

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-417-05

既有集中空调冷却水系统能效提升方法研究

彭治霖 钟辉智

(中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610042)

【摘要】 面对当前既有建筑高能耗的现状,国内外已有大量针对既有集中空调冷却水系统能效提升的研究,但大量的研究都局限在理论的层面,与系统的实际运行出现了脱节,在实际项目中应用受限。为了进一步提升既有建筑集中空调水系统运行能效,在集中空调冷却水系统多年现场测试和空调设备性能探索的基础上,针对既有公共建筑集中空调冷却水系统在设备性能诊断、设备性能优化及提升、设备优化组合运行、系统运行参数监测、能效整体优化提升等方面进行了深入理论研究,提出了一种简化、高效的能效提升方法及控制逻辑。

【关键词】 既有建筑; 诊断; 提升; 方法; 控制逻辑

中图分类号 TU24 文献标识码 A

Research on Energy Efficiency Improvement Method of Existing Central Air-conditioning Cooling Water System

Peng Zhilin Zhong Huizhi

(China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp, Chengdu, 610042)

【Abstract】 Faced with the current situation of high energy consumption of existing buildings, there have been a large number of researches on improving the energy efficiency of existing central air-conditioning cooling water systems at home and abroad, but a large number of researches are confined to the theoretical level, which is disconnected from the actual operation of the system, and their application in practical projects is limited. In order to further improve the operation energy efficiency of the existing building centralized air-conditioning cooling water system, On the basis of many years of field testing of central air-conditioning cooling water system and exploration of air-conditioning equipment performance, this paper conducts in-depth theoretical research on equipment performance diagnosis, equipment performance optimization and improvement, equipment optimization and combined operation, system operation parameter monitoring, overall optimization and improvement of energy efficiency of central air-conditioning cooling water system of existing public buildings. A simplified and efficient energy efficiency improvement method and control logic are proposed.

【Keywords】 existing building; diagnose; improve; method; control logic

0 引言

截至目前,我国建筑大部分是高能耗建筑^[1],空调系统作为公共建筑的能耗大户,占据建筑能耗的 40%~50%^[2],其中冷却水系统运行效率便是其

中重要的一环。截至目前,国内对既有建筑的冷却塔改造进行了大量的研究工作^[3,4],但与既有冷却水控制系统相关的论文较少。根据目前国内已经发表的相关专利来看,基本上该领域的方法均是根据

基金项目: 中国建筑西南设计研究院有限公司青年科技研发计划课题: 既有集中空调冷水系统能效提升方法研究 (R-2021-10-GB-Y-2022); 四川省科技计划重点研发项目: “绿色建筑运行性能提升关键技术研究” (2020YFS0060); 中建股份科技研发课题: 四型机场建设关键技术与示范 (CSCEC-2021-Z-34)

作者(通讯作者)简介: 彭治霖 (1983.11-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 845002352@qq.com

收稿日期: 2023-03-15

数学模型的建立对设备之间的耦合运行进行控制,但是实际项目中的设备运行曲线往往偏离理论模型,且模型过于复杂难以实现;本文的方法和控制逻辑基于专业基础原理、冷却水系统各设备的实际运行特性及设备之间在运行能效相互制约的本质关系,避开了基于复杂数学模型相关的研究方法所带来的众多不确定因素,使得冷却水系统在运行过程中实现节能具有实际应用的价值。具体的实施步骤如图 1 所示。

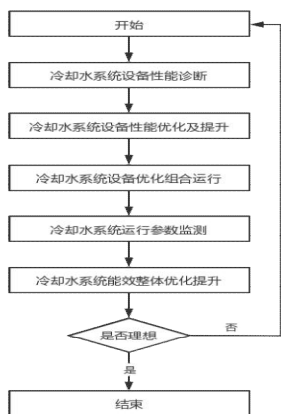


图 1 冷却水系统能效提升路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy efficiency improvement path of cooling water system

1 冷却水系统形式

既有公共建筑中央空调冷却水系统的冷水机组、冷却水泵、冷却塔有多种搭配方式,本文针对的系统具体形式如图 2 所示,为大容量冷水机组有 M 台(冷水机组的编号为 1 号大冷机~ M 号大冷机,具体数量以项目实际情况为准),小容量冷水机组有 N 台(编号为 1 号小冷机~ N 号小冷机,具体数量以项目实际情况为准)。

对应大容量冷水机组的同型号冷却水泵台数为 $M+1$ (编号为 1 号大冷却泵~ $M+1$ 号大冷却泵,设置 1 台备用泵),对应小容量冷水机组的同型号冷却水泵台数为 $N+1$ (编号为 1 号小冷却泵~ $N+1$ 号小冷却泵,设置 1 台备用泵),冷却水泵先并联再与冷水机组及冷却塔连接;冷却水泵采用该连接方式的原因在于多台同型号水泵可以实现优化组合运行,使水泵运行过程中尽量运行在高效率区间。

冷却塔之间通过并联的方式与冷却水主管进行连接,容量相同的冷却塔有 K 台(编号为 1 号冷却塔~ K 号冷却塔,具体数量以项目实际情况为准);冷却塔采用该连接方式的原因在于冷却水在流量变化过程中可以最大化的利用冷却塔的散热面积,实现高效率散热。

主要设备的开启顺序是:冷水机组及冷却塔入口电动阀门→冷却塔风机→冷却水泵→冷水机组;主要设备的关闭顺序为冷水机组→冷却水泵→冷却塔风机→冷水机组及冷却塔入口电动阀门。

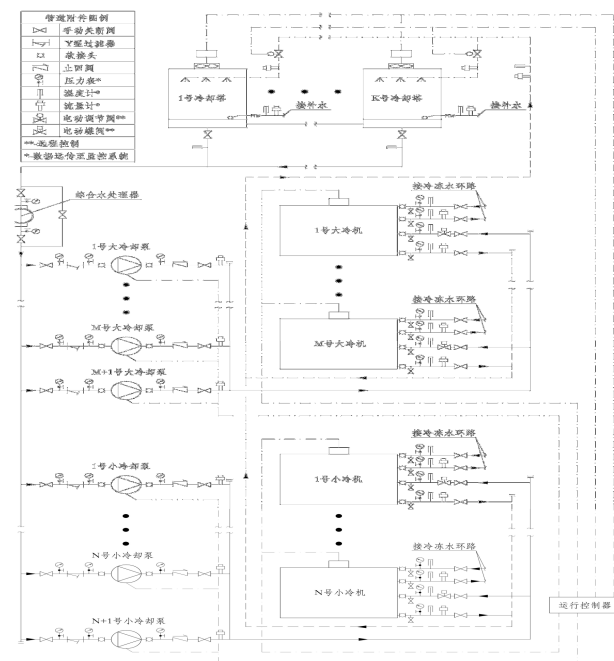


图 2 冷却水系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of cooling water system

2 冷却水系统能效诊断及提升

2.1 冷水机组能效诊断及提升

根据现场勘察冷水机组冷冻水及冷却水进出口是否有流量监测及温度监测装置,冷水机组是否有电耗监测装置;如果现场缺少或监测装置不能准确的测量和显示相关监测参数,需要更换或安装有效的测试仪器进行测试。

对于运行时间较长的冷水机组,根据监测或测试仪器获取冷却水出水温度及制冷机组冷凝温度,根据两个温度的差值判断冷水机组冷凝器侧换热盘管结垢程度,同理获取冷冻水侧结垢情况,对于结垢严重的机组进行相应的清洗工作。

对于结垢严重的机组进行相应的清洗工作后进行机组能效测试,测试工况为额定工况及部分负荷工况;对于能效系数满足国家现行标准《冷水机组能效限定值及能源效率等级》(GB19577)^[5]的能效限值要求(若是预算充足可以提高标准)的冷水机组,根据具体情况设置或更换冷却水低阻力过滤和冷凝器在线清洗设备以及冷冻水在线处理设备;对于能效系数过低的冷水机组进行更换新机组。

对于投入运行时间较短的机组,额定工况及部分负荷工况的测试性能参数严重低于厂家提供的参数时,应联合设备厂家对冷水机组进行联合优化和调适。

2.2 冷却塔能效诊断及提升

现场勘察冷却塔所有进水支管是否安装具有水流量关断的控制阀门,以便实现冷却塔分组运行的控制;现场勘察冷却塔所有进水支管是否安装具有水流量动态平衡调节的控制阀门,以便实现冷却塔分组运行时水量平衡的控制;根据实际情况,在冷却塔供水支管上增加或改造具有远程关断、流量动态平衡调节的控制阀门。

现场勘察冷却塔布水孔和出水支管上的过滤器是否有堵塞情况,布水槽、集水盘、填料等是否需要清洗;对需要清洗的冷却水系统进行清洗。

现场勘察和通过水流量调节验证冷却塔所有布水器的布水功能是否正常;对布水器均匀布水有问题的冷却塔进行优化整改,并达到最低均匀布水流量不超过30%额定流量(目前该技术可以达到,后期可以根据市场产品的水平进行调整)。

现场勘察并通过测试冷却塔进风口含湿量、室外空气含湿量,确定冷却塔是否有进排风短路情况;对冷却塔进排风有短路情况进行优化提升。

现场勘察冷却塔塔体及室外冷却水管道是否大面积暴露在日照下;在不影响冷却塔的通风效果的基础上对冷却塔的塔体设置有效的遮阳措施。

测试冷却塔风机效率,并将测试结果与国家现行《通风机能效限定值及能效等级》GB19761^[6]中能效限定值(若是预算充足可以提高标准)进行对比;更换效率不满足现行规范要求的冷却塔风机。

对所有冷却塔额定工况的换热效率、风水比、湿球温度逼近度进行测试,并与厂家提供的参数进行对标或与国际、国内现行相关标准进行比较;根据情况更换不满足要求的风机、填料等。

现场勘察冷却塔排风机是否具有无极变频控制功能;冷却塔风机需要设置高效无极变频装置。

2.3 冷却水泵能效诊断及提升

根据现场勘察冷却水泵进出口是否有流量监测及压力监测装置,冷却水泵是否有电耗监测装置;如果现场缺少或监测装置不能准确的测量和显示相关监测参数,需要更换或安装有效的测试仪器进行测试。

水泵性能参数的测试需要逐个水泵单机进行测试,通过性能测试获取冷却水泵的流量 $L(\text{m}^3/\text{h})$ 、扬程 $H(\text{m})$ 、电耗 $W(\text{kW})$ (电耗包括变频器上下游的电功率),并将测试结果整理成流量、扬程及效率曲线;当冷却水泵为变频泵时,需要将水泵不同频率下的流量、扬程、电耗参数进行测试,并将测试结果整理成流量、扬程及效率曲线族。

根据获取的冷却水泵额定效率与《清水离心泵能效限定值及节能评价》GB 19762^[7]中泵能效限定值(若是预算充足可以提高标准)进行对比;对于不满足规范中能效限定值的水泵进行更换。

检查是否所有冷却水泵均设置有变频装置,对于未安装变频装置的冷却水泵增加高效变频装置,保证冷却水泵可以实现无极变流量控制;装有变频器的水泵需要测试变频器在不同频率下的效率,用以判断变频器是否满足高效运行要求,更换或提升低效率的变频装置,保证变频装置高效。

3 冷却水系统设备优化组合运行

3.1 冷水机组组合运行策略

根据每台冷水机组历史运行数据(机组能效COP值),将其分解成外部效率 $ICOP$ (蒸发温度与冷凝温度对应的逆卡诺循环制冷系数)、内部效率 $DCOP$ ($DCOP=COP/ICOP$, $DCOP$ 与机组的构造等相关,反映冷水机组内部的效率)^[8],将 $DCOP$ 与机组负载率 PLR 拟合成曲线,根据不同的负荷组合运行内部效率高的冷水机组。

当缺少历史运行数据,且不能获取各台冷水机组 $DCOP$ 与 PLR 的拟合曲线时,根据选型参数组合运行负荷率和效率高的冷水机组。

3.2 冷却塔组合运行策略

当冷却水总流量大于所有冷却塔最低均匀布水流量的总和时,开启所有冷却塔。

当冷却水总流量 $L(\text{m}^3/\text{h})$ 不能保证所有冷却

塔最低布水量（单台冷却塔流量为 I (m^3/h)，单塔均匀布水流量下限为 $0.3I$) 要求时，减少相应冷却塔开启的台数；满足所有冷却塔均维持均匀布水要求的冷却水总流量 L 与冷却塔开启数量的关系如图 3 所示。

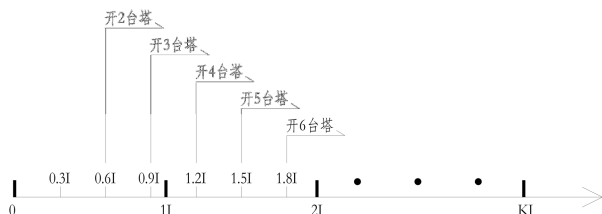


图 3 冷却水总流量 L 与冷却塔开启数量关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of the relationship between the total flow of cooling water L and the opening number of cooling tower

3.3 冷却水泵组合运行策略

运行冷水机组所对应设置的并联冷却水泵。

冷却水泵组合运行总流量的上限对应开启冷水机组总流量的上限 L_{max} (m^3/h)，冷却水泵总流量的下限取对应开启的冷水机组冷却水总流量下限 L_{min} (m^3/h)。

不同流量段效率最高的冷却水泵运行组合的确定：冷却水系统试运行，不同组合冷水机组冷却水环路打开（通水不通电），组合运行的冷却水泵流量不低于冷水机组冷却水流量下限值 L_{min} 以确定冷却水泵下限运行台数 x_1 及下限运行频率 y_1 (Hz，因冷水机组不同组合运行各异)，不超过冷水机组冷却水流量上限值 L_{max} 以确定冷却水泵上限运行台数 x_2 、上限运行频率 y_2 (Hz，因冷水机组不同组合运行各异) 以及初始冷却水流量 L (m^3/h ，取对应开启的冷水机组最大允许流量和对应运行泵组最大流量的小值)；冷却塔开启台数满足最低均匀布水要求，根据冷却水流量范围确定不同冷却水流量范围内冷却塔能够保证最小均匀布水流量的开启台数；根据以上原则获取不同冷水机组及冷却塔组合运行时，不同流量段效率最高的冷却水泵运行组合。

4 冷却水系统运行参数监测

4.1 冷水机组运行参数监测

监测参数包括：冷水机组冷却水（冷冻水）进出口温度及水流量、冷水机组有功功率、冷水机组

负载率、冷水机组冷却水进出口压力值、冷水机组冷凝温度。

通过监测参数计算冷水机组的实时 COP 、 $ICOP$ 、 $DCOP$ 。

以上数据需要具备数据传输功能，并在监控平台上进行显示。

4.2 冷却塔运行参数监测

监测参数包括：室外空气干球及湿球温度、冷却塔主干管及进水支管实时流量、冷却塔进水干管温度、冷却塔出水支管温度、冷却水补水管实时流量及温度、冷却塔进出风空气焓值、冷却塔风机有功功率、冷却塔风机运行频率。

通过监测参数计算各台冷却塔换热效率、风水比、冷却水出水温度与室外湿球温度的逼近度。

以上数据需要具备数据传输功能，并在监控平台上进行显示。

4.3 冷却水泵运行参数监测

监测参数包括：水泵流量、扬程、水泵变频器上下游的有功功率、水泵频率。

通过监测参数计算单台水泵实时总效率、变频器效率。

以上数据需要具备数据传输功能，并在监控平台上进行显示。

5 冷却水系统能效整体优化提升

5.1 冷却水系统能效整体优化提升的方法

冷水机组的运行能耗随冷凝温度（冷凝器出口冷却水温度）的降低而降低；在特定工况下，冷水机组的能耗整体呈现随冷水机组出口冷却水温度升高而单调递增的关系；要降低冷凝器出口冷却水温度就需要冷却水泵组合运行水流量在冷水机组冷却水流量限值范围内尽可能的大，冷却塔出水温度尽可能的低。

根据 3.3 节，冷却水泵组合运行的总能耗在不同的冷却水流量段内随冷却水流量的降低而单调递减，而冷水机组冷凝器出口水温及能耗随冷却水流量的降低而单调递增。

冷却塔在满足均匀布水前提下，出水温度在一定的水流量和室外的湿球温度下随冷却塔运行风量的降低（风水比降低）而呈现单调递增的趋势，同时冷却塔的能耗（冷却塔风机电耗）将随冷却风量的降低而单调递减。

有效整合冷水机组、冷却水泵、冷却塔优化组合运行及能效相关影响的关系,可以从根本上简化冷却水系统的控制逻辑,使得既有冷却水系统能效提升方法及应用具有可实施性,使冷水机组、冷却水泵、冷却塔在冷却水系统上做到运行能耗综合最低。

5.2 冷却水系统能效整体优化提升的控制逻辑

冷却水系统能效整体优化的控制逻辑如图4所示,具体的控制原理及步骤如下:

(1) 开启预设的冷水机组入口电动阀门、冷却塔入口电动阀门、预定冷却水泵。

(2) 预定冷却水泵运行至冷却水总流量初始值 L (m^3/h)。

(3) 根据冷却水总流量初始值 L 与冷却塔最低均匀布水流量的关系调整冷却塔的开启数量 X 台;设冷却塔总数量为 K 台,单台冷却塔流量为 I (m^3/h),单台冷却塔最低均匀布水流量为 $0.3I$ 。

冷却塔开启数量 X 与冷却水总流量 L 的关系为:当 $L > K * 0.3I$ 时,开启所有冷却塔;当 $X * 0.3I < L \leq (X+1) * 0.3I$ 时,开启 X 台冷却塔(即 $L >$ 冷水机组总水量下限值 $L_{\min}$ 的前提下, $1 * 0.3I < L \leq 2 * 0.3I$ 时,开启 1 台冷却塔; $2 * 0.3I < L \leq 3 * 0.3I$ 时,开启 2 台冷却塔…… $(K-1) * 0.3I < L \leq K * 0.3I$ 时,开启 $K-1$ 台冷却塔;当 $L > K * 0.3I$ 时,开启 K 台冷却塔)。

(4) 开启对应冷水机组。

(5) 冷却水泵逐步降频,冷却水泵并联模块+冷水机组的总电耗 $W01$ (kW) 达到谷值 $W0$ (kW) 时,冷却水泵停止降频。

若冷却水泵并联模块+冷水机组的总电耗 $W01$ 达到谷值 $W0$ 前,冷却水泵并联模块降频至冷却水总流量 L 与冷却塔最低均匀布水流量的关系到达临界状态,记录冷水机组+冷却水泵并联模块+冷却塔的综合电耗 $W1$ (kW);减少 1 台冷却塔,并记录冷却塔开启数量为 $(X-1)$ 时,冷水机组+冷却水泵并联模块+冷却塔的综合电耗 $W2$ (kW)。例如初始 $3 * 0.3I < L \leq 4 * 0.3I$,本轮开启 3 台冷却塔,随着冷却水泵逐步降频且冷却水泵并联模块+冷水机组的总电耗 $W01$ 未达到谷值,记录 $W1$;当冷却水总流量降至 $L = 3 * 0.3I$,则将冷却塔开启数量调整为 2 台,并记录冷却塔开启数量为 2 时,冷水机组+冷却水泵并联模块+冷却塔的综合电耗 $W2$ 。

(6) 若 $W1 < W2$,选择冷却塔开启数量仍为 X ;

否则冷却塔开启数量为 $(X-1)$,返回步骤 5。

(7) 冷却水泵停止降频,冷却塔逐步降频,冷水机组+冷却水泵并联模块+冷却塔的综合电耗 $W1$ 达到谷值 W 时,冷却塔停止降频。

(8) 冷却塔停止降频,系统达到最优工作点(能耗最低)。

(9) 冷水机组总供冷量变化值 ΔQ 超过 10% 时,返回步骤 1。

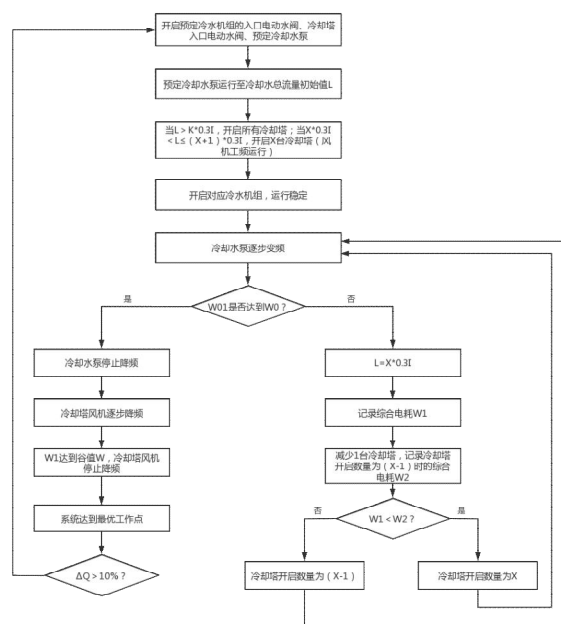


图4 冷却水系统能效整体优化提升的控制逻辑示意图

Fig.4 Schematic diagram of control logic for overall optimization and improvement of energy efficiency of cooling water system

6 结论

(1) 冷却水系统高效运行的基础条件是要保证各个设备的运行高效;设备运行能效过低时,即便匹配优秀的控制系统也无法实现整个空调系统的高效运行,设备的运行高效是整个空调系统高效运行的第一基础条件。

(2) 冷却水系统的高效运行离不开设备优化组合运行;优化设备优化组合运行可以根据负荷需求以及各个设备的性能特性启动运行高效的设备,是实现整个空调系统高效运行的第二基础条件。

(3) 对各个设备的运行参数进行实时监测是保证冷却水系统的各个设备及系统长期高效运行必不可少的环节;对设备运行参数(下转第443页)