

## 第五章 提高冷源温度的新型末端方式

数据中心冷却系统由蒸发端、输配段和冷源端组成，其中蒸发端作为终端冷却对数据中心的热环境和能效都有着直接的影响。传统的数据中心采用架空地板下送风形式，冷却终端为精密空调，这种冷却形式采用大风量小焓差的形式，能耗一般较高且容易出现冷热气流掺混现象。随着数据中心单机柜发热密度、精细化管理程度和能效要求的不断提高，传统精密空调已经难以满足要求，许多新型末端冷却技术逐渐出现，包括列间空调冷却技术、热管背板冷却技术和服务器级冷却技术等。对于末端为空气冷却的形式，发展新型末端的目的是通过改善机房内部气流组织，以达到减小送风阻力和风量，降低送风温度与服务器进风温度的之间的最大温差。而实现这一目标的关键是机房均匀供冷和缩短送风距离，避免出现冷热气流掺混和局部“热点”，这样就有可能减小送风阻力和风量，并依靠较高的送风温度实现有效冷却。减小风阻和风量可降低末端风机的能耗，而较高的送风温度可以使用较高的冷源供水温度，延长自然冷源利用时间，即便是利用机械制冷，也因为较高的冷水需求温度而提高蒸发温度，从而获得较高的冷机效率。本章以实际数据中心应用案例为基础，对新型末端冷却技术进行介绍，分析其系统原理、适用范围及实际应用效果。

### 5.1 不同末端方式的差异性分析

#### 5.1.1 末端方式对能耗的影响

传统数据中心的精密空调一般安置在单独的空调送风室或机房内部的一侧，送风距离较远，送回风压差大，一般采用大风量的运行模式。而空调风机的功耗量由压差和风量决定，压差越大、风量越大，则风机功耗越高。因此，传统精密空调末端形式由于送回风压差大、风量大导致其运行功耗通常较高，且这种机房级的送回风方式容易造成冷气短路、热风回流和负压回流等冷热气流掺混现象<sup>[1]</sup>，虽然采用大风量的运行模式，但实际流经机柜服务器的风量却大打折扣。与传统精密空调的冷却方式不同，列间空调布置在机柜之间，对邻近机柜内的 IT 设备供冷，因此，列间空调冷却技术的冷却气流路径缩短，气流掺混现象更少，制冷对象更为具体。当机房换热量和送回风温差固定时，即风量保持不变，由于列间空调比精密空调的送风距离短，风机压差更小，因此，列间空调风机的功耗可以做到更低。在机柜级冷却方式中，将空调末端直接嵌入到机架柜门对 IT 设备进

行冷却，将一个机柜作为冷却单元，这使得送风距离进一步缩短，风机压差减小，风机功耗随之降低。对于更节能的服务器级冷却，冷却系统的蒸发端直接与产热元件相接触，采用接触换热的方式，无需风机驱动空气换热，可实现末端零功耗换热。

随着信息技术集成度的提高，单机柜功率不断增加，若要保持空调送回风的温差不变，则需要提升风量以满足换热需求。对于传统精密空调末端形式，将导致其风机功耗急剧增加，与此同时冷热气流掺混现象更为严重，故而精密空调末端形式一般应用在单机柜功率较小的机房。对于更高单机柜功率的情况，若想减小风机功耗的增幅，则缩短送风距离、降低送回风压差是一个有效的方式。因此随着单机柜功率密度的提升，改为采用列间空调、热管热板及服务器级冷却方式，可有效提升末端能效。为了对比不同末端冷却形式的风机能耗，以一 32 个机柜的机房为例，图 5.1 展示了传统精密空调、列间空调和热管背板这三种冷却方式的机房布局和最远送风距离示意图。假设三种冷却方式单机柜发热功率相同，按送回风均为 10℃ 计算，不考虑气流掺混问题，整个机房的总送风量是相同的，但由于精密空调末端形式送风距离最长，列间空调次之，背板冷却最短，因此其送风阻力也逐渐减小，送回风压差也逐渐降低；而风机功耗与风量和送回风压差均呈正相关关系，故在总风量相同的条件下，精密空调末端形式风机功耗最高，列间空调次之，背板冷却的风机功耗最低，系统能效最高。

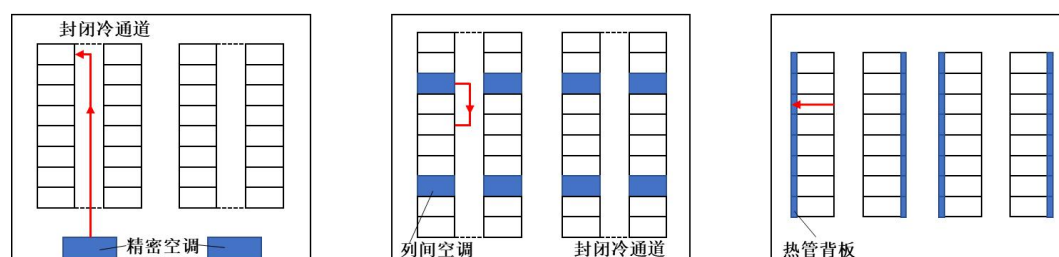


图 5.1 三种末端形式送风距离示意图

### 5.1.2 末端方式对冷源温度的影响

末端方式从传统的机房级精密空调末端发展到列间级的列间空调、机柜级的背板冷却和服务器级的冷却形式，其冷却形式从空气冷却转变到液体冷却，其中机房级、列间级和机柜级属于空气冷却，服务器级属于液体冷却。对于空气冷却的末端方式，从机房级到列间级再到机柜级，其冷却单元逐渐减小，送回风距离

逐渐缩短，冷热气流掺混现象不断减少，使得送风温度与服务器进风之间的温差逐渐缩小，图 5.2 展示了传统精密空调下送风形式的典型气流组织图，由于负压回流和热风回流现象的存在，导致精密空调的送风在进入服务器之前先和温度较高的回风进行了掺混，从而使得服务器进风温度比精密空调送风温度升高 4~8℃。而列间级进行了冷热通道封闭，若在没有安装服务器的机柜处安装盲板，阻断热风回流的通道，可有效避免冷热掺混现象，缩短送风与服务器进风之间的温差；机柜级更是直接将末端与服务器封在一个机柜里，若能根据单机柜功率合理调节风量，可做到整个机房温度均匀，杜绝冷热掺混现象，使得空调末端送风温度与服务器进风温度几乎保持一致。故而列间级和机柜级的空调末端送风温度可比精密空调送风温度高 4~8℃，从而可提升冷冻水供水温度，提升冷却系统整体能效。

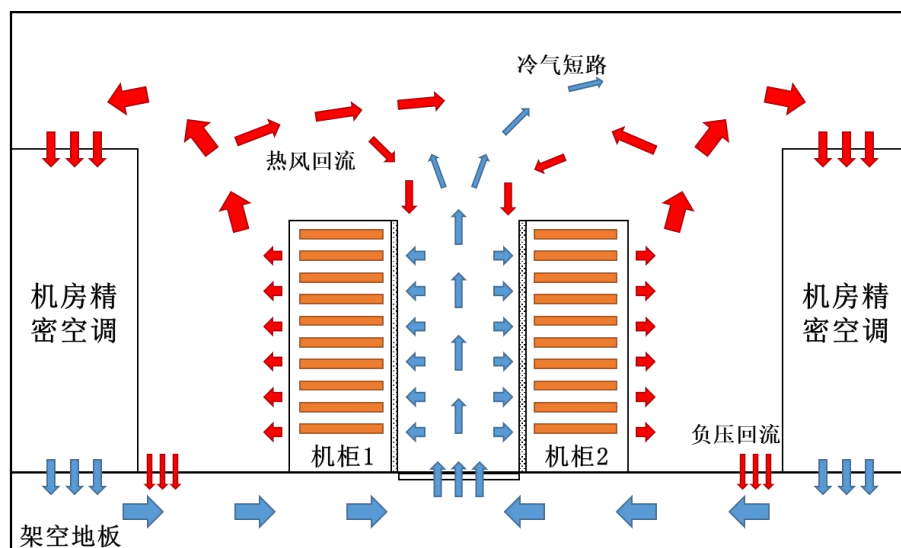


图 5.2 传统精密空调下送风形式气流组织示意图

从空气冷却到液体冷却的转变，其冷却方式发生了质的变化。空气冷却的末端形式对机房内的气流进行冷却，再用冷却后的气流去冷却服务器，其热源温度为空气；而服务器级冷却方式直接对服务器芯片进行冷却，取消了空气冷却的环节，其热源温度直接为服务器芯片，与空气温度相比，服务器芯片温度通常高 40℃ 以上，由于热源温度的提升直接使得冷源温度提升，一般来说，服务器级冷却系统可用最高 40℃ 的冷源温度，几乎可以实现全气候区域的全年自然冷却。

## 5.2 列间空调冷却技术

### 5.2.1 系统形式

列间空调冷却技术是一种以两列机柜为冷却单元的冷却技术，与传统下送风形式的精密空调形式相比，列间空调冷却技术可取消架空地板结构，将精密空调制成列间形式置于机柜之间，通常以两列机柜为一个单元，进行冷通道或热通道封闭，按照冷却介质的不同可以分为水冷列间空调和热管列间空调两类，两种类型传热流程相似，列间空调作为末端蒸发器与冷凝器（板式换热器）相连，冷凝器再与冷冻水系统相连。

将列间空调置于机柜之间，列间空调从热通道吸入热风，热量被管内的工质吸热后向冷通道吹入冷风，机柜从冷通道按需吸入相应的冷风进行设备冷却。对于水冷列间空调一般会配置冷量分配单元（UDC），对于热管列间空调一般采用双管路双系统设计，提高系统运行可靠性，列间空调系统示意图如图 5.3 所示，

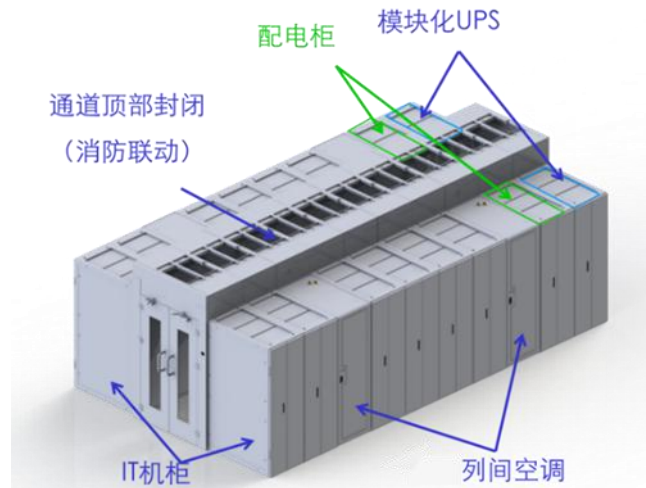


图 5.3 列间空调系统示意图

列间空调冷却技术可实现模块化部署，具有以下特点：

- 1、靠近热源，机柜内吸收 IT 设备后的热空气直接进入列间空调，送风距离近；
- 2、适用于中低密度数据中心；
- 3、根据机房整体布局，可兼容封闭冷通道或热通道；
- 4、采用列间级制冷模式，无局部热点，相比传统集中式送回风形式的冷却系统可提高冷源温度约 5℃左右；
- 5、模块化部署，可集机柜、制冷、供配电、管理等子系统为一体。

与传统精密空调系统相比，列间空调冷却技术取消了精密空调的设置，可提

升机房的机柜装机率，但列间空调置于机柜之间，依然会占用部分机柜的空间，为了进一步提升机柜装机率，可采用顶置式列间空调方案。顶置式列间空调安装于热通道或冷通道的顶部，以两列机柜为模块进行部署（如图 5.4 所示），根据机房整体热环境的需求，可兼容封闭冷通道或热通道。由于顶置式列间空调不占用机柜空间，可提高机柜装机率 10~20%。

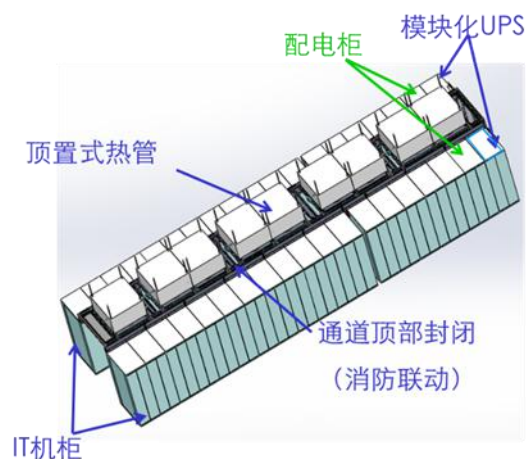


图 5.4 顶置式列间空调系统示意图

## 5.2.2 性能测试

### 1) 水冷列间空调

广东某数据中心采用水冷列间空调末端形式，该机房单机柜功率实测约为 5 kW，该数据中心冷却系统采用了微模块架构封闭系统，全部由冷冻水型列间空调供冷，封闭冷通道，单个微模块布局如图 5.5 所示，水冷列间空调系统示意图如图 5.6 所示，冷冻水主供水管路进入微模块的冷量分配单元，末端设定出风温度值，由自动调水阀的开度分配进入每个水冷列间空调的水量，从而保证冷通道的温度，实现对冷量的按需分配，管路全部布置在微模块下方，并设置防漏水箱。设定送回风温差值，通过自动调节风机转速保证设定的冷热通道温差，避免不必要的送风量。尽量提高冷通道的温度，提高冷却系统效率。



图 5.5 水冷列间空调微模块布局示意图

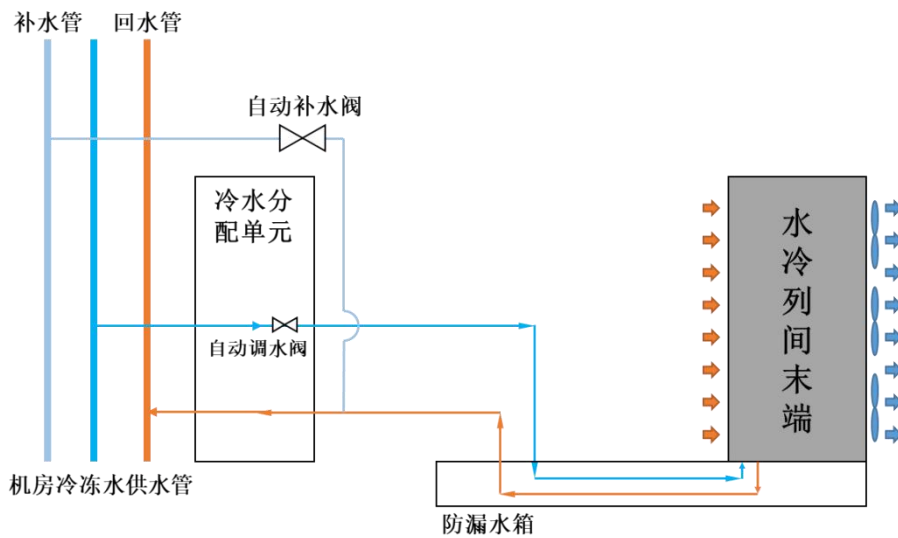


图 5.6 水冷列间空调末端系统示意图

考虑到系统运行工况的稳定性,选取了无自然冷却切换条件下的运行工况进行分析,测试时室外干球温度  $25.8^{\circ}\text{C}$ ,湿球温度  $18.3^{\circ}\text{C}$ 。测试时分别对冷却水供回水、冷冻水供回水以及列间空调的送回风温度进行了监测和记录,典型工况数据如表 5.1 所示。测试时现场服务器布置非常密集,且空位均有盲板封闭,虽然有少量备用列间空调未开启,但整体气流组织良好,可以认为无冷热气流掺混,因此,列间空调送风温度可以认为近似等于服务器进风温度,列间空调回风温度也可近似等于服务器出风温度。

表 5.1 水冷列间典型工况温度

测点位置	值 (°C)
冷却水供水温度	19.5
冷却水回水温度	25.4
冷冻水供水温度	13.3
冷冻水回水温度	20.4
列间空调送风温度	22.4
列间空调回风温度	41.8

## 2) 全氟热管列间冷却

北方某数据中心采用了全氟热管列间空调冷却技术，其冷却系统为全氟冷却系统，列间空调直接与室外机连接，没有中间换热环节，单机柜服务器功率为 3 kW，封闭热通道，实际机房照片如图 5.7 所示。



图 5.7 列间空调冷却系统照片

夏季对该数据中心列间空调的冷却效果进行了测试，测试时选取了中间（列间空调 Dc2 和机柜 D6）和两端（列间空调 Dc3 和机柜 D10）两个典型位置的列间空调和机柜进行了热环境测试，测试期间室外温度约为 26°C，测试期间负载和空调系统全部开启。机柜分别在进风面和排风面各布置两个测点，列间空调分别在回风面和出风面各布置两个测点，将各面的两个温度取平均视为该处的温度值，各点温度变化如图 5.8 所示。由于该机房布局是列间级与机柜级混合布局，列间级采用热通道封闭，整个机房保持冷环境，测试时，列间级机柜未安装盲板，存

在一定的冷热气流掺混现象，由图 5.8 可以看出机柜进风温度比列间空调出风温度升高约 2.5℃左右，表明热风回流现象较少，气流组织较好。

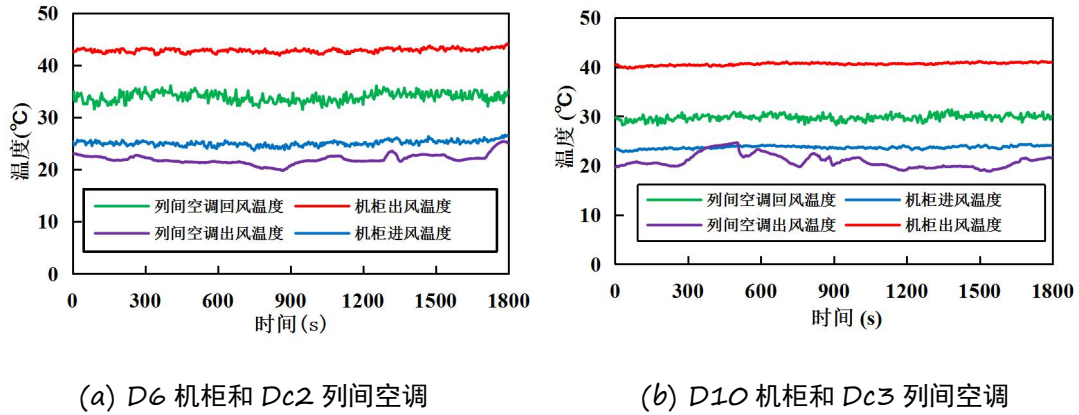


图 5.8 列间空调热环境测试结果

### 5.3 热管背板冷却技术

#### 5.3.1 系统形式

热管背板冷却技术是一种机柜级冷却技术，将背板换热器嵌入到服务器机架柜门对服务器进行冷却，其冷却原理与热管列间空调相似，均是以分离式热管为基础，利用氟利昂工质相变排走机房的热量，不同的是其冷却尺度更小，以单个机柜为冷却单元进行冷却，如图 5.9 所示。



图 5.9 热管背板冷却机柜

热管背板安装在机架前/后柜门上，以吸收机架中 IT 设备发出的热量。安装服务器机架出口处的柜门上配置有风机，热管背板将服务器排出的热风吸入柜门，降温后排出，使服务器机架的进、排风温度保持一致，如图 5.10 所示。使得在使用热管背板冷却系统的数据机房中，各通道的温度相同（消除了传统冷却方式中的热通道），有效避免传统空调冷却方式中常见的冷热气流掺混和局部热点问题。



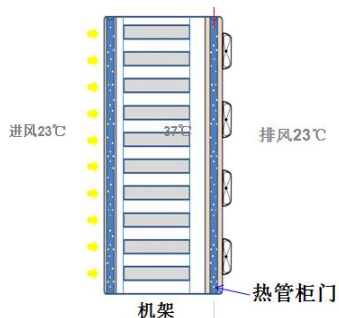


图 5.10 热管背板机柜冷却原理示意图

热管背板冷却机柜可与常规冷源兼容，用中间换热器连接热管背板机柜和冷源，由于采用的分离式热管为重力式，中间换热器的安装位置需要高于热管背板，一般采用板式换热器。如图 5.11 所示，以分离式热管连接中间换热器与热管背板制冷机柜，将分离式热管蒸发端嵌入机柜柜门形成热管背板，制冷工质在热管背板内吸热蒸发变成气态，经过蒸气上升管流入冷凝器（即中间换热器），并在冷凝器内冷凝为液态，通过导液下降管借助重力回到热管背板继续蒸发；冷凝器释放的热量由冷源系统供给冷冻水或冷却水排到室外，完成一个循环。

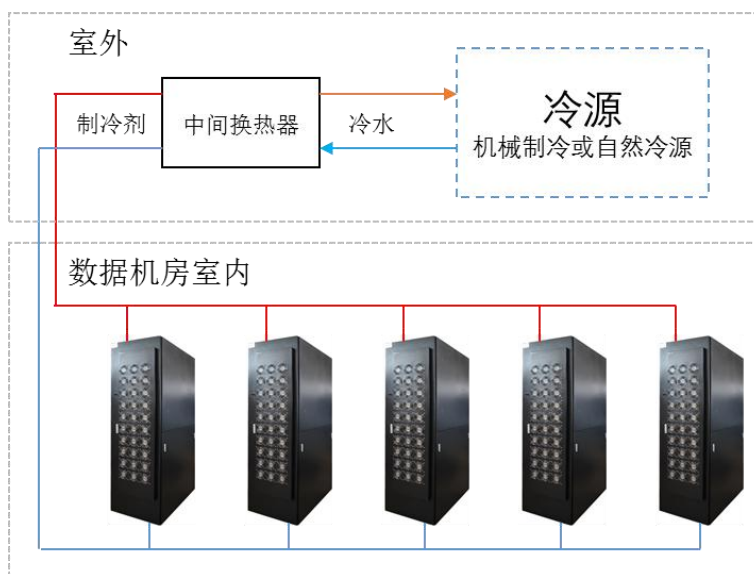


图 5.11 热管背板冷却系统示意图

热管背板冷却技术具有以下特点：

- 1、分离式热管具有自调节能力，可根据单机柜发热量按需供冷，解决机房局部热点问题；
- 2、热管背板安装位置灵活，包括后背板、前后背板、上下背板等多种安装形式，满足不同散热需求；

- 3、机柜内服务器产生的热量在排出机柜前先被冷却，机房整体为冷环境，避免了冷热气流掺混，且可有效防止单点故障；
- 4、热管背板基于分离式热管，依靠重力完成循环，减少输配能耗；
- 5、热管背板冷却技术减少了换热环节，可有效提高冷源温度，降低冷机能耗并延长自然冷源利用时间；
- 6、冷却工质为氟利昂，无水进入机房，杜绝水泄漏带来的安全隐患；
- 7、节约机房空间，采用热管背板冷却技术时，可取消架空地板构架，此外机房不需预留常规精密空调的安装空间，提升机房的机柜装机率。图 5.12 为典型的热管背板空调机房布局示意图。

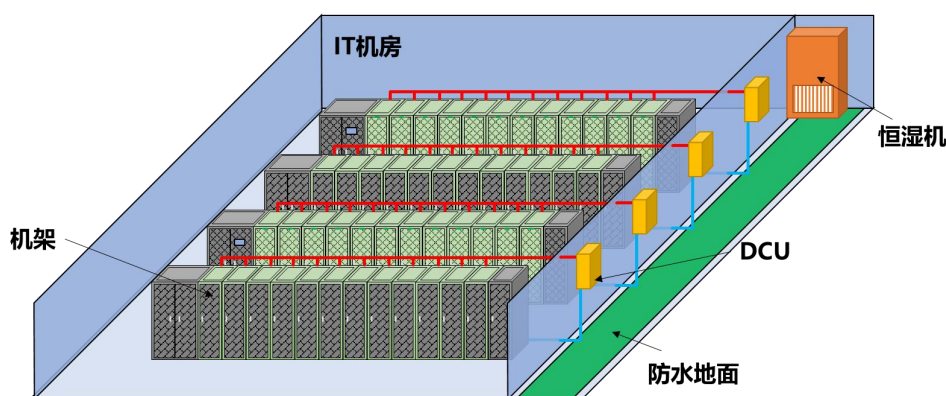


图 5.12 热管背板空调机房布局示意图

### 5.3.2 性能测试

#### 1) 冷冻水-热管背板冷却

北方某一数据中心采用冷冻水-热管背板冷却系统，其系统示意图如图 5.13 所示，由冷水机组或冷却塔制备的冷冻水在板式换热器中与热管中的气态工质换热，将气态工质冷凝为液体，液体工质回流至热管背板与服务器出风的热风进行热量交换，从而实现机房排热。表 5.2 给出了典型工况下给系统的温度分布。

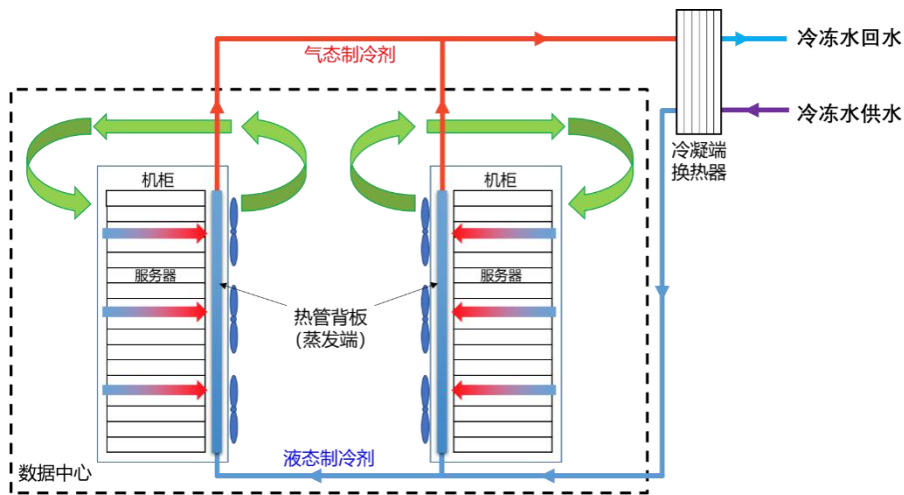


图 5.13 冷冻水-热管背板系统示意图

表 5.2 不同工况下热管背板空调散热效果测试结果

测点位置	值 (°C)
冷冻水供水温度	14.3
冷冻水回水温度	18.2
背板出风温度	20.2
背板回风温度	24.1

## 2) 全氟热管背板冷却

北方某数据中心采用了全氟热管背板冷却技术,该机房的热管背板冷却系统为全氟冷却系统,热管背板直接与室外机连接,没有中间换热环节,单机柜服务器功率为6~12 kW,实际机房照片如图 5.14 所示。



图 5.14 热管背板机柜照片

在过渡季对该机房的热管背板系统运行效果进行了测试,测试时选取了中间

(E6 机柜) 和两端 (E12 机柜) 两个典型位置的机柜进行了热环境测试。分别在机柜进风面、服务器排风面和机柜排风面各布置两个测点, 将各面的两个温度取平均视为该处的温度值。测试期间负载和空调系统全部开启。测试期间室外环境温度约为 3~21℃。机柜监测点温度变化如图 5.15 所示。由图 5.15 可知, 机柜级末端的气流组织良好, 末端送风温度 (机柜排风温度) 与机柜进风温度平均相差约 1℃ (图中机柜排风温度的周期性起伏是由于过渡季冷源压缩机间歇性启停导致), 基本不存在冷热气流掺混现象和冷量浪费现象。

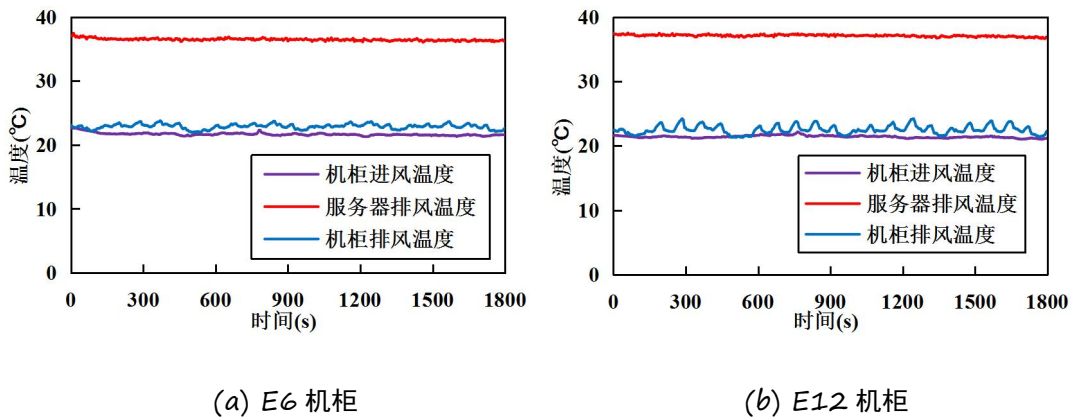


图 5.15 热管背板热环境过渡季测试结果

## 5.4 服务器级冷却技术

### 5.4.1 系统形式

服务器级冷却技术是为了解决超高发热密度机柜的散热问题而诞生的一种冷却技术, 它将冷却系统的蒸发端直接与服务器的散热元器件相接触, 略过空气换热的环节, 直接带走服务器产生的热量, 实现高效换热。按换热工质不同可以分为水冷型和热管型, 其传热路径大致相同, 通过一级回路将热量从服务器中传递到服务器外, 再通过二级回路传递到冷冻水循环或室外环境中。不同的是回路中所用的工质不同, 采用水作为冷却介质的系统需要水泵提供循环动力, 而采用氟利昂为冷却介质的系统可以依靠重力或热虹吸现象实现无动力的热量传输。本节以热管型的服务器级冷却技术为例进行介绍。

双级回路热管冷却系统是一种典型的热管型服务器级冷却系统, 如图 5.16 所示, 该系统由两级回路热管构成, 其中一级热管的蒸发端直接与 CPU 等高发

热密度元件贴合，通过管内工质相变带走 CPU 散发的热量，一级热管的冷凝端与二级热管的蒸发端通过热插拔的方式将热量从一级热管导热到二级热管，再经过二级热管内工质的相变循环最终排放到室外环境中。双级回路热管冷却系统可利用 40℃左右的冷源实现对高发热密度元件的散热，几乎可在全气候范围内实现全年自然冷源的利用。对于 IT 设备中其他低发热密度元件，可采用列间级或机柜级冷却的方法将其热量排出。

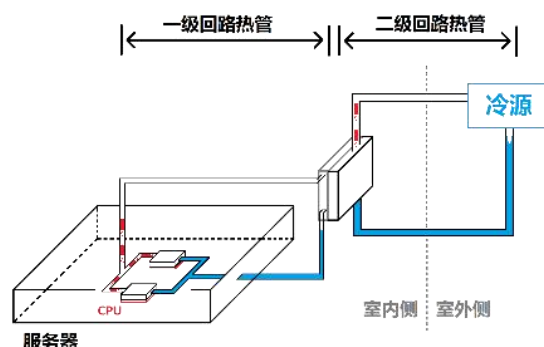


图 5.16 双级回路热管冷却系统示意图

双级回路热管具有以下优势：

- 1、直接从 CPU 等发热密度元件取热，可实现全年自然冷源的利用，大幅提升冷却系统能效；
- 2、两级回路热管之间采用热插拔的方式进行连接，方便安装与拆卸，可满足服务器维护和更换的需求；
- 3、一级回路热管为微热管，二级回路热管为重力式环路热管，均无需额外动力就能完成循环换热，降低输配能耗；
- 4、无水进入机房，杜绝水泄漏的安全隐患；
- 5、列间级或机柜级冷却系统带走低发热密度元件的热量，同时可作为双级回路热管冷却系统的冗余备份，提高整体冷却系统的运行可靠性；
- 6、整套系统不含阀门、快接插头等活动部件，无泄漏隐患且造价较低。

#### 5.4.2 性能测试

北方某数据中心对服务器级冷却技术进行了示范应用，并对双级回路热管冷却系统进行了效果测试。测试时冷源侧采用水冷的形式，其系统形式如图 5.17 所示。服务器芯片通过一级热管冷媒的相变将热量传递给二级热管，二级热管的

冷媒在换热器中将热量传递给冷冻水。测试机柜实物照片如图 5.18 所示。

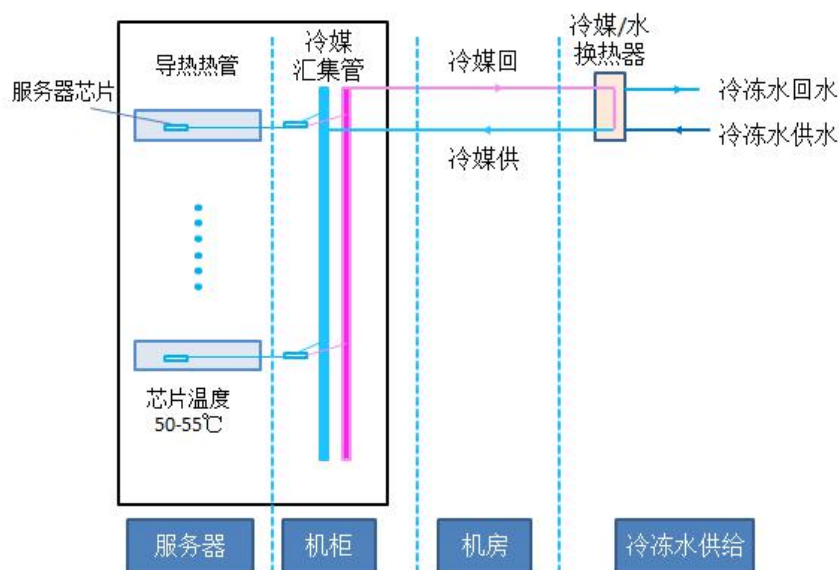


图 5.17 双级回路热管冷却系统测试示意图



图 5.18 双级回路热管冷却系统照片

测试采用基于通用的 X86 服务器，能够在 10~35℃环境温度下长时间稳定运行，其详细配置参数如表 5.3 所示。

表 5.3 测试服务器配置表

序号	名称	配置
1	服务器形态	机架式服务器
2	安装方式	19 英寸机架
3	每节点 CPU 数量 (实配/最大扩展)	2/2

4	CPU 类型	2 路 E5-2690 v4
5	内存配置	DDR4, 8*16GB
6	硬盘配置	1*400G SATA SSD+1*SAS HDD (1.2T 10K 转)
7	网卡	2*GE+2*10GE
8	风扇配置	支持风扇 N+1 冗余
9	液冷单元	由液冷对 CPU 进行散热, 其他部分通过风扇进行散热
10	电源	两个 PSU 接口均支持 AC220V 和 DC336V 双电源供电
11	高度	单服务器的平均高度≤2U
12	功耗	单服务器功耗约 400W

分别测试了不同服务器进风温度和不同冷冻水供回水温度情况下, 服务器级冷却技术所能维持的芯片温度以及系统能耗情况, 表 5.4 给出了服务器进风 27℃, 冷冻水供水温度 25℃, 回水温度 30℃ 情况下系统的散热和能耗性能。

表 5.4 服务器级冷却系统散热和能耗测试结果

序号	测试条目	测试结果
1	环境空调耗电量 (kwh)	0.14
2	环境空调冷量 (kJ)	2.85
3	服务器级冷却占比	58%
4	冷冻水泵耗电量 (kwh)	0.089
5	冷冻水温 (℃)	供水 25℃/回水 30.4℃
6	CPU 芯片温度 (℃)	61-68℃

## 5.4 本章小结

本章从数据中心单机柜功率密度、送回风压差、送风量的角度分析了机房级、列间级、机柜级和服务器级冷却末端形式的能效差异, 选取了典型工程案例, 对列间级、机柜级和服务器级三种新型末端的冷却效果进行了分析。相比传统机房级精密空调末端形式, 列间级和机柜级冷却方式可以有效缩短送风距离, 减小风机送回风压差, 减少冷热气流掺混现象, 从而提高冷源温度并控制风机能耗在可承受的范围, 使得冷却系统能效整体提高。而服务器级冷却方式由于采用接触

式传热，取消了风机，可实现末端零功耗换热。

## 参考文献

---

[1] 何仲阳. 数据中心热环境数值模拟与优化[D]. 北京：清华大学航天航空学院, 2013.