

# 中国人寿数据中心水冷空调系统的 节能方案及实施

毛路<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 曹连华<sup>3</sup>, 王建华<sup>3</sup>

(1. 北京建工集团有限责任公司, 100055, 北京; 2. 中国人寿保险股份有限公司, 100033, 北京;  
3. 北京捷通机房设备工程有限公司, 100015, 北京)

**摘要:** 依据近几年来数据中心能源消耗的情况, 对数据中心的节能措施进行分析, 同时结合中国人寿研发中心的方案、机组工作参数对数据中心的节能采取相应的措施。

**关键词:** 能耗; 节能; 冷通道; 冷冻水供水温度; 冷冻水回水温度

**中图分类号:** TU 201.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-4726(2016)02-0126-05

## ENERGY CONSERVATION OF WATER-COOLING AIR-CONDITIONING SYSTEM FOR DATA CENTER

MAO Lu<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, CAO Lian-hua<sup>3</sup>, WANG Jian-hua<sup>3</sup>

(1. Beijing Construction Engineering Group, 100055, Beijing, China; 2. China Life Insurance Company Ltd., 100033, Beijing, China;  
3. Beijing Chatone Computer Room Equipment and Engineering Co., Ltd., 100015, Beijing, China)

**Abstract:** Based on the energy consumption of data center of China Life Research and Development Center in recent years, analyzed the energy conservation measures and relevant energy conservation measures were adopted for data center with consideration of practical scheme and unit working parameters.

**Keywords:** energy consumption; energy conservation; coolness channel; chilled water supply temperature; return water temperature

随着计算机技术的发展, 其功能越来越强、运算速度越来越快且日趋小型化。但因其电子元件的排列越来越密集, 使计算机单位体积的散热量也越来越大。中国人寿数据中心工程中, 通过对空调系统进行合理的设计, 节约了大量能耗。

目前国内绝大部分数据中心采用风冷模块式机房专用空调, 这种做法具有安装方便、系统简单可靠、漏水隐患较小等优点, 但风冷模块式机房专用空调的能效较低。

中国人寿数据中心工程采用冷冻水型制冷方式, 冷冻站为数据中心及其辅助房间提供制冷所需的冷冻水, 冷冻站按 Tier4 相关标准设计, 即在地下三层建设 2 座完全物理分离的冷冻站, 每座冷冻站均能满足 100% 负荷时的制冷需求, 并设有蓄冷装置以保证满足连续制冷的要求。

制冷主机部分配置板式换热器, 过渡季节及冬季可利用室外冷空气进行部分或完全自然冷却运行, 北京地区可运行时间为 4~5 个月。

### 1 水冷空调系统的基本构架

我国北方冬季及过渡季节气温较低, 合理利用

室外自然冷源可为数据中心降温。水侧节能器是利用室外空气很低的湿球温度条件产生低温冷却水, 可部分或全部满足数据中心的供冷要求。通过板式换热器将冷却水及冷冻水隔离、间接实现自然冷却的方案, 运行及控制虽较复杂, 但能避免冷却水直接进入机房专用空调冷却盘管而产生污垢。

若采用串联布置, 当大气的湿球温度低至可使板式换热器能满足部分负荷时, 冷冻水即可通过板式换热器进行部分冷却。在此模式下, 冷冻水依次流经板式换热器和冷水机组, 通过板式换热器降温后的冷冻水再进入冷水机组, 继续降至冷冻水供水设定温度。此过程获得了很大一部分自然冷却的运行时间, 代价仅为额外增加将水送至板式换热器和冷水机组所需的水泵能耗。一旦湿球温度低到允许由板式换热器全部供冷时, 水流即可旁通冷水机组蒸发器以降低水泵压头, 降低能耗。

如图 1 所示, 夏季运行工况 1: 电动阀 M1/M4 及 V1/V4 关闭、M2/M3 及 V2/V3 打开, 冷水机组提供全部冷量。过渡季节 (依靠自然冷却不能满足全部供冷要求时) 运行工况 2: 电动阀 M1/M3 及 V1/V3 关闭、M2/M4 及 V2/V4 打开, 冷水机组及板式换热器联合提供所需冷量。冬季及过渡季节 (依靠自然冷却能够满足全部供冷要求时) 运行工况 3:

收稿日期: 2015-11-12

作者简介: 毛路 (1975—), 男, 湖北武汉人, 工程师, 项目机电负责人, e-mail: 13910799970@139.com.

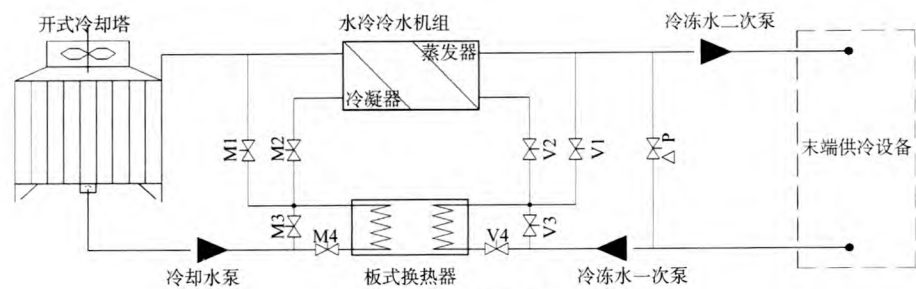


图 1 串联式自然冷却系统流程图

电动阀 M2/M3 及 V2/V3 关闭、M1/M4 及 V1/V4 打开, 板式换热器提供全部冷量。

根据北京地区的气候条件, 部分及全部自然冷却工况全年可运行时间比例约为 41%。为充分满足数据中心冷负荷的需求, 室外空气的湿球温度一般需比设计冷冻水温度低 4~6℃, 这取决于冷却塔的散热能力和板式换热器的换热温差。

若采用水侧节能器的方案, 需要换热温差较小的板式换热器和较大的冷却塔, 在需要时要用电动阀控制水流的不同路径。对于运行状态的改变需要通过控制系统进行严密监控, 以确保从冷水机组供冷到免费制冷之间能可靠、无缝过渡。

2 冷水机组变频驱动系统节能

数据中心冷水机组绝大部分时间均在部分负荷工况下运行, 而最高效率点一般为 60%~80% 负荷。若负荷降低, 冷水机组运行效率也将降低; 而离心式冷水机组采用变频调速装置后, 控制系统能同步调节导流叶片开度和电机转速, 使冷水机组的运行效率大幅增加。图 2 为某型冷水机组在不同的负荷比例下有无变频器的运行效率对比。

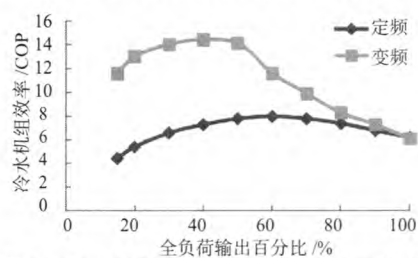


图 2 有无变频装置的冷水机组部分负荷时效率比较

使用变频器后, 离心式冷水机组主要从两个方面实现节能: 一是部分负荷运行状态下的节能, 二是低冷却水温度下的节能。

2.1 部分负荷状态下运行的节能

通常在部分负荷下, 定频离心式冷水机组通过调节导流叶片开度来调节机组输出冷量, 最高效率点通常为 60%~80% 负荷, 负荷降低单位冷量能耗增加较显著; 而变频装置不断监测冷冻水温度、冷冻水温

度设定值、冷媒压力导流叶片开度和电机转速等参数, 通过自适应容量控制逻辑定出有效的调节方法。它可优化电机转速和导叶的开度, 使机组运行转速最小而效率最高, 能耗达到最小。

2.2 低冷却水温度状态下运行的节能

在夜间或过渡季节, 冷水机组冷却水的温度往往较低。对定频冷水机组需有恒定的工作条件, 即需有恒定的蒸发压力和冷凝压力, 但冷却水温度降低后必然相应降低冷凝压力, 此时为满足离心冷水机组的工作条件, 只有通过关小进口导叶并减小输气量, 从而调整离心冷水机组的工作点, 以适应更低的冷凝压力, 以上调节会降低机组的效率, 无端地消耗更多能量。而使用变频器后, 可通过调整压缩机的转速, 以适应冷凝温度的变化, 最大限度地利用低冷却水温的节能效应, 从而达到节能的目的。

变频离心机组还可通过变速和导流叶片协同调节容量。机组能测定当时的工作点, 选择相应的容量调节模式, 并能精确地预测喘振区, 从而可以在 10%~100% 负荷范围内避免发生“喘振”现象。

3 冷冻水供水温度及供回水温差系统节能

冷冻水供水温度提高至 12℃ 时, 冷水机组的运行效率可提高约 15%; 冷冻水供回水温差提高至 6℃ 时, 会降低冷冻水泵的能耗。

冷水机组的运行效率与冷冻水的供水温度、供回水温差的关系, 可通过分析图 3 及图 4 的曲线来得出结论。图 3 曲线是在冷冻水温差及冷却水温度恒定的情况下, 某台冷水机组的冷冻水供水温度对冷水机组效率的影响。

由图 3 可看出, 随冷冻水供水温度增高, 冷水机组的运行效率也大幅度的提高, 因此提高冷冻水的供水温度能大幅降低电能消耗。常规空调系统冷冻水供水温度一般设为 7℃, 冷水机组的运行效率约为 5.5; 而若将冷冻水供水温度提高至 12℃, 冷水机组的运行效率可达到 6.9。本工程设计中将冷冻水供水温度设置在 10~12℃。

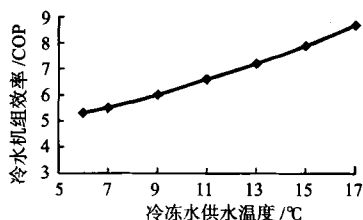


图 3 冷水机组效率与冷冻水供水温度的关系

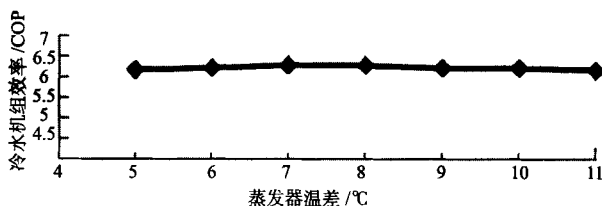


图 4 冷水机组效率与蒸发器温差的关系

由图 4 可看出,冷水机组效率随冷冻水供回水温差的变化曲线十分平坦,即随冷冻水温差增高,冷水机组的运行效率无太大变化。对应于此特性,可适当增大冷冻水的供回水温差,一般取 6~8℃,减小冷冻水的循环流量,进而降低冷冻水泵的能耗;冷冻水供回水管道的管径也可相应减小,以降低空调系统的初投资。

因提高冷冻水的供水温度会影响到冷冻水型机房专用空调的选型及除湿运行,需在设计时予以解决。(1)数据中心内的计算机设备按冷热通道的方式布置并采取冷通道封闭等措施严格隔离冷、热空气,以保证冷通道送冷风的设计温度为  $17 \pm 1^\circ\text{C}$ ,热通道回热风的设计温度为  $29 \pm 1^\circ\text{C}$ ,湿度为 20%~80%。在此工况下选用主流品牌冷冻水型机房专用空调的制冷量均基本达到或略超过标称制冷量,空调选型时无须放大空调的型号即能满足机房的制冷需求。(2)供水温度为  $12^\circ\text{C}$  的冷冻水除湿能力不足,但由于数据中心内部无湿源(由于人员不常在数据中心内故可忽略),唯一的湿空气来源为新风带入,因此可将送入数据中心的新风处理至室内空气的露点温度,以保证不增加室内空气的湿度。

#### 4 冷却水供水温度及供回水温差对系统节能的影响

冷水机组运行过程中,若冷却水温度发生变化会直接影响机组的制冷量和能效特性。当冷却水温度降低时,由于冷却效果好,将使冷水机组获得更低的冷凝温度,从而增加冷水机组的制冷量,提高冷水机组的效率(图 5)。

由图 6 可看出,随冷却水温差增高,冷水机组

的运行效率明显下降。因此冷却水温差设计值不应过大,一般取 5~6℃。

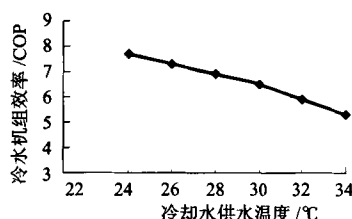


图 5 冷水机组效率与冷却水供水温度的关系

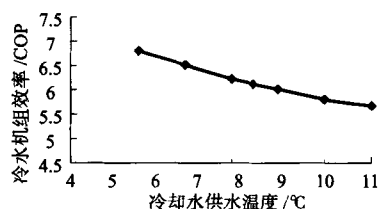


图 6 冷水机组效率与冷却水温差的关系

#### 5 冷冻水变频二次泵对系统节能的影响

冷水机组冷冻水侧采用一、二次泵的形式。一次泵定频定流量运转,保证冷水机组稳定运行;二次泵变频变流量运转,依据末端负荷的变化自动进行调整。由于二次泵可根据实际需要进行变频调整,大幅降低了部分负荷时的水泵能耗。

#### 6 冷却塔选型对系统节能的影响

冷却塔是整个空调系统对外散热的装置,其型号选择影响整个空调系统能否正常运行。本工程空调系统的冷却塔全年不间断运转,且分为夏季散热、冬季自然冷却二个不同的运行工况。

在夏季,冷却塔的最小散热功能须在最大设计室外湿球温度下能满足全负荷时所需的散热要求;在冬季,较寒冷地区的数据中心内仍需供冷时,冷却塔将会被利用作为制冷冷源,利用较低的室外气候条件将冷却水降温并循环至板式热交换器进行换热,产生较低温的冷冻水,以达到数据中心内计算机设备的散热要求。

在冬季工况下,空调系统运行在自然冷却模式下,冷水机组不启动,仅依靠冷却塔来直接散热。虽然室外温度和湿度较低,但同时冷却水运行温度也降得很低,水分子蒸发能力下降,导致冷却塔的蒸发散热量大幅降低。因此只能加大冷却塔的散热面积,增大依靠温差换热部分的散热量,使冷却塔满足全年的散热要求。一般情况下,冬季运行工况

下选出的冷却塔容量约为在夏季运行工况下选出的冷却塔容量的 1.5~3 倍。

每组冷却塔风机均设置变频器, 若冷却水管上的温度低于设定值时, 冷却塔的风机将由高速转至低速; 若水温继续下降, 冷却塔风机将会停止工作以节省能源。此时单靠冷却塔循环水洒水, 自然风冷。冬季运行期间, 冷却水总供、回水管间应设旁通调节阀控制旁通水量, 以免出现冷却塔进水温度过低的现象。

在一定的冷却负荷下, 不同冷却塔的风机能耗差别很大。为使冷却塔高效运行, 应对比不同品牌、不同型号的多种冷却塔, 对冷却塔进行优化。

7 机房专用空调控制方式对系统节能的影响

常规冷冻水型机房专用空调是依靠回风温度调节冷冻水管路上的电动两通调节阀的开度, 而风机送风转速一般恒定不变, 此种控制方式能保证数据中心内的空气温度, 但对冷通道封闭的数据中心内相当于控制了热通道的温度, 而无法控制对计算机设备散热更为重要的冷通道温度, 显然不合适也不节能。

改进后的机房专用空调控制方式为: 依靠送风温度调节冷冻水管路上的电动两通调节阀的开度, 依靠地板下静压控制 EC 风机的转速。

对于几乎所有的计算机设备, 进风温度不高于 28℃即可满足散热要求, 因此机房专用空调的送风温度设置在 17±1℃, 这样既可满足设备散热要求, 又不会出现过度冷却而造成浪费能源。地板下安装静压传感器, 一般设定静压值约为 20Pa, 依靠调整 EC 风机的转速来保证地板下的静压恒定, 以保证冷风送风量。当机柜内计算机设备增加或减少时, 仅调整相应的地板送风口的开度即可。

8 机房内湿度控制方式对系统节能的影响

为抑制静电及尘土的产生, 数据中心内的空气需保持一定的湿度, 国家现行机房设计规范规定的相对湿度范围为 40%~55%。北方地区冬季干燥寒冷, 需设置加湿装置才能满足达到至少 40%的相对湿度要求。

数据中心的特点是计算机设备发热量大, 即使在寒冷的冬季也存在大量余热, 故适合选用湿膜式加湿器。加湿水在湿膜表面蒸发, 该过程中由于总热交换量近似为零, 空气的显热量减少, 潜热量增加, 二者近似相等, 水蒸发所需热量取自空气本身, 因

此湿膜式加湿器的加湿过程为等焓加湿 (图 7)。A 点为温度 28.0℃、相对湿度 20%, 其对应的含湿量为 4.68 g/(kg 干), 若加湿至含湿量 7.00 g/(kg 干), 则从 A 点沿等焓线与含湿量 7.00 g/(kg 干) 线相交的 B 点即加湿后的空气状态点, 可查得 B 点为温度 22.2℃、相对湿度 42.1%。

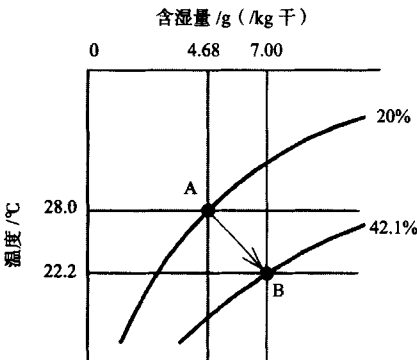


图 7 湿膜加湿过程

湿膜式加湿器在加湿的同时吸收机房的余热, 分担了空调系统的部分负荷, 降低了空调系统的能耗。与电极式、电热式或者远红外式加湿器相比, 其自身的耗电量也小得多。

9 空调系统的最优控制

本工程空调系统广泛采用分布式控制, 即控制模块集成的数字控制系统。为实现集成数据采集和控制, 各自具有次级处理特定功能的所有模块相互连接, 操作人员一般通过计算机控制大多数设定值和控制系统的其他相关内容。由于控制器具有独立的控制能力, 故监控计算机系统故障并不会使整个空调系统瘫痪, 空调系统可在控制器的控制下继续运行。

合理的设计和设置控制器可获得可靠性和节能效果。实现可靠性主要是通过提供冗余的机械系统; 而控制器自带的控制程序能在不损害可靠性的情况下使机械系统获得很高效能, 从而达到节能的目的。

9.1 提高空调的设定温度

数据中心机房专用空调的设定温度一般为 23±1℃, 个别机房专用空调温度控制得很低, 甚至为 20℃, 能源浪费严重, 因此合理设定机房空调的温度十分重要。随着服务器的功能的提升, 数据中心机房环境温度可为 28℃; 依据部分服务器的性能指标, 机箱内温度在 40℃以下都可正常运行。因此适当提高机房环境的温度对空调系统的节能作用明显, 尤其在冷通道封闭的数据中心内。

合理提高机房设定温度节能效果及优点为: (1)

可降低室内外传热温差,从而降低因围护结构传热形成的空调负荷;(2)可降低新风形成的空调负荷;

(3)空调的蒸发温度相应提高,制冷系数提高,机房回风温度每提高1℃,机房空调的耗电量能节约2%~5%。

## 9.2 湿度控制

由于室内人员较少,因此数据中心内产湿量很小,这为大型数据中心提供了高效集中控制湿度的可能。将送入数据中心的新风处理至室内空气的露点温度,不会增加中心内的湿度,可避免加湿及除湿同时运行,室内冷却盘管也可在干工况下运行。

冬季较低的相对湿度设定值可减少蒸汽量或其他加湿能源,从而降低运行费用;因减小潜热冷量,夏季设定较高的相对湿度设定值,同样可降低运行费用。

## 9.3 机房专用空调 EC 风机的控制

机房专用空调配置 EC 风机,可根据需要调节转速。在地板下安装静压传感器,一般设定静压值为 20 Pa,依靠调整 EC 风机的转速来保证地板下的静压,以保证冷风送风量。当机柜内计算机设备增加或减少时,仅调整相应的地板送风口的开度即可。

## 9.4 部分负荷下运行控制

数据中心空调系统很少会一直在满负荷工况下工作,因此部分负荷时的工作效率对系统的节能性影响很大。

为获得部分符合工况下的高工作效率,应选择带有变频控制装置的冷水机组,冷冻水二次泵、冷却塔风机等也应配置变频控制装置。风机、水泵的输入功率通常与转速的立方成正比,因此风机转速降低 10%,可使能耗降低 27%;风机转速降低 20%,可使能耗降低 49%。采用变频装置取代导叶和节流阀等,可在节能的同时显著改善系统的控制。

## 9.5 新风控制

数据中心通常设有独立的新风系统,以控制房间正压及湿度。在正常的数据中心内湿负荷相当小,显热负荷相当大,因此独立的新风系统可向房间提供正压防止渗透,则设施的加湿及除湿要求可由新风系统满足。将新风冷却盘管的露点温度维持在数据中心内环境的露点温度以下,设施的冷却盘管即在干工况下运行,可避免出现这些盘管既进行冷却又进行除湿的低效率情况。

由于室外新风处理至室内空气的露点温度之下需消耗大量能源,故在保持数据中心正压的前提下,尽量减小新风量为很好的节能措施。为此,进入每

个数据中心的新风管道均设置 VAV BOX 末端,以机房与走廊或室外的压差来控制送入的新风量;新风处理机组的风机也采用变频控制,依据需要调整运行频率,以达到节能目的。

## 9.6 机房专用空调的群控

数据中心机房专用空调存在竞争运行的情况,由于各台空调位置不同,受气流组织的影响,空调的运行状态也不同,有的在制冷,有的在温度较低的情况下加热,还有的在加湿,有的在除湿,上述相互竞争的运行状态造成了能源的极大浪费。

通过采用通讯线缆连接多台机组,可实现组网群控功能,网内机组间能实现主备切换、轮换运转、层叠、主机报警/断电备机启动等功能。

多台机房专用空调通过控制器群控带来的效益主要包括:提升了整体效率,避免了机组间的竞争运行,优化了温湿度的控制精度,最终带来的是数据中心的节能安全和机组寿命的延长。

## 9.7 部分自然冷却的引入

当冷却塔出水温度低于冷冻水回水温度 1℃以上但还不能实现完全自然冷却时,控制系统将水侧节能器和冷水机组进行串联运行,冷冻水先部分冷却,然后再进入冷水机组冷却至设定温度。北京地区全年约有 20%的时间可在部分自然冷却的工况下运行,可节约约 10% 的电能。

## 10 结论

(1)采用板式换热器进行自然冷却的方案节能效果明显,并联式布置年平均节能约 20%~25%,串联式布置年平均节能约 30%~35%。

(2)提高冷冻水供水温度及机房专用空调的送风温度,不仅能提高冷水机组的工作效率,且在一定的气候条件下还能显著增加自然冷却的运行时间。

(3)冷水机组、冷冻水二次泵、冷却塔风机等采用变频控制装置,可显著提高部分负荷工况下的运行效率。

(4)在保证正压的前提下,尽量减小新风量能节约较大部分能源。

(5)集中控制湿度,可避免机房专用空调竞争运行造成的能源浪费。

(6)适当加大冷却塔型号及降低板式换热器的换热温差,能延长自然冷却工况的运行时间。

## 参考文献

- [1] 章永洁,蒋建云,叶建东,等.节能环保技术在小型公共建筑中的集成应用及能耗模拟分析[J].建筑技术,2015,45(6):504-507.