

# 数据中心水冷空调冷源系统的节能运行

谢静 蒋雅靖

上海邮电设计咨询研究有限公司

**摘要:** 空调冷源系统耗电在数据中心总用电量中占比接近一半。本文主要针对现有的数据中心空调冷源系统,通过对水冷系统经济运行模式的研究分析,提出了多种行之有效的节能运行策略,可显著地降低系统运行费用,同时为今后数据中心水冷系统的节能减排起到重要的示范作用。

**关键词:** 数据中心; 空调冷源系统; 经济运行; 节能

## 引言

据预测,到2016年中国数据中心市场规模将突破1000亿人民币<sup>[1]</sup>。就目前原始设备出口总量而言,中国及亚太已经远超世界其他区域。从全球视角而言,中国正在成为全球最大的数据中心市场。然而,在大型数据中心建设中仍存在着许多问题,值得深入探索并不断完善。

统计显示,数据中心的冷却用电占机房总功耗的40%左右。如何降低大型数据中心水冷系统的运行能耗,从根本上降低PUE(评价数据中心能源效率的指标)成为亟待解决的课题。本文分别从制冷主机运行及控制策略、IDC机房空调的合理设计及系统轻载运行等方面进行了阐述,提出了一系列行之有效的数据中心空调冷源系统的经济运行模式。

## 正文

### 1 制冷主机运行及控制策略

空调冷水系统一般包括冷水机组、冷却塔、水泵等主要部件,大多数建筑物都是使用两台(或两台以上)的冷水机组供冷,冷水机组大部分时间内均在部分负荷下运行。优化制冷主机运行台数,同时对冷冻水、冷却水系统进行控制调节,能使冷水机组高效、可靠地运行。

#### 1.1 制冷主机运行台数优化

##### 1.1.1 离心式冷水机组部分负荷的能效比特点

离心式冷水机组在部分负荷下运行的条件不同,其部分负荷的能效比变化趋势不同,根据冷却水进水温度变化,冷水机组在部分负荷时的运行规律见表1<sup>[2]</sup>。

表1 冷却水进水温度对冷水机组部分负荷的能效比影响(参见右栏)

冷水机组是按照设计工况选择的,当冷却水进水温度低于设计工况时,冷水机组的满负荷制冷量可能会大于其设计冷量(额定冷量)。超额冷量一般

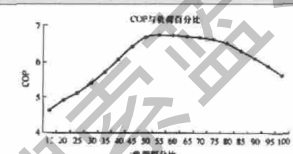
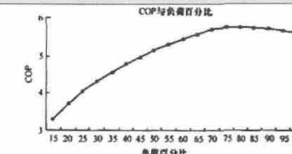
项目	冷却水进水温度与机组负荷同步变化	冷却水进水温度不变,机组负荷变化
特征	冷却水进水温度与空调系统负荷同步变化时(受太阳得热影响),冷冻机能效比在55%-65%区间内效率最高	冷却水进水温度不变时,冷冻机能效比在80%左右区间内效率最高
图示	 <p>反映了常规机组的特性曲线</p>	 <p>反映了常规机组的特性曲线</p>
原因	冷却水进水温度降低,减小冷凝器与蒸发器中制冷剂压差,冷水机组能效比提高。另外,冷水机组在部分负荷运行时,制冷剂流量减少,而冷凝器和蒸发器的换热面积不变,故换热效果增强,提高冷水机组的能效比	冷却水进水温度不变,冷水机组负荷减少时,电机功率不是同比例下降,存在“大马拉小车”现象。虽然冷水机组负荷减少后,冷凝器和蒸发器的换热效果增强,能改善冷水机组能效比,但不能弥补“大马拉小车”的能耗

表1 冷却水进水温度对冷水机组部分负荷的能效比影响

是5%左右,它不仅受到“压缩机过电流保护”的限制,而且受到冷凝器与蒸发器的压差不宜过低的限制。另外,在冷水机组负荷相同的条件下,若冷却水进水温度降低,则冷水机组的COP会升高。

冷水机组在非设计工况下,仍可能满负荷运行。在多台冷水机组运行管理中,空调系统负荷逐步减少时,会关闭部分冷水机组,使剩余的冷水机组在较高负荷区域满负荷运行。因此在设计选型时适当增加冷水机组台数,在空调系统部分负荷时,减少冷水机组的运行台数是节能的措施之一。

##### 1.1.2 多台离心式冷水机组并联运行规律

据统计只有15%左右的建筑物使用单台冷水机组供冷,而85%左右的建筑物使用两台(或以上)的冷水机组供冷。为了让每台冷水机组运行在高能效的较高负荷区域,冷水机组的群控方案应确保每台冷水机组绝大部分时间运行在50%以上负荷范围内,以达到既节约冷水机组运行费用,又节约与之相对应的水泵、冷却塔的运行时间及电费的目的。当建筑物中的冷水机组的数量越多时,每台机组接近满负荷运行的概率越大。

由于大部分建筑物都是使用两台(或两台以上)

冷水机组供冷，并且冷水机组的群控方案基本保证每台冷水机组绝大部分时间运行在50%以上负荷范围内，因此在选择离心式冷水机组台数时，需注意：

1) .离心式冷水机组的NPLV值不能真实反映多台冷水机组运行时的实际能耗情况，因此可采取比较离心式冷水机组的COP为主，比较其NPLV值为辅的方式，评估多台冷水机组运行时的实际能耗情况。

2) .合理选择冷水机组的台数，综合考虑两方面因素。增加设计的冷水机组台数是节能运行的措施之一，在空调系统负荷减少时，可减少冷水机组的运行台数。但是需综合考虑由于冷水机组台数增加，导致冷水机组的单机制冷量减少，对于同一系列的机组而言，单机制冷量减小，其COP值也相对较小，对冷水机组的节能运行不利。

3) .从实际出发选择冷水机组的台数和单机制冷量。一般工程以3~5台冷水机组为宜，基本上是多台同一冷量的冷水机组。这样既考虑离心式冷水机组在不同冷量范围的性能比和COP值，又考虑冷水机组、水泵、冷却塔的互为备用，还考虑冷水机组的群控系统的复杂程度及其成本。冷水机组台数过多，会相应增大冷水机房面积，因为每一台冷水机组都需要维修空间，并且水泵、冷却塔所需的空间也相应增大。

根据能效和设备性能，提供最优设备运行组合和优化每台冷水机组负荷分配，可根据日常运行数据，经专业软件提供智能控制算法以便最大限度的根据负载需求实现节能运行，合理控制冷水机组运行台数，实现系统高效节能地运行。为了让每台冷水机组运行在高效的较高负荷区域，应确保每台冷水机组绝大部分时间运行在50%以上负荷范围内，以达到既节约冷水机组运行费用，又节约与之相对应的水泵、冷却塔的运行时间及电费的目的。

## 1.2 变工况节能冷却水系统

### 1.2.1 冷却水温度的优化点确定

冷水机组提供冷量的同时还产生热量，通过冷却塔散热。冷却水温度变化后，冷水机组能耗和冷却塔能耗的变化趋势却相反，见表2。

表2 冷却水的温度对冷却塔和冷水机组能耗的影响

要求	机械通风式冷却塔	冷水机组
冷却水的温度降低	风扇运行台数增加， 耗电增加	冷凝器进水温度降低， 耗电减少
冷却水的温度升高	风扇运行台数减少， 耗电减少	冷凝器进水温度升高， 耗电增加

故把冷却塔能耗与冷水机组能耗相加，可以寻找冷却水温度的优化点，对应于总能耗曲线上的最低点。

### 1.2.2 冷却水温度优化点随运行工况变化而改变

冷却水温度的优化点取决于很多参数，如冷却负荷、空气的湿球温度或环境状态等。冷水机组和冷却塔的综合能耗最低点不是对应于恒定的冷却水温度点，如图1所示<sup>[2]</sup>。

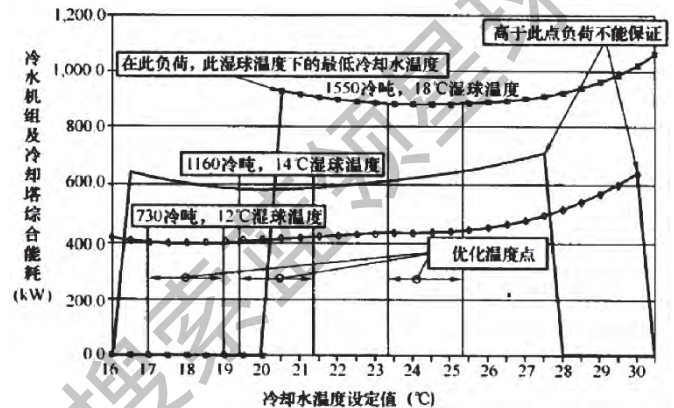


图1 系统负荷变化与冷却水最优化温度点关系图

假如在室外湿球温度18℃时，一台1550冷吨的离心式冷水机组满负荷的工作状态曲线如图1，它表明在此负荷、此湿球温度下，随着冷却水温度的不同，冷水机组和冷却塔的总能耗也随之不同。在此状态下的冷却水的优化温度为24℃，对应于总能耗曲线上的最低点。当随着负荷减少，室外湿球温度的下降，冷却水的优化温度也会随之发生变化。在冷水机组荷载达到1160冷吨时，湿球温度在14℃的条件下，冷却水的优化点移到了21℃。因此，不同的湿球温度，不同的冷水机组荷载会产生出不同的优化温度点。

冷水机组能耗与冷水机组的性能曲线有关，而冷却塔能耗与冷却塔的性能曲线有关，需采用智能化的控制系统将冷却塔运行控制与冷水机组运行控制紧密地结合。

### 1.2.3 变工况调节

冷却水温度主要由冷水机组和冷却塔性能曲线、空气湿球温度和环境状态以及冷却负荷这三个方面来确定的。

变工况冷却系统实质是把系统的发热量用最小的功耗带走，并为系统提供相对理想的冷却水温度，适应不同空气湿球温度及不同冷负荷工况变化，为系统综合COP做贡献。

由于空调系统大部分时段均运行于部分负荷下，冷却塔容量按照满负荷配置，同时配有备用冷却塔



及自由冷却系统冷却塔(此部分塔在非自由冷却时段可与主机配备的塔体联合使用), 这些设备配置就为变工况冷却系统的实施奠定了基本的物质基础。

在日常运行中, 根据环境湿球温度、冷却水流量、进回水温度, 控制风机运行状态与数量, 为主机提供最佳冷却水温, 做好相关数据的纪录与整理, 从中归纳汇总找出内在的联系及规律, 为主机运行提供最佳的冷却温度, 优化冷却水系统运行方案。

同时应当明确增加冷却塔运行台数、降低冷却水出水温度, 必然导致冷却塔蒸发损失、排污损失及飘逸损失的加大, 不可避免的会增大冷却水系统的补水量, 所以确定冷却水最佳冷却温度, 需同时考虑补水量的影响。

### 1.3 适当提高空调供水温度的节能运行

适当提高制冷主机的蒸发温度及冷水的出水温度是提升制冷系统整体节能效果的一个有力措施。

随着冷水机组的出口冷水温度升高, 冷水机组的制冷量逐渐增加, COP值逐渐增加, 从4.4℃到9.5℃, 冷水温度升高5.1℃, 冷水机组的冷量增加了30.2%, COP值增加了7.9%。冷水温度的升高使冷水机组的蒸发压力和蒸发温度升高, 从而改善主机的制冷性能, 使得制冷量和COP值增加(见图2)。如空调负荷发生变化, 可以通过调节离心式制冷机进口导叶或者调节转速, 改变蒸气吸量, 以适应供冷量的要求。所以提高冷水供水温度不会引起供冷量偏大的问题。

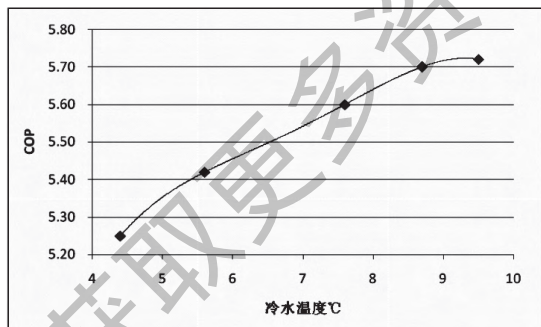


图2 冷水温度对机组性能的影响

下图显示了在不同的出水温度条件下, 冷水机组的制冷量与用电功率的典型关系。

图3 冷水机组出水温度与制冷量和用电功率的关系(参见右栏)

不难看出, 随着出水温度的提升, 制冷量和用电功率都在增加, 但制冷量的增幅更大。以上分析表明, 根据气象条件和空调负荷的变化, 确定合理的供水温度, 这样既可提高制冷机组运行能效比, 又可延长自由冷却使用时间。

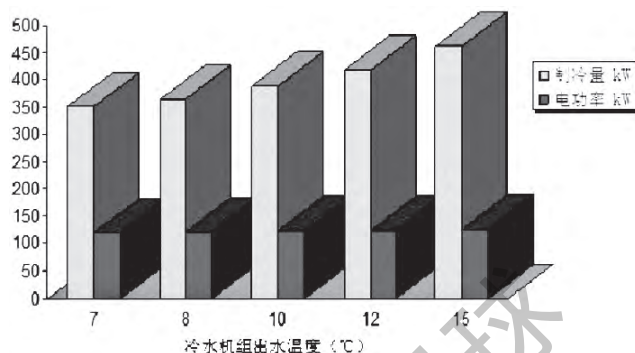


图3 冷水机组出水温度与制冷量和用电功率的关系

确定冷水温度的运行参数, 需根据数据机房空调负荷、室外气象参数、末端专用空调处理能力三方面的因素确定。

值得注意的是, 冷水机组的出水温度也不可以不受限制的提高, 且对于末端空调设备而言, 当来自冷水机组的冷冻水供水温度提升时, 其制冷量将随之下降, 专用空调的运行台数必然会有所增加, 其对应的功耗也会有一定程度的上升; 当专用空调制冷量衰减过大, 即会出现末端专用空调制冷总量无法满足数据机房所需冷负荷, 那势必会导致数据机房环境温度升高。

## 2 IDC机房的合理设计

### 2.1 IDC机房的气流组织

合理的冷热通道分布, 可以避免因局部热点, 导致空调温度设定过低而引起的高功耗。机架“背对背”、“面对面”布置是最基础的冷热通道布置(如图4), 在此基础上, 应进一步考虑封闭热通道(如图5)或冷通道(如图6), 进而提高气流组织的效率, 使空调运行在高效状态<sup>[3]</sup>。通过大量的CFD(计算流体动力学仿真模拟软件)模拟, 以及现场实测, 总结了大多数情况下, 封闭冷通道效率更高, 究其原因是由于冷通道可以使机柜得到更多的进风, 可以有效冷却设备, 降低主设备的出风温度, 最终的结果就是可以提高空调回风温度的设定点, 实现空调系统的节能。

图4 机房冷热通道布置示意图

图5 封闭热通道后的温度场

图6 封闭冷通道后的温度场(参见下页)

机柜内气流设计是引导空气最大限度改进冷却效果的关键因素, 设计合理的机柜, 其气流组织顺畅且无冷热气流掺混, 高效地利用了空调提供的低温空气, 提高了冷风的利用效率。无论是何种形式的机柜, 都要合理设计机柜内部的气流组织。首先,

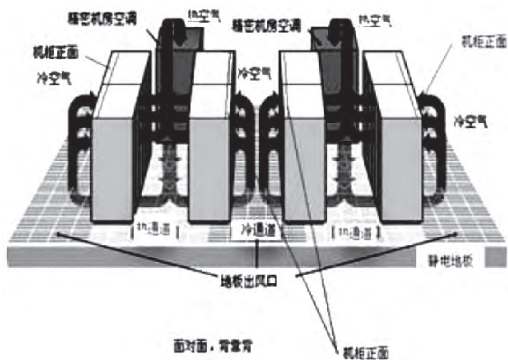


图4 机房冷热通道布置示意图

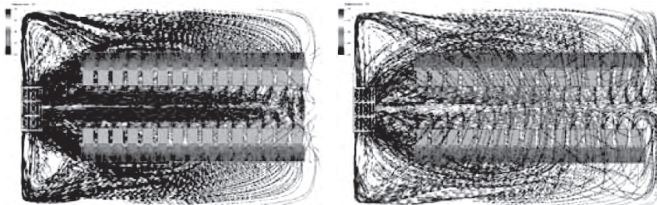


图5 封闭热通道后的温度场

图6 封闭冷通道后的温度场

应避免气流受阻，在机架中应留出冷风自由上升的通道，避免设备完全将下送的冷风阻挡；其次，应避免气流紊乱，造成冷热风混合，应在空位放置机架挡板（盲板），阻止热风回流。

## 2.2 IDC机房热通道温度的提高

适当提高末端专用空调回风温度以提高单台机组的运行效率，减少运行台数，降低末端专用空调的功耗。较高的回风温度，可以增加服务器的前后端温度差，这能在相同热负荷的情况下，减少风量，同时也可以减少风机风量和转速，风机的功耗它根据的转速比值是一个立方的关系，当风机转速降低一半的时候，它的功耗只相当于原来的八分之一。

提高回风温度，可以随之提高供水温度，通过加大进出空调机组的温度差，提高单台专用空调的显冷量，消除潜热损失。

## 2.3 专用空调的智能群控管理

空调机房设有多个机房专用空调，如果不进行群控管理，就会出现如下两种情况：

1) .即使空调冷却需求下降，仍保持多台机组的运行状态；

2) .出现部分机组在制冷，部分机组在加热，或部分机组在加湿，部分机组在除湿的竞争运行状况。

在这种情况下，就需对多台空调进行群控管理，包括：

1) . 能实现系统中主、备空调机之间的自动切换，系统中空调机应定时轮换作为备份机组，保证整个系统的可靠性；

2) .判断机房总的冷量需求，根据冷却需求，

判断开启的空调台数；

3) .判断机房总的温度控制或湿度控制趋势，保持多台机组协同运行，避免出现制冷、制热同时出现，或加湿、除湿同时出现的情况。

## 3 轻载运行

数据中心通常发热量大，导致配置的水冷主机容量较大。但数据设备的启用是一个逐步发展的过程，其发热量必然随之由小到大逐步增加，起始负荷甚至是几十千瓦。所以数据机房水冷空调存在一个初始启动轻载运行的阶段，这个阶段虽然短暂，但却必不可少无法逾越，对这个过程必须做出充分考虑，才能满足数据中心的制冷需求。

### 3.1 风冷末端的配置

在空调系统初期冷负荷较低时，可通过配置末端风冷专用空调解决数据机房初期平滑带载问题；同时避免了水冷主机初期“大马拉小车”而产生的低效率、高能耗问题。

随着装机容量的提高，达到水冷主机的合适启动负荷，即可启用水冷主机，此时每个机房的风冷专用空调转为备用；随着冷负荷的逐步增加至满负荷时，一部分风冷专用空调可以转为主用，以弥补水冷空调冷量的不足，将不会影响水冷空调规模化节能效果。

### 3.2 蓄冷罐的运行

为保障数据机房制冷的连续性，空调系统均配置有支撑系统满负荷运行15~20分钟的蓄冷水量(贮存于蓄冷罐内)。当数据机房运行初期，数据设备发热量很低的轻载运行阶段，可充分使用蓄冷罐内蓄存的冷量，减少主机开启次数；即使在制冷主机可以开启运行的条件下，初期冷负荷较不稳定，也会导致主机频繁启动、影响主机寿命。由于蓄冷罐的存在，当低负荷不稳定运行时，会延长主机运行及停机时间，避免主机频繁启动。以冷负荷为422kW(主机冷量的10%)为例，蓄冷罐可维持系统运行320分钟(5小时20分)，即主机的启停间隔为320分钟。

### 3.3 自由冷却的运行

冬季自由冷却技术是利用自然冷源实现空调系统节能的一项重要技术。在过渡季节和冬季，利用室外温度较低的空气温度进行降温，相对常规空调系统在相同气候条件下的运行能耗具有显著的经济性。对于需要全年供冷的数据中心机房，自由冷却技术的使用有很好的节能潜力。



自由冷却系统与制冷系统并联连接,配置相应的板式换热器、冷却塔、一次水侧循环泵及二次水侧循环泵。在不使用自由冷却系统的季节,冷却塔可与主机配备的冷却塔一并使用,以此降低冷却水温,进而提高主机COP值。

由于空调系统配有自由冷却系统,如轻载运行阶段处于过渡季节或冬季等室外温度较低时期,可独立运行自由冷却系统,通过冷却塔将内部少量热量排至室外,保证数据机房室内温湿度的要求。

#### 4 总结

针对数据机房水冷空调系统的经济型运行策略主要有:

1).根据系统日常运行的情况,综合考虑环境湿球温度、冷却水流量,冷却塔运行台数及补水量等因素,总结出主机最佳的冷却水温度,优化系统运行。

2).根据室外气象条件、空调负荷的变化和末端专用空调的处理能力,确定冷水机组合理的供水温度,这样既可提高冷水机组运行能效比,又可延长自由冷却使用时间。

3).适当提高末端专用空调回风温度可以提高单台机组的运行效率,减少运行台数,降低末端专用空调的功耗,消除潜热损失。

4).机房建设应确保密封隔热性,机房内的冷热通道封闭和机柜内部设计合理的气流组织,提高冷量的有效利用率,降低数据机房的运行能耗,降低PUE值。

5).设置有效的群控管理系统,实现主、备机定时轮换,控制冷水机组运行台数确保主机在高负荷区域运行;实现末端专用空调的主、备机定时轮换、控制运行台数、保持多台机组协同运行。

6).在常规的制冷系统中,增设自由冷却系统。在冬季和过渡季节有效地利用自然冷源进行制冷。在不使用自由冷却系统的季节,冷却塔可与主机配备的冷却塔一并使用,提高主机COP值。

7).充分利用空调冷源系统配置的蓄冷罐、自由冷却系统及末端配置风冷专用空调实现轻载负荷下的经济运行。

#### 参考文献:

[1] <http://storage.chinabyte.com/337/12964337.shtml>

[2] 陆耀庆.实用供热空调设计手册.

北京:中国建筑工业出版社.2007

[3] 钟志鯤,丁涛.数据中心机房空气调节系统的设计与运行维护.北京:人民邮电出版社.2009.8

#### 作者简介

谢静,工学士,高级工程师,注册公用设备师,主要从事大型数据机房设计工作,例如信息源区B2、B7、B15a、B15b,曾获多项优秀设计咨询奖。

蒋雅靖,工学硕士,助理工程师;主要从事暖通专业的设计工作及数值模拟的研究。