

制冷机组冷却水系统运行工况分析及优化

汪华聪 董正映

云南红塔烟草（集团）有限责任公司昭通卷烟厂 云南 昭通 657000

【摘要】：制冷机组冷却水的温度、流量影响制冷机组的运行效率，而制冷机组冷却水系统运行工况决定冷却水的温度、流量。本文对制冷机冷却水系统的运行工况进行分析，找出存在的问题，提出优化措施，在提高制冷机组冷却水系统运行稳定性的同时也降低了能耗。

【关键词】：管路特性；扬程；优化；变流量供应；冷却塔分组

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.075

引言

如制冷机工作原理所述，进入制冷机冷凝器的冷却水水温须在一定的范围内，同时冷却水也须具有一定压力、流量才能保证冷凝器的压力、温度在可控范围内。一般制冷机冷却水进出口压力范围在 0.3MPa 至 0.5MPa 之间。水冷式制冷机组的冷却水由冷却水系统提供，对于水冷式制冷机组来说冷却水系统是必要辅助设施，冷却水系统供给的冷却水的水温、水压、流量关系到制冷机是否能正常运转，因此分析研究冷却水系统的工况非常必要。制冷机冷却水系统主要由冷却水循环泵、冷却塔、管道、电控系统组成。冷却水系统的关键主要设备是冷却水循环泵、冷却塔，可以说冷却水泵、冷却塔的运行工况代表了制冷机冷却水系统的工况，本文重点对冷却水泵、冷却塔的运行工况进行分析，提出优化措施，目的是提高冷却水系统供给冷却水的品质，降低能耗。

1 冷却水泵运行工况分析

制冷机组运行时是否根据制冷机组对冷却水量需求不一致而搭配不同运行冷却水泵的组数。实际运行冷却水泵组的情况是：板式换热器运行时开启 3 台水泵运行，500 冷吨变频电制冷机运行时开启 3 台水泵，740 冷吨制冷机运行也开启 3 台水泵运行。动力制冷系统有 5 台格兰富水泵，技术参数： $Q=350\text{m}^3/\text{h}$ ， $H=35\text{m}$ ， $N=45\text{kw}$ ，1450rpm。如根据制冷机组对冷却水量的需求来开启运行水泵，理论上运行板式换热器时开启 1 台水泵，运行 500 冷吨变频电制冷机时开启 1 台水泵，运行 740 冷吨制冷机组时开启 2 台水泵。为什么会存在理论分析与实际操作不一致的情况，以运行 500 冷吨制冷机，分别进行了单泵，双泵，及三泵的运行情况测试记录，并根据运行电流对水泵出口阀门进行人为调节以采集相关数据（电流及温升）。

1.1 单泵运行状况

由于该型号水泵已停产，厂家无法提供原始运行曲线，但根据现场运行情况，可以判定主要故障原因为设备选型时，流量偏小（原设备为 $350\text{m}^3/\text{h}$ ），扬程偏高（原设备为 35m）。所配置管道口径偏大，实际运行水泵流量大，扬程低。导致水泵启动后流量跑位严重。且水泵选型工况点靠工作曲线末端，

电机安全余量偏小，从而导致设备运行不正常。详见下图

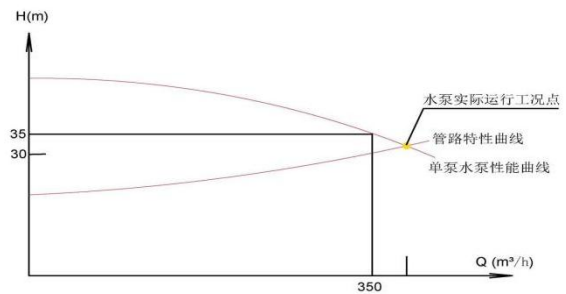


图 1 单泵运行管路特性图

实际运行电流值远超额定电流，可推断出存在较为严重的过载现象，单泵运行时，管道流量小，管道阻力较低，导致水泵实际运行流量增大，扬程降低，实际工况点与设计工况点偏离较大，甚至超出正常工作曲线外，实际功率超出电机额定功率，导致电机温升异常。通过水泵出口阀门调节，单泵可正常运行，但是调节阀后，多泵运行会出现水泵流量偏小的情况。

1.2 双泵运行状况

双泵运行时，实际运行电流值仍超额定值，仍存在过载现象。两台泵并联运行，流量增加，管路阻力增大，再通过现场关闭水泵出口阀门，人为调节管道系统阻力的方式，使得单泵的运行点位上移（2 台泵并联运行单泵流量减小，扬程增大），可将水泵实际运行工况点调整至正常工作曲线范围内，并进行了 6 个小时不间断运行测试，期间双泵运行稳定，且电机温升正常。

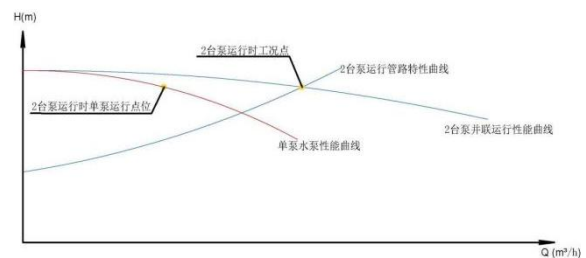


图 2 双泵运行管路特性图

1.3 三泵运行状况

三泵运行时，实际运行电流值低于额定电流，不存在过载

现象,但是存在欠载现象,人为调节管道系统阻力的方式,无法将水泵实际运行工况点调整至正常工作曲线范围内,且水泵运行噪音较大,确定为水泵欠流导致(循环管道内水量不足)。

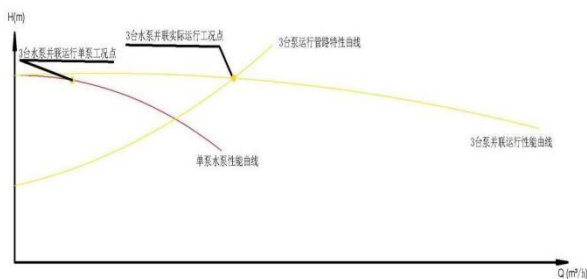


图3 三泵运行管路特性图

2 冷却塔运行工况分析

现有制冷机冷却水系统包含7个冷却塔,每个冷却塔处理量为200m³,管路走向由南向北。制冷设备运行时,不管开1台制冷机组还是两台制冷机组所有冷却塔的进水闸阀全部打开,所有冷却塔都进水换热。单台冷却水泵流量350m³/h,正常情况下开2~3台水泵,水流量为700~1050m³,单台冷却塔的水处理量为200m³/h,运行3~5台冷却塔就可满足生产,目前冷却塔运行数量为7台,现场查看靠北面的3台冷却塔出水流量很小,且风扇在运行造成能源浪费,且冷却塔容易滋生藻类堵塞管道。

3 冷却水泵运行优化措施

3.1 冷却水泵扬程分析

现场为开式冷却塔循环系统,在冷却水泵的开式系统中,水泵扬程的计算方法与其他类型的水泵相同,可以使用以下公式计算:

$$H=(P_2-P_1)/\rho g+H_s$$

其中,H代表水泵的扬程,单位是米;P₂是水的出口压力,单位是帕(Pa);P₁是水的进口压力,单位是帕(Pa);ρ是水的密度,单位是千克/立方米;q是重力加速度,单位是米/秒²;H_s是管道系统的阻力。根据系统管路特性,循环管路补满水后,回水与出水端压力值相等,即循环泵进、出水口静压值相同,即P₂与P₁时相同的,循环泵仅需满足循环管路压损,并能够将冷却水泵送至冷却塔顶部进水管。

水泵扬程H=H_s=管道沿程阻力+管路局部阻力+冷凝器侧的阻力+冷却塔中水的提升高度+冷却塔布水器喷头的喷雾压力+回水过滤器阻力。

制冷机冷凝器阻力一般为5至7mH₂O,取7mH₂O;管道沿程阻力加管路局部阻力一般为5至8mH₂O,管道总长度约为60米,不算太长,取6mH₂O;冷却塔提升高度一般为2至3mH₂O,取3mH₂O;冷却塔布水器喷头压力一般为2至3mH₂O,取3mH₂O;回水过滤器阻力一般为3至5mH₂O,

取3mH₂O,全部扬程22mH₂O,取1.15安全系数等于25mH₂O。

实际选型使用的水泵扬程为35米,水泵扬程超过估算扬程40%,一般超过20%最为合适。水泵扬程过高时,水泵需克服更大阻力,导致电机长时间超负荷运行,电流增大,引发过热甚至烧毁,另外超出实际需求的扬程会消耗更多电能,运行成本增加。单泵运行的实际工况也是运行电流值远超额定电流,存在较为严重的过载现象。

3.2 冷却水泵流量分析

板式换热器流量计算:板式换热规格型号M15-BFG,管道为DN150,根据开始系统经验值流速取值1.5-2.0m/s,在这里取值为2.0m/s,根据公式计算管道为通径为150mm管道流量:

$$Q=V \cdot S=2 \cdot 3.14 \cdot (0.15/2)^2 \cdot 3600=127.17 \text{ m}^3/\text{h}$$

500冷吨变频制冷机组冷凝器要求冷却水的流量是98.2l/s,换算后为353.5m³/h;740冷吨变频制冷机组冷凝器要求冷却水的流量是130l/s,换算后为468m³/h。根据各制冷设备的冷却水需求量,结合冷却水泵的流量350m³/h,理论上运行板式换热开启1台冷却水泵,运行500冷吨制冷机组开启1台冷却水泵,运行740冷吨制冷机组开启2台冷却水泵就能满足运行需要,而实际情况是无论开500冷吨制冷机组,还是740冷吨制冷机组皆需要开启3台冷却水泵。

3.3 水泵运行问题优化措施

3.3.1 阀门调节

单泵及双泵运行情况下,都可以通过阀门调节来实现工况点的调整,但是管路阻力曲线是不断变化,且现场启、停泵的设备位号也是交替轮换的,所以该方案可以作为临时性应急方案使用,但是长期使用操作上具有一定难度。

3.3.2 水泵选型更换

根据现场的开式冷却塔安装位置,在用水泵的运行情况,并结合在不同工况下空调主机的冷却水量需求,更换新的水泵,重新设定水泵选型参数如下,已考虑长期运行后水泵的性能下降,性能余量≥10%。

设计工况点一:流量Q=400m³/h,扬程H=30m;

设计工况点二:流量Q=450m³/h,扬程H=28m;

轴功率≤45kw,配套电机功率55kw;

冬季板式换热器单独运行时对流量需求小,可以通过阀门调节来实现工况点的调整,水泵流量减少后,电机电流降低,电机不过载。因此冷却水泵组的更换方案是,更换1至3号水泵为新型号水泵,4至5号水泵保留。

3.3.3 变流量冷却水供应

更换水泵后,现冷却水泵组有两种规格型号的水泵,根据制冷机组运行机组的不同,制定变流量供应冷却水策略。

表 1 冷却水泵优化运行表

常用工况	机组运行策略	板式换热器	1#号制冷机	2#制冷机	3#制冷机	运行水泵	冷却水流量 (m ³ /h)
1	冬季模式	运行	停止	停止	停止	4#或 5#	130-180
2	过渡季节模式	运行	待机	停止	停止	1#、2#、3#任意 1 台	130-350
3	夏季模式	停止	待机	运行	待机	1#、2#、3#任意 1 台	350-450
4	夏季模式	停止	停止	运行	运行	1#、2#、3#任意 2 台	600-750

4 冷却塔运行优化措施

4.1 冷却塔流量分析

冷却塔冷却水量可以按下式计算：

$$W=Q/c(tw1-tw2)kg/s$$

式中 Q 一冷却塔排走热量，kW；压缩式制冷机，取制冷机负荷 1.3 倍左右；吸收式制冷机，去制冷机负荷的 2.5 左右；c 一水的比热，kJ/(kg·°C)，常温时 c=4.1868 kJ/(kg·°C)；tw1-tw2-冷却塔的进出水温差，°C；压缩式制冷机，取 4~5°C；吸收式制冷机，取 6~9°C。

车间目前的制冷设备皆为压缩式制冷设备，冷却塔排走热量取 1.3 倍制冷机负荷。500 冷吨变频电制冷机组额定功率 1758kW，根据公式计算冷却塔冷却水流量 393m³/h；740 冷吨变频电制冷机组额定功率 2638kW，根据公式计算冷却塔冷却水流量 589.75m³/h；板式换热器规格型号 M15-BFG，换热负荷 2028kW，根据公式计算冷却塔冷却水流量 453m³/h。理论上运行板式换热器时，需要开启 2 台冷却塔，运行 500 冷吨制冷机时需要开启 2 台冷却塔。运行 740 冷吨制冷机组时需要开启 2 至 3 台冷却塔。

4.2 冷却塔分组控制

冷却塔理想的经济运行模式是根据运行不同的制冷机组来决定运行冷却塔台数，现同时开启 7 台冷却塔不利于经济运行的。根据冷却塔的水处理能力，提出冷却塔分组控制模式。

首先改动屋顶冷却塔的进水管，冷却塔进水管分为两组，1、2、3 冷却塔为一组进水管，4、5、6、7 冷却塔为一组进水管，在两组进水管上分别安装两个电动阀门。

参考文献：

- [1] 李志英,杨木和,曾刚.冷却塔供冷的应用和分析[J].制冷技术,2010(1):20-23.
- [2] 杨光,祁影霞,蒋慧.冷却塔供能系统应用机节能设计分析[J].制冷与空调,2010,24(4):43-48.
- [3] 李占胜.离心式水泵的工况点分析与应用[J].内燃机与配件,2018(5).

4.3 冷却塔分组运行优化

冷却塔组优化运行如下表所示：

表 2 冷却塔运行策略表

常用工况	板式换热器	1#制冷机	2#制冷机	3#制冷机	冷却塔运行组数	冷却水控制温度 (°C)
1	启动	停止	停止	停止	1#、2#、3#、	13
2	停止	启动	停止	停止	1#、2#、3#	25
3	停止	停止	启动	停止	4#、5#、6#、7#	25
4	停止	停止	停止	启动	4#、5#、6#、7#	25

5 应用效益

优化后，运行板式换热器时只需开启 4#、5#其中 1 台冷却水泵，电机功率 45kW，同时运行 3 台冷却塔，3 台冷却塔电机总功率为 22.5 kW，总消耗功率 67.5 kW；运行 500 冷吨制冷机组时，只需开启 1#、2#、3#中 1 台冷却水泵，电机功率 55kW，同时运行 3 台冷却塔，3 台冷却塔电机总功率为 22.5 kW，总消耗功率 77.5 kW；运行 740 冷吨制冷机组时，只需开启 1#、2#、3#中 1 台冷却水泵，电机功率 55kW，同时运行 4 台冷却塔，4 台冷却塔电机总功率为 30 kW，总消耗功率 85kW。原来冷却水系统运行需要开启 3 台冷却水泵，电机总功率 135kW，开启 7 台冷却水泵，电机总功率 52.5kW，冷却水系统总消耗功率为 187.5 kW。优化后同比运行板式换热可节电 64%；运行 500 冷吨制冷机组可节电 58.6%；运行 740 冷吨制冷机组可节电 58.6%。

6 结束语

优化前运行制冷机组与运行冷却水泵和冷却塔是不匹配的，优化后根据不同制冷机组运行不同的冷却水泵与冷却塔，制冷机组与冷却水泵和冷却塔是匹配的，优化后的冷却水系统节能效果明显，系统运行稳定。由此冷却水泵、冷却塔设计选型时，冷却水泵的流量应根据制冷机冷却水量来确定，冷却塔水处理也应根据制冷机冷却水量来确定，有多台不同制冷负荷制冷机组时需搭配不同流量冷却水泵和冷却塔，冷却水泵与冷却塔才能根据制冷机运行情况实现分组运行，达到经济运行的目的；冷却水泵扬程需根据整个冷却水管路特性来确定，过高的水泵扬程也是不利于水泵经济运行的，相反会造成水泵能耗增加，故障频繁。