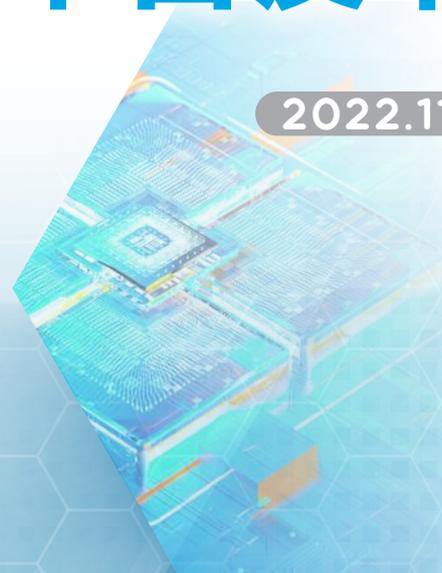


ZTE中兴

# 中兴通讯 液冷技术白皮书

2022.11



# 序言

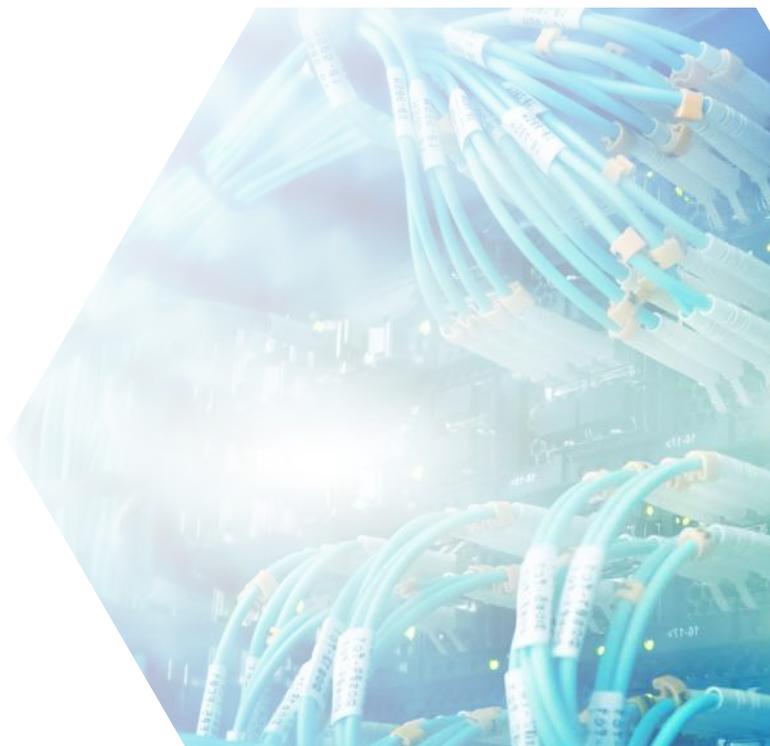
本白皮书作为数据中心液冷技术的参考文献，内容解释由中兴通讯股份有限公司负责。  
在应用过程中如有修改和补充的建议，请将有关资料 Email 至：[zhang.junfan@zte.com.cn](mailto:zhang.junfan@zte.com.cn)。

课题技术负责人：**翁建刚**

主要起草人：**范浩龙、李伟波、林智、吴炎新**

参编人：**刘帆、汪尔敏、许璐、张俊凡**

主要审查人：**石瑜、杨立新、王伟**



# 目录

## 液冷技术应用背景 01

功率密度持续升高 01

数据中心 PUE 指标不断降低 02

## 液冷技术优势 04

2.1. 低能耗 04

2.2. 高散热 05

2.3. 低噪声 05

2.4. 低 TCO 05

## 液冷技术方案 06

3.1. 冷板式液冷 07

3.2. 浸没式液冷 08

3.3. 喷淋式液冷 10

3.4. 液冷趋势分析 10

## 中兴通讯液冷技术方案 11

4.1. 总体方案 11

4.2. DC 液冷方案 12

4.3. IT 液冷方案 17

4.4. CT 液冷方案 18

## 中兴通讯液冷技术实践 20

5.1. 滨江液冷实验局 20

5.2. CT 液冷实验局 22

## 展望 24

## 1

## 液冷技术应用背景

随着云计算、大数据、人工智能、元宇宙等信息技术的快速发展和传统产业数字化的转型，数据呈现几何级增长，算力和硬件部分能耗也在持续增加，而在“双碳”政策的持续推进下，国家、地方政府、企业层面均在积极推动绿色低碳转型和可持续发展，通讯领域对数据中心节能降耗要求越来越严格。

## 功率密度持续升高

算力的持续增加促进通讯设备性能不断提升，芯片功耗和热流密度也在持续攀升，产品每演进一代功率密度攀升 30~50%。当代 X86 平台 CPU 最大功耗 300~400W，业界最高芯片热流密度已超过 120W/cm<sup>2</sup>；芯片功率密度的持续提升直接制约着芯片散热和可靠性，传统风冷散热能力越来越难以为继。

芯片功率密度的攀升同时带来整柜功率密度的增长，当前最大已超过 30kW/ 机架；对机房制冷技术也提出了更高的挑战。不同机柜功率密度对应的机房典型制冷方式如图 1-1 所示，液冷作为数据中心新兴制冷技术，被应用于解决高功率密度机柜散热需求。

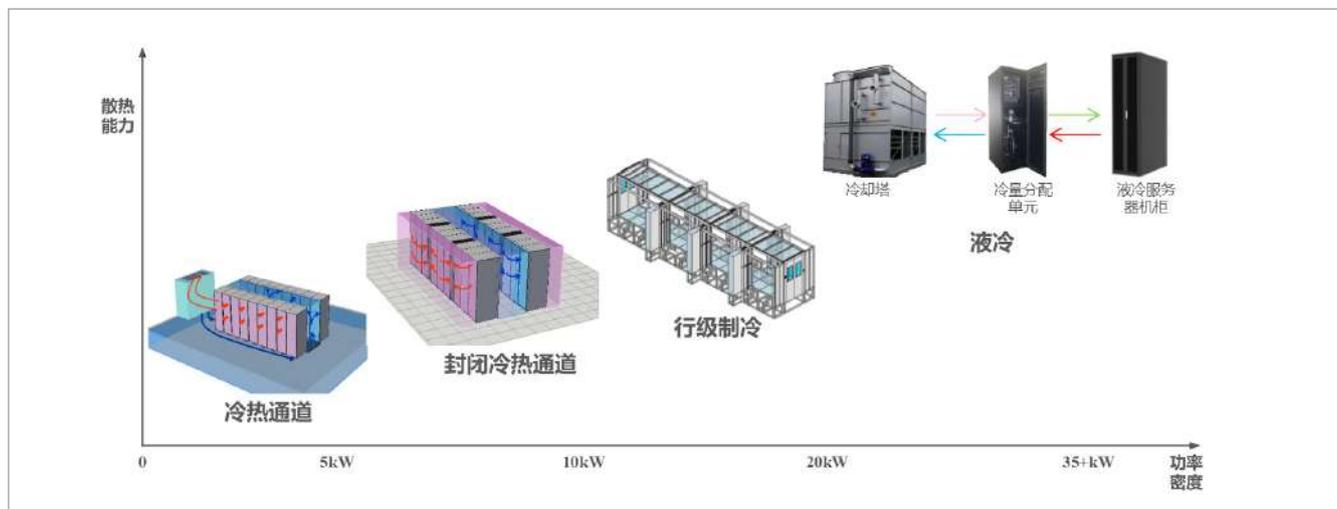


图 1-1 机柜功率密度与制冷方式

## 数据中心 PUE 指标不断降低

城市	年平均气温℃	数据中心 PUE 要求
北京	12.3	年能源消费量小于 1 万吨标准煤的项目 PUE 值不应高于 1.3；年能源消费量大于等于 1 万吨标准煤且小于 2 万吨标准煤的项目，PUE 值不应高于 1.25；年能源消费量大于等于 2 万吨标准煤且小于 3 万吨标准煤的项目，PUE 值不应高于 1.2；年能源消费量大于等于 3 万吨标准煤的项目，PUE 值不应高于 1.15； 1.4 < PUE ≤ 1.8，每度电加价 ¥0.2； PUE>1.8，每度电加价 ¥0.5
上海	16.6	到 2024 年，新建大型及以上数据中心 PUE 降低到 1.3 以下，起步区内降低到 1.25 以下。推动数据中心升级改造，改造后的 PUE 不超过 1.4。
广东	22.6	新增或扩建数据中心 PUE 不高于 1.3，优先支持 PUE 低于 1.25 的数据中心项目，起步区内 PUE 要求低于 1.25
浙江	16.5	到 2025 年，大型及以上数据中心电能利用效率不超过 1.3，集群内数据中心电能利用效率不得超过 1.25
江苏	15.5	到 2023 年底，全省数据中心机架规模年均增速保持在 20% 左右，平均利用率提升到 65%，全省新型数据中心比例不低于 30%，高性能算力占比达 10%，新建大型及以上数据中心电能利用效率 (PUE) 降低到 1.3 以下，起步区内电能利用效率不得超过 1.25
山东	14.7	自 2020 年起，新建数据中心 PUE 值原则上不高于 1.3，到 2022 年年底，存量改造数据中心 PUE 值不高于 1.4。到 2025 年，实现大型数据中心运行电能利用效率降到 1.3 以下。优先支持 PUE 值低于 1.25，上架率高于 65% 的数据中心新建、扩建项目
青岛	12.7	新建 1.3，至 2022 年存量改造 1.4
重庆	18.4	到 2025 年，电能利用效率 (PUE) 不高于 1.3。集群起步区内 PUE 不高于 1.25。 甘肃：到 2023 年底，大型及超大型数据中心的 PUE 降到 1.3 以下，中小型数据中心的 PUE 降到 1.4 以下；到 2025 年底，大型及超大型数据中心的 PUE 力争降到 1.25 以下，中小型数据中心的 PUE 力争降到 1.35 下
四川	15.3	到 2025 年，电能利用效率 (PUE) 不高于 1.3。集群起步区内 PUE 不高于 1.25。各市 (州) 要充分发挥已建在建数据中心作用，除天府数据中心集群外，区域内平均上架率未达到 60%、平均 PUE 值未达到 1.3 及以下的，原则上不得新建数据中心。
内蒙古	4.3	到 2025 年，全区大型数据中心平均 PUE 值降至 1.3 以下，寒冷及极寒地区力争降到 1.25 以下，起步区做到 1.2 以下
宁夏	9.5	到 2025 年，建成国家 (中卫) 数据中心集群，集群内数据中心的平均 PUE ≤ 1.15, WUE ≤ 0.8，分级分类升级改造国家 (中卫) 数据中心集群外的城市数据中心，通过改造或关停，到 2025 年，力争实现 PUE 降至 1.2 及以下。
贵州	15.5	引导大型和超大型数据中心设计 PUE 值不高于 1.3；改造既有大型、超大型数据中心，使其数据中心 PUE 值不高于 1.4。实施数据中心减量替代，根据 PUE 值严控数据中心的能源消费新增量，PUE 低于 1.3 的数据中心可享受新增能源消费量支持。

算力的持续增加，意味着硬件部分的能耗也在持续提升；在保证算力运转的前提下，只有通过降低数据中心辅助能源的消耗，才能达成节能目标下的 PUE 要求。典型数据中心能耗占比如图 1-2 所示，其中制冷系统占比达到 24% 以上，是数据中心辅助能源中占比最高的部分，因此，降低制冷系统能耗能够极大的促进 PUE 的降低。

近年来，为了降低制冷系统电能消耗，行业内对机房制冷技术进行了持续的创新和探索；各制冷技术对应 PUE 范围如图 1-3 所示。间蒸 / 直蒸技术通过缩短制冷链路，减少过程能量损耗实现数据中心 PUE 降至 1.15~1.35；液冷则利用液体的高导热、高传热特性，在进一步缩短传热路径的同时充分利用自然冷源，实现了 PUE 小于 1.25 的极佳节能效果。

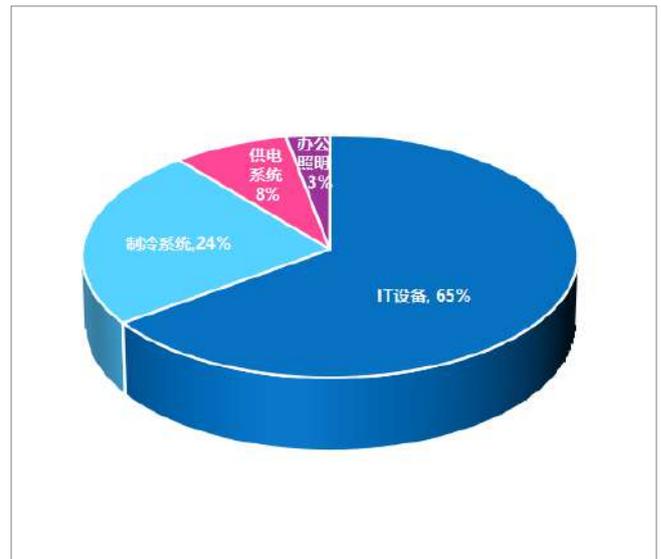


图 1-2 典型数据中心能耗占比

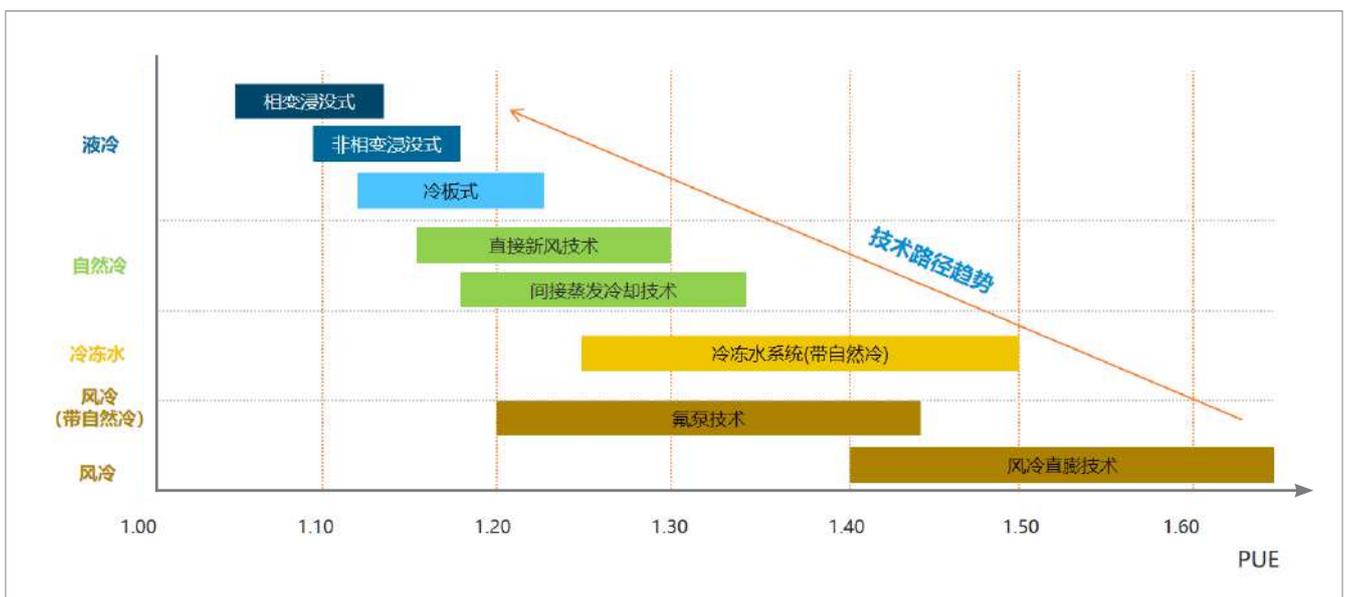


图 1-3 数据中心制冷技术对应 PUE 范围

# 2

## 液冷技术优势

液冷是一种采用液体带走发热器件热量的散热技术，适用于需提高计算能力、能源效率、部署密度等应用场景；液冷利用了液体的高导热、高热容特性替代空气作为散热介质，同传统强迫风冷散热对比，液冷具有低能耗、高散热、低噪声、低 TCO 等优势，是解决数据中心散热压力和节能挑战的必由之路。

### 低能耗

液冷散热技术传热路径短、换热效率高、制冷能效高的特点促成液冷技术低能耗优势：

#### 传热路径短：

低温液体由 CDU（冷量分配单元）直接供给通讯设备内；

#### 换热效率高：

液冷系统一次侧和二次侧之间通过换热器实现液液换热；一次侧和外部环境之间结合风液换热、液液换热、蒸发汽化换热三种形式，具备更优的换热效果；

#### 制冷能效高：

液冷技术可实现 40~55°C 高温供液，无需压缩机冷水机组，采用室外冷却塔，可实现全年自然冷却；

除制冷系统自身的能耗降低外，采用液冷散热技术有利于进一步降低芯片温度，芯片温度降低带来更高的可靠性和更低的能耗，整机能耗预计可降低约 5%。

## 高散热

液冷系统常用介质有去离子水、醇基溶液、氟碳类工质、矿物油或硅油等多种类型；这些液体的载热能力、导热能力和强化对流换热系数均远大于空气；因此，针对单芯片，液冷相比于风冷具有更高的散热能力。

同时，液冷直接将设备大部分热源热量通过循环介质带走；单板、整柜、机房整体送风需求量大幅降低，允许高功率密度设备部署；同时，在单位空间能够布置更多的 ICT 设备，提高数据中心空间利用率、节省用地面积。

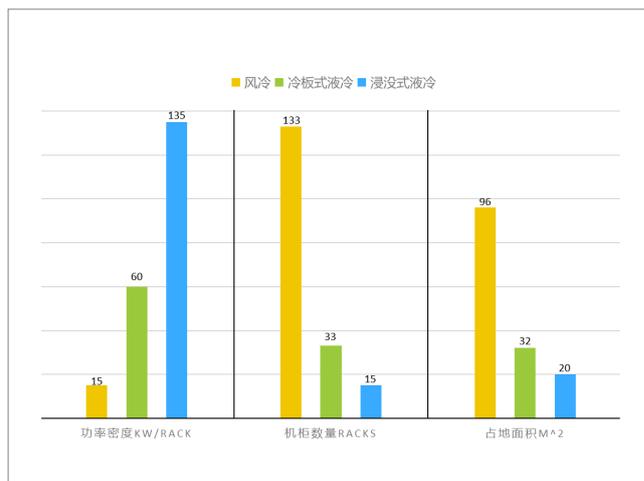


图 2-1 液冷同比风冷散热能力 (2MW 机房)

## 低噪声

液冷散热技术利用泵驱动冷却介质在系统内循环流动并进行散热，解决全部发热器件或关键高功率器件散热问题；能够降低冷却风机转速或者采用无风机设计，从而具备极佳的降噪效果，提升机房运维环境舒适性，解决噪声污染问题。



## 低 TCO

如上所述液冷技术具有极佳的节能效果，液冷数据中心 PUE 可降至 1.2 以下，每年可节省大量电费，能够极大的降低数据中心运行成本。相比于传统风冷，液冷散热技术的应用虽然会增加一定的初期投资，但可通过降低运行成本回收投资。以规模为 10MW 的数据中心为例，比较液冷方案 (PUE1.15) 和冷冻水方案 (PUE1.35)，预计 2.2 年左右可回收增加的基础设施初投资。下图给出了传统风冷、冷板式液冷和单相浸没液冷每年的能耗和电费对比。

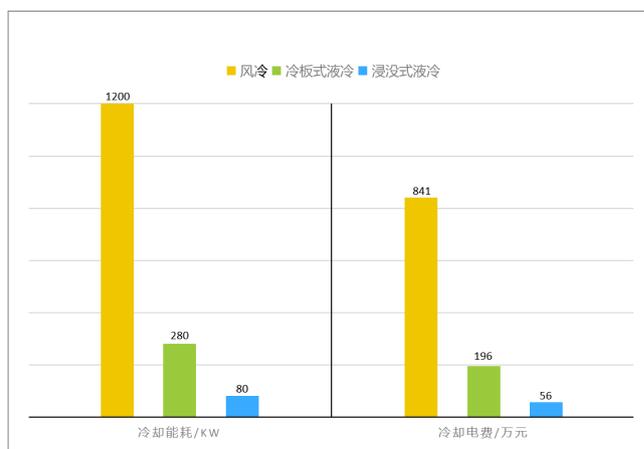


图 2-2 液冷同比风冷每年收益 (2MW 机房)

## 3

## 液冷技术方案

液冷技术分为接触式及非接触式两种，接触式液冷是指将冷却液体与发热器件直接接触的一种液冷实现方式，包括浸没式和喷淋式液冷等具体方案。非接触式液冷是指冷却液体与发热器件不直接接触的一种液冷实现方式，包括冷板式等具体方案。其中，冷板式液冷采用微通道强化换热技术具有极高的散热性能，目前行业成熟度最高；而浸没式和喷淋式液冷实现了 100% 液体冷却，具有更优的节能效果。

液冷系统通用架构及原理如下图所示；室外侧包含冷却塔、一次侧管网、一次侧冷却液；室内侧包含 CDU、液冷机柜、二次侧管网和二次侧冷却液。

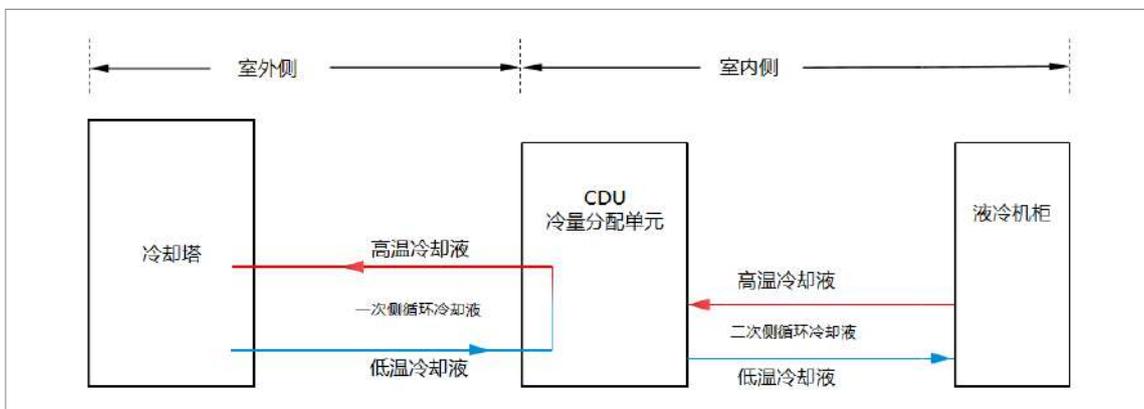


图 3-1 液冷系统通用架构原理图

## 冷板式液冷

冷板式液冷是通过液冷板（通常为铜铝等导热金属构成的封闭腔体）将发热器件的热量间接传递给封闭在循环管路中的冷却液体，通过冷却液体将热量带走的一种散热形式。冷板式液冷系统主要由冷却塔、CDU、一次侧 & 二次侧液冷管路、冷却介质、液冷机柜组成；其中液冷机柜内包含液冷板、设备内液冷管路、流体连接器、分液器等。

### 冷板式液冷散热原理：

- 液冷板与芯片贴合；
- 芯片设备热量通过热传导传递到液冷板，工质在 CDU 循环泵的驱动下进入冷板，之后在液冷板内通过强化对流换热吸收热量
- 温度升高，高温工质通过 CDU 换热器将热量传递到一次侧冷却液，温度降低；
- 低温的工质再进入循环泵，一次侧冷却液最终通过冷却塔将热量排至大气环境中。

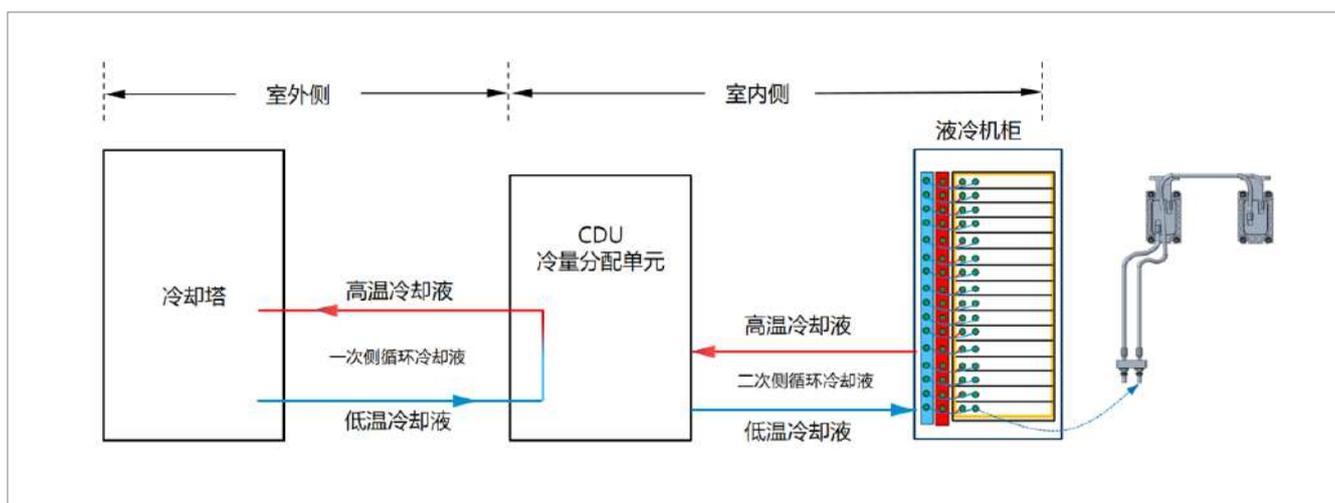


图 3-2 冷板式液冷系统原理图

冷板式液冷作为非接触式液冷的一种，行业内具有 10 年以上的研究积累，在三种主流液冷方案中技术成熟度最高，是解决大功耗设备部署、提升能效、降低制冷运行费用、降低 TCO 的有效应用方案；具有以下技术特性和优势：

**产品架构兼容性：**可兼容现有硬件架构；

**机房适应性：**灵活适用于旧机房改造和新建机房；

**可靠性：**液体与设备不直接接触，可靠性更高；

**维护性：**易开展维护性设计，可实现在线维护方案；

**节能：**数据中心的 PUE 值可降至 1.2 以下；

**噪声：**风机转速大幅降低，噪声值可至 70dB 左右。

冷板式液冷未能实现 100% 液体冷却，因此存在机柜功耗低、液冷占比低时，节能收益不显著问题；且液冷板设计需要考虑现有设备的器件布局，结构设计和实现的难度较大，标准化推进难度大。

## 浸没式液冷

浸没式液冷是以冷却液作为传热介质，将发热器件完全浸没在冷却液中，发热器件与冷却液直接接触并进行热交换的制冷形式。浸没式液冷系统室外侧包含冷却塔、一次侧管网、一次侧冷却液；室内侧包含 CDU、浸没腔体、IT 设备、二次侧管网和二次侧冷却液。使用过程中 IT 设备完全浸没在二次侧冷却液中，因此二次侧循环冷却液需要采用不导电液体，如矿物油、硅油、氟化液等。

按照热交换过程中冷却液是否存在相态变化，可分为单相浸没液冷和两相浸没液冷两类。

### 3.2.1 单相浸没式液冷

作为传热介质的二次侧冷却液在热量传递过程中仅发生温度变化，而不存在相态转变，过程中完全依靠物质的显热变化传递热量。

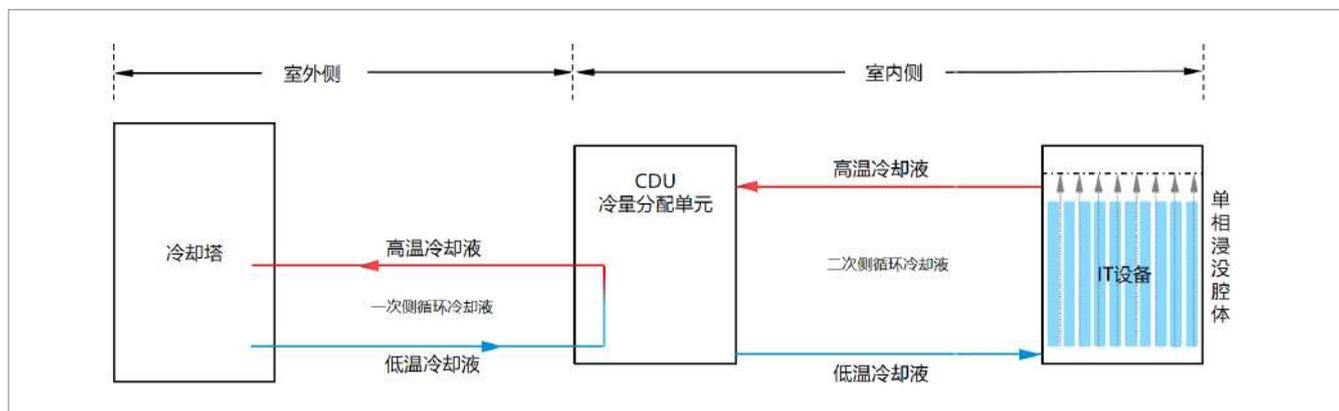


图 3-3 单相浸没液冷系统原理图

单相浸没液冷系统原理如上图所示，CDU 循环泵驱动二次侧低温冷却液由浸没腔体底部进入，流经竖插在浸没腔体中的 IT 设备时带走发热器件热量；吸收热量升温后的二次侧冷却液由浸没腔体顶部出口流回 CDU；通过 CDU 内部的板式换热器将吸收的热量传递给一次侧冷却液；吸热升温后的一次侧冷却液通过外部冷却装置（如冷却塔）将热量排放到大气环境中，完成整个制冷过程。

### 3.2.2. 两相浸没液冷

作为传热介质的二次侧冷却液在热量传递过程中发生相态转变，依靠物质的潜热变化传递热量。

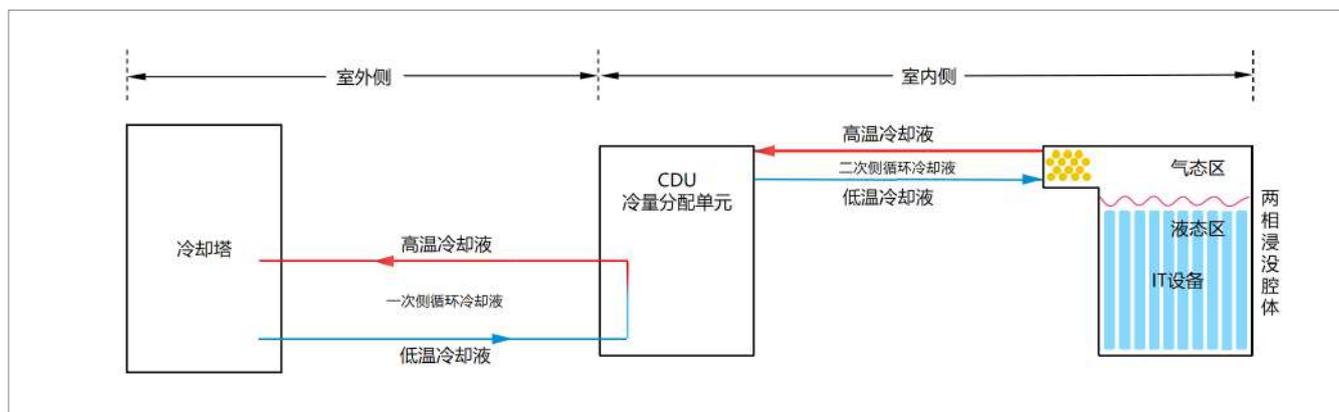


图 3-4 两相浸没液冷系统原理

两相浸没液冷系统原理图如上图所示，其传热路径与单相浸没液冷基本一致。主要差异在于二次侧冷却液仅在浸没腔体内部循环，浸没腔体内顶部为气态区、底部为液态区：IT 设备完全浸没在低沸点的液态冷却液中，液态冷却液吸收设备热量后发生沸腾，汽化产生的高温气态冷却液因密度较小，会逐渐汇聚到浸没腔体顶部，与安装在顶部的冷凝器发生换热后冷凝为低温液态冷却液，随后在重力作用下回流至腔体底部，实现对 IT 设备的散热。

### 3.2.3. 浸没式液冷优势与局限性

与传统风冷和冷板式液冷相比，浸没式液冷具有多项优势：

**节能 (PUE < 1.13)：**低温液体直接与发热芯片接触散热，传热路径更短；传热方式为液液换热和蒸发汽化换热，传热效率更高；无需压缩机冷水机组，制冷方式采用自然冷却 + 强化通风冷却，制冷能效更高。

**紧凑：**支持高密机柜，单柜散热量高达 160kW；同时，机柜间无需隔开距离，机房不需要空调和冷冻机组、无需架空地板、无需安装冷热通道封闭设施；

**高可靠：**设备完全浸没在液体中，排除了温度、风机振动、灰尘等带来的可靠性问题；

**低噪声：**100% 液体冷却，无需配置风扇，实现极致“静音”机房。

浸没式液冷是一种创新性的制冷解决方案，需要将 IT 设备完全浸没在冷却液中，产品结构发生颠覆性变化，对器件选型和维护性都提出了新的挑战：

**结构颠覆性：**区别于传统意义上的立式机架结构，浸没液冷所用的浸没腔体为卧式 Tank；

#### 器件选型局限性：

- 1) 硬盘：由于冷却液的渗入，普通机械硬盘无法正常运转，需要被替换为固态盘，或氦气硬盘；
- 2) 风扇：对于改造升级的数据中心机柜，需要拆除所有风扇组，并屏蔽风扇故障信号；对于新建的数据中心，机柜内部无需再设计风扇及配套的调速和故障检测措施；
- 3) 光模块：为了避免出现由冷却液渗入引起的信号失真和错乱，需要选用全密封处理的光模块；
- 4) 导热界面材料：液冷环境下导热硅脂会被液体冲刷溶解，需要使用固态界面材料。

**维护局限性：**浸没式液冷设备维护时需要打开 Tank 上盖，并配备可移动机械吊臂或专业维护车实现设备的竖直插拔，维护复杂度高，耗时长；且开盖维护过程有一定的冷却液挥发问题，增加运行成本；

**机房环境特殊性：**因浸没式液冷系统 Tank 内充满冷却液，整柜重量大幅增加，对机房有特殊承重要求，普遍要求浸没式液冷机房地板承重应大于 1500kg/m<sup>2</sup>。

## 喷淋式液冷

喷淋式液冷是面向芯片级器件精准喷淋，通过重力或系统压力直接将冷却液喷洒至发热器件或与之连接的导热元件上的液冷形式，属于直接接触式液冷。喷淋式液冷系统主要由冷却塔、CDU、一次侧 & 二次侧液冷管路、冷却介质和喷淋式液冷机柜组成；其中喷淋式液冷机柜通常包含管路系统、布液系统、喷淋模块、回液系统等。

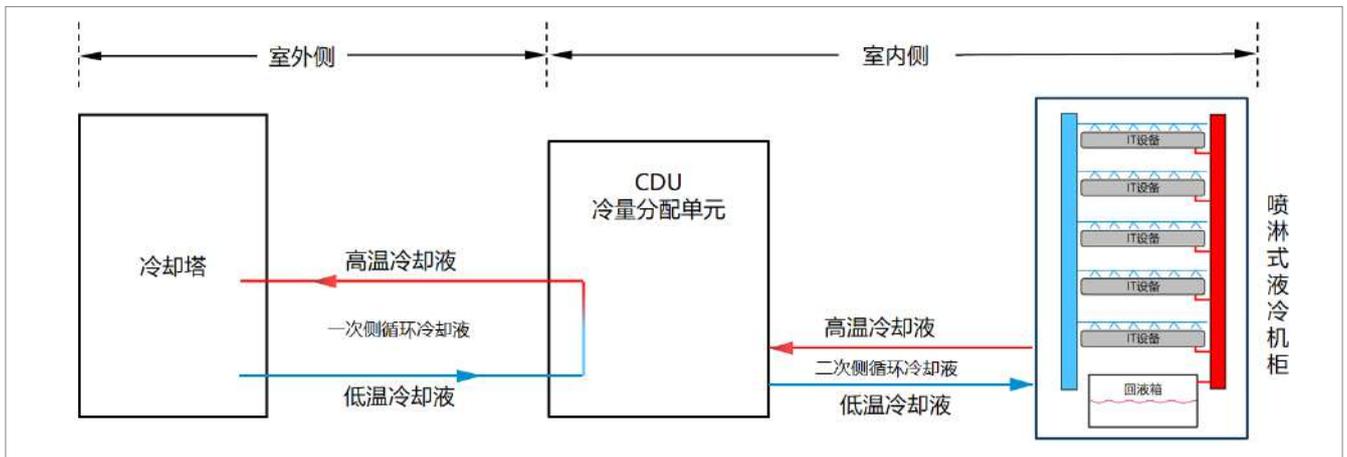


图 3-5 喷淋式液冷系统原理图

喷淋式液冷系统原理如上图所示，在冷量分配单元内冷却后的冷却液被泵通过管路输送至喷淋机柜内部；冷却液进入机柜后直接通过分液器进入与服务器相对应的布液装置，或将冷却液输送至进液箱以提供固定大小的重力势能以驱动冷却液通过布液装置进行喷淋；冷却液通过 IT 设备中的发热器件或与之相连的导热材料进行喷淋制冷；被加热后的冷却液将通过回液箱进行收集，并通过泵输送至冷量分配单元进行下一个制冷循环。

喷淋式液冷同样实现了 100% 液冷，其结构颠覆性优于浸没式液冷；但节能效果差于浸没式液冷，且存在与浸没式液冷相同的局限性问题。

## 液冷趋势分析

液冷市场需求保持逐年增长状态，冷板式液冷和浸没式液冷是行业内目前共存的两条主流技术路线；伴随国家双碳节能政策驱动，市场对液冷的需求将逐步提升。考虑到技术成熟度、可靠性、技术通用性、结构颠覆性等多个方面，当前液冷数据中心仍以冷板式液冷占据主流地位；本白皮书后续内容重点聚焦冷板式液冷。

## 4

## 中兴通讯液冷技术方案

## | 总体方案

中兴通讯推出 ICT 液冷一体化解决方案，实现 DC 液冷数据中心机房、IT 液冷服务器设备、CT 液冷路由交换设备一体化集成开发、交付；液冷一体化方案架构如下图所示。

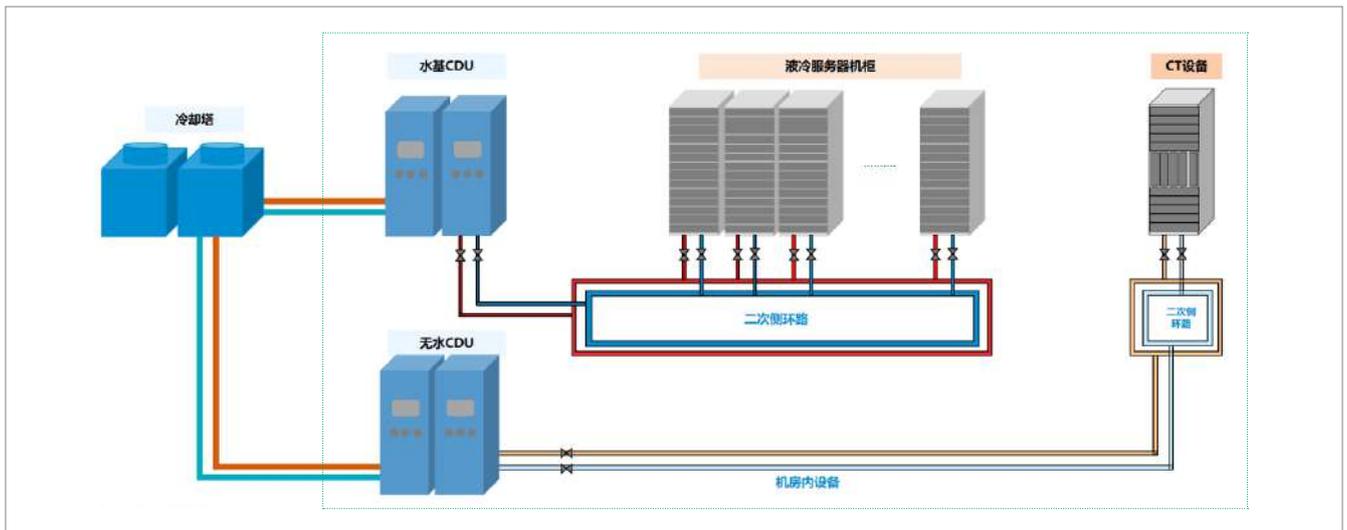


图 4-1 液冷一体化方案架构

液冷一体化解决方案实现了液冷系统能耗最优、成本最优，并大幅缩短开发和交付周期，具备多项技术优势。

**更节能：** 冷却塔、CDU、IT、CT 设备控制联动，基于算力需求和环境情况，AI 实时调控运行参数保持最低运行能耗；

**高可靠：** 液冷系统整体可靠性设计，液体润湿面材料综合选择控制；系统全面监控，异常情况提前预判、及时告警 & 处理；

**更省钱：** 从技术、方案、交付层面拉通，提供整体解决方案；实现产品及机房级的标准化 & 模块化设计，并最大程度促进组件共用和控制优化，实现低能耗、低成本；

**更快速：** 设备模块化、接口标准化，实现更快速的安装交付。

## DC 液冷方案

中兴通讯推出 ICT 液冷一体化解决方案，实现 DC 液冷数据中心机房、IT 液冷服务器设备、CT 液冷路由交换设备一体化集成开发、交付；液冷一体化方案架构如下图所示。

### 4.2.1. 方案综述

#### 4.2.1.1 液冷方案与产品

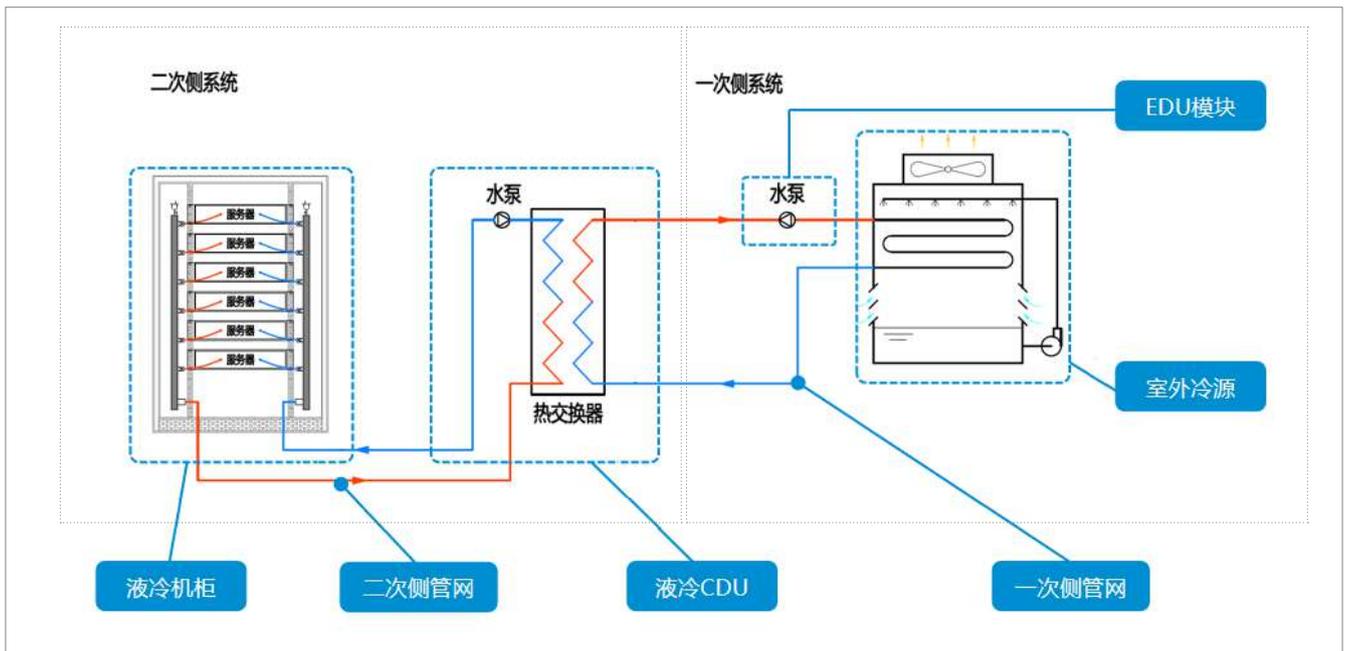


图 4-2 DC 液冷方案架构

中兴通讯 DC 液冷解决方案基于冷板式液冷技术。液冷系统通常以 CDU 为分界划分为一次侧系统和二次侧系统。其中，一次侧系统由室外冷源、一次侧水泵、一次侧管路组成，二次侧系统由液冷机柜、二次侧管路、CDU 组成。中兴通讯可提供上述全套的液冷产品以及配套群控系统，形成完整的数据中心液冷解决方案。

## 4.2.2. 一次侧系统

### 4.2.2.1 设计工况

基于冷板式液冷方案的一次侧系统，其功能是为二次侧系统提供满足散热要求的冷却水，而二次侧系统的供液温度及流量应满足液冷元件的散热要求。液冷系统的工况设计可参考下表：

	一次侧	二次侧
供液温度	综合考量当地气象条件和二次侧供液温度要求，推荐供液温度不超过 35°C	在满足液冷元件散热要求的前提下，从节能角度考虑，建议供液温度控制在 40~50°C
流量	推荐按 5~10°C温差设计	推荐按 5~10°C温差设计

表 4-1 液冷系统工况设计

### 4.2.2.2 冷源的选择

在国内绝大部分地区，液冷系统均能够使用自然冷却。常见的自然冷冷源可选择开式 / 闭式冷却塔、干式冷却器。冷源的选择应根据项目所在地的场地、气象、水电等因素综合考量。

	开式冷却塔	闭式冷却塔	干式冷却器
初投资	结构简单，成本较低	成本较高	成本介于闭式塔与开式塔之间
占地面积	占地面积较小	占地面积介于开式塔与干冷器之间	占地面积较大
耗水量	循环水直接喷淋，运行就会产生蒸发损失，耗水量较大	环境温度较低时可干工况运行，耗水量介于开式塔与干冷器之间	可实现全年干工况运行，增加喷淋或湿帘系统会产生少量水量消耗
耗电量	耗电量较低	耗电量介于开式塔与干冷器之间	耗电量较高
水质	循环水与空气直接接触，水质较差，容易结垢、滋生细菌	闭式循环，水质较好	闭式循环，水质较好
适用场景	适用于室外空气质量较好的地区	适用于室外空气质量较差且对循环水质要求较高的场合	适用于干冷、缺水地区，夏季炎热地区需要增加喷淋或湿帘系统

表 4-2 冷源选型对比

### 4.2.2.3 预制冷源产品（EDU 模块）

中兴通讯可提供成套的预制冷源产品（EDU 模块），产品集成一次侧水泵以及配套的管路组件和控制器，与冷却塔或干式冷器搭配可形成完整的一次侧冷源解决方案。其控制器集成了一次侧水泵、一次侧电动阀以及冷却塔或干式冷器的控制，可实现一次侧的水温控制和流量调节。

预制冷源产品采用高度集成的模块化设计，以方舱或平台的结构形式部署，可大幅减少现场施工量，缩短项目交付周期。同时，工厂内预制的生产模式更有利于质量控制，可减少现场施工中的质量问题。

## 4.2.3. 二次侧系统

### 4.2.3.1 设计工况

CDU（冷量分配单元）是液冷系统中的核心设备，其功能在于为二次侧工质提供冷却和循环动力并对二次侧系统进行集中控制。该产品包括：箱体结构件、热交换器、二次侧水泵、管路组件、配电控制箱及各种传感器。上述各组件中与冷却工质接触的材料必须经过测试验证，确保其与工质的材料兼容性。此外，CDU 的功能不仅是对温度、流量的控制，还包括对水质洁净度及泄漏的监测。

CDU 支持的机柜数量可从单个机柜扩展到机柜组乃至整个集群，中兴通讯可提供多种形态的 CDU 产品以适配不同的场景和规模需求。

产品	规格	应用场景
机架式 CDU	风 - 液型，6~20kW 液 - 液型，20~60kW	<b>机柜级应用：</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 老旧机房内局部热点改善</li> <li>• 液冷科学样机或实验局</li> <li>• 边缘节点部署</li> </ul>
机柜式 CDU	<b>制冷量：</b> 200~600kW <b>结构形式：</b> 机柜式	<b>房间级应用：</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 老旧机房单机房或单层腾退改造</li> <li>• 新建中等规模机房</li> <li>• 微模块、集装箱场景</li> </ul>
平台式 CDU	<b>制冷量：</b> 1200~3600kW <b>结构形式：</b> 方舱式或平台式	<b>建筑级应用：</b> 大型数据中心集中供冷

表 4-3 CDU 的应用场景

### 4.2.3.2 二次侧管路

二次侧管路用于连接 CDU 和末端的液冷机柜，实现冷却工质的传输和均匀分配。考虑到冗余设计，二次侧管路通常采用环形管网的连接方式。此外环形闭合回路有助于提升流量均匀性且不存在流动死区，工质始终处于循环流动状态，不易变质。环形管网包含供液环管、回液环管、CDU 支路、机柜支路、排气装置、排污阀等组件。

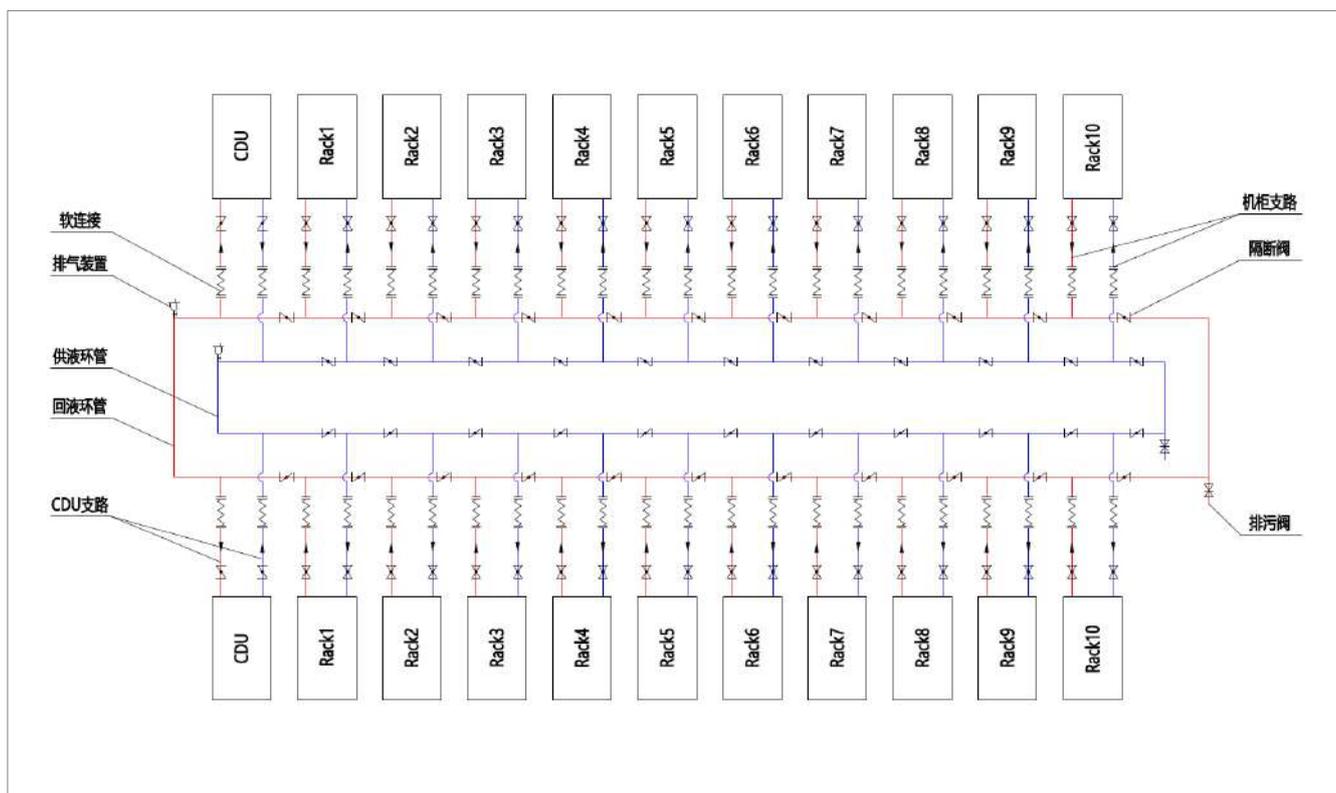


图 4-3 二次侧管路示意图

环形管路一般采用厂内分段预制，现场组装的方式交付，以保证管路的焊接质量和清洁度。中兴通讯可提供现场勘察、设计、生产加工、现场施工的一条龙服务。在设计过程中，中兴通讯引入了 BIM 技术和 CFD 仿真技术，确保结构设计的准确性和流量分配的均匀性。

### 4.2.3.3 液冷机柜

液冷机柜是在标准通讯设备机柜的基础上加装流体连接器、液冷软管、分液器形成的总成。液冷机柜内部方案详见 4.3、4.4 章节。

#### 4.2.4. 液冷群控

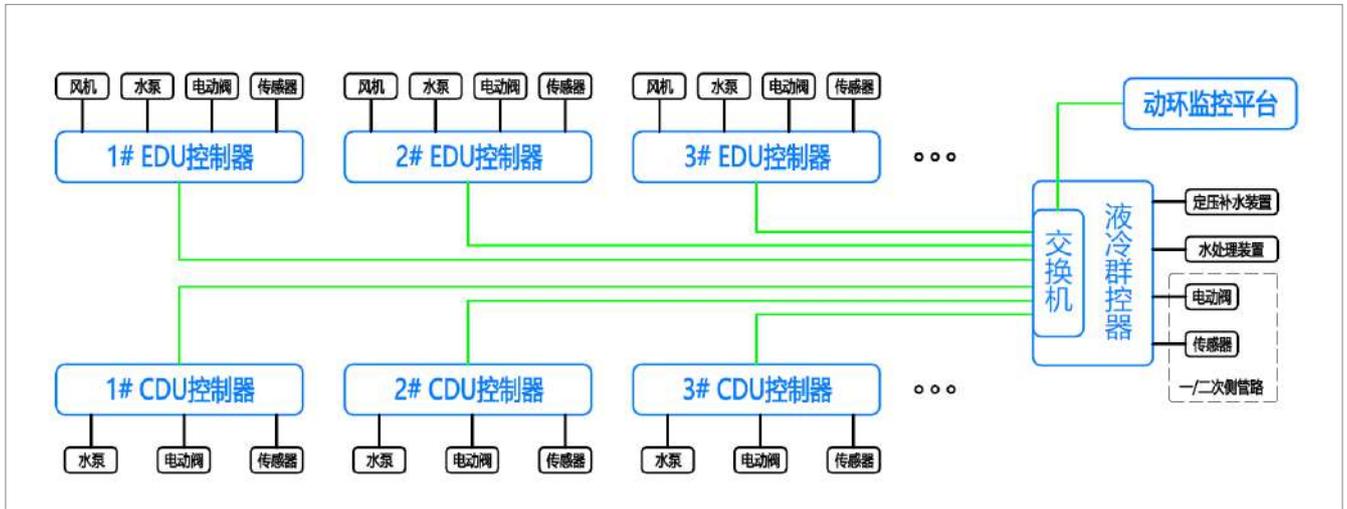


图 4-4 液冷群控系统架构图

中兴通讯针对液冷系统的特点开发了一套完整的液冷群控系统。控制系统采用液冷设备、液冷群控、动环监控平台三层架构。液冷设备层主要包括 CDU、EDU 两种产品，CDU、EDU 控制器负责设备内的传感器采集和部件控制。液冷系统可由多台 CDU 和 EDU 组成，各液冷设备控制器北向接入液冷群控。液冷群控将各液冷设备、一 / 二次侧管路上的传感器、电动以及辅助设备统一纳入监控，实现整个液冷系统集中控制

##### CDU 控制器

采集温度、压力、流量等传感器数据，根据运行参数控制本设备内的水泵和电动阀等部件，从而实现二次侧供液温度、流量的控制和调节。

##### EDU 控制器

采集温度、压力、流量等传感器数据，根据运行参数控制本设备内的水泵和电动阀以及冷却塔 / 干冷器内的风机、喷淋泵等部件，从而实现一次侧供液温度、流量的控制和调节。

##### 液冷群控

采集一 / 二次侧管路上的温度、压力、流量等传感器数据，综合所有运行参数整体协调所有液冷设备的运行，并实现主备切换，故障投切等综合策略。同时，液冷群控还可以将定压补水装置、水处理装置纳入监控，实现对液冷系统的集中控制。

动环监控平台 对数据中心内的所有动力设备及环境变量进行集中监控。

#### 4.2.5. 空调系统

数据中心应用中，冷板式液冷系统通常用于解决 IT 设备内芯片、内存条等主要发热元件产生的热量（60%~80%），IT 设备内剩余的发热量（20%~40%）仍需要通过空调系统解决。中兴通讯可提供间蒸空调、氟泵空调、冷冻水系统等多种空调系统解决方案，适配不同的应用场景和客户需求。

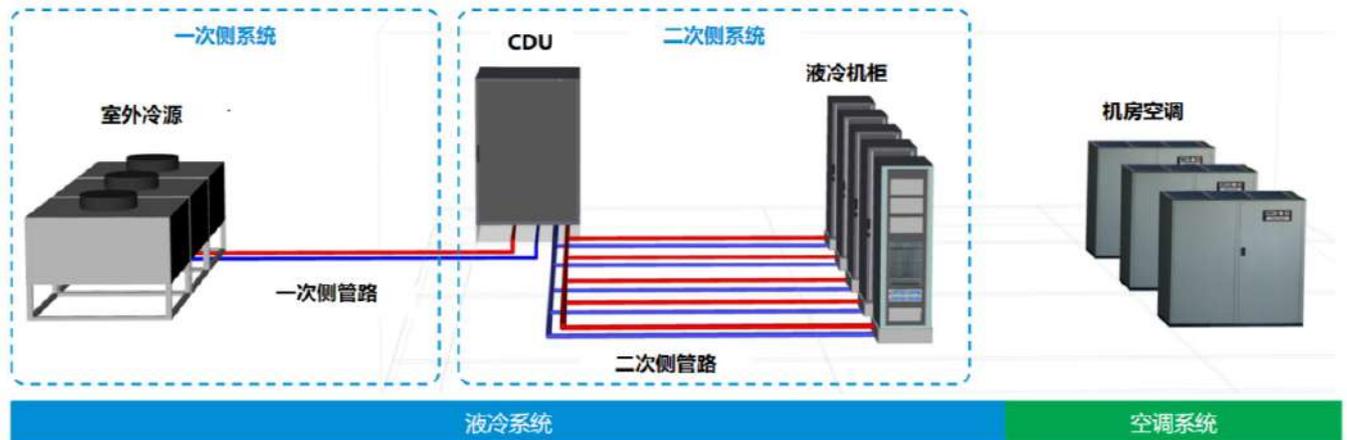


图 4-5 液冷数据中心冷却系统示意图

## IT 液冷方案

IT 设备液冷可以是单个液冷服务器节点或整个液冷机柜。关键部件包含：液冷工质、液冷板、流体连接器、分液器、液冷管路以及漏液检测装置。

### 4.3.1. 液冷工质

二次侧液冷工质是 IT 液冷方案设计中首选需要确定的部分，直接影响液冷系统的设计方案、工作环境、可靠性、维护方式等。选型过程中需要考虑工质热物性（密度、粘度、比容、导热系数等）、兼容性（金属、非金属）、成本和可获取性等。目前 IT 液冷系统二次侧常用的液冷工质有去离子水、乙二醇水溶液、丙二醇水溶液等，并配合具有一定缓蚀、杀菌、阻垢功能的化学药剂使用。

### 4.3.2. 液冷板

IT 设备液冷板设计需满足定制化和通用性，首先液冷板设计需要根据单板芯片和芯片布局进行芯片冷板和管路布局设计，具有一定的定制化特性，其次在定制化结构设计中应尽量保证内部零件的通用性，如芯片冷板内部流道、外形尺寸，以及液冷板进出口组件结构尽可能一致，以降低成本。液冷板的选型还需要结合实际功耗、工作压力、流速等条件，综合考虑冷板材质、工艺等。

同时，为了提升节能效果，IT 设备应尽可能提高冷板板式液冷占比；目前 ZTE 已推出自研液冷服务器，并制定了不同

的液冷解决方案，如 CPU 液冷，CPU+ 内存条液冷，以及 CPU+ 内存条散热 +VR 液冷，液冷占比最高可达 80% 以上，满足不同的制冷需求。

### 4.3.3. 流体连接器

流体连接器主要用于液冷散热系统环路中各部件间的快速连接和断开。选型要点包括工作流量、温度、压力、介质、壳体材料、流阻特性、颜色标识、安装方式、接口形式等。现阶段，中兴通讯自研液冷服务器产品选择了 Intel 推荐的 UQD 系列流体连接器，促进行业标准化进程，满足最终用户兼容替代需求。

### 4.3.4. 分液器

分液器安装在 IT 设备液冷机柜内，起到流量分配作用，将系统的循环工质分配到各个 IT 设备节点，在液冷板内换热后将热量带出到主水管路。其设计选型需要考虑以下几个方面：分液器内流速通常不超过 1.5m/s，流量分配需要均匀一致，根据结构空间、充注量和机柜总重量综合考虑分液器的体积。

### 4.3.5. 液冷软管

液冷管路是循环工质流通通路，液冷管路需要参与整个液冷系统的流量 - 流阻分配，同时为外接液冷设备提供简便的转接接口。IT 设备内液冷选型需要考虑材料兼容性、流速（柔性管道中的流速应控制在 1.5m/s 以下）、管路布置、安装方式、流量分配设计以及可靠性方面的要求。

### 4.3.6. 漏液检测装置

漏液检测采用节点级 & 整柜级智能监控漏液检测技术，及时告警，快速处理。主板预留液冷方案漏液侦测接口可快速识别泄漏情况，具有告警机制及应急动作。



## CT 液冷方案

CT 设备无水液冷系统组成与 IT 设备相似，但 CT 设备产品架构复杂、可靠性要求高，无水液冷系统方案设计过程中需要重点考虑系统可靠性、在线维护性、单板兼容性，以及单板间流量分配均匀性等问题；下面重点对 CT 液冷系统设计要素，以及与 IT 液冷系统的差异进行介绍。

### 4.4.1. 液冷工质

二次侧液冷工质采用国产化氟碳类冷却液，绝缘不导电，即使极端情况下系统发生泄漏也不造成设备损坏；同时，氟碳工质基本组成成份为大分子化合物，不能被微生物分解，微生物缺少生产繁殖的基础碳源，因此，无水液冷系统中几乎不存在微生物生产繁殖问题；系统整体可靠性等级更高。

此外，氟碳工质物理、化学稳定性突出，与液冷系统润湿面材料相容性更好，系统运行过程无需额外添加化学药剂。

### 4.4.2. 液冷架构

CT 设备通常具有业务板和交换板，且机柜内存在一定的框体分区，产品架构复杂度高；液冷系统架构需要依据产品架构进行定制化设计，重点考虑以下因素：

- 1) 分液器易于安装、拆卸；分液器在机柜内的位置能够实现安装在其上的流体连接器或管路插拔维护；
- 2) 液冷管路与光纤线缆布局合理性，具备可操作性和可维护性；
- 3) 业务板和交换板功率具有一定差异，流量需求也不同，因此系统架构层面需要具备流量易分配性。

### 4.4.3. 单板兼容性

考虑到设备配置变化，业务板和交换板通常会有多种类型，不同类型的单板之间会搭配使用，因此，同一机柜槽位在设计过程中需要考虑多类单板的兼容性：

- 1) **单板进、出液接口：**同一槽位，不同类型单板对外接口位置和结构保持一致；
- 2) **单板流阻：**同一槽位，不同类型单板流量 - 流阻特性保持一致；
- 3) **单板风阻：**不同类型单板因液冷板结构设计带来的风阻变化尽量小。

### 4.4.4. 液冷板

与 IT 设备一致，CT 设备液冷板同样由多个串并联的芯片冷板组成，每个芯片冷板与一个芯片贴合并为其散热，不同的是 CT 设备液冷板采用全金属材料，各个芯片冷板之间通过金属管进行连接，金属管与芯片冷板之间焊接成型，液冷板泄漏风险显著降低，可靠性更高。全金属材料在带来密封可靠性的同时，也引入了独特的支反力问题。

因存在 PCB 板翘曲、芯片自身公差、以及芯片在 PCB 板上的焊接公差，故每个芯片冷板在单板上安装后其冷板底面并不在一个平面上；因此各芯片冷板之间因金属管连接而存在一定的约束力，称为支反力。若支反力过大，超过液冷板安装力和界面材料压紧力要求，则会引起液冷板与芯片之间贴合失效，从而导致芯片超温风险。针对支反力问题主要采取两项技术措施进行解决：

- 1) **金属硬管连接方案：**建立不同材料、外径 & 壁厚、长度、折弯角度等规格参数下金属硬管支反力数据库和经验公式，对硬管支反力进行精准设计；
- 2) **金属波纹管方案：**芯片冷板之间采用金属波纹管连接，大幅提高芯片冷板间浮动量，降低支反力约束。

### 4.4.5. 可靠性 & 维护性

CT 设备对产品可靠性要求高，非极端情况不允许业务中断，因此需全面识别液冷系统失效模式，并制定对应探测和预防措施，达到风险问题全面对策和闭环。此外，在液冷系统因非预期因素出现故障后，应具备检测和在线维护功能，保证维护过程设备连续运行：

- 1) **漏液检测：**采用吸入式氟化液检测装置，能够及时检测 CT 设备机柜、CDU 和机房漏液情况，并上传告警信息；
- 2) 液冷系统维护过程保证设备液体循环不中断；
- 3) **专业在线维护车，提供第二套循环供液回路：**液冷系统出现渗漏时首先将正式循环回路切换至维护回路，然后断开被维护零部件进行备件更换，最后由维护回路切换至正式循环回路；
- 4) 单板连接处采用小口径动压插拔流体连接器，工作状态插拔力较小，可实现单板处的不断液插拔；
- 5) 主管路连接采用大口径流体连接器，工作状态插拔力较大，需排液后再进行插拔维护，提高维护操作性和可靠性。

## 5

## 中兴通讯液冷技术实践

## | 滨江液冷实验局

为了验证液冷系统冷却能力和节能效果，测试自研液冷产品的性能和可靠性，中兴通讯在南京滨江部署了液冷实验局。

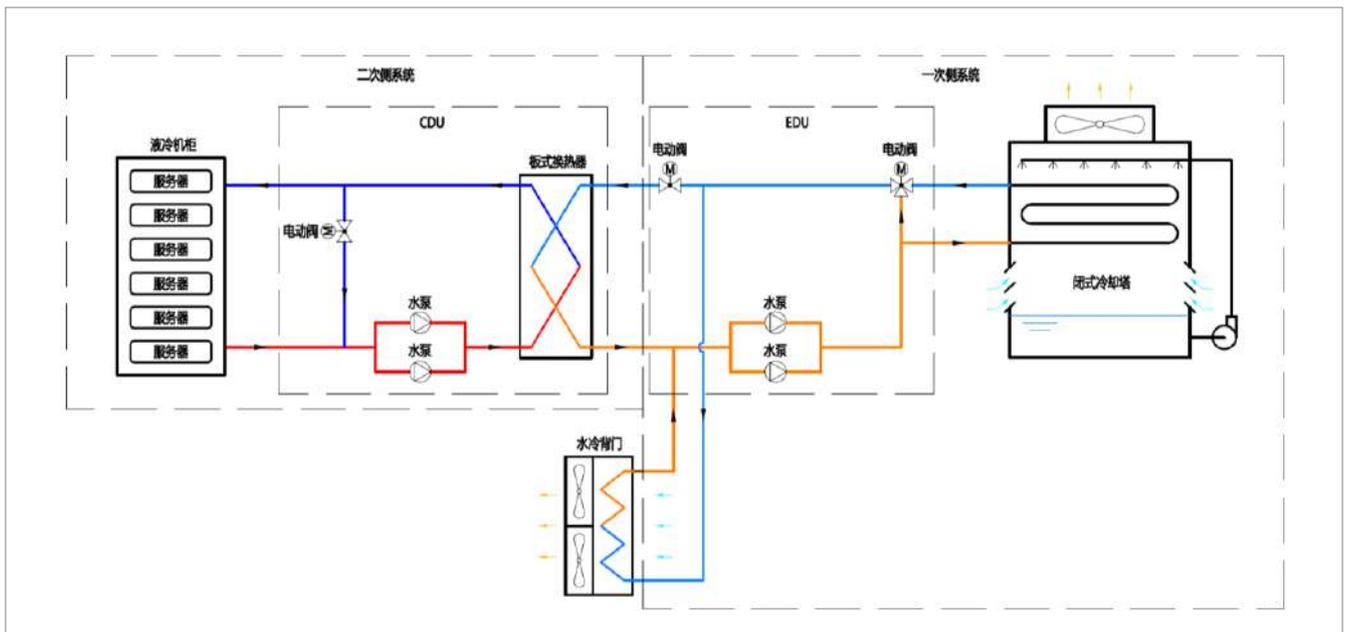


图 5-1 系统原理图

滨江液冷实验局基于冷板式液冷技术，创新地采用了全液冷设计。其系统原理图如图 5.1 所示，整个系统包含两个热量传递路径：

**其一**，液冷服务器内主要发热元件产生的热量经液冷板传递给二次侧工质，二次侧工质在二次侧水泵的驱动下进入板式换热器，换热器内二次侧工质将热量传递给一次侧工质，一次侧工质在一次侧水泵的驱动下进入闭式冷却塔，在冷却塔内一次侧工质与室外空气进行换热，完成散热循环。

**其二**，室内空气在风扇的驱动下带走液冷服务器内次要发热元件产生的热量，之后空气经过液冷背门将热量传递给一次侧工质，一次侧工质在一次侧水泵的驱动下进入闭式冷却塔，在冷却塔内一次侧工质与室外空气进行换热，完成散热循环。



图 5-2 现场外观图

全液冷系统的基础设施由配电管控柜、液冷 IT 柜、CDU、EDU 柜四个部分组成。其中配电管控柜内部署了配电箱、UPS、电池包等设备可为 IT 设备和冷却系统提供可靠的供电。配电管控柜内还集成了动环监控平台，可对所有的动力设备和环境变量进行集中监控。

液冷 IT 柜用于部署 IT 设备，柜内部署了中兴通讯自研的高性能液冷服务器，该自研液冷服务器采用双路 Intel XEON 高性能 CPU、32 根内存条，可应用于大规模数据计算与存储场景。此外，机柜内还部署了中兴通讯自研的液冷假负载，液冷假负载是为液体工质专门设计的模拟热源，发热功率可调节，可用于液冷系统的测试。



图 5-3 液冷 IT 柜正面



图 5-4 液冷 IT 柜背面



图 5-5 液冷 CDU

CDU 采用机架式设计，部署于液冷 IT 柜内。CDU 内集成了二次侧水泵、板式换热器、二次侧电动阀、各种传感器以及控制器等组件。CDU 控制器可对二次侧工质的温度的进行恒温控制，并根据服务器的负载变化调节流量，实现制冷量与发热量的匹配。

EDU 柜内集成了一次侧水泵、二次侧电动阀、定压补水装置、各种传感器以控制器等组件。EDU 控制器除了对上述部件的进行控制外，还集成了闭式冷却塔的控制，从而实现对一次侧工质温度和流量的控制和调节。

液冷背门安装于液冷 IT 机柜背面，设备被设计成柜门的形式，具有安装便利、占地面积小的优点。液冷背门由管翅式换热器和风扇组成，管内侧为一次侧冷却水，通过冷却水对服务器的出风进行冷却。本项目液冷背门针对高温冷却水

进行了优化，可以满足服务器风冷器件的散热需求。

该试点方案针对冷板式液冷系统无法实现 100% 液冷散热，仍需要保留空调散热的问题进行了改进；通过配置液冷背门，解决了服务器非冷板散热部分的热负荷。液冷背门替代机房传统空调后可进一步降低 PUE，本项目年均 PUE 可达 1.14。同时，液冷背门与 CDU 共用一次侧系统可简化冷却系统架构，降低系统的初投资。



图 5-6 水冷背门

## CT 液冷实验局

为解决当前高功耗设备在机房应用中存在的供电困难、机房 PUE 高、占地空间增加等问题。中兴通讯、中国电信研究院和中国电信云计算公司联合，开展大容量核心机房能源改造方案探索，通过液冷散热技术解决机房能耗高，空间利用率低问题。液冷系统由室外冷却塔；室内液冷 CDU；液冷核心路由器机柜；风冷机房空调组成。

机房室外冷却塔采用闭式冷却塔，冷却塔风机采用变频配置，结合电动阀共同进行冷量调节；一次侧冷却工质采用乙二醇水溶液；CDU 控制器根据被冷却器件热负荷的变化，通过调节冷却塔风机转速、喷淋泵的启停以及一次侧冷却液流量来控制换热设备工作负荷，从而达到精确控制冷却介质温度的要求，确保被冷却器件进液温度稳定在设计目标值。

CDU 与液冷核心路由器间的二次侧热交换采用国产无水工质实现，通过 CDU 内的泵驱动冷却液将路由器中器件的热量带到 CDU 内的板式换热器，完成一次侧和二次侧的热量传递。

液冷核心路由器采用风 / 液混和的冷却方式，风冷部分热量依靠机房空调解决，液冷部分热量通过 CDU 以及室外冷却塔解决。液冷系统采用单相无水工质，绝缘不导电，使用更安全可靠，满足十年长期稳定运行；液冷单板采用流体连接器，支持设备运行过程中带压插拔，即插即用，高效维护。CDU 使用外置方式，占用一个机柜位，液冷系统一次侧采用冷却塔冷却、二次侧高温供液（ $\geq 45^{\circ}\text{C}$ ）方案，具有节能、高效、高集成的特点；关键部件采用冗余备份设计，可靠性更高。

该解决方案实现核心芯片运行温度降低  $10^{\circ}\text{C}$ ，理论故障率约减少一半；整机噪声降低 6dBA 以上，极大改善了机房环境，保护了工作人员身体健康；大容量核心机房综合  $\text{PUE} \leq 1.2$ ，还解决了高功率路由器空调散热难的问题，充分体现了液冷代替风冷的巨大优势。



图 5-7 室外冷却塔



图 5-8 CDU



图 5-9 液冷核心路由器



图 5-9 液冷核心路由器

A night cityscape of Shanghai, featuring the Oriental Pearl Tower and other skyscrapers, reflected in the water. A digital network overlay of glowing blue and purple lines and nodes is superimposed over the scene, extending from the foreground into the distance.

# 6 展望

在“数字经济”和“双碳”大背景下，不断提升的芯片热流密度和不断严苛的设备能耗设计要求成为制冷技术不断演进的两大重要驱动力，液冷技术具有低能耗、高散热、低噪声、低 TCO 等优势，是解决数据中心散热压力和节能挑战的必由之路。

作为全球领先的综合性通信制造业上市公司和全球通信解决方案提供商之一，中兴通讯一直致力于将液冷技术应用到通讯领域；随着对技术不断的积累和创新，已完成单板级、插箱级、机柜级、机房级四个不同维度的液冷技术攻关，形成鲜明的技术特点；并推出 ICT 液冷一体化解决方案；用户可根据自己的使用需求及现有设备情况进行选择。

当前行业内液冷技术成熟度、规范化和标准化工作有待进一步提升，中兴通讯希望与整个产业链上下游密切合作，共同推进液冷技术的快速发展，促进数据中心节能建设和国家双碳目标达成。

中兴通讯版权所有

转载、编摘或利用其他方式使用本白皮书的全部或部分内容的，应注明来源  
违反上述声明者，著作权方将追究其相关法律责任