

工业冷却水系统自动化节能改造设计

赵金鑫

(杭州中美华东制药江东有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:某企业的冷却水系统通过后台人为操控,经常出现能耗浪费。该文在分析冷却塔的冷却极限和水泵的节能措施后,将冷却塔负荷率控制在 50% 并参考湿球温度启停,水泵采取同步变频,并把旁通阀执行机构更换成调节型来避免冬季低温时水泵大流量现象的发生。恒压供水和恒流控制的 PID 调校参数通过 Lambda 算法设定。在不影响系统的前提下完成,该改造可实现 0 操作运行,经连续 7 个月的稳定运行,电耗同比降低 43 716 kWh。

关键词:冷却水系统;工业自动化;节能改造;PID

中图分类号:TP29

文章编号:1000-0682(2024)06-0093-04

文献标识码:B

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.017

Automated energy-saving reconstruction design of industrial cooling water system

ZHAO Jinxin

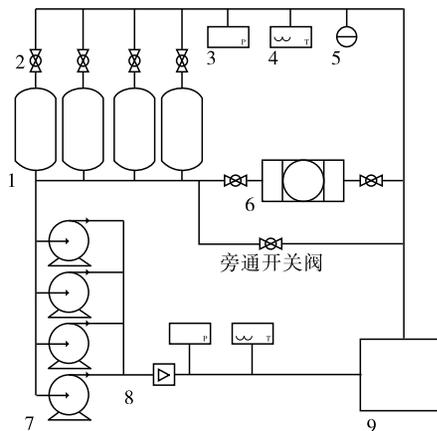
(Hangzhou Sino-American Huadong Pharmaceutical Jiangdong Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310000, China)

Abstract:The cooling water system of a certain enterprise is often subject to energy waste due to manual control in the background. By analyzing the cooling limits of cooling towers and energy-saving measures for water pumps, the load rate of the cooling tower is controlled at 50%, and the start and stop of the motor are judged in combination with the wet bulb temperature. The water pump adopts synchronous frequency, the bypass valve actuator is replaced with a regulating type to avoid the occurrence of high flow at low temperatures in winter. The PID tuning parameters of constant pressure water supply and constant flow control is set by Lambda algorithm. Under the premise of not affecting the system, this renovation can achieve zero operation, after 7 months of stable operation, power consumption was 43,716 kWh lower than the same period last year.

Keywords:cooling water system; industrial automation; energy-saving reconstruction; PID

0 引言

公司现有一独立的冷却系统供 8 台水冷氟盘管直膨机组。冷却系统管路示意如图 1 所示,冷却塔、水泵及电动开关阀从 2 个位于不同母线段的 XL-21 型动力柜均摊配电。冷却塔由 4 台配置 7.5 kW 定频风机的同系列冷却塔合方式组装而成,总处理水量 1000 m³/h,铭牌冷却极限为湿球温度 +3 ℃。水泵为 4 台单极单吸水泵,配变频电机搭载变频器,单台水泵流量 250 m³/h、扬程 32 m,电机功率 37 kW,水泵效率 79%,变频器端最低频率限制在 30 Hz。



1-冷却塔; 2-电动开关阀; 3-压力传感器; 4-温度传感器; 5-电导率传感器; 6-高效过滤器; 7-水泵; 8-电磁流量计; 9-水冷氟盘管直膨机组(8台)

收稿日期:2024-05-06

第一作者:赵金鑫(1994—),男,浙江杭州人,工程师,研究方向为流体工程自动化节能应用。

图 1 冷却系统管路示意图

该系统连入 DCS 系统控制,水温控制在 32 ℃

以下,供水压力限定在 0.16 MPa,并允许有 0.03 MPa 的偏差。高效过滤器会根据电导率自动启用,冷却塔和冷却水泵的启停由后台操作人员控制,一般在系统报警后操作。运行过程中经常会出现以下能耗浪费现象:

(1) 冷却塔运行一段时间后水温已经长时间处在恒定温度不再下降,机组达到冷却极限但是仍然保持运转;

(2) 多水泵运行时常异步变频,当泵之间频率差在 5 Hz 及以上时,运行频率最低的泵出水量远小于其他水泵;

(3) 到了冬季,水冷机组冷量需求减少,机组会打开其内部旁通减少流过机组的冷量,此时水泵单台运行,频率在 35 ~ 40 Hz 之间,但是水流量接近甚至超过铭牌流量,水泵无用功较多。

综上所述,目前的运行方式节能效果受操作人员的影响很大,而且 DCS 系统仅仅起到了监视和数据记录的作用,对生产效率的提升作用较小,因此,需要提出一种改造方案解决现有能耗浪费问题,同时提升 DCS 系统的价值。

1 冷却塔运行方案

空气中的湿球温度对冷却塔的冷却极限的影响最大,冷却塔冷却极限不可能低于湿球温度且呈线性关系。湿球温度可以根据干球温度和湿度使用马格努斯(Magnus)算法经 Goff - Gratch 公式修正后的公式(1) ~ (3)得到:

$$e_w = 6.10695 e^{\frac{7.592717 \times \ln 10}{240.72709 + T}} \quad (1)$$

$$i = \frac{1.01T + 0.001 \times (2501 + 1.84T) \times 622 \times RH \times e_w}{101325 - RH \times e_w} \quad (2)$$

$$I = \frac{1.01T_w + 0.001 \times (2501 + 1.84T_w) \times 622 \times e_w}{101325 - e_w} \quad (3)$$

式中: e_w 为饱和水汽压(Pa); T 为干球温度($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气湿度,范围 0 ~ 1; i 为干空气焓值(kJ/kg); I 为湿空气焓值(kJ/kg),其值等于干空气焓值; T_w 为湿球温度($^{\circ}\text{C}$)。

根据获取的干球温度和湿度计算得到干空气焓值。湿球温度以 15 $^{\circ}\text{C}$ 为基准计算得到湿空气焓值后与干空气焓值对比,如果偏差大于 2% 湿球温度减小 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 后继续计算比较,反之亦然,直到偏差在 2% 以内。湿球温度范围限制在 0 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$,比较次数限制在 150 次。该方式得到的湿球温度精度在 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 内,能满足基本要求。

气象数据在短时间内不会有太大变化,实际应用时每 10 分钟采集一次气象站数据,若采集成功则计算湿球温度,以降低 CPU 负荷。

对于冷水机组,冷却塔运行数量配套运行其 1.4 ~ 2.0 倍配置可使得冷水机组和冷却塔运行总电耗最低^[2]。但是当前系统冷水机组与冷却塔已经按照 2:1 数量配置,冷却塔处理流量与水泵运行流量对应,已经无法按其方式调整,该文献建议实际上是将冷却塔负荷率控制在 50% ~ 70%,而龚思越等以广州某商业项目为基础验证了其工况下冷却塔负荷率在 50% ~ 80% 区间节能率相对较高^[3]。对于当前设备测试了 6 组工况,在机组负荷率为 50% 及靠右时,冷却同热量的水所需的单位电耗优于 80% 及 100% 负荷,当水温接近冷却塔冷却极限时,所需电耗也会相应增加。

表 1 冷却塔数量对冷却效果的工况测试

序号	冷却塔 启用数量	流量控制 /(m^3/h)	风机启用期间平 均湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$	起始水温 / $^{\circ}\text{C}$	终末水温 / $^{\circ}\text{C}$	冷却用时	理论电耗 /kWh
1	1	250	21.5	29.7	26.7	44 min17 s	5.54
2	2	250	21.6	29.7	26.7	20 min43 s	5.18
3	3	250	21.3	29.7	26.7	14 min06 s	5.29
4	2	250	21.6	26.7	25.7	8 min55 s	2.23
5	2	400	21.7	28.8	25.8	33 min31 s	8.38
6	3	400	21.6	28.8	25.8	21 min57 s	8.23

对于末端设备,冷却水温要求为 12 ~ 32 $^{\circ}\text{C}$,过高或过低都会使得设备保护跳机,而杭州地区环境湿球温度范围为 0 ~ 28.5 $^{\circ}\text{C}$,故冷却塔在寒冷季节只需酌情开启。结合实际工况和冷却塔的冷却极限,同时考虑计算的湿球温度精度影响,得到以下冷

却塔控制判断流程,在湿球温度计算完成后同步执行:

(1) 出水温度在 12 ~ 20 $^{\circ}\text{C}$ 时且湿球温度低于 12 $^{\circ}\text{C}$ 关闭所有布水阀并开启冷却水旁通;

(2) 出水水温在 12 ~ 20 $^{\circ}\text{C}$ 时且湿球温度高于

12℃时打开所有布水；

(3) 水温在 20℃ 以上, 与湿球温度温在 4℃ 以内时根据流量按 50% 负荷率开启等量的冷却塔布水, 与湿球温度温差在 4℃ 以上时开启相应风机。

上述判断方式可以保证冷却水处在较低温度。冷却塔风机启停选择参考设备累计运行时长和设备工作状态, 对设备启动顺序编码后判断下一个需要启停的设备。下达实际硬接点控制指令前再与设备实际工作状态做一次比较避免触点做无用功, 延长中间继电器的使用寿命。

2 水泵运行方案

根据用水流量改为“变频大泵 + 定频小泵”的方式相比于全变频能降低约 6.33% 能耗^[4], 但是定变结合变频运行模式随着流量的减小, 节能率会低于同步变频和异步变频^[5], 而当前系统时常会出在最小流量状态, 定变结合并不适合。

变频水泵并联运行可以有异步变频和同步变频两种模式, 同步变频全年工况相比于异步变频能节约 11.6% 的电费^[6], 且能保证每台水泵的出口流量相当^[7], 可以避免憋泵。结合当前系统并考虑扬程的影响, 将频率最小值限制在 35 Hz, 同步变频调节。

水泵启停选择算法和冷却塔相似, 供水压力设置为 0.16 MPa 并通过 PID 控制, 结合 0.16 ± 0.3 MPa 的工况设备启动数量按下列规则执行:

(1) 给定 48 Hz 且供水压力 < 0.16 MPa 持续 10 分钟或供水压力小于 0.14 MPa, 设备启动数量增加 1 台;

(2) 给定低于 36 Hz 且供水压力 > 0.16 MPa 持续 10 分钟或供水压力 > 0.18 MPa, 设备启动数量减少 1 台;

(3) 设备启动数量最小为 1;

(4) 设备启动数量变化时设备启停选择算法立即执行。

在冬季, 冷却塔处在运行方案的判断流程 1 中, 冷却水通过旁通循环, 随着气温的进一步降低, 机组内部旁通会被打开, 此时水泵会在最低频率运行, 水流量在 $220 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右。

水泵的高效区间一般指水泵铭牌效率 90% 以上的区域, 高效区间流量会随着频率的降低而变窄, 流量应控制在泵设计最高效流量附近。当前应用水泵工频运行的性能曲线如图 2 所示, 最高效流量在 $225 \text{ m}^3/\text{h}$ 附近, 35 Hz 运行时最高效流量应出现在

$157.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右, 但是低温环境下因机组内部旁通阀的开启工况流量明显偏右, 如果将流量控制在 $157.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 偏左, 轴功率会明显降低, 而供水压力上涨不超过 20%。实验时将水流量控制在 $155 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右时, 变频器电流可以降低 4 A 左右, 供水压力维持在 0.18 MPa 左右, 经过 24 h 实验该运行流量未对水冷氟盘管直膨机组造成任何影响。

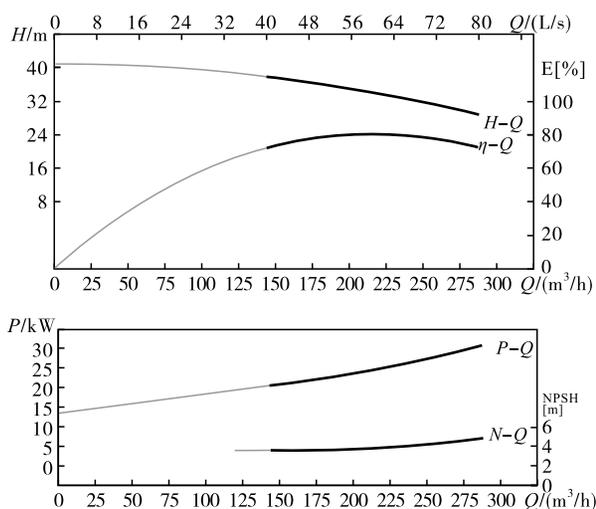


图 2 应用水泵工频性能曲线

电动开关阀操控需要人为不定时介入操作, 为了操作人员控制将该旁通阀的电动执行机构由开关型改为调节型并根据流量 PID 调节, 目标流量设置为 $155 \text{ m}^3/\text{h}$, 调节阀开关到时长采用 60 s 类型避免快速介入对系统产生较大影响, 为避免管道关闭, 调节阀机械限位与 PID 调节日限定值均限制在 40% ~ 100%。电动调节阀不允许频繁使用, 因此对于给定信号还有一定时间间隔限制, 本次应用的调节型电动执行机构每小时动作次数为 1200 次, 通过多次测试每 10 s 下达给定值稳定性最好。

恒压供水和调节阀控制工业上常采用 PID 控制, 目前主流的 PID 整定方式可概括为专家整定、通过预测的模型整定、根据模型整定三大类。专家整定受经验影响较大, 可靠性不高。灰狼算法^[8]、秃鹰算法^[9]等优化算法几乎都是以一定范围的随机数建模比对, 根据算法流程进行多次迭代验算得到最优整定值, 需要大量的运算, 对算力要求较高, 更适合应用在 APC 系统上; 模糊算法通过趋势建立模糊整定表, 每次都需要经过至少 49 次比较来纠正原整定参数^[10], 算法量虽然低于优化算法但是仍旧不适合 DCS。因此在整定上优先采取模型整定法。上述 2 类 PID 工况都属于典型的自衡对象且非超快速的系统, 因此采取已经在流体工业有一定应用先例

的 Lambda 算法对系统整定^[11-12]。该算法指出在控制器增加 10% 给定后建模,PI 控制器整定参数由下列公式确定:

$$K_c = \frac{T}{K(\lambda + \tau)} \tag{4}$$

$$T_i = T \tag{5}$$

式中: K_c 为标准 PID 的比例系数; T_i 为标准 PID 的积分时间; T 为反馈响应至变化幅度的 63.2% 时所需时间; $K = (\text{反馈变化量占表计量程的比例}) / (\text{控制器给定比例})$; τ 为反馈响应延时; λ 为整定控制变量。

对于恒压供水要求其有较好的鲁棒性,且相对波动不大,采取 PI 控制器, $\lambda = 3\tau$ 。

对于调节阀,由于调节间隔时间较长,而水流量会在阀体开度到一定程度时突然变化,需要对控制量在稳态附近时有一定抑制,采取 PID 控制器, $\lambda = \tau$,同时设置 $T_d = T/4$ 。

3 总结

系统在 23 年 9 月完成改造并试运行,经过连续 7 个月的监测,在该运行方式下电耗同比减少 43 716 kWh,且无系统振荡情况发生。

水泵作为暖通系统中能耗的主要部分之一,在设计阶段除了满足《工业建筑节能设计统一标准》外还应该考虑具体工况去优化,针对冷却水泵根据经验总结了以下几条选型建议并已在新建项目中开展实施:

(1) 多联式空调机组冷却水选择全变频,并配备一用一备小用量辅机,在低温天气下使用辅机运行;

(2) 冷水机组及热泵机组冷却水的使用量相对稳定,若安装位充足优先采用变频大泵和定频小泵

组合;

(3) 冷却水终端设备为空压机组等散热量恒定设备时,冷却水旁路考虑增加水源蒸汽热泵加强对余热的利用,该设备设置在在谷电时段启用。

参考文献:

[1] 赵金鑫. 露点和湿球温度计算在工业领域的应用方法研究[J]. 机电信息, 2022, 22(5): 83 - 85.

[2] 杨玉鹏, 杨玲, 陈卓, 等. 公共建筑冷却塔台数调节节能运行分析[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(7): 91 - 94.

[3] 龚思越, 郭勇, 江宋标. 冷却水变流量节能分析与计算探讨[J]. 制冷, 2023, 42(04): 3 - 7.

[4] 王彤, 朱多林, 周晓, 等. 二次供水并联泵组节能优化研究[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 125 - 131.

[5] 邵光明, 缪小平, 彭福胜. 并联变频水泵调速特性试验研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(11): 120 - 125.

[6] 赵倩, 林建泉, 黄忠, 等. 工业循环冷却水变频恒压供水系统水泵并联运行策略研究[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(02): 157 - 161 + 168.

[7] 胡明, 侯书亮, 刘玲. 并联循环冷却水泵的参数选择与系统设置[C]//中国建筑学会建筑给水排水研究分会第四届第一次全体会员大会暨学术交流会论文集. 2022, 651 - 660.

[8] 陈涵. 基于灰狼算法的水轮机调速器参数优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

[9] 任宇希. 车用永磁同步电机 MTPA 控制优化策略研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.

[10] 王鹏程. 基于模糊 PID 控制的双级射流在线混药系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.

[11] 冯少辉, 袁海雷. 基于 Lambda 方法的自衡对象 PID 整定研究[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(4): 31 - 34.

[12] 臧春华, 张帅杰, 苏宝玉. 流程工业最优 PID 参数整定[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(06): 95 - 100.

(上接第 62 页)

[18] REZAM, RAHMAN HA. Non - invasive voltage measurement technique for low voltage AC line[C]. 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Cheng - du, China. IEEE, 2021: 143 - 148.

[19] MARTINSAV, BACURAU RM, DOS SANTOSAD, et

al. Non intrusive energy melter for nontechnical losses identification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 2020, 69(4): 1140 - 1147.

[20] 周文斌, 李红斌, 蒋紫娟, 等. 基于标准电能表高频脉冲的数字化电能表快速校验方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 125 - 131.