采集的实时数据

(如服务器实时功耗、室外温湿度),对未来一段时间内(如15min)的系统状态进行滚动预测,并根据预测结果生成动态控制策略。例如,当预测到某区域服务器即将因任务调度出现负荷激增时,系统可提前通过模型计算调整该区域空调送风量与冷水流量,避免“负荷突变-温度超标-紧急加冷”的被动控制。常用的动态控制模型如模型预测控制算法,通过“预测-优化-执行-反馈”的闭环机制,在保证系统稳定性的同时,实现动态工况下的事前响应和能效优化。实施动态控制需要较高的计算资源,并需与服务器负载预测模型以及气象预测数据结合,才能获得准确的控制前瞻性;同时应建立算法失效时的回退策略。该路线兼顾了模型的物理约束与实时性需求,但模型复杂度与计算成本较高,对硬件算力有一定要求。

③ 无模型的强化学习:可摆脱对预设物理模型的依赖,通过智能体与环境的持续交互自主学习优化策略。其核心是将控制参数(如阀门开度、设备启停)视为“动作”,将系统能耗、SLA与温度达标率等因素的综合评价作为“奖励”,让智能体在不断试错中学习“动作-奖励”的映射关系,最终形成最优控制策略。这种路线的优势在于无需精确建模,能适应未知干扰与系统动态变化,但训练过程需大量数据或者仿真训练支撑,为了保障运行安全,可利用数字孪生环境进行离线训练,并通过引入安全探索机制与奖惩设计,使智能体遵守设备运行边界;在实际部署前还应由工程师进行充分测试和逐步放权。且控制策略的可解释性较弱,在实际应用中需与安全约束机制结合以避免控制风险。

上述三种技术路线并非相互替代,而是能够协同互补:稳态搜索为系统提供基础最优参考点,动态控制负责应对中短期负荷波动,强化学习则可在模型未覆盖的复杂场景中挖掘潜在优化空间,共同推动冷却系统向更高能效水平演进。实践中可根据负荷和设备特性选择组合应用,以兼顾可解释性与灵活性。

(3) AI调优与BA动环的关系

在数据中心冷却系统的智能化管控体系中,BA系统、动环系统与AI调优平台构建了一种“基础执行与智能决策”相协同的层级架构(如图4.4-6所示),共同保障系统的高效与稳定运行。

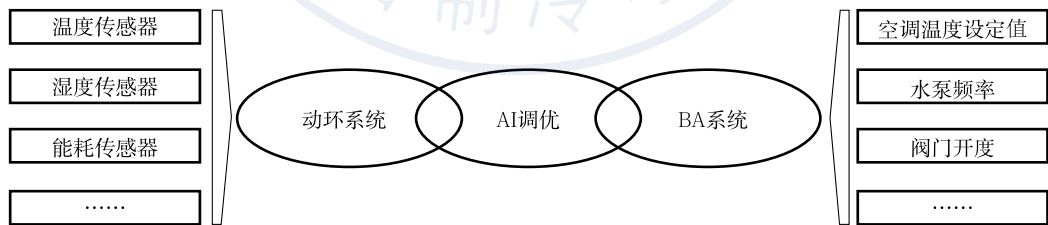


图 4.4-6 BA 系统、动环系统与 AI 调优的关系

BA系统和动环系统作为传统智能化系统的核心,承担冷却系统实时监控的关键职能,依托部署于冷水机组、冷却塔、水泵、风机及阀门等设备的传感器,持续采集温度、压力、流量与能耗等多类数据,并基于预设控制逻辑(如PID算法)实现对设备的启停、调速与阀门开度调节等操作,保障系统基础稳定性。该类“感知-响应”机制构成了系统可靠运行的基础,然而受限于其固定控制策略,难以有效应对负荷快速变化及

多参数耦合的复杂工况，同时传统系统之间通信协议不统一和数据颗粒度不够也限制了深度优化。

AI 调优技术则依托 BA 及动环系统作为实时数据接口与指令执行载体，致力于实现系统层面的精细化节能与动态优化。一方面，AI 调优技术汇聚并分析由 BA 及动环系统监测的运行数据（包括区域温度场、设备能耗等），深入挖掘系统运行规律与参数间隐含关系（如 IT 负载与制冷量的动态匹配机制）；另一方面，AI 调优形成的优化策略，如冷水机组协同运行方案、送风风速精细化设定等，需经由 BA 系统转化为实际设备控制信号，实现从智能决策到精准执行的闭环管理。需要通过标准化协议（如 BACnet、Modbus）和数据集成平台实现互联互通，并实施网络安全措施防止数据泄露；此外，AI 调优的推广需要运维人员理解算法原理、掌握系统操作，建立人机协同机制，确保决策的透明性和可审计性。

该协同架构的价值在于：BA 系统确保了系统稳定运行的基本目标，而 AI 调优技术则在此基础上致力于实现最优运行的高阶目标。例如，BA 系统可将机房整体温度维持在常规安全区间，AI 调优技术则能够依据实时负载与 AI-CFD 预测数据，动态调整控制策略，在局部高热区域允许温度短期上浮（在设备允差范围内），并相应降低低温区域冷量输出，实现分区域差异化和精细化调控，在保障安全的前提下进一步提升能效。BA 系统、动环系统与 AI 调优技术的有机结合，使得数据中心冷却系统既具备扎实可靠的基础控制能力，又赋予其智能优化的决策能力，两者协同发挥节能增效作用。

4.4.2.2 技术趋势和挑战

数据中心冷却系统调优技术始终遵循从单一到融合、从经验驱动到智能驱动的演进路径。第一代机理白盒模型，依赖物理公式与专家知识构建，具备良好的可解释性，但在复杂多变场景中的适应性有限；第二代纯数据驱动的黑盒模型，借助机器学习与深度学习技术挖掘运行数据中的隐含规律，却因缺乏物理机理支撑，存在可解释性差与泛化能力不足的局限；第三代机理与 AI 融合模型，引入强化学习、迁移学习等方法协同冷却系统的物理拓扑、能源机理，提升了 AI 调优技术的泛化与决策能力。

结合技术发展趋势，未来第四代 AI 调优技术可能会深度融合机理与大模型技术，整合能耗、温湿度、设备状态、运维文本和图像信息等多模态数据，通过整合负荷预测、故障诊断和优化控制等技术和任务模型，实现大模型赋能的多模态、多任务协同的 AI 调优技术路线。AI 调优技术应用场景也将不断由通算（水冷和风冷）向智算场景（风液同源、纯液冷）适配发展，该领域技术体系将朝着系统性、精准化和高度智能化方向发展。

AI 调优技术仍面临诸多挑战。在技术层面，物理机理与 AI 模型的深度融合尚未成熟，如何将领域知识有效嵌入模型结构、防止“黑盒”决策偏离物理约束，是提升系统可靠性的关键。数据层面，多源异构数据的标准化采集、高质量标注及安全流通仍存在屏障，设备接口不一、隐私与合规要求进一步提高数据治理复杂度。在工程实践中，AI 模型部署对实时算力与响应延迟提出更高要求，现有基础设施的硬件改造与协议适配需投入成本。此外，还存在算法可解释性、鲁棒性和公平性不足的问题，需要制定行业标准和评估体系，使不同厂商的系统能够互联互通；政策法规对数据安全和能效指标的要求也需要在 AI 调优设计中充分考虑。

4.5 本章小结

本章系统梳理了数据中心输配系统的形式与优化设计，涵盖了管网系统、泵与泵组特性、阀门与阀组特性，以及运行调优策略。输配系统作为连接冷源与末端的关键环节，其设计质量直接影响数据中心的能效、可靠性与可扩展性。管网系统的合理布局、冗余设计与水力优化是保障系统稳定运行的基础，而泵组与阀门的精确选型、智能控制与系统集成，则为实现高效、精准的冷量输配提供了技术支撑。随着 AI 调优、流体仿真与数字孪生等技术的引入，输配系统正从传统的经验驱动向数据驱动与智能化运维转型，显著提升了系统在动态负载下的适应能力与整体能效水平。

未来数据中心输配系统的发展将更加注重智能化、集成化与绿色化。一方面，随着液冷技术的普及与算力密度的持续攀升，输配系统需进一步优化以适应高密度、低 PUE 的散热需求，尤其是在冷板与浸没式液冷场景中，CDU 与精密泵阀的控制精度与可靠性将成为关键。另一方面，AI 与物联网技术的深度融合将推动“感知-决策-执行”一体化系统的成熟，实现从设备级优化到系统级协同的跨越。模块化与预制化设计亦将加速数据中心的快速部署与弹性扩展。此外，随着政策对能效要求的不断提高，输配系统的节能潜力仍有待进一步挖掘，特别是在自然冷却、动态冗余与多能互补等方向。未来，随着数字孪生与大模型技术的应用深化，数据中心输配系统有望实现全生命周期的精准预测与自主优化，为绿色、高效、可靠的数据基础设施提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 彭殿贞. 绿色数据中心空调设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 暖通南社. 数据中心典型水冷制冷系统与优化 [EB/OL]. (2025-04-08) [2025-08-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/OFiopM7p8JOZy5enV6o1xQ>.
- [4] IDC 暖通设施运维. 数据中心冷水系统全透视: 从核心组成到闭式/开式循环、一级/二级泵系统 [EB/OL]. (2025-08-09) [2025-08-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ctk7KH3kZf-xnHrT4Fk2qw>.
- [5] 科闻汽车. 数据中心水系统管路架构设计分析 [EB/OL]. (2024-09-05) [2025-08-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/uTKTAvm74OEU1gFXCSE4rQ>.
- [6] 暖通南社. 中央空调水系统基础 [EB/OL]. (2024-10-08) [2025-08-21]. https://mp.weixin.qq.com/s/tpWu-VGfne7C_kzy5ljgSA.
- [7] 趣享探索家. IT 机柜设计. 数据中心冷冻水系统的分类 [EB/OL]. (2021-09-29) [2025-08-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/8p2Vsozl9ljqpbqk2ICw>.
- [8] 腾讯数据中心. 一次泵 VS 二次泵系统, 究竟孰优孰劣? [EB/OL]. (2017-03-10) [2025-08-21]. <https://mp.weixin.qq.com/s/aak1MeFZEQgvqaLlGljQQQ>.
- [9] 珀蒂琼, 杨国荣, 胡仰耆, 等. 全面水力平衡: 暖通空调水力系统设计与应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] 中国电子工程设计院. 数据中心设计规范: GB 50174—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

- [11] 王泽青. Tier3 数据中心末端冷冻水环路最不利维护点讨论 [J]. 洁净与空调技术, 2018 (1): 81-83.
- [12] 赵文成. 中央空调节能及自控系统设计 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [13] 胡孝俊, 许俊, 邓程, 等. 结合 CFD 的数据中心空调末端节能方法研究 [J]. 邮电设计技术, 2025 (5): 82-86.
- [14] 严劲, 景焕强, 张子鹭, 等. 数据中心液冷散热技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30 (6): 84-91.



第5章 末端与输配系统产品

在数字经济与人工智能迅猛发展的今天，数据中心作为支撑算力基础设施的核心载体，其冷却系统的创新与优化显得尤为关键。本章聚焦于数据中心末端与输配系统产品的技术突破与应用实践，介绍 10 款兼具创新性与实用性的产品。这些产品不仅代表了行业在能效提升、可靠性增强及模块化部署方面的最新成果，也为构建下一代绿色、智能、高可用数据中心提供了坚实的技术支撑。

5.1 风水混合末端

5.1.1 产品介绍

水氟双冷源行间空调为双盘管水冷直接膨胀式空调机组，具备两套制冷循环，机组包含氟盘管和水盘管两个独立盘管，将冷水系统和压缩机制冷系统有机结合，可根据不同水温、不同负荷进行智能切换控制，具有三种运行模式：机械制冷、混合预冷、自然冷却。可与液冷 CDU 共用冷源，实现液冷云舱风液比无级调节，满足多元化业务的应用场景，适配服务器未来发展和智算中心的大规模部署。

当冷源供水温度高于机组进风温度时，设备运行在机械制冷模式，压缩机开启；随着冷源供水温度降低，机组进风先经过水盘管进行预冷，不足的冷量由机械制冷系统承担，压缩机变频运行；当冷源供水温度满足完全利用自然冷源供冷时，压缩机机械制冷系统停止运行，热量完全通过水盘管换热由冷却水带走，运行原理如图 5.1-1 所示，产品图如图 5.1-2 所示。

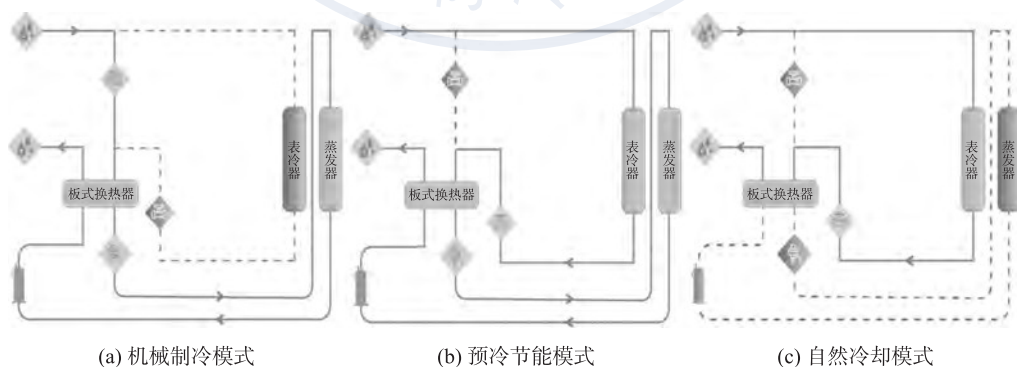


图 5.1-1 空调运行原理示意图

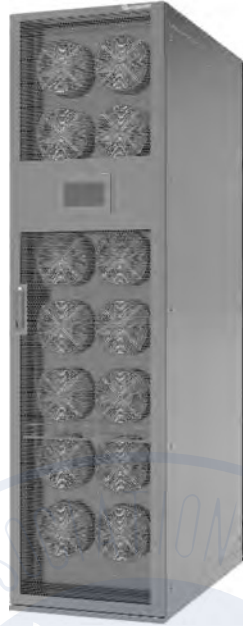


图 5.1-2 水氟双冷源行间空调示意图

5.1.2 产品创新性

水氟双冷源行间空调采用标准机柜式结构支持水平前送风，空调示意图如图 5.1-2 所示，可以灵活安装于模块化机房内，具有以下特点。

- (1) 结构灵活：匹配模块化机房的灵活交付；
- (2) 系统可靠：实现无需集中式冷源补冷的风液同源设计；
- (3) 性能优异：充分利用自然冷源以提高制冷系统能效比；
- (4) 场景广泛：具有优异的灵活适配能力和广泛的应用场景。

水氟双冷源行间空调能够有效满足智算数据中心预制化快速交付和模块化灵活部署的建设需求，兼容多种冷源方案，满足全风冷、风液混合、全液冷建设模式。

5.2 SDP 饱和汽液两相制冷剂泵

5.2.1 产品介绍

5.2.1.1 产品背景

制冷剂泵（氟泵）作为数据中心、AI 智算中心冷却系统的核心节能装备，其运行稳定性直接关系到系统能效。然而，传统泵型在饱和两相制冷剂输送过程中面临严峻挑战：由于流体处于汽液临界状态，管路阻力或环境温度波动极易引发闪蒸汽化，导致汽蚀或断流故障，严重制约系统节能性能的稳定发挥。目前行业主要采用两类解决方案。

(1) 离心泵（速度式）：依赖入口侧大容积储液器维持高液位和提升过冷度，但汽蚀防护和连续供液问题始终未能有效解决。

(2) 齿轮泵（容积式）：虽改善了两相流适应性，但存在机械磨损、卡滞等固有风险，且对控制系统精度和管路设计有严苛要求。

SDP 汽液两相泵通过革命性流体机械架构，开创性地解决了饱和两相工况下的行业难题。产品实现了“零汽蚀、零泄漏、高自吸、免维护”的卓越性能，为极端工况下的制冷剂循环提供了前所未有的可靠动力解决方案。

5.2.1.2 产品原理

突破传统泵体结构限制，受水车工作原理启发，采用边缘进液式叶轮设计，使液体从叶轮外周切向进入，彻底避免进口空腔形成。设计专用多级流道，当有汽体进入泵体后，先实现汽液分离，然后用增压后的液体多次混合，直至完全液化。

通过多级渐进式流道实现汽液高效分离与再融合，该技术从根本上解决了汽蚀、空转及断流问题，显著提升了泵在汽液混输工况下的可靠性与寿命，产品原理如图 5.2-1 所示，产品图如图 5.2-2 所示。



图 5.2-1 SDP 系列汽液两相制冷剂泵原理图



图 5.2-2 SDP 系列汽液两相制冷剂泵产品图

5.2.1.3 产品核心特点

(1) 可靠输送饱和汽液两相制冷剂流体

突破传统局限，重构两相输送——SDP 汽液两相制冷剂泵系列，采用创新流体架构，完美解决了在饱和两相汽液混合工况下的汽蚀、断流与可靠性痛点，为苛刻应用提供持久稳定的动力核心。

入口含汽混合输送：设计专用多级流道，当有汽体进入泵体后，先实现汽液分离，然后用增压后的液体多次混合，直至完全液化。可适应泵入口 0~100% 体积含汽量，避免出现因汽体进入而导致的汽蚀、干磨、断流等失效现象。

兼容常用相变制冷剂：支持常用制冷剂（R134a、R22、R407C、R410A、R32、R404A、R1234yf、R1234ze 等相变工质），适配不同沸点需求。

(2) 零汽蚀、强自吸：永无断流

内置气液分离与独特的再循环混合流道，在环形流道中以“太极推拉式”诱导驱动进入的汽体，消除局部低压区，彻底避免汽泡生成与破裂导致的汽蚀损伤，确保连续输送，无断流运行。

具备较强自吸能力：入口处无需大容量储液器，无较高的液位要求，无必需汽蚀余量要求，大幅节约制冷剂充注量。

(3) 无摩擦：耐干磨空转，支持含油和无油运行

泵体：无机械接触摩擦，支持长时间空转和带载干磨，无磨损风险。

陶瓷轴承：无轴电流腐蚀、高韧性、高硬度、低摩擦，长寿命运行。

(4) 全封闭：高耐压、无泄漏

所有器件封闭在高耐压不锈钢壳体中，无泄漏，设计耐压 5MPa。

进出口管路采用铜管焊接，杜绝了泄漏可能性。

(5) 安装灵活，运行控制简便，大幅降低系统设计难度和材料成本

体积小，并可卧式安装或立式安装：位置灵活，不占据整体机组主要空间，可根据整机设计和管路走向，选择卧式、立式、壁挂等安装方式。

简化出口液体管路设计：出口后液体管路出现空腔时可快速填充、管路堵塞时无过载。

控制简便：可配置通用变频器，实现扬程-流量简便而精密的控制。

(6) 低噪声、无振动：长期无故障连续运行

无机械摩擦接触面。

自带入口过滤网：标配高目数、大面积过滤网，避免管路焊渣等杂物影响高精度做功界面。

汽液分流与“太极推拉式”混合流道设计，降低湍流噪声。

5.2.2 产品创新性

SDP 系列汽液两相制冷剂泵，针对输送极其“娇气”的饱和两相制冷剂的特性和难点，吸收传统离心泵和齿轮泵的优点，避开其各自不足，创造性地设计了两相专用叶轮和流道，实现了“零汽蚀、强自吸、无摩擦”的两相输送。

创新点 1：实现“零汽蚀”运行。创新叶轮流体动力学设计，流体从叶轮边缘进入

流道，由叶轮翅片推动做功，有效应对制冷剂闪蒸蒸汽及管路残留空气/氮气等不凝结气体。避免了离心泵因“汽化”和含“气”而带来的频繁断流、汽蚀问题；避免了齿轮泵含“汽”和气体积聚导致的干磨、润滑失效、能力消失等；入口制冷剂无需过冷，饱和状态或含汽均可正常运行。

创新点 2：实现“强自吸”能力。吸取容积泵和制冷压缩机原理，创新流道和叶轮匹配设计，具备自吸能力：当入口供液液体不足，出现闪蒸汽体甚至液体断流时，可以把断断续续的含汽液体，经由 SDP 泵整理成全液状态输送至膨胀阀前，SDP 汽液两相泵起到“液路稳压”作用。当入口完全无液时，SDP 泵提供 0.1MPa 吸力，化身小型压缩机，可连续抽吸汽体，直至大量液体回流恢复正常。

创新点 3：实现“无摩擦”运行。SDP 汽液两相泵，叶轮和流道壳体之间无接触，无摩擦，利用相对速度和流体自身密封。无论入口和出口流体何种不正常状态，自适应运行均不需停机，无需保护。当入口或出口状态恢复正常时，泵则随即恢复正常工作。

5.2.3 产品性能指标

产品性能指标如表 5.2-1 所示。

表 5.2-1 SDP 系列汽液两相制冷剂泵产品性能指标

项目		SDP003	SDP006
额定工况	额定流量/ (m ³ /h) (L/min)	0.36 (6)	0.60 (10)
	额定扬程/m	25	25
	参考制冷量/kW	20	30
变速运行性能	输出流量范围/ (m ³ /h)	0.1~0.5	0.1~0.7
	输出扬程范围/m	5~45	5~55
	输送制冷量范围/kW	3~25	3~35
	运行功率范围/kW	0.05~0.5	0.05~0.6
壳体尺寸 (直径×长度) /mm		65×180	
进出口管径/mm		φ12.7/φ12.7	
质量/kg		1.8	
电机类型		永磁同步	
变频驱动器供电电源		单相 220VAC	
项目		SDP011	SDP022
额定工况	额定流量/ (m ³ /h) (L/min)	1.1 (18)	2.2 (36)
	额定扬程/m	40	40
	参考制冷量/kW	60	120
变速运行性能	输出流量范围/ (m ³ /h)	0.3~1.8	0.3~2.7
	输出扬程范围/m	5~55	5~55
	输送制冷量范围/kW	15~90	15~150
	运行功率范围/kW	0.1~0.8	0.1~1.1

续表

项目		SDP011	SDP022
壳体尺寸（直径×长度）/mm		108×299	
进出口管径/mm		φ19/φ19	
质量/kg		8.4	
电机类型		变频异步	
变频驱动器供电电源		单相 220VAC	三相 380VAC
项目		SDP040	SDP060
额定 工况	额定流量/（m ³ /h）（L/min）	4.0（66）	6.0（100）
	额定扬程/m	40	40
	参考制冷量/kW	240	350
变速 运行 性能	输出流量范围/（m ³ /h）	0.3~6.5	0.3~8.5
	输出扬程范围/m	5~65	5~65
	输送制冷量范围/kW	16~350	16~480
	运行功率范围/kW	0.2~2.0	0.2~2.6
壳体尺寸（直径×长度）/mm		121×361	
进出口管径/mm		φ35/φ28	
质量/kg		14	
电机类型		变频异步	
变频驱动器供电电源		三相 380VAC	

5.3 热管理承压屏蔽泵

5.3.1 产品介绍

5.3.1.1 产品背景

数据中心的热管理技术正从传统风冷技术转向先进的液冷技术。这一转变主要是因为人工智能算力的快速增长，以及数据中心对能效的要求越来越高。液冷技术散热效果好，能有效解决高密度算力场景下的散热问题。液冷技术不仅能够显著提升数据中心的散热效率，还能将数据中心的 PUE 降低至 1.1 以下，这一指标远低于国家政策对新建数据中心 PUE 低于 1.3 的强制性要求。在液冷系统中，循环泵是核心部件，就像系统的“心脏”一样，它需要具备可靠性高、性能好等特点，能确保液冷系统高效稳定运行。

目前常用循环泵主要有两种类型：一种是离心泵，采用单级或多级离心泵；一种是齿轮泵（流量较小工况下优势明显），考虑泄漏风险均可采用屏蔽式电泵。此外，数据中心对漏液现象持有“零容忍”的严格态度，并且需要确保全年无间断的稳定运行，这对热管理系统中泵的可靠性和能耗控制提出了极为苛刻的要求。热管理承压屏蔽泵采用了全密封的屏蔽设计，通过无轴封的结构创新，能够实现绝对零泄漏的卓越效果，完美

适配乙二醇、丙二醇、氟利昂等多种冷却介质。其内部独特的循环流道设计与先进的层间冷却技术结合，能够有效控制和调节温度，确保泵在高温、高压等极端工况下的稳定运行。与传统离心泵相比，屏蔽泵的故障率大幅降低至 1/20，其平均无故障时间 (MTBF) 更是超过了 5 万 h，展现出极高的可靠性。此外，其紧凑的结构设计还能节省高达 30% 的安装空间，为数据中心的高效布局提供了有力支持。

5.3.1.2 产品原理

热管理承压屏蔽泵可作为数据中心液冷系统的核心动力单元，其独特的工作原理完美契合了液冷系统对零泄漏、高可靠性和低噪声运行的严苛要求。以下是其核心工作原理：

(1) 在动力传递方面，电机定子产生的旋转磁场穿透屏蔽套，驱动转子带动叶轮同步旋转。屏蔽套通常采用塑料或金属，用来隔离定子绕组和湿转子（浸泡在介质中），能够实现无物理接触的扭矩传递。流体输送则依靠叶轮旋转使冷却液加速，在蜗壳内将动能转化为压力能，从而克服系统阻力进行循环。一般采用离心式叶轮（可多级串联），泵壳及屏蔽套作为承压容器，能够承受液冷系统的高工作压力。轴承的润滑与冷却主要依赖泵内循环的冷却液，其中一部分流入电机腔，润滑石墨或碳化硅滑动轴承并带走热量，实现轴承的自润滑。电机冷却则通过循环流动的冷却液直接带走电机转子和定子屏蔽套产生的热量（如涡流损失等）。针对高温工况，可采用外置换热器（冷却液套）或逆循环等特殊流道设计，以强化散热效果。

(2) 在密封与承压方面，泵与电机集成在一个压力容器内，仅采用静密封，从结构上彻底杜绝泄漏。二次压力壳体设计（如加强的电机机壳）提供额外的安全冗余，确保在极端情况下仍能保持无泄漏状态。产品图如图 5.3-1 所示，产品爆炸图如图 5.3-2 所示。



图 5.3-1 新沪热管理承压屏蔽泵产品图

5.3.2 产品创新性

创新点 1：采用屏蔽式设计，摒弃机械密封，实现无泄漏、免维护。

创新点 2：采用离心叶轮结构，确保流量连续均匀，液体在叶轮离心力作用下平稳排出，特别适用于数据中心等对流量稳定性要求严格的场景，保障液冷流程的稳定性。

创新点 3：通过调整转速（如使用变频器，实现高效节能）或调节阀等方式，可灵活调控流量。其结构简洁紧凑，主要由叶轮、泵轴、泵壳等核心部件构成，安装与维护便捷，尤其适合机柜等空间受限的环境。转速较高，通常可达 1000~7000r/min，能够实现中大流量、高扬程输送，满足不同工程对液体输送量和压力的多样化需求。

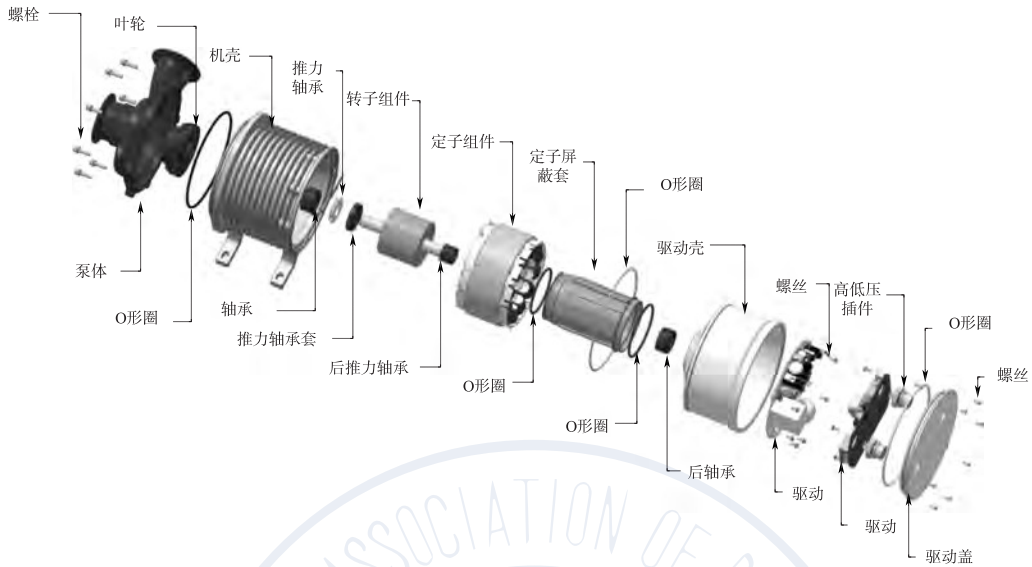


图 5.3-2 热管理承压屏蔽泵产品爆炸图

创新点 4：在设计工况点效率显著提高，通过优化叶轮、泵壳流道及采用高效电机，有效降低能耗。运行噪声低，转动部件动平衡优良，液体流动平稳，振动小、噪声低，适用于液冷 CDU、IDC 数据中心等对噪声敏感场所的循环液冷系统。

5.3.3 产品性能指标

额定电压：600VDC/380VAC。

通讯电压：9~32VDC。

输入功率： $\leq 4800\text{kW}$ 。

尺寸： $\leq 311\text{mm} \times 210\text{mm} \times 220\text{mm}$ (4002)。

噪声： $\leq 65\text{dB}$ (A)。

防护等级：IP67。

5.4 定压补水真空脱气装置

5.4.1 产品介绍

5.4.1.1 产品背景

空气不可避免地存在于暖通系统中，并以两种形式存在：游离空气和水中溶解的空气。游离空气，一般汇聚于管路高点，或者局部高点；水中溶解的空气，会随介质在管网中循环。受温度和压力双重影响，游离气体和溶解气体也会相互转化。当游离空气汇集于板换、管路高点时，暖通系统换热效率就会受到影响；游离空气中的氧气也会腐蚀管网、散热器等设备，影响系统安全。为解决这一问题，需要在暖通系统中设置定压补水真空脱气装置。

5.4.1.2 产品原理

真空脱气原理：根据亨利定律，温度升高或者压力降低时，水中溶解气体将会减少；反之，水中溶解气体将增加。

真空脱气时，在定压补水真空脱气装置中，会不断产生真空，将暖通系统中的溶解空气强制释放，并通过自动排气阀排出系统，脱气后的水重新注入暖通系统。真空脱气装置持续工作，不断将暖通系统中水中溶解的空气释放，实现强制脱气。产品图如图 5.4-1 所示。



图 5.4-1 威乐定压补水真空脱气装置图

5.4.2 产品创新性

创新点 1：采用雾化喷头，使介质以雾状颗粒进入真空脱气装置，实现快速脱气。

创新点 2：结构紧凑，布置合理；也可以根据用户要求定制。

5.4.3 产品性能指标

流量范围：常规流量范围 0.5~25m³/h。

扬程：常规扬程范围 15~200m。

5.5 BXC 不锈钢紧凑型卧式端吸离心泵

5.5.1 产品介绍

5.5.1.1 产品背景

挑战 1：作为冷却系统的核心组件，循环水泵能耗在当代数据中心整体冷却能耗中占比为 15%~30%，其能效优化直接影响数据中心整体能源消耗。

解决方案 1：开发更高能效的水泵。

挑战 2：数据中心的空间宝贵，对水泵的尺寸、结构和质量有特定要求。

解决方案 2：紧凑型结构设计，特别是在机架内或靠近服务器的 CDU 中部署的泵，需要结构紧凑、体积小，以节省空间，提高部署密度。

5.5.1.2 产品原理

离心泵的工作原理是基于叶轮高速旋转产生的离心力，将机械能转化为液体的动能和压力能，实现液体的连续输送，从而能稳定控制温度差。

全仿生隔舌设计改善了隔舌前后较大的液流压力梯度带来的应力集中问题，使应力均匀地分散于整个隔舌型线，避免出现泵壳因应力集中而承压不足。在相同承压下，仿生学隔舌部位可以减少用料，实现轻量化设计。产品图如图 5.5-1 所示。

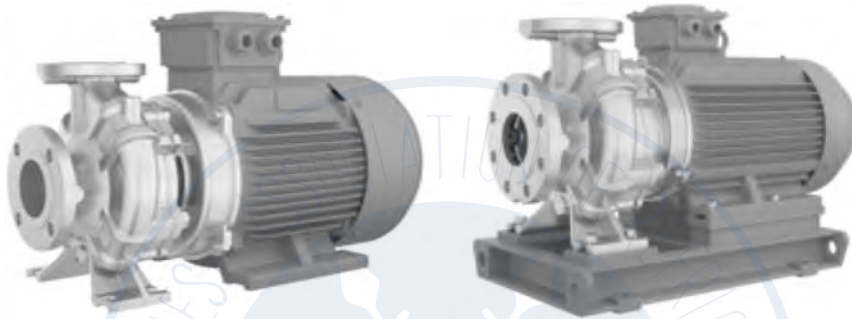


图 5.5-1 威乐 BXC 不锈钢紧凑型卧式端吸离心泵产品图

5.5.2 产品创新性

创新点 1：2024 年 2 月 6 日授权发明专利《一种仿生学水泵壳体、壳体的隔舌及隔舌的设计方法》(ZL_202111631401.3)。BXC 系列泵体采用全仿生隔舌设计，有效提高了水力转化效率，有效改善湍流所带来的振动及噪声水平，系列满足 GB 19762—2025 一级能效评价指标。

创新点 2：泵轴和电机轴共轴设计，轴向尺寸较刚性连接缩短 15%，质量减轻 10%。去除联轴器，减少配合，增加稳定性，缩短总体长度，降低轴端挠曲，增加轴承寿命，运行更稳定。

5.5.3 产品性能指标

最大工作压力：1.6MPa/2.5MPa。

介质温度范围：-20~120℃。

材质：泵体/叶轮/电机前端盖标配 1.4308 不锈钢，可选配 1.4408、1.4409、1.4517 不锈钢，叶轮可定制青铜。轴标配 1.4021 不锈钢，可选配 1.4057 不锈钢。机封标配 AQ1EGG/Q7Q7EGG，其他材质可选配。

防护等级：IP55。

绝缘等级：F。

电机标配满足 GB1/GB2/GB3 标准，可满足 CE/UL 认证，可定制变频器。

5.6 BCES 永磁大流量屏蔽离心泵

5.6.1 产品介绍

5.6.1.1 产品背景

挑战 1：作为冷却系统的核心组件，循环水泵能耗在当代数据中心整体冷却能耗中占比为 15%~30%，其能效优化直接影响数据中心整体能源消耗。

解决方案 1：开发更高能效的水泵。

挑战 2：数据中心的空间宝贵，对水泵的尺寸、结构和质量有特定要求。

解决方案 2：紧凑型结构设计，特别是在机架内或靠近服务器的 CDU 中部署的泵，需要结构紧凑、体积小，以节省空间，提高部署密度。

挑战 3：水冷板有泄漏导电风险，要求水泵无泄漏。

解决方案 3：开发一款无轴封从而实现零泄漏的产品。

5.6.1.2 产品原理

屏蔽泵属离心式无密封泵，泵和驱动电机都被封闭在一个充满泵送介质的压力容器内，此压力容器只有静密封，取消了传统离心泵具有的旋转轴密封装置，能够做到完全无泄漏。

屏蔽泵把电机和水泵连在一起，电机转子和泵的叶轮共轴，利用屏蔽套将电机的转子和定子隔离开，转子在被抽送的介质中运转，其动力通过磁场传递给转子。产品图如图 5.6-1 所示。

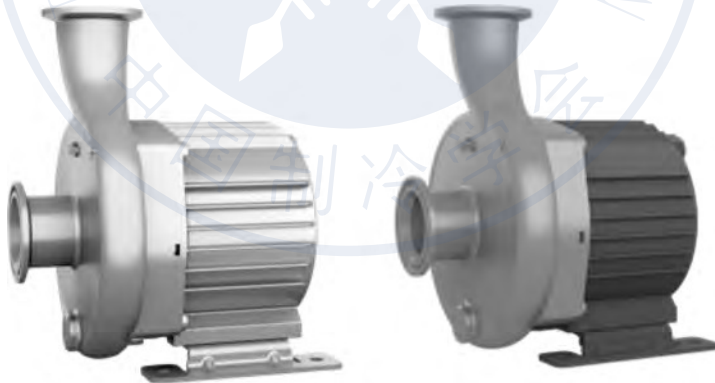


图 5.6-1 威乐 BCES 永磁大流量屏蔽离心泵产品图

5.6.2 产品创新性

创新点 1：3D（三维）仿真叶轮设计，水力模型更高效。

创新点 2：防护等级最高达 IP68，高防腐 C4H 可选配。

创新点 3：采用先进的电机电磁仿真技术，电机能效满足 GB1 标准。电机高效运行区间宽，特别是在低转速和低转矩的输出条件下，节能效果显著。高效电磁设计与电机

冷却方案，多参数优化设计爬电距离和电气间隙，保证高海拔运行不降容。

创新点 4：结构紧凑，尺寸小巧，较常规机械式离心泵轴向减小 60%。

创新点 5：耐磨损，采用威乐独有钻石涂层的轴与高性能石墨轴承，石墨的自润滑性能在运行时形成稳定润滑膜，更稳定，且较常规陶瓷轴承更耐高温和抗热冲击。

5.6.3 产品性能指标

最大工作压力：1.0MPa。

介质温度范围：-30~60℃。

材质：过流部件标配 304 不锈钢，可选配 316L 不锈钢，橡胶件 EPDM/FKM/NBR 可选。

滑动轴承：高性能石墨轴承，其他材质可选配。

最高防护等级：IP68。

绝缘等级：F。

5.7 Medana 大流量卧式多级离心泵

5.7.1 产品介绍

5.7.1.1 产品背景

挑战 1：作为冷却系统的核心组件，循环水泵能耗在当代数据中心整体冷却能耗中占比为 15%~30%，其能效优化直接影响数据中心整体能源消耗。

解决方案 1：开发更高能效的水泵。

挑战 2：数据中心的空间宝贵，对水泵的尺寸、结构和质量有特定要求。

解决方案 2：紧凑型结构设计，特别是在机架内或靠近服务器的 CDU 中部署的泵，需要结构紧凑、体积小，以节省空间，提高部署密度。

5.7.1.2 产品原理

离心泵的工作原理是基于叶轮高速旋转产生的离心力，将机械能转化为液体的动能和压力能，实现液体的连续输送，从而能稳定控制温度差。产品图如图 5.7-1 所示。

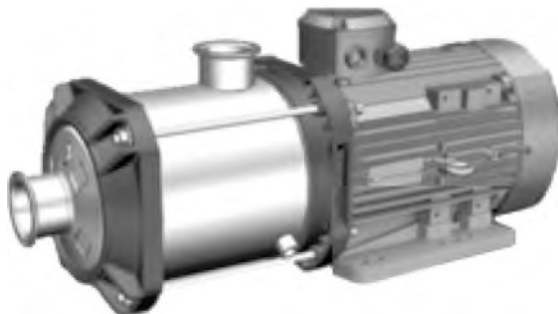


图 5.7-1 威乐 Medana 大流量卧式多级离心泵产品图

5.7.2 产品创新性

创新点 1: 3D 叶轮设计, 过流部件采用更高效的水力模型, 最高效率达到 70%。Medana CH1-L 大流量系列目前是市场上流量最大的卧式多级离心泵。

创新点 2: 注水孔和排水孔加大到 3/8", 能快速和更容易地进行调试和维护。

创新点 3: 更高的可靠性和寿命。壳体寿命循环耐压 30 万次 (上一代是 17 万次), 运行寿命较上一代增加 25%。

5.7.3 产品性能指标

最大工作压力: 1.0MPa。

介质温度范围: $-20\sim 120^{\circ}\text{C}$ 。

材质: 过流部件标配 304, 可选配 316L。机封标配 AQ1EGG/Q7Q7EGG, 其他材质可选配。

防护等级: IP55。

绝缘等级: F。

电机标配满足 GB3 标准, 可选配 GB1/GB2 标准, 可满足 CE/UL 认证。

5.8 云模舱

5.8.1 产品介绍

5.8.1.1 产品背景

对计算密集型工作负载的需求增加: 越来越多的组织正在利用人工智能和机器学习等应用来改善客户体验、增强网络安全并转变业务流程。部署这些技术并最大限度地发挥其价值, 需要越来越强大的基础设施。

(1) 数据中心的密度和空间限制: 数据中心运营商也在不断创新, 以适应功率密度越来越高的硬件。传统上, 数据中心需要适应各种密度, 以支持各种客户技术。功率密集型机柜会产生更多热量, 通常会分散在数据中心内, 以分散热量并满足冷却要求。但随着功率密集型硬件数量的增加, 将密集服务器分散到多个机架上变得不切实际、低效且成本高昂, 因为会增加布线长度。此外, 高性能计算 (HPC) 和 AI 等工作负载要求服务器尽可能靠近, 以减少计算资源之间的延迟。当数据中心使用液体冷却时, 它们可以最大限度地减少机柜和硬件之间的空间, 将功率密集型服务器放置在彼此靠近的位置。这可以更有效地利用数据中心空间, 并支持 HPC 和 AI 工作负载。

(2) 边缘计算的兴起: 过去, 液体冷却主要用于集中在主要大都市的高密度部署。但随着边缘计算的发展, 企业需要在边缘位置拥有更多的计算能力——尤其是在建筑、石油和天然气以及医疗保健等行业, 这些行业的数据存储和计算需要位于最终用户附近。随着边缘计算与人工智能一起不断发展, 边缘位置的数据中心正在支持更多计算密集、耗电的应用程序和基础设施, 因此需要更先进的冷却解决方案。

威乐 WILO 水力模块应运而生——以“高效节能、智能便捷”为核心, 通过模块

化设计、变频控制及数字互联技术，为驱动算力基础设施提供一站式水力系统解决方案。产品覆盖从单泵到整体系统的全场景需求，助力客户降低运营成本、提升系统可靠性，为 AI 的发展提供全面的支撑，并符合“双碳”目标下的绿色建筑要求。

5.8.1.2 产品原理

云模舱的核心原理是预制模块化集成，它并非单一设备，而是一套智能化的水力模块解决方案。

(1) 集成化设计：云模舱将水泵、阀门、管路、补水及加药、控制单元、旁滤等核心设备，在工厂内就预装到一个标准集装箱大小的空间内。这种高度集成化的设计，使其成为一个即插即用的功能性模块。

(2) 智能化控制：它融合了物联网技术与流体技术，通过先进的变频控制系统、传感器和智能仪表，能够根据实际需求对水泵进行精确控制，从而实现系统的高效和稳定运行。

云模舱产品图如图 5.8-1 所示。

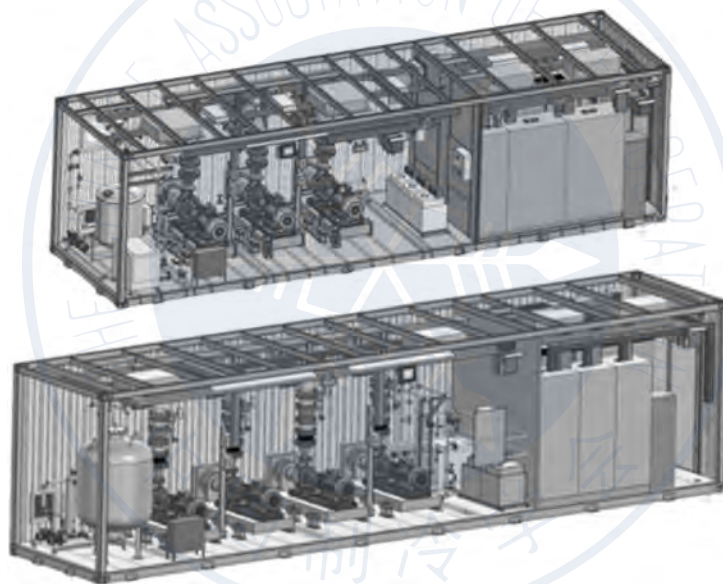


图 5.8-1 威乐云模舱产品图

5.8.2 产品创新性

数字经济时代业务需求变化快，传统建设周期长（1 年或 1 年半）、成本高、运维复杂、能效低下，已经无法匹配市场敏捷性要求。

新建的数据中心建设，需要快速部署、模块集成、绿色节能，三者结合实现“高效建设-弹性扩展-可持续运营”闭环，支撑数字经济高质量发展。

预先设计、组装和集成了水泵、阀组、过滤器、定压补水装置等多种水力组件的功能整体，可以实现水力系统的控制、调节和分配功能，能够提高系统的运行效率和稳定性，可作为标准化即插即用式模块被运至项目现场，支持灵活移动与快速部署，降低现场施工难度，并且方便安装、维护和管理。

5.9 W-SCBV 系列智能控制阀

5.9.1 产品介绍

W-SCBV 系列智能控制阀是一款集监测与控制功能于一体的先进设备，其核心原理是通过能量计实时采集系统中的流体参数，如流量、温度、压力等，并通过运算得到能耗以及系统状态故障等情况。智能执行器则根据这些数据对调节球阀进行精准操控，从而实现对中央空调、采暖等系统中流体的智能化管理。通过各类传感器捕捉的信息，经过内部智能算法处理，转化为对阀门开度的调节指令，确保系统按照设定的参数稳定运行，达到高效节能的控制效果。智能控制阀产品图如图 5.9-1 所示。



图 5.9-1 沃茨 W-SCBV 系列智能控制阀产品图

5.9.2 产品创新性

创新点 1：能够根据不同的控制目标（如流量、能量、温差等）自动调整阀门运行状态，且支持多种控制特性曲线的选择，可根据系统实际需求灵活配置，大大提高了控制的精准度和适应性。

创新点 2：智能控制阀打破了传统阀门无法了解真实状况的缺陷。比如传统阀门，其开关的真实状态、平衡阀的平衡功能是否实现、管路系统的流量能否达到设计与控制需求并不能明确的获知，只能通过实际效果进行分析与反推衍。而智能控制阀通过直接读取阀门内的供回水温度、流量、压力等参数并予以计算分析，可以有效实现水路系统的透明化，了解管路中的各类状态，真正实现了管路的参数透明可视化与参数化。

创新点 3：打破了传统阀门单一的控制模式，融合了电压、电流等模拟量输入反馈、多种数字协议以及蓝牙连接等多种通信方式，实现了与不同设备的无缝对接，为智能化系统集成提供了极大便利。

创新点 4：采用了自动故障诊断与报警技术，能快速定位故障并提供相关信息，便于维修；过载保护功能则有效避免了电机因异物卡住而烧毁，延长了设备使用寿命。此外，手动操作设计与高等级防护的结合，既保证了特殊情况下的应急操作，又使设备能

在恶劣环境中稳定工作，体现了设计的全面性和创新性。

5.9.3 产品性能指标

5.9.3.1 调节球阀

公称通径：DN15~DN400mm。

承压等级：PN20 (DN15~DN50mm 螺纹连接)；PN16 (DN50~DN400mm 法兰连接)。

介质温度：0~95℃。

关闭压差：1600kPa (DN15~DN125mm)；1000kPa (DN150~DN400mm)。

泄漏率： $\leq 0.01\%K_{vs}$ (DN15~DN200mm)。

5.9.3.2 智能执行器

电源：24VAC/24VDC (DN15~DN150mm)；220VAC (DN200~DN400mm)。

电机功率：15W (DN15~DN150mm)；23W (DN200mm)；100W (DN250~DN350mm)；200W (DN400mm)。

额定电流：0.8A (DN15~DN150mm)；0.32A (DN200mm)；1A (DN250mm)；1.2A (DN300~DN350mm)；1.9A (DN400mm)。

扭矩：50N·m (DN15~DN150mm)；100N·m (DN200mm)；1000N·m (DN250mm)；2000N·m (DN300~350mm)；3000N·m (DN400mm)。

行程时间：20s (DN15~150mm)；30s (DN200mm)；50s (DN250mm)；80s (DN300~350mm)；60s (DN400mm)。

防护等级：IP67。

环境温度：-25~60℃。

壳体材质：铝合金。

5.9.3.3 超声波能量计

电源：3.6V 锂电池+外部电源 [24VDC (DN15~DN150mm)，220VAC (DN200~DN400mm)]。

功耗： $< 0.01W$ 。

公称通径：DN15~DN400mm。

承压等级：PN20 (螺纹)；PN16 (法兰)。

精度：2级。

测温配件：PT1000 温度传感器，精度 AA/B 级；回水装在阀体上；供水线长 3m (螺纹)、10m (法兰)。

防护等级：IP68。

环境等级：A 类。

连接标准：ISO 7-1/ISO 7005。

表头材质：PVC 塑料 (螺纹)，铝 (法兰)。

管段材质：黄铜 (DN15~DN50mm)；球墨铸铁 (DN50~DN200mm)；WCB (DN250~DN400mm)；不锈钢 (DN50~DN200mm)。

5.10 可兼容型流体连接器

5.10.1 产品介绍

5.10.1.1 产品背景

AI发展驱动算力基础设施高速增长，在“双碳”目标与芯片功耗持续上升的背景下，液冷技术成为关键散热方案，而流体连接器是液冷系统与服务器间的传输枢纽。当前液冷互联面临三大痛点：通用接口缺失导致兼容性差、部署成本高、制约异构算力部署与业务扩展；混插连接故障难以溯源界定；产品绑定、非标情况下增加测试难度，测试结果无法拉齐。

为破解上述难题，中国移动通信集团设计院有限公司积极履行央企责任，研发可兼容型流体连接器，支持手插与盲插等多种接头形式，统一接口尺寸规范，并携手行业领先企业推动该技术在液冷系统中的规模化应用，助力算力基础设施绿色高效发展。

5.10.1.2 产品原理

流体连接器由插头与插座组成，通过精密机械设计实现液冷系统的高效密封与通断控制。系统运行时，插头与插座插合，建立冷却液流通过路，使冷却液在服务器发热部件与外部散热设备间稳定循环，及时导出热量，保障服务器持续可靠运行；在断开连接时，连接器内部自密封结构可瞬间动作，有效防止冷却液外泄，确保设备安全。

如图5-10-1所示，可兼容型流体连接器经结构优化，实现了公头与多种母头（包括本品牌母头、手插UQD母头、盲插UQDB母头）之间的互插兼容，并支持与TSL接头等位替换，在提升互联灵活性的同时，确保连接的安全可靠，为液冷系统部署与维护提供了便利。机柜内流体连接器如图5.10-2所示。

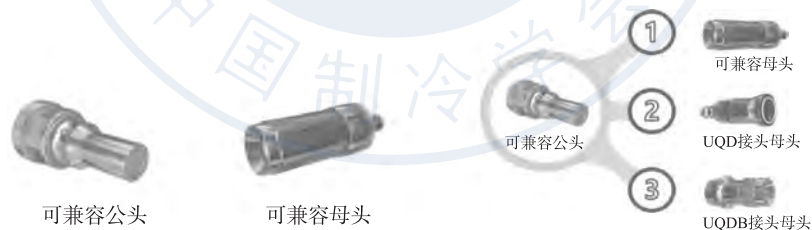


图 5-10-1 可兼容型流体连接器

5.10.2 产品创新性

创新点 1：共平台兼容。实现国际标准手插（UQD）与盲插（UQDB）接口的共平台设计，支持与国产主流服务器品牌间的等位无感切换，推动液冷机柜与 IT 设备解耦，适配多类业务场景。

创新点 2：高可靠性。结构上具备轴向±2.5mm 双向浮动容差能力，适应复杂装配环境；搭配漏液防护模块，冷却液兼容性更强，系统密封与耐久性能显著提升。

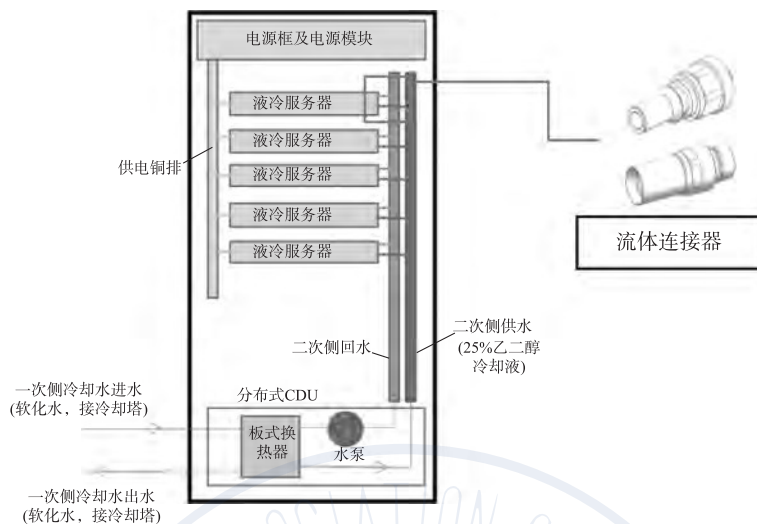


图 5.10-2 机柜内流体连接器示意图

创新点 3：高性能表现。经第三方测试，关键性能指标表现卓越，耐压能力达行业标准 2 倍，流阻降低 40%，泄漏率仅为行业标准的 1/10，保障系统高效稳定运行。

5.10.3 产品性能指标

可兼容型流体连接器在第三方权威检测机构中国计量科学研究院进行了全量混插兼容性测试，测试结果表明：

(1) 其工作压力、最大带压插拔压力、泄漏量相当或优于行业水平，且接头可配置防喷溅装置，安全性更优；

(2) C_v 值达到 1.24，为行业较高水平，系统运行流阻小，性能优异；

(3) 轴向浮动量优于行业水平，在轴向上具备浮动容差功能，降低接口精度要求，降低制造成本，成本更优。

接头的参数对比如表 5.10-1 所示。

表 5.10-1 接头参数对比

项目	国内某厂家 1/4 盲插	国外某厂家 UQDB04	国外 UQDB 标准	CMDI-CFC 指标	对比情况
工作压力	0~1MPa	0~1.6MPa	0~0.689MPa	0~1.6MPa	相当或优于
最大带压插拔压力	0.4MPa	0.3MPa	无	0.6MPa	优于
轴向浮动量	0~2.5mm	±1mm	±1mm	±2.5mm	优于
C_v 值	0.5	1.25	0.8	1.24	相当或优于
单次插拔泄漏量	≤0.03mL	≤0.025mL	≤0.025mL	≤0.025mL	相当或优于
共平台功能	无	无	无	支持	优于
防喷溅设计	支持	无	无	支持	相当或优于

2025 年中旬，中国移动通信集团设计院有限公司聚焦“灵活适配+混插互认”模式在长三角（苏州）数据中心组织开展了可兼容型流体连接器试点应用。联合液冷机柜

厂商与服务器厂商，打破行业壁垒，统一测试方法，验证了该连接器与 UQD/UQDB 接头混插的可行性，成功实现跨品牌机柜与服务器的互联互通，提升了系统部署灵活性与设备选型自由度，为接口标准化奠定了实践基础。其“双向浮动”设计简化了插拔流程，结合标准化运维操作，有效降低了运维复杂度与长期运营成本。

5.11 本章小结

本章所呈现的末端与输配系统产品，展现了行业在节能化、模块化、高可靠方向的技术突破。这些产品普遍以解决实际场景痛点为核心，通过无泄漏设计、仿生优化、共平台兼容等创新手段，突破了传统设备在能效、适配性、维护成本上的局限。无论是适配高密度智算中心的冷却方案，还是满足边缘部署需求的模块化产品，均实现了性能与场景的精准匹配。这些产品的规模化应用，不仅能有效降低数据中心 PUE 值与运营成本，还能支撑快速部署与弹性扩展需求，为算力基础设施的高质量发展提供坚实保障。



第 6 章 案 例

6.1 中国移动呼和浩特数据中心

6.1.1 案例简介

中国移动呼和浩特数据中心（如图 6.1-1 所示），是中国移动在全国“4+N+31+X”算力中心布局中规模最大、技术最先进、保障最完备的中心节点。



图 6.1-1 案例现场照片

中国移动呼和浩特数据中心项目以“建设世界一流数据中心”为核心定位，秉承“高科技、信息化、绿色环保”三大理念。项目总投资 150 亿元，占地 93.47hm²，园区总建筑面积 62.1 万 m²，园区设计建设 18 栋仓储式机房，提供 20.4 万个机架的服务能力，主要提供 IDC 服务，包括主机托管、机架租赁、VIP 机房租赁、互联网接入、云计算 IaaS 服务等。总规划设计面向全球通过国际竞赛的方式确定，历经 7 个月的筛选，由德国 GMP 公司中标，数据机房等级均为国标 A 级，将领先的设计理念应用到园区的每一个细节。

案例项目可提供 10.5 万个标准机架的服务能力，目前一期、二期已建成 8 栋机楼（B01~B08），投资 37.03 亿元，建设 5.7 万标准机架，于 2016 年陆续投产，已装机架 3.2 万标准机架，一直保持安全稳定运行。

6.1.2 已有节能管理措施

2022 年数据中心积极响应自治区“能耗双控”要求，在各级政府监管部门的指导下，结合《工业和信息化部 国家机关事务管理局 国家能源局关于加强绿色数据中心建设的指导意见》（工信部联节〔2019〕24 号）等要求规定，将数据中心年内电能使用效率控制在 1.4 以内，并淘汰高能耗老旧设备。

根据大数据管理局能耗双控工作指示，中国移动呼和浩特数据中心先后多次展开能耗双控宣贯会，研究切实可行的节能技改措施，成立数据中心能耗双控工作领导小组，制定《中国移动呼和浩特数据中心能耗双控实施方案》和《中国移动呼和浩特数据中心能耗双控应急预案》。同时根据相关文件精神，数据中心维护人员积极落实各项节能管理制度和措施，主要包括以下措施：

(1) 严格落实机房巡检制度。数据中心维护人员每日对机房楼进行多次巡检，每次巡检均会对主要用能设备运行工况进行监督检查，严格按照能耗双控要求的设备运行工况，对进出风温度存在异常的设备及时调整，确保日常设备巡检能够按照能耗双控要求落到实处。

(2) 落实能耗分析制度。数据中心有完善的能耗统计分析制度，针对数据中心各种用能设备建立能耗统计日报、周报、月报，同时结合外界环境温度、制冷工况、新上架业务情况，分析能耗变化情况，对能耗存在异常的设备进行重点观察，对存在问题的设备及时处理或者更换。

(3) 充分利用自然冷源。数据中心通过 3I 智能控制和 BA 系统 [3I 智能控制：智能切换 (I-Switch)、智能调节 (I-Adjust)、智能选择 (I-Choice)；BA 系统：楼宇自动化系统 (Building Automation)] 实现根据运行负荷及外界温度自动调节运行模式，当室外气温低于 6℃ 时采用完全自然冷源模式。在过渡期室外气温 6~10℃ 时，采用间歇启用冷却塔+板式换热器的过渡半自然冷源模式，缩短冷水机组开启时间，有效节能降耗。

(4) 油机房温度管理。水套加热器是为柴油发动机冷却液预热的装置，能使油机迅速达到最佳输出工况的温度为 45℃，然而这一温度一直高于环境温度，使得水套加热器一直处于开启状态。油机冷却液在高于 5℃ 时油机的启动成功率就可达到 99%，故考虑到在一年中温度较高的时间无需开启水套加热器，于是决定仅在每年 10 月 1 日至次年 5 月 1 日开启。

(5) 回收公建区机房余热为生活区进行冬季采暖及热水供应，降低整体能耗。

(6) 将机房公共区域的照明改造为人体感应灯管，做到灯管亮度按需调节，有效节能降耗。

(7) 引入自动水处理设备，精确控制水系统结垢问题，提高设备换热效率，节约电能和延长固定资产使用寿命。

(8) 电力电池室精确送风改造。随着负载的增加，机房电力电池室在实际运行过程中出现局部高温情况，空调温度调低会导致整体能耗的上升，同时增加空调数量也会导致能耗的上升。经过现场实际查勘及与空调设备厂家进行意见征询，对现有空调送风方式进行改造，增加风管，控制阀门，进行精确送风到设备，节能降耗。

(9) 强化人员节能意识。加强用电管理，强化人员节能意识，在照明、空调开关处设置提醒标识，在人员集中和进出通道处设置节能宣传海报、条幅等。

数据中心于 2018 年开始纳入工信部日常节能监察和重大工业节能监察范围，公司各级领导和运行维护人员高度重视本项工作，数据中心从电源和空调两大耗能系统出发，积极主动探索适用于数据中心节能降耗的技术手段，如制冷群控系统智能化、充分利用自然冷源、感应灯管改造、提高设备效率、精确送风改造等，通过众多有效节能措施的实施以及机房负载率的增加，数据中心能效指标逐年下降，低于设计指标 1.35，数据中心在节能降耗方面的成效显著。

依据 YD/T 2543—2013《电信互联网数据中心（IDC）的能耗测评方法》、GB 40879—2021《数据中心能效限定值及能效等级》标准，核算数据中心 B04 机楼 2024 年耗能情况。2024 年数据中心 B04 机楼全年生产用电 9251 万 kW·h，信息设备用电 7760 万 kW·h，数据中心 B04 机楼 PUE 实测值为 1.192，接近数据中心能效等级指标 1 级。

数据中心结合自身优势积极参与工业和信息化部、国家发展改革委、商务部、国管局、银保监会、国家能源局六部门组织的 2020 年度国家绿色数据中心评选并成功入选。

6.1.3 冷却系统形式

6.1.3.1 冷源系统形式

目前，中国移动呼和浩特数据中心已经建成 8 栋机房。数据机房采用集中式水冷系统，由高压冷水机组+冷却塔+板式换热器+新型空调末端组成，寒冷季节充分利用自然冷源。

图 6.1-2 是中国移动呼和浩特数据中心冷源系统示意图。数据中心的冷源系统装配了大量配套设施，包括管路、阀门、冷却塔、风机、冷水机组、板式换热器、分集水器、蓄冷罐、冷却水泵、冷水泵、蓄冷泵、水源热泵、电伴热、补水泵、排污泵、集水坑及相关各类传感器和执行机构等等，组成了 3 套制冷系统。冷却设备如表 6.1-1 所示。

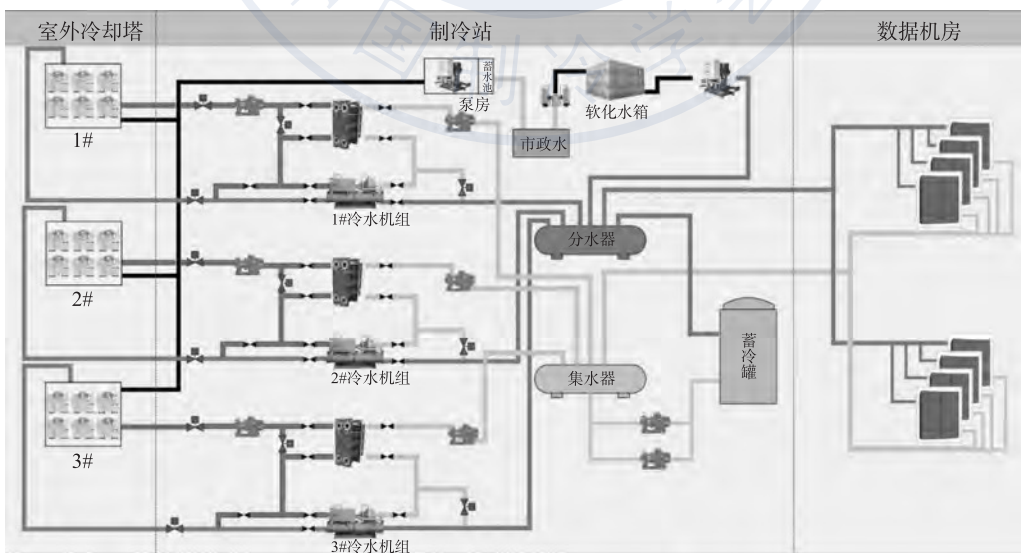


图 6.1-2 冷源系统图

表 6.1-1 冷却设备清单

序号	设备名称	规格型号	设备数量/台(套)	标称功率/kW	年运行时间/h
1	离心式冷水机组	10kW YKN9NPK35DEG/EG21	9	1060	3360
		WSC160BCTR55/E4812-FK/C4212-JK-FA	4	985	3360
		CCWE2500H10	6	1064.9	3360
		19XRA4HA4H632EN7	4	984.5	3360
2	冷水循环泵	VSX-VSC-10X12X	9	220	5840
		SCP250/390HA-185/4	4	185	4380
		VSX-VSC 10 * 12 * 17.5A 200kW 1500	4	200	2190
		SCP250/360HA-160/4	4	160	2190
3	冷却水循环泵	VSX-VSC-10X12X	9	220	5840
4	间接蒸发冷却塔	MD5018SAF5L	9	230	5840
5	高温水源热泵机组	YEWS210HA50E-HP2	6	125	5040

(1) 免费冷源利用

如图 6.1-3 所示, 每个制冷站配置 3 台 7034kW (2000rt) 离心式冷水机组, 两用一备, 每台水冷离心机组配套一台板式换热器, 在过渡季节或冬季, 由开式冷却塔及板式换热器利用较低的室外气温提供冷源, 减少冷水离心机组的开启时间, 降低能源消耗。冷水离心机组和板式换热器设置在制冷机房, 开式冷却塔设置在屋顶。呼和浩特数据中心全年 52% 的时间可以完全关闭压缩机, 13% 的时间可以减少压缩机运行。与完全采用压缩机电制冷相比, 节能约 42%, 年节电约 3000 万 kW·h/栋楼。



图 6.1-3 制冷站现场照片

(2) 冷源共享

如图 6.1-4 所示, 每两栋机房楼制冷站采用互相连通的设计, 可共享冷源。两栋机房楼在负载较小的情况下, 以两个制冷站母联运行仅开启一套制冷系统即可满足制冷需求, 不但系统冗余能力增强, 在实际应用中更可以有效减少两个制冷站制冷系统设备

(冷水机组、板式换热器及水泵) 开启的数量, 与两个制冷站各开启一套制冷系统进行对比, 节能可达 20% 以上, 全年可节省约 155 万 kW·h 电能。母联运行不仅可以实现节能降耗, 还可以增强制冷系统的冗余能力。



图 6.1-4 紧邻的制冷站

(3) 余热利用

呼和浩特地区年平均气温仅为 5.4℃, 冬季供暖期较长 (每年 10 月至次年 4 月)。中国移动呼和浩特数据中心采用高温水源热泵机组, 收集机房模块 IT 设备的热量, 经由热泵机组做功后, 水温达到 50~60℃, 将热量传递至热水及供暖系统, 保证了机房的供暖需求, 实现整个生活园区余热回收利用; 此时冷水降温后重新回到机房为 IT 设备制冷。

余热回收技术利用高温水源热泵替代传统加热锅炉, 取得极好的环保效应和经济效应, 防止了燃煤锅炉的废气、废渣对环境的污染, 实现 10 万 m² “零供热、零供暖费用”。此外, 如图 6.1-5 所示, 高温水源热泵机组在提供热量的同时也为数据机房提供了约 1400kW 的免费冷源, 降低了数据机房制冷能耗。按照目前园区建设投产情况, 可节省供热费用约 103.4 万元。



图 6.1-5 数据中心高温水源热泵

6.1.3.2 末端系统形式

中国移动呼和浩特数据中心约 20000 个机架同时采用热管背板+水冷前门+列间空调 3 种新型空调末端制冷技术，3 种技术各有优势，满足不同的客户需求。

(1) 热管背板空调

如图 6.1-6 所示，热管背板空调由表冷器、中间换热单元（DCU）以及辅助结构件构成，通过热管背板的表冷器，借助 R134a 工质相变直接吸收机架中 IT 设备的热量，完全依靠制冷剂气化和液化产生的压差驱动制冷剂循环，无动力驱动。同时有效降低冷空气传输距离，提升冷空气利用效率，同时配合自然冷源达到节能目的。



图 6.1-6 热管背板空调机房

(2) 水冷前门空调

如图 6.1-7 所示，水冷前门空调是将制冷系统末端安装在网络机柜前门，针对 IT 设备进行精准送风，气流均匀，制冷效率高，不产生局部热点。同时提升冷空气利用效率，将制冷区域压缩到机柜内部，明显降低空调环境负荷，节约空调能耗，且相邻机柜内部相通，形成冷量共享的冷池，称为微型冷通道结构，冷源贴近热源，没有冷量散失。



图 6.1-7 水冷前门空调机房

(3) 水冷列间空调

如图 6.1-8 所示，水冷列间空调是采用制冷系统末端紧靠机柜，气体输送距离短，风机功率小，采用封闭冷通道部署方式，优化气流组织，减少混风损失。此外，由于机柜分布在空调之间，利于布置大功率 IT 设备，同时可进行非标机柜改造，扩容便捷，满足客户定制化需求。



图 6.1-8 水冷列间空调机房

新型空调末端制冷技术与传统精密空调相比，制冷效率提升 63%，空调系统能耗可以降低 66%。其中，热管背板空调 PUE 因子低至 0.013，水冷前门空调 PUE 因子为 0.032，水冷列间空调 PUE 因子为 0.038，采用新型空调末端每年可节约用电超过 230 万 kW·h/1000 机架；此外，IDC 机房空间利用率可提升 13%~25%。通过对服务器的温度、功耗、风量等数据进行采集和分析处理，对风机转速进行智能控制，实现冷量按 IT 设备所需进行供给，解决空调末端控制不准确的技术难题。

6.1.4 节能控制措施

6.1.4.1 冷源 BA 控制系统

数据中心冷却系统有效运行和故障监控全部依赖数据中心的冷源 BA 控制系统。数据中心冷源 BA 控制系统结构示意图如图 6.1-9 所示。本控制系统采用四层网络通讯结构：第一层为现场采集层，由冷源系统的各硬件组成，提供监测控制点，包括送排风系统、污水坑系统、集成冷水机组、集成蓄冷罐、集成水源热泵机组等。第二层为系统接入层，采用 DDC (Direct Data Controller) 控制器及 I/O 模块或网关连接底层设备。第三层为系统控制层，控制设备 NAE (Network Automation Engine) 互联，采用 BAC-net 通讯协议，用于连接控制设备 (DDC 及 I/O 模块或网关)，并进行逻辑运算和下发决策控制命令。第四层为系统显示层，使用 TCP/IP 协议，用于连接系统服务器、工作站及第三方系统。

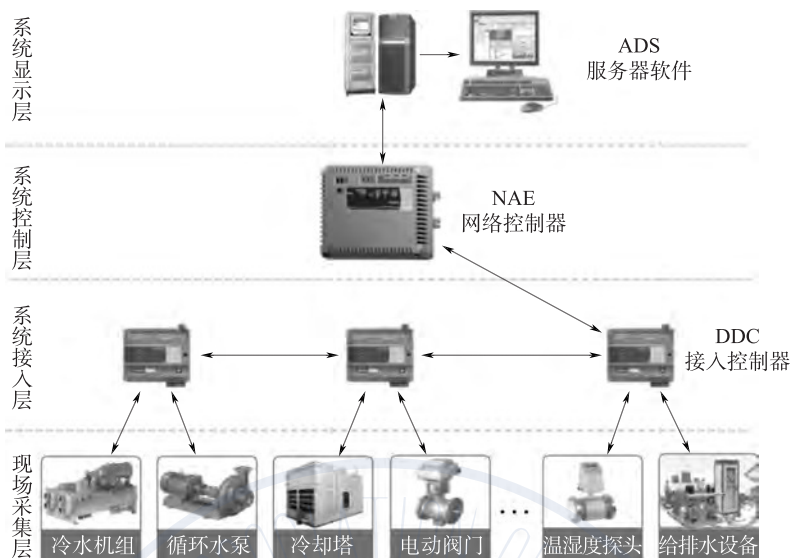


图 6.1-9 冷源 BA 控制系统结构示意图

6.1.4.2 应用的 3I 智能控制策略

数据中心配置的水冷机组控制系统仅能够实现设备级的远程控制，未实现系统级的联动控制，自动化和智能化程度低、可靠性差。基于以上痛点问题，数据中心开发 3I 智能控制策略，实现水冷空调设备智能化运行，如图 6.1-10 所示。

3I 智能控制策略包括：智能切换（I-Switch）、智能调节（I-Adjust）、智能选择（I-Choice），逻辑控制提升系统可靠性包括开发智能控制逻辑实现故障时系统平滑切换。



图 6.1-10 制冷控制 BA 系统展示界面

根据系统设计、数据积累、冷源设备特性等综合分析，开发 3I 智能控制逻辑，如图 6.1-11 所示。控制主逻辑包括七项：模式切换、冷水机组加减机条件、启动/停止的连锁保护控制、故障模式下控制、蓄冷罐控制、循环水泵循环控制、冷却塔控制，精确控制设备加减载、故障自动切换，自动选择最佳制冷模式，最大程度使用自然冷源，有效降低水冷系统安全运行风险和运行能耗。



图 6.1-11 制冷控制 BA 系统操作界面

(1) 智能切换

根据室外湿球温度，对制冷系统的制冷模式、部分自然冷却模式与全部自然冷却模式三种运行模式进行智能切换。

制冷模式策略：①室外湿球温度大于 10℃；②时间大于 20min；③当前机组告警状态；④选择机组/冷机启动/加载；⑤设定冷却水供水温度等于 14℃；⑥冷水出水温度大于 14℃，时间大于 20min 告警。

部分自然冷却模式策略：①室外湿球温度小于 10℃；②时间大于 20min；③当前机组告警状态；④选择机组/冷机启动/加载；⑤设定冷却水供水温度等于 12℃；⑥打开板换的电动阀门；⑦水阀 V7 由冷凝器压力调节。

全部自然冷却模式策略：①室外湿球温度小于 6℃；②时间大于 20min；③冷却水出水温度大于 5℃；④启动冷却塔电加热器；⑤设定冷却水供水温度等于 12℃；⑥冷却塔风机全部关闭；⑦冷却水供水温度小于 6℃，时间大于 5min；⑧开启阀门 V10，关闭阀门 V9；⑨冷却塔表冷器电磁阀开。

智能切换策略流程如图 6.1-12 所示。

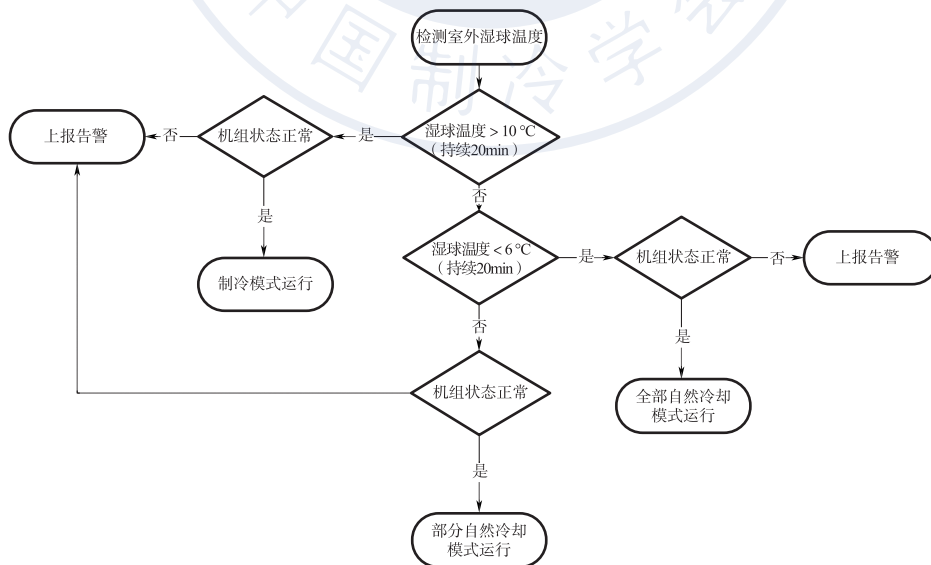


图 6.1-12 智能切换策略流程图

智能切换策略逻辑编程图如图 6.1-13 所示。

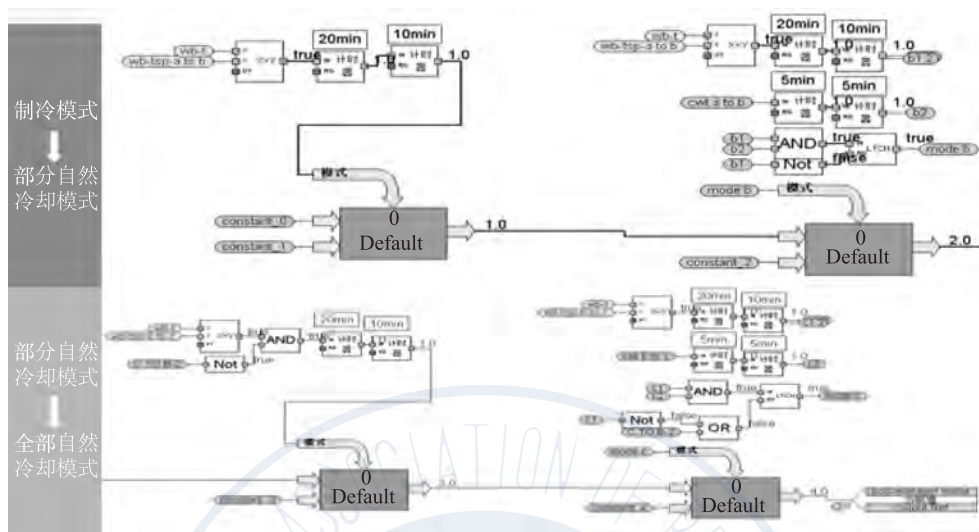


图 6.1-13 智能切换策略逻辑编程图

(2) 智能调节

据制冷负载、冷水和冷却水温度、水泵运转情况等数据，对制冷系统进行加减载智能调节操作。

冷水机组调节减载策略：

- ① 各台冷水机组运行电流与额定电流的比值之和除以运行组数减去 1 的商小于 0.8；
- ② 此状态持续 15min；
- ③ 管理器根据运行时间及运行效率逐步关闭适当数量的冷水机组；
- ④ 前一套冷水机组卸载后延时至少 5min 才可以卸载下一套冷水机组。

冷水机组调节加载策略：

- ① 冷水机组成功启动 30min；
- ② 冷水供水温度大于 15℃；
- ③ 冷水泵频率达到 45Hz；
- ④ 前一套冷水机组加载后延时至少 15min 才可以加载下一套冷水机组。

表 6.1-2 为智能调节变量表。

表 6.1-2 智能调节变量表

检测/控制类型	内容
模拟量	设备工作电流、电压、室外湿球温度、各管路进回水温度、压力
状态量	设备本地/远程/自动、设备启停、阀门开关状态、水流开关、压差开关
告警量	配电系统告警、冷水机组制冷剂高低压力告警、油路循环系统告警、温度
运算规则	与、或、非、计时、选择、统计、保持

(3) 智能选择

根据各冷水机组运行时间、冷水机组运行效率、告警信息等参数，智能选择需要启动的冷水机组。

运行时间判断策略：

① 自控系统将记录各冷水机组的运行时间，并对各冷水机组的累积运行时间进行排序。在冷水机组启动时，根据此顺序决定每套冷水机组的投入切出。

② 对冷水机组连续运行时间进行监测，当超过设定时间时切换至另一冷水机组，以防止一台冷水机组长时间运行。

设备运行性能判断策略：

在日常运行过程中记录各冷水机组的运行性能，当收集到足够数据后按照效率对冷水机组进行排序。效率低的冷水机组在计算累积运行时间时会乘以一个大于 1.0 的惩罚系数，从而保证效率高的冷水机组优先运行。

智能选择策略流程图如图 6.1-14 所示。

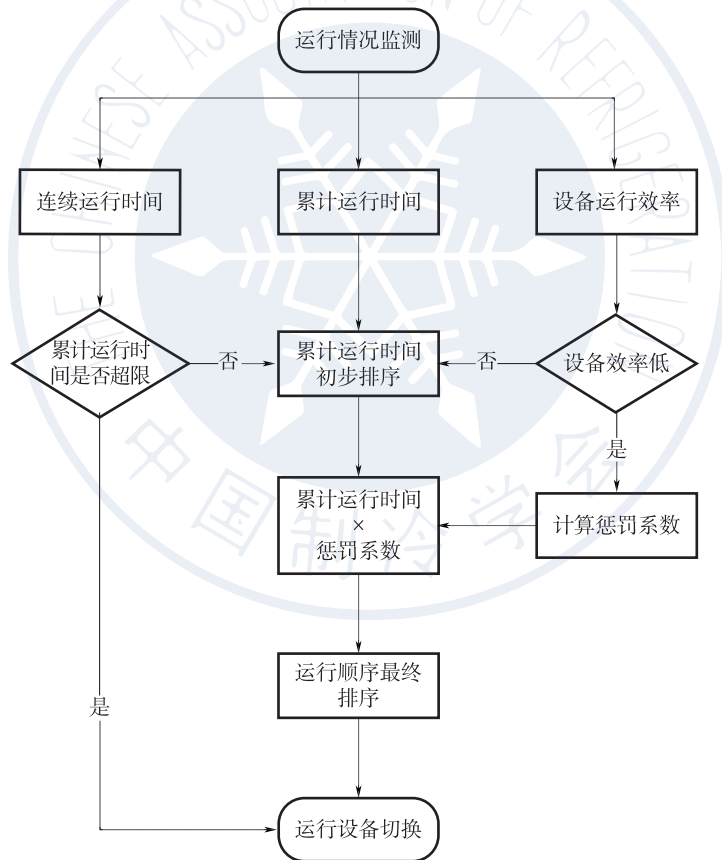


图 6.1-14 智能选择策略流程图

数据中心制冷系统“3I”智能化控制系统，通过改造循环水泵、阀门的 DDC 控制器，优化了原有控制系统架构，提升了硬件的可靠性，精确控制了板换与冷水机组的工作模式切换，实现最优工况运行，耗电量降低 17.1%，耗水量降低 11.3%，巡检工时

降低 42.9%，有效避免了制冷系统在模式切换、设备倒换等情况下故障的发生。

6.1.4.3 引入 AI 技术智能调优

中国移动呼和浩特数据中心搭建能耗智能管理平台，引入“专家经验+AI 算法”两种调优方式相结合，各取所长，推进实现最大化节能效果，具体技术方案如下。

(1) 专家经验调优方案

第一步，通过专家经验规则录入平台，实现能效诊断。包括：环境工况诊断、能源利用效率诊断、设备健康度诊断、设备群集协调配合诊断等，如图 6.1-15 所示。



图 6.1-15 专家经验规则录入示意图

第二步，平台进行在线流程编排，实现基于专家经验的节能寻优。基于回馈的诊断结果判断下一步执行策略，实现快速寻优，如图 6.1-16 及图 6.1-17 所示。

第三步，根据专家经验调优进行问题闭环管理，以空调负载不均衡问题为例，闭环流程详见图 6.1-18。

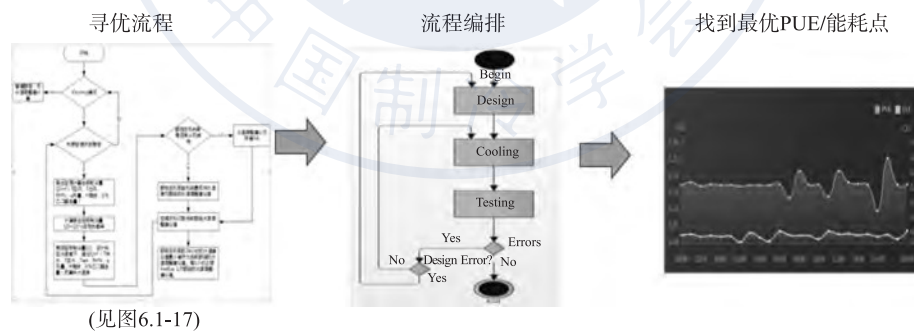


图 6.1-16 基于专家经验节能寻优示意图

(2) AI 算法调优方案

专家经验调优主要依赖人的经验，具有探索式、逐步寻优的特点，精度相对较低。为了进一步快速给出高精度寻优结果，能耗管控平台引入了 AI 算法调优方案，主要依据室外温湿度及 IT 负载工况，利用 AI 技术，建立能耗模型，找出整个制冷系统的最佳工况，优化控制策略，实现数据中心最优能耗，如图 6.1-19 所示。

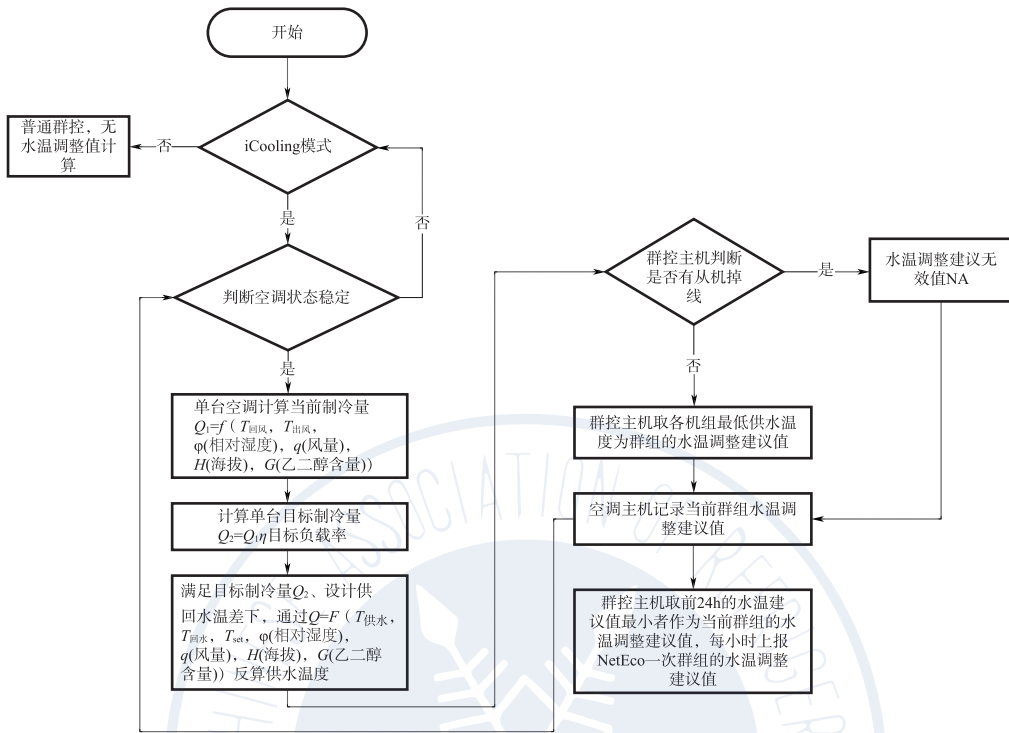


图 6.1-17 基于专家经验节能寻优逻辑示意图



图 6.1-18 根据专家经验调优闭环流程示意图

业务流程包括：数据治理、关键特征提取、AI 模型训练、最优参数推理、推理决策安全下发，具体见图 6.1-20。

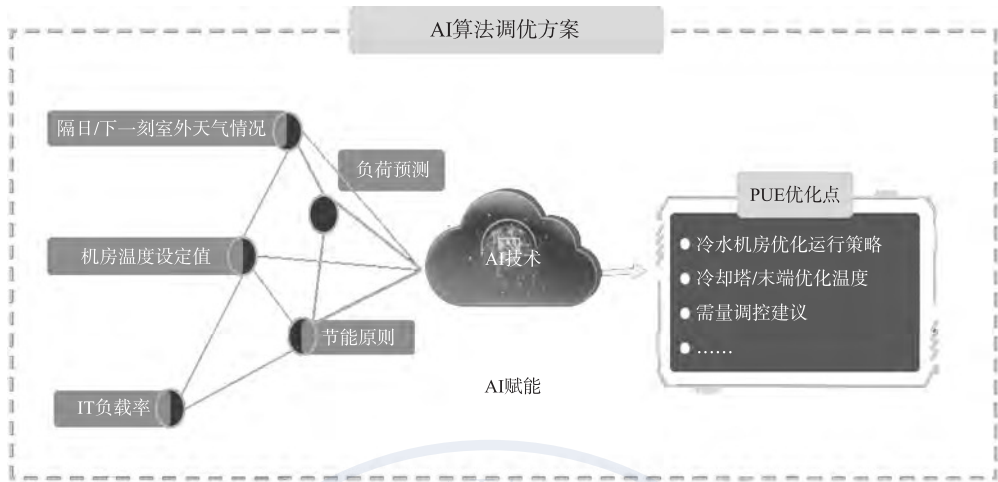


图 6.1-19 AI 算法调优示意图

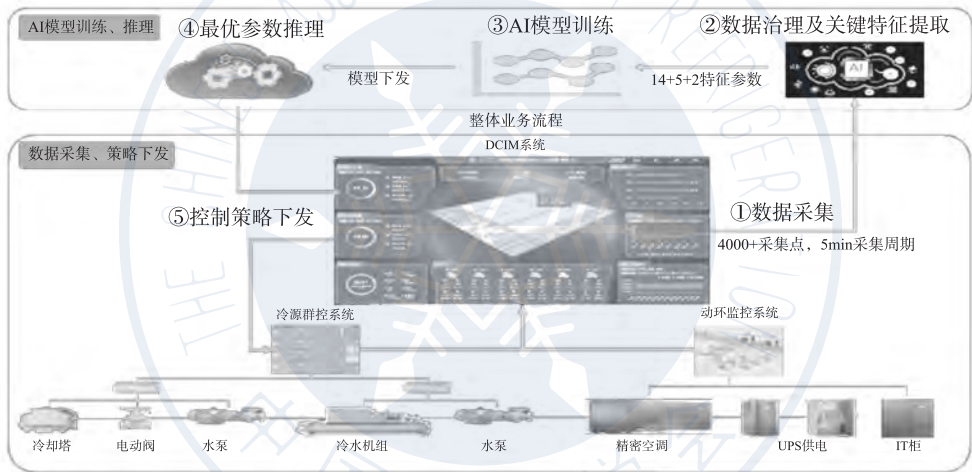


图 6.1-20 AI 算法调优业务流程图

① 数据治理

即对异常数据进行识别和删除，统一所有参数的时间轴，地理位置归一，剔除与能效无关的数据（告警信息、维护信息等），参考数据中心运维经验、冷水机组等设备运行参数对空白数据进行补齐，如图 6.1-21 所示。

数据治理：输出70+类跟PUE相关数据，AI平台利用高斯分布，对异常数据进行识别和删除；统一所有参数的时间轴；剔除与能效无关的数据；依据运维经验、运行参数补齐空白数据。



图 6.1-21 AI 算法调优数据治理示意图

② 关键特征项提取

利用治理后的规范数据，通过相关性分析，从海量原始数据中找出“5+14+2”类影响 PUE 的关键特征因子，如图 6.1-22 所示。

关键特征项提取：利用治理后的规范数据，通过相关性分析特征工程，反复分析计算获得的关系因子，找出影响PUE的14+5+2类关键特征因子。

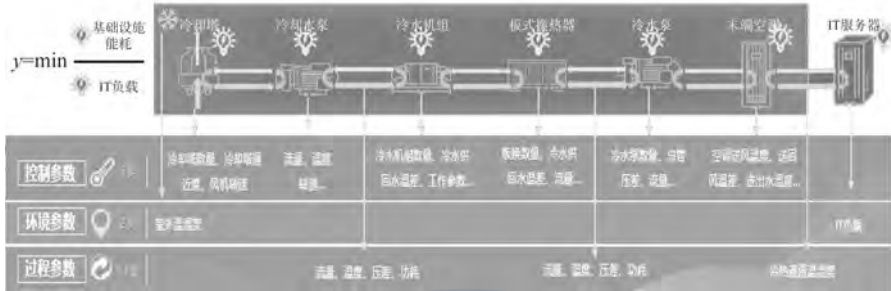


图 6.1-22 AI 算法调优关键特征项提取示意图

③ 通过深度学习建立能效模型

利用机器学习算法找到不同设备、不同系统之间参数的关联关系，利用现有的大量传感器数据建立数据中心的能效模型。所有经过数据治理和关键特征提取的数据被随机分为三份，其中 10% 的数据用于初步训练，80% 的数据用于深度训练，10% 的数据用于最终校验。经过训练和校验，得出数据中心 PUE 模型。

神经网络包含五个隐含层，神经网络的基本模型以及搭建示意图如图 6.1-23 和图 6.1-24 所示。

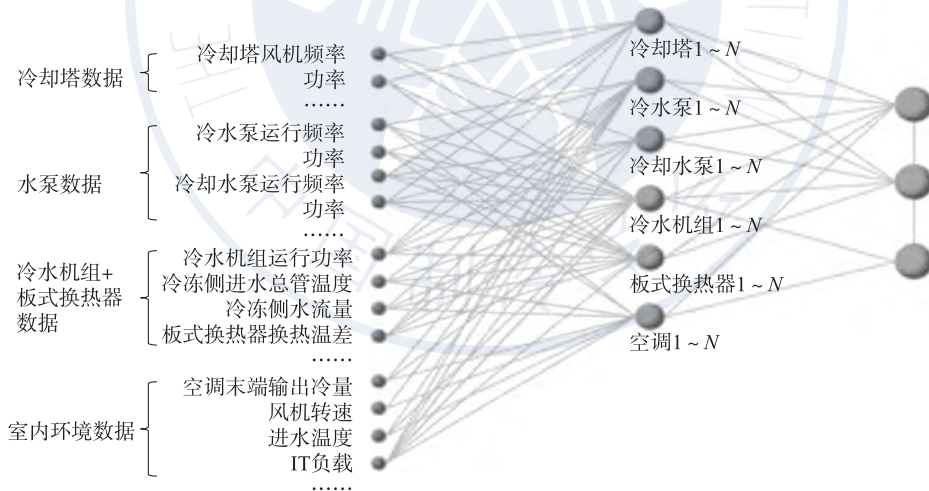


图 6.1-23 AI 算法调优神经网络基本模型

④ 利用遗传算法进行推理决策

将预测模型（PUE 模型）下发到推理平台，利用推理平台的推理和计算能力，用遗传算法对可能的制冷策略进行遍历和模拟。通过参数遍历组合、业务规则保障、制冷能耗计算及最优策略选择四个步骤，最终找出最佳的运行策略，如图 6.1-25 所示。

6.1.4.4 冷却水智能处理系统

行业内各大数据中心冷却水系统存在的问题是：腐蚀、结垢、微生物黏泥。而且，



图 6.1-24 AI 算法调优训练模型搭建示意图

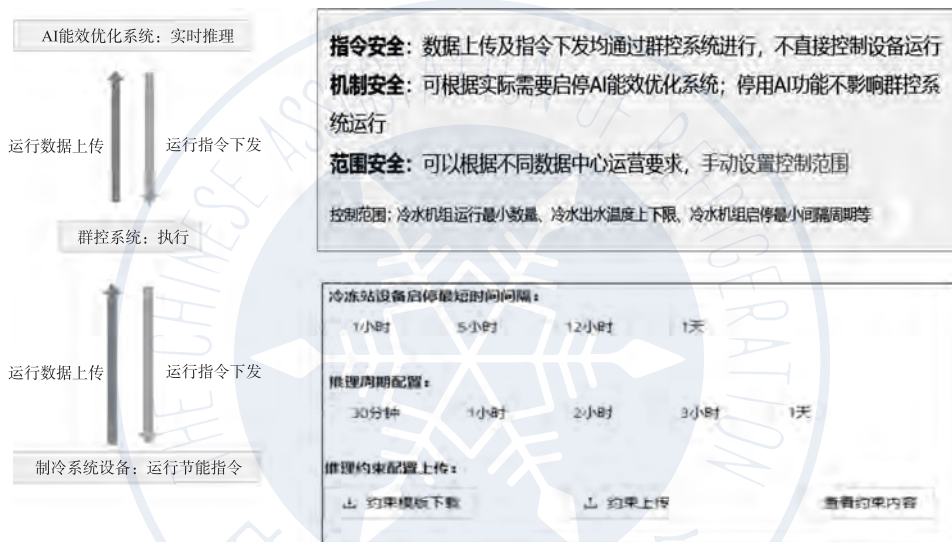


图 6.1-25 AI 算法调优推理决策示意图

系统一旦出现了这三个问题，会形成恶性循环，造成设备结垢，换热效率低下，能耗增加。为了使制冷系统结垢、腐蚀风险大幅降低，同时最大程度减少水量的消耗，数据中心基于现有冷却水加药装置完成水处理系统的智能化改造，采用冷却水智能加药控制技术，合理控制浓缩倍数使冷却水系统达到最佳工况，从而降低冷却水系统结垢、腐蚀风险，同时减小制冷能耗。制冷站房照片如图 6.1-26 所示。

为提升制冷效率，数据中心对冷却水处理设备进行智能化改造，主要技术包含：自动化应力控制策略、设备智能化改造、研发药剂投加方案、数据远程分析等，实现药剂示踪检测与主控参数的自动上传；通过药剂示踪实时监测反馈来控制投加量，实现按需闭环控制，在流程控制上实现了排污与加药控制联动互锁功能。冷却水智能处理系统如图 6.1-27 所示。

提升冷却水系统利用率，通过冷却水系统加压装置智能化改造后，水质控制各项指标均达到国标对冷却循环水的控制要求，管路结垢情况控制良好，板换运行更加稳定，特别是电导率指标控制在 $1720\mu\text{s}/\text{cm}$ ，浓缩倍数稳定控制在 3.0 以下，制冷能耗下降 13.8%，耗水量下降 17.8%，数据中心冷却水系统小温差稳定控制在 1.4°C 。



图 6.1-26 制冷站房照片

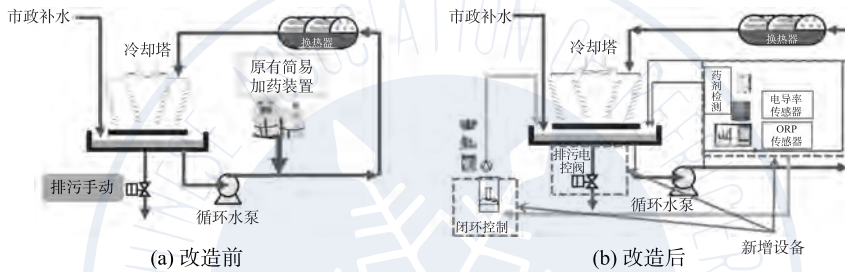


图 6.1-27 冷却水智能处理系统示意图

6.1.5 PUE 运行数据

如图 6.1-28 所示为逐月 IT 设备耗电量、总耗电量和 PUE 值。

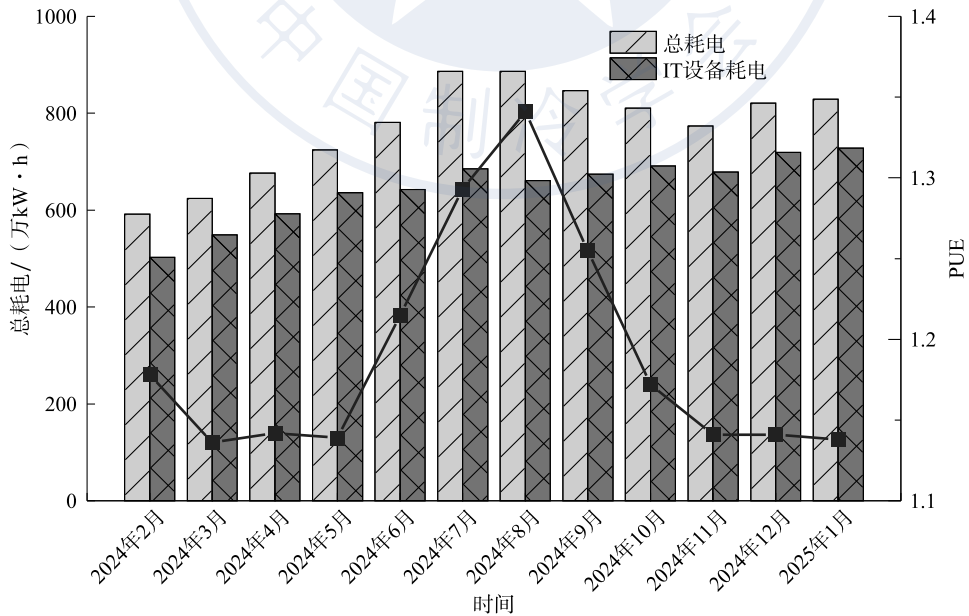


图 6.1-28 逐月 IT 设备耗电量、总耗电量和 PUE 值

6.2 山西中联云港 & 华奕新能源+中联绿色大数据产业基地

6.2.1 案例简介

中联绿色大数据产业基地 4 号数据中心位于山西省阳高县大白登镇，建筑为地上二层，高度 15.21m。该机楼有 M101、M102、M103 三间机房，M101、M102 机房服务器平均功率 32kW，单个房间 IT 设计负载为 704kW，M103 机房 IT 设计负载为 384kW，该机楼设计总负载为 1792kW。

6.2.2 系统简介

M101、M102 两个机房各配置三台 450kW 间接蒸发冷却集成冷站，M103 机房配置三台 240kW 间接蒸发冷却集成冷站，供回水设计温度为 22℃/32℃，间接蒸发冷却集成冷站均采用 N+1 配置，当自然冷源不满足供冷要求时，设备内部补冷系统启动。水泵、板式换热器等集成在机组内，水泵、风机变频控制，风机、循环水泵、风墙配 UPS 电源，保障系统应急供冷，电池供应时间不小于 15min。数据中心全年使用自然冷却模式，仅在极端工况下开启直接膨胀风冷补充制冷系统。

服务器风冷部分空调形式采用风墙空调，在服务器机柜背部设置热通道，热通道机柜对面设置风墙，机房末端风墙均采用 N+1 配置，冷源来自蒸发冷却集成冷站，最大限度使用自然冷源。机房气流组织形式为：封闭热通道吊顶回风、弥漫送风。

系统图如图 6.2-1 所示，系统项目特点如下。

(1) 冷源最简化：制冷系统核心设备集成一体，内置 AI 智能控制系统根据室外气象参数及室内负荷变化自动调优运行、自动切换运行模式，运行节能、运维简单方便。

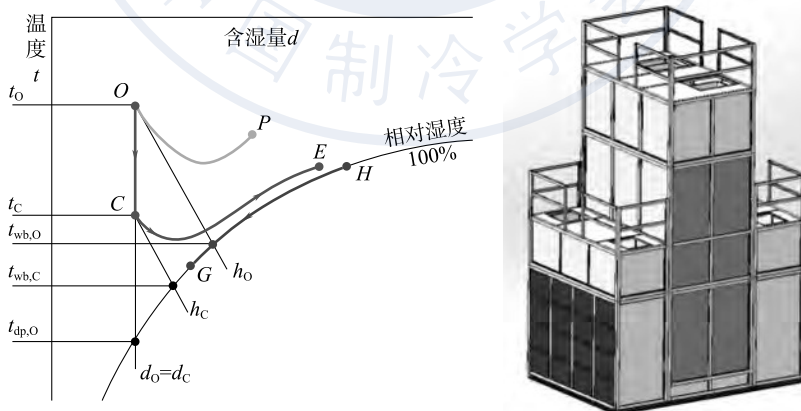


图 6.2-1 间接蒸发冷却塔原理图

(2) 冷源高效化：间接蒸发冷却塔利用双级蒸发技术，可实现系统全年自然冷却制冷，冷源侧全年高效运行，大幅降低数据中心 PUE。

(3) 冷源集成化：将冷源、输配及控制系统高度集成为一体，打造“间接蒸发冷却集成冷站”，空调系统冷源侧、输配侧无须占用室内建筑空间，且能实现机组快速部署和交付。

(4) 经济性：考虑空调系统的安装、维护、运行费用以及引起的电气系统相关的综合投资，实现最优的总拥有成本（TCO），提升经济效益。

6.2.3 运行情况简介

本系统全年运行自然冷却模式，具备间接复合直接蒸发冷却模式、直接蒸发冷却模式、冬季防冻模式，其控制逻辑如下。

(1) 间接复合直接蒸发冷却模式：当室外湿球温度大于等于 18℃ 时（连续 15min 以上），间接蒸发冷却段启动，间接蒸发冷却塔通过间接段预冷+直接蒸发冷却模式，实现低于湿球温度的冷却供水，满足机房制冷需求。

(2) 直接蒸发冷却模式：当室外湿球温度小于 18℃ 时（连续 15min 以上），间接蒸发冷却段关闭，间接蒸发冷却塔仅运行直接蒸发冷却模式，系统即可实现目标供水温度，满足机房制冷需求。

(3) 冬季防冻模式：当室外干球温度小于等于 8℃ 时（连续 5h 以上），间接蒸发冷却集成冷站的间接蒸发冷却器彻底排空内部循环水，以彻底避免结冰，机组运行在直接蒸发冷却模式，根据机组出水温度，通过风机变频调节供水温度，在满足供水温度前提下，降低机组结冰风险、实现最佳节能。

(4) 退出冬季防冻模式：当室外干球温度大于 8℃（连续 5h 以上），间接蒸发冷却器开始充水，直接蒸发冷却段运行提供制冷能力，当湿球温度逐步增高，出水温度不满足需求时，逐步开启间接蒸发冷却器，使出水温度稳定在末端供水温度需求。

具体控制逻辑如表 6.2-1 所示。

表 6.2-1 控制逻辑内容

控制逻辑	逻辑内容
间接蒸发冷却集成冷站系统启动	<ol style="list-style-type: none"> 1. 检测各种报警状态，如设备未出现故障，则开始进行顺序启动程序； 2. 开启冷却管道阀门→开启冷水管阀门→间接蒸发冷却塔开启→延时 5s 开启冷却水泵（低水位不报警）→检测冷却水泵开启运行信号→所有设备正常运行； 3. 直接风机进入 PID 模式，会根据冷却出水设定温度，自动调节风机频率；冷却水泵进入 PID 模式，会根据设定出水温度，自动调节水泵频率，确保水泵频率满足最小流量要求； 4. 启动程序完成
间接蒸发冷却集成冷站系统停止	<ol style="list-style-type: none"> 1. 检测停机报警信号，或者人为切入手动运行。触发停机； 2. 停机顺序：关闭冷却水泵→延时 180s 关闭间接蒸发冷却塔→延时 10s 关闭冷水管阀门→延时 10s 关闭冷却管道阀门； 3. 如异常停机机会触发报警蜂鸣器，提示现场维护人员及时排查故障；待故障排除后，系统会自动启动； 4. 如人为切换到手动时，需要人工逐步开启每台设备。设备故障也会触发蜂鸣器报警； 5. 停止程序完成

续表

控制逻辑	逻辑内容
间接蒸发冷却集成冷站系统停止	警告：在自动状态下如果系统运行正常，如非必要，不要打到手动操作，打到手动时会造成系统停机。只有在需要手动操作时才能打到手动状态
	停机信号：冷却水泵故障（冷水泵故障）、整体低水位信号； 机组水箱水位低会触发冷却水泵停止，待水位升高后会自动启动

外加机械（DX）补冷模块控制如下。

(1) DX补冷模块机启动：夏季极端高温期间，间接蒸发冷却集成冷站画面上有DX补冷模块机组的启停点，也可远程动环控制启停。DX补冷模块的工作是自己的一套独立控制系统，机组通过温差进行控制，在远程启动下，当检测到出水温度高于 24°C 时，DX补冷模块内部开始工作，待间接蒸发冷却集成冷站出水温度到 20°C 后停机。当下次再检测到出水温度高于 24°C 时，重新开始工作，如此循环。

(2) DX补冷模块机关闭：DX补冷模块关闭需要在远程动环或触摸屏上进行关闭，关闭后的DX补冷模块不再进行启停动作。

(3) DX补冷模块机调节：DX补冷模块机工作期间，将按照冷站出水温度信号进行温度调节，温度低于设定值时减载，高于设定值时加载。

(4) 故障报警：DX补冷模块机的所有运行、故障信号均上传到冷站内，由冷站统一输出。

6.2.4 用电量统计

不同设备日用电量分布如图 6.2-2 所示，每月用电量如图 6.2-3 所示。

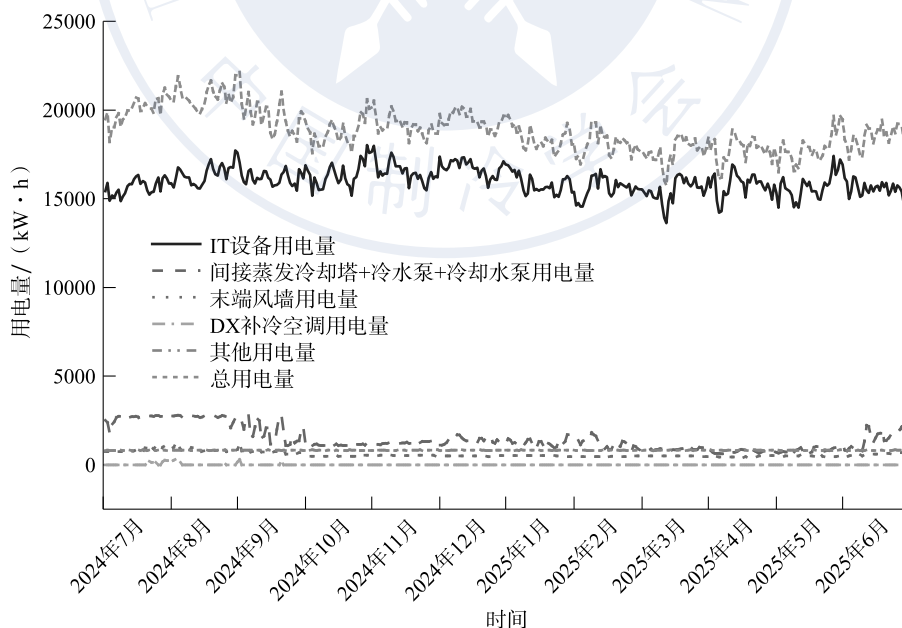


图 6.2-2 不同设备日用电量分布

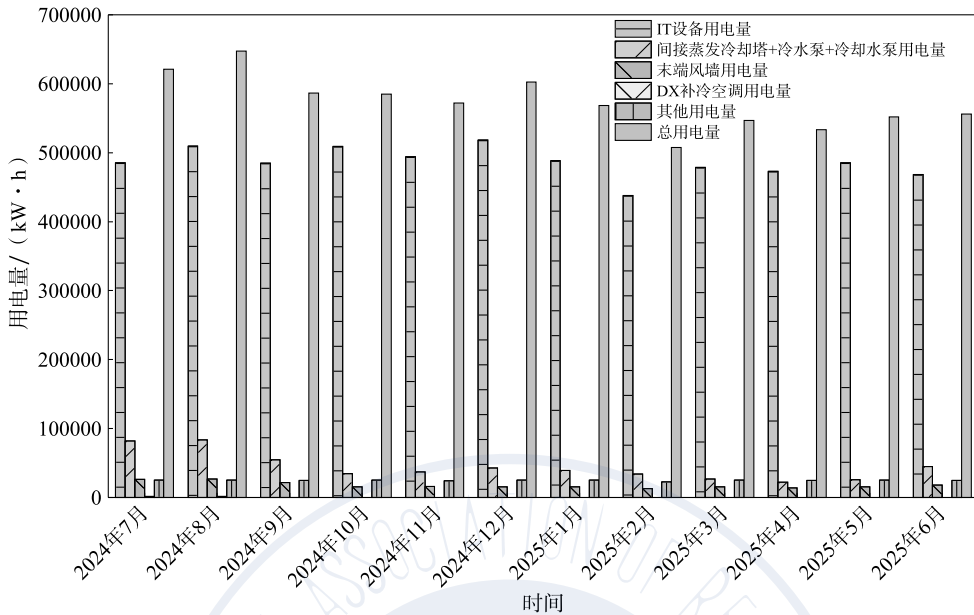


图 6.2-3 不同设备每月用电量

6.2.5 GCOP 计算

根据 T/CAR 9.2—2021《数据中心冷却系统》，全年综合性能系数 $GCOP_A$ 计算如公式 (6.2-1) 和 (6.2-2) 所示：

$$Q_{CS,A} = E_{DC,A} - E_{CS,A} \quad (6.2-1)$$

$$GCOP_A = Q_{CS,A} / E_{CS,A} \quad (6.2-2)$$

式中： $Q_{CS,A}$ ——数据中心冷却系统全年累计排热量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

$E_{DC,A}$ ——数据中心全年累计耗电量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

$E_{CS,A}$ ——冷却系统全年累计耗电量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

因此，该项目数据中心全年累计耗电量 $E_{DC,A}$ 为 $6878625.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，冷却系统全年累计耗电量 $E_{CS,A}$ 为 $745056.1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，数据中心冷却系统全年累计排热量 $Q_{CS,A}$ 为 $6133569.7 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，全年综合性能系数 $GCOP_A$ 为 8.23。

本项目开创性地应用间接复合直接蒸发冷却技术，充分利用了当地优质气象资源，首次实现了在华北地区数据中心全年自然冷却运行，在最大化节能的同时，为大型高密数据中心建设提供了新的思路和方向。

6.3 北京某数据中心

6.3.1 案例简介

以图 6.3-1 所示的北京市某数据中心为例，机房面积为 453.6 m^2 ，高度为 5.2 m ，共有 139 架机柜，单机柜电力限额 4.4 kW ，负载率为 55%，每个机柜采用 5 个浪潮 NF5466，支持风冷及冷板式液冷，服务器功率可设置为 1300 W 和 1600 W ，机房拥有

29 台列间空调。

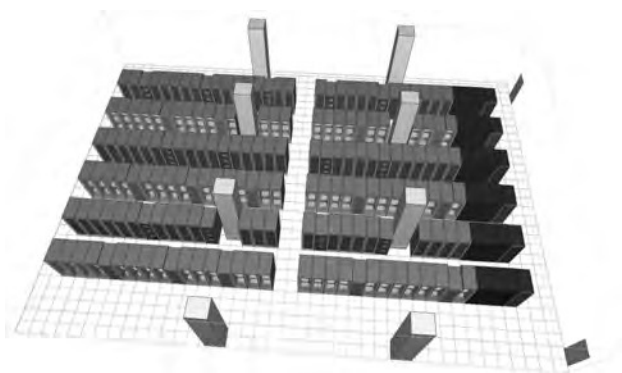


图 6.3-1 北京某数据中心

表 6.3-1 设备尺寸及参数

名称	参数	数值
机柜	宽×深×高/mm×mm×mm	800×600×2200
	功率/kW	4.4
	数量/个	139
服务器	高度/mm	4
	功率/kW	1.3/1.6
UPS	宽×深×高/mm×mm×mm	600×1200×2200
	功率/kW	150
	数量/个	6
蓄电池柜	宽×深×高/mm×mm×mm	600×1200×2200
	功率/kW	8.4
	数量/个	20

机房内机柜、IT 设备及供配电设备的尺寸及参数如表 6.3-1 所示，数据中心机房的平面布置如图 6.3-2 所示。

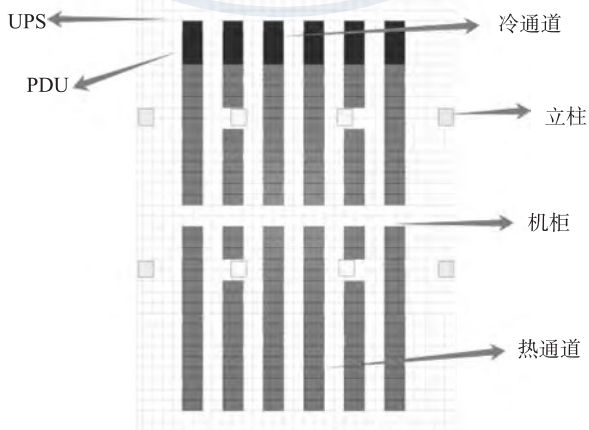


图 6.3-2 数据中心平面布置图

6.3.2 系统简介

机柜风冷采用列间空调冷却，风-液混合冷却采用列间空调与冷板式水冷混合冷却，分别设置无封闭通道、封闭热通道及封闭冷通道。列间空调的空调出风温度控制在 18°C ，测试期间分别使用 1300W 、 1600W 的4U服务器进行6组中负载情况下的模拟。根据GB 50174—2017《数据中心设计规范》，当机柜或机架采用冷通道和热通道分开方式布置时，主机房的环境温度和露点温度应以冷通道的温度为标准；当服务器设备采用冷热通道分离方式布置时，主机房的环境温度和露点温度应以机柜进风区域的温度为准。

项目系统特点：

(1) 风-液混合冷却（列间空调与冷板式水冷结合）的冷却效果优于单纯风冷。在相同通道状态下，混合冷却能显著降低服务器的平均进口温度和平均出口温度，且平均出口温度的下降更为明显，温度变化幅度也更小，尤其在无封闭通道时，对抑制高温的作用更突出。

(2) 通道封闭方式对冷却效果影响显著。无论是风冷还是混合冷却，封闭通道（封闭热通道或封闭冷通道）的服务器平均进口温度均低于无封闭通道。其中，封闭冷通道的冷却效果优于封闭热通道，因其能使冷空气更集中地用于机柜冷却，减少冷量流失，而封闭热通道时热气流易导致冷空气向上运动，削弱冷却效果。

(3) 服务器功率升高（从 1300W 到 1600W ）时，无封闭通道和封闭热通道状态下的服务器平均进出口温度均有明显上升，且无封闭通道时升温更显著。而封闭冷通道状态下，温度变化较小，在功率增加时较稳定。

6.3.3 运行情况简介

当服务器功率为 1300W 和 1600W 时，在风冷和风-液混合冷却下对20个服务器的平均进出口温度进行对比分析，如图6.3-3~6.3-6所示。功率增加，无封闭通道时与封闭热通道时的平均进出口温度都略有上升，以无封闭通道时最为明显，而封闭冷通道时温度变化较小。采用混合冷却后，平均进出口温度均下降，平均出口温度下降更为明显，且温度变化幅度较采用风冷时小。

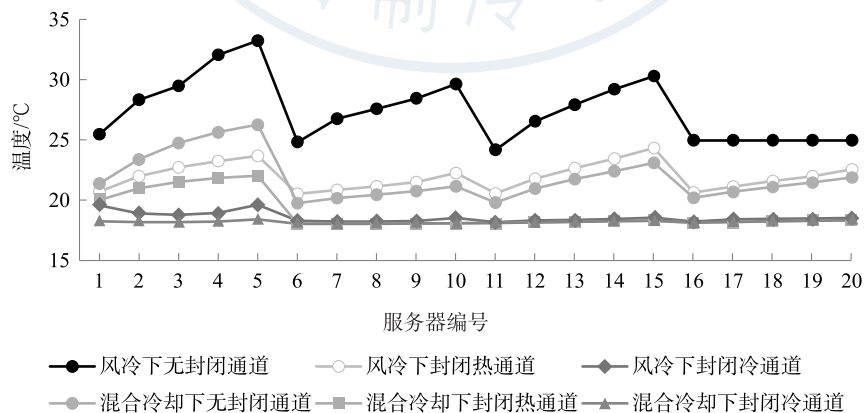


图 6.3-3 1300W 时平均进口温度

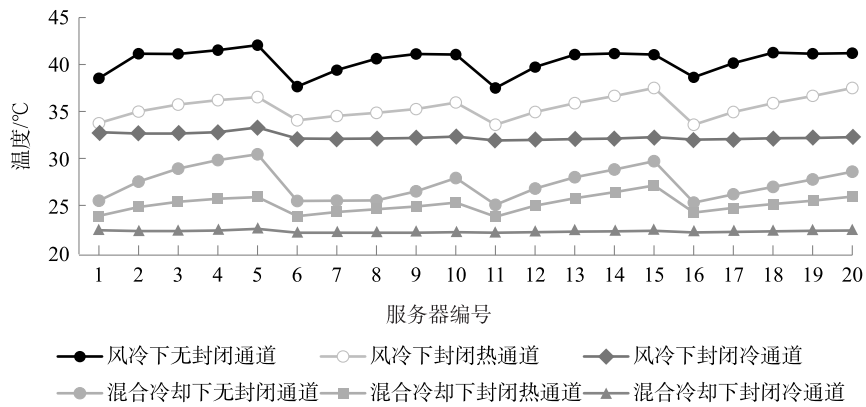


图 6.3-4 1300W 时平均出口温度

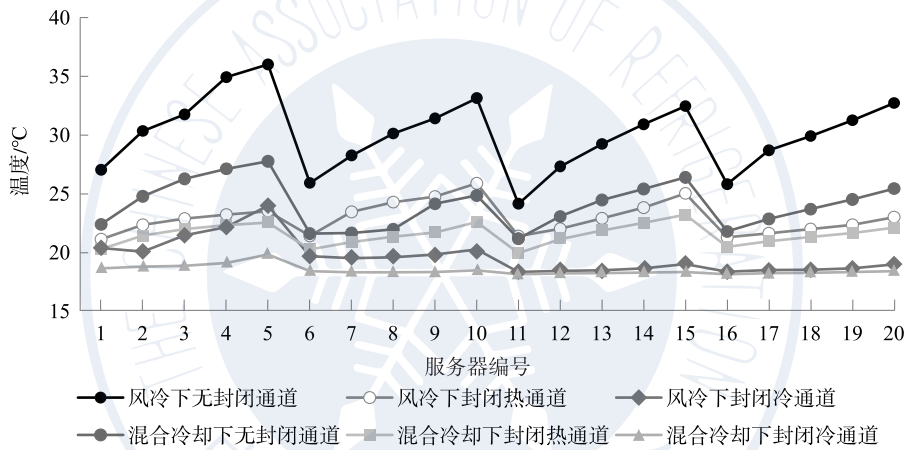


图 6.3-5 1600W 时平均进口温度

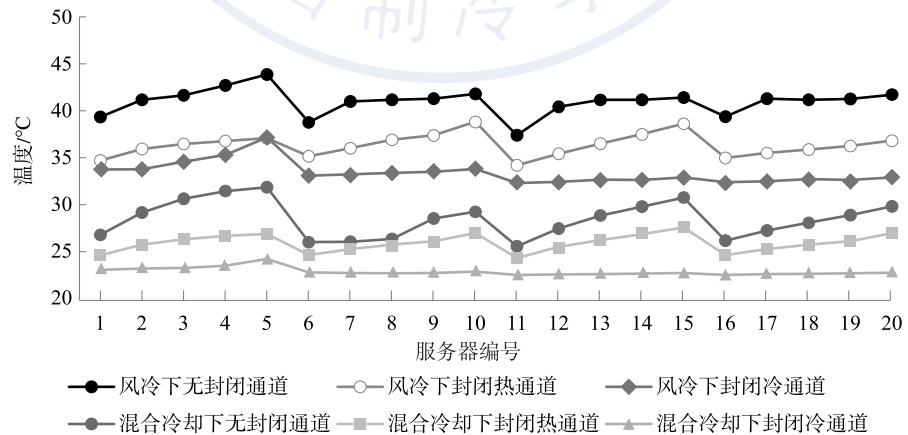


图 6.3-6 1600W 时平均出口温度

6.4 中国移动通信集团上海数据中心

6.4.1 案例简介

该数据中心总建筑面积达 27825m²，涵盖 5 层机房楼，共计标准机架 2000 余个，整体布局合理、功能完善。数据中心的电力系统、制冷系统、网络通信系统等均按照高可用性、高安全性标准进行设计与建设，确保业务连续性的同时，兼顾能效管理。数据中心当前总负载功率为 13934kW，从能耗结构来看，IT 设备与制冷系统是主要能耗来源，因此优化这两个系统的能效，是降低整体 PUE、提升绿色水平的关键。配套 3 套高配系统、24 套低配系统、1 套冷源系统、1 套油机系统，以及 BA 和动环系统等。楼宇合计拥有机房 62 个，其中动力机房 44 个、传输机房 1 个、数据机房 16 个、综合机房 1 个，目前可装机容量 1900 个机架（其中 5kW 机架 500 个、7kW 机架 640 个、15kW 机架 12 个、25kW 机架 600 个、传输机架 130 个）。

6.4.2 PUE 分析

2025 年，该数据中心年 PUE 值为 1.35。PUE 作为衡量数据中心能源效率的关键指标，此数值表明在能源利用方面达到了较高水平。与行业平均水平相比，具有明显优势，有效降低了运营成本，提升了能源利用率。

(1) 末端 PUE：末端设备包括服务器、存储设备等直接进行数据处理的硬件设施。通过采用高效能服务器，对设备进行智能功耗管理，根据业务负载动态调整设备运行功率，使得末端系统在保障业务稳定运行的同时，有效控制了能源消耗。

(2) 输配 PUE：输配系统涵盖了为末端设备供电和制冷的传输分配设施。在供电输配方面，采用了高效的不间断电源（UPS）系统，优化了电力布线，减少了线路损耗。在制冷输配方面，通过采用精确送风技术，将冷空气精准送达设备需求区域，避免了冷空气的浪费，提升了制冷效率，从而降低了输配系统的能源消耗。

在电力输配方面，数据中心采用双路市电输入，经过高压配电柜、变压器、UPS、高压直流系统及配电柜等设备，最终输出稳定可靠的电源。同时，配备柴油发电机组作为应急电源，确保极端情况下关键系统的持续运行。

在制冷输配方面，采用水冷系统，局部高热密度区域则使用水冷中央空调集中制冷。该系统通过冷水机组、水泵、冷却塔等设备协同工作，实现高效制冷。同时，数据中心引入了精确送风技术，通过风道控制、气流组织优化，将冷空气精准送达设备需求区域，减少冷量浪费，提升制冷效率。

此外，数据中心还通过优化管道布局、减少水流阻力、提高水泵效率等手段，进一步降低了输配系统的能耗，显著提升了整体能效。

PUE 详细计算指标如表 6.4-1 所示，不去杂项 PUE 为 1.35，减掉杂项 PUE 为 1.33。

表 6.4-1 PUE 计算分析

楼宇总负载/kW	13934
IT 设备用电/kW	10266
空调配电/kW	661
冷源配套/kW	2699
杂项用电/kW	209

6.4.3 冷却系统简介

冷源系统共配置五台（四用一备）7034kW（2000rt）离心式变频水冷冷水机组，一台 1407kW（400rt）低压螺杆机组，冷源系统最大供冷量为 28136kW（8000rt），采用 BA 智能化控制，可自动根据现场实际情况进行冷水机组增减机、轮机操作。为保证供冷安全，每套冷源的冷水机组、冷却塔、板式换热器、水泵等设备均按 $N+1$ 冗余原则配置。另外，为满足数据中心不间断供冷的需求，冷源系统布置了 14 个 45m³ 在线式闭式蓄冷罐，满足冷水机组断电 15min 内的供冷需求。冷水管路采用环形管道供水，从环管上分别引出供回水立管（8 路）。各数据机房立管均为一用一备，通过管道间的水平管连成环路。管道设置必要的阀门以保证在管道故障、维护时可切换。且空调冷水、冷却水经过加药水处理达到除垢、杀菌、防腐目的，冷却水系统同时设置加药装置达到除藻、杀菌目的，以防止水质劣化影响供水安全。末端机房空调采用精密空调、列间空调等模式提供制冷。

项目系统特点：

（1）AI 输配优化：智能预测与动态调节。在绿色节能技术应用方面，率先引入 AI 驱动的输配优化系统。该系统通过采集 IT 负载、环境温湿度、冷量需求等多维数据，构建预测模型，实时分析制冷需求，并动态调整冷水机组、水泵及冷却塔的运行频率，实现制冷量与需求的精准匹配。在实际应用中，该系统有效解决了传统制冷系统中常见的“过冷”或“供冷不足”问题，同时通过优化水力平衡，减少管道阻力损失，显著降低了水泵功耗，使输配系统的贡献值达到行业领先水平。

（2）模块化 UPS 与高压直流供电技术结合。传统塔式 UPS 系统存在效率低、维护成本高、扩容困难等问题。为此，数据中心将传统 UPS 替换为模块化 UPS 与 240V 高压直流供电系统。模块化 UPS 具备高效率、高可靠性、易维护、可扩展等优势，能够根据负载变化动态调整模块运行数量，避免能源浪费。高压直流供电则通过减少中间转换环节，提升整体供电效率，降低能源损耗。实际运行数据显示，该系统的应用使得供电输配效率提升了 8%~10%，显著降低了数据中心的电力损耗。

（3）能源管理系统建设：实现数据驱动的能效管理。为了实现对能源使用情况的全面掌握与精细化管理，数据中心搭建了一套完善的能源管理系统。该系统通过部署在配电柜、空调机组、服务器等设备上的智能电表、传感器等装置，实时采集能源数据，并上传至统一管理平台。平台利用大数据分析技术，对能源使用趋势、能耗结构、异常能耗等进行深度挖掘，生成能耗报表、能耗分析图、能效改进建议等，为管理层提供科学

决策支持。同时，该系统还具备能耗预警、节能策略推荐等功能，帮助运维人员及时发现和处理能耗异常问题。

6.4.4 运行情况简介

通过上述绿色节能技术的实施与优化，数据中心在多个方面取得了显著成效：PUE 值控制在 1.3 以内，优于行业平均水平；输配系统能耗降低，特别是制冷系统的能效提升明显；模块化 UPS 与高压直流供电技术的应用，提升了供电系统的效率与稳定性；能源管理系统的上线，实现了能源使用的可视化、智能化管理；AI 驱动的输配优化系统显著提升了制冷效率，降低了能耗。

经测算，技术措施全生命周期可节约用电 2.84 亿 kW·h，减少碳排放 28 万 t。未来将持续推进液冷技术应用及可再生能源替代，向 PUE 小于 1.25 的国际先进水平迈进。未来，数据中心将继续深化绿色转型，探索新技术、新标准、新模式，为构建绿色、低碳、智能的数字基础设施贡献力量。

6.5 上海青浦云湖智算中心

6.5.1 案例简介

上海青浦云湖数据中心立足长三角，面向全国，以构建全国一体化算力网络为目标，致力于解决传统算力分散、调度低效的痛点。作为我国首个实现多元异构算力统一调度的平台，项目创新性地实现算力资源的“可管、可控、可调度”，有效提升算力使用效率，为人工智能、大数据分析等前沿领域提供强大算力支撑，成为推动区域及国家数字经济发展的引擎。

项目于 2022 年 9 月规划，2023 年 8 月正式开工建设，预计 2025 年正式交付使用。总体用地面积近 2.4 万 m²，总建筑面积约 4 万 m²，总计提供约 4000 个机柜能力。其中液冷工程部分包括 2 个机房共 100 台单相浸没式液冷机柜，IT 设备容量 2MW。

6.5.2 系统简介

项目采用“液冷机柜（KCS-T021）+CDU+闭式冷却塔”全链路系统方案。单相浸没式液冷系统通用架构分为一次侧（室外侧）和二次侧（室内侧）。一次侧包含冷却塔或干冷器等制冷单元、一次侧管路、泵、水处理装置、补水管路等；二次侧包含液冷机柜（Tank）、冷液分配单元（CDU）、二次侧管路、泵等。

工作原理是将电子设备完全浸没在液体中，通过液体的流动带走电子设备的热量，全程利用自然冷源完成散热，无需压缩制冷等附加耗能，涉及精细流场、复杂系统控制、高稳定性冷却液研发等核心技术难点。

同时，采用预制集成化技术，对液池、配电、液冷散热及智能控制等系统进行模块化设计，优化集成系统的布局，提升产品结构强度。其核心指标 PUE 小于 1.08 且不受数据中心规模限制，能大幅提升计算功率密度。

系统项目特点：

(1) 自研低成本高效冷却液。突破进口氟化液“高成本、高挥发、高承重要求”等痛点，研发具备自主知识产权的冷却液，成本不到进口氟化液的 1/10，导热能力 3 倍于氟化液，性能稳定，使用寿命更长、维护成本更低，不易挥发，无毒无害，目前已获得专业机构的多项检测认证。

(2) 高精流场协同散热技术。基于 CFD 建模与数字孪生，采用仿生导流与多级分流技术实现全局流场均衡，消除涡流及热死角；针对 CPU/GPU 等高温区，通过定制化流场模组与钕铁硼电机强化局部对流，大幅提升换热效率，确保关键部件在安全温度区间内稳定运行。

(3) 智算集群深度适配。完成英伟达 H800、A800、燧原 T20 等主流智算卡验证，充分验证了云酷液冷技术在长周期重负载场景下的可靠性优势。完美支撑 H800 稳定运行，GPU 功率密度超过 $88\text{W}/\text{cm}^2$ ，服务器能耗较风冷环境降低 $2\text{kW}/\text{台}$ ，系统 PUE 可实现低于 1.08，算力指标优于风冷基准水平。全面适配 AI 训练、自动驾驶、超算等高算力场景需求，可为数字经济产业提供稳定可靠的低成本的算力底座。

6.5.3 运行情况简介

该项目方案在能效上表现为 PUE 小于 1.1，较风冷方案（PUE 按 1.5 计）年节电超 700 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，减少碳排放 7300t；同时实现高密支撑： $20\text{kW}/\text{机柜}$ 的功率密度使相同空间算力提升 5 倍，满足 AI 集群高密度部署需求；在稳定性提升上实现了芯片级精准散热，支持服务器超频工作，算力输出稳定性大幅跃升，故障率下降约 30%。并且在环境优化上做到了运行噪声不大于 50dB，契合城区低噪要求。

项目系统照片如图 6.5-1 和图 6.5-2 所示。



图 6.5-1 设备照片



图 6.5-2 现场照片

6.5.4 假负载工况下测试记录情况

现以 B 楼二层液冷机房为例，记录假负载工况下的测试情况，基础信息如表 6.5-1 所示。

表 6.5-1 基础信息

项目	详细信息
假负载额定功率	200kW
液冷系统型号	Ks-021T
冷却液体类型	Keencool2005
液冷系统额定散热能力	200kW
测试目的	验证散热性能、系统运行稳定性

(1) 南侧机房 G01 机柜测试过程参数如表 6.5-2 所示（假负载功率：19.66kW；液泵开启频率：42Hz；冷却塔开启 1 台）。

表 6.5-2 G01 机柜记录表

环境参数	测试前初始值	测试中 1h 记录值	测试中 2h 记录值	测试结束时数值	是否达标
环境温度	28℃	28℃	29℃	30℃	是
冷却液体初始温度	25℃	33℃	37.0℃	37.1℃	是
假负载运行稳定性	无异常情况	无异常	无异常	无异常	是
冷却液体进出口温差	0℃	5℃	5.3℃	5.3℃	是
液冷系统泄漏情况	无泄漏	无泄漏	无泄漏	无泄漏	是
系统运转稳定性	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	是

(2) 南侧机房 G02 机柜测试过程参数如表 6.5-3 所示（假负载功率：19.59kW；液泵开启频率：42Hz；冷却塔开启 1 台）。

表 6.5-3 G02 机柜记录表

环境参数	测试前初始值	测试中 1h 记录值	测试中 2h 记录值	测试结束时数值	是否达标
环境温度	28℃	28℃	29℃	30℃	是
冷却液体初始温度	25℃	32.9℃	36.9℃	37.1℃	是
假负载运行稳定性	无异常情况	无异常	无异常	无异常	是
冷却液体进出口温差	0℃	5℃	5.3℃	5.3℃	是
液冷系统泄漏情况	无泄漏	无泄漏	无泄漏	无泄漏	是
系统运转稳定性	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	液泵运行平稳， 液体流动正常	是

CLF 计算结果如表 6.5-4 所示。

表 6.5-4 CLF 计算结果

项目	数值
IT 机柜负荷/kW	1000
空调全年功率（平均）/kW	85.9
CLF	0.0859