

Analysis and Reflection on the Operation of Chilled Water System in Biopharmaceutical Factories

Xiaobin Qian

Beijing Tiantan Biological Products Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract

This paper introduces the operation control of the chilled water and hot water systems used in the air conditioning system of the factory, describes how to achieve the interlocking control logic of multiple chilled water units, multiple pumps, bypass valves, etc., and analyzes and summarizes the advantages of the automatic control of the chilled water system. With the development of China's economy and the expansion of the scale of the pharmaceutical industry, the public utility system is also getting larger and larger. Automated and intelligent public utility solutions are constantly being applied in the new and renovated pharmaceutical factories in China.

Keywords

air-cooled unit; Frozen water; control

生物制药厂内冷冻水系统运行分析与思考

钱校斌

北京天坛生物制品股份有限公司, 中国·北京 100120

摘要

介绍了工厂内空调系统所使用的冷冻水和热水系统的运行控制, 讲述如何实现多台冷冻水机组、多台泵、旁通阀门等联动控制逻辑, 分析总结冷冻水系统自动化控制的优点。随着我国经济的发展, 医药行业的规模扩展, 公用工程系统也越来越大, 自动化、智能化的公用工程方案在国内新建、改建医药厂房中不断应用。

关键词

风冷机组; 冷冻水; 控制

1 引言

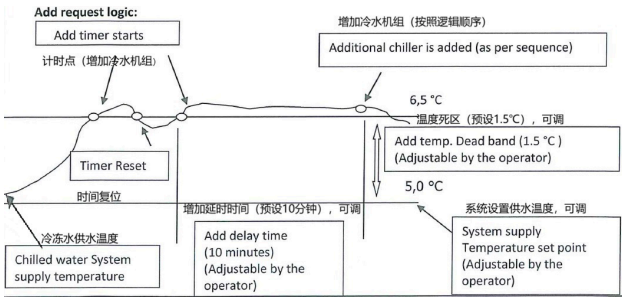
在某一个医药厂房, 7-12℃冷冻水是普遍被采用控温介质, 生产车间和仓储区内符合 GMP 生产工艺和存储物料的温湿度 ($22 \pm 2^\circ\text{C}$, 45%~65%) 要求, 采用风冷冷水机组与风冷热泵冷水机组联合提供作为空调冷热源。空调冷源设计选用 4 台风冷冷水机组 (CH-5、CH-6、CH-7、CH-8) 和 4 台风冷热泵冷水机组 (CH-1、CH-2、CH-3、CH-4) 联合提供, 每台机组额定制冷量 1210kW, 冷媒参数为 7/12℃ 冷冻水, 以满足厂区内两栋主要生产厂房负荷所需的冷冻水需求; 热源设计选用 4 台风冷热泵 (即冷水系统中所使用的风冷热泵) 联合提供, 每台机组额定制热量 735Kw, 加热采用 45/40℃ 热水, 供暖负荷将由两台全热回收 (FHR) 冷水机组 CH-1、CH-2 以及两台部分热回收冷水机组 (PHR) CH-3 和 CH-4 提供; 整个冷冻水系统是通过冷冻水供水温

度和冷冻水回水总管温度两者变化控制来风冷冷水机组的运行数量增减。循环水泵的变频器和冷水机组是通过网络通信链路连接到监控系统 (Supervisory Controller)。冷水机组由监控系统控制 (启用/停运), 如果单个冷水机组处于“本地模式”, 则可以进行手动操作。冷水机组设计的蒸发器入口温度为 12℃, 蒸发器出口温度为 5℃。热回收冷水机组设计的冷凝器入口温度为 40℃, 冷凝器出口温度为 45℃。

2 风冷冷水机组操作顺序 – 冷冻水侧

冷水机组启动顺序: 首先通过通信链路经由冷冻水管理系统 (以下简称 CPM) 启动 FHR 冷水机组 (CH-1 和 CH-2) 中的任意一台, 依据其序列号。主冷水机组编号 (1 或 2) 取决于冷水机组轮换 (如基于每周切换)、冷水机组的可用性以及故障顺序。如果满足以下条件并持续预定的时间间隔, 下一个按顺序的冷水机组的添加请求将变为活动状态。 $T_{ss} > T_{sp}$ (T_{ss} 是冷冻水供水总管冷冻水实际温度; T_{sp} 是冷冻水供水总管冷冻水设定温度 (可调))。这种逻辑在下面的图表中有更详细的解释:

【作者简介】钱校斌 (1981-), 男, 中国浙江嵊州人, 本科, 工程师, 从事制药工程机电研究。



当增加冷冻水机组运行的请求，在整个增加时间段内延迟（用户可调值）期间保持有效，则会增加一台额外的冷水机组参与工作运行。CPM 应确保将下一个 FHR 冷水机组（CH-1 或 CH-2）投入运行。这样做是为了利用 FHR 冷水机组的全热回收来满足供热负荷需求。随着冷冻水需求的增加，CPM 将根据其由 CPM 通过这些冷水机组每周切换所分配的序列号，依次添加 PHR 冷水机组 CH-3 和 CH-4。这将确保 FHR 和 PHR 冷水机组投入运行以生成冷冻水和热水。在热回收冷水机组运行时，供热负荷需求和制冷负荷需求得以匹配，如果建筑物的冷水负荷需求进一步增加，则将投入下一组普通冷水机组运行。随着冷冻水负荷需求的进一步增加，CPM 应根据 CPM 通过每周切换计划定义的序列号，依次投入普通风冷冷水机组 CH-5、CH-6、CH-7、CH-8 运行。在任何运行状态下，如果需要手动添加另一台冷水机组，操作人员可以通过 PC 工作站进行“强制添加”操作，将冷水机组开启参与运行。一旦完成增加操作，接下来的冷却器将按照后续章节所述的方式启动。

冷水机组减量逻辑：如果冷水机组处于自动运行模式且冷冻水系统使用负载正在降低，CPM 系统将尝试减少（减去）正在运行的冷水机组的数量。冷水机组的减量逻辑基于运行制冷机组的 %RLA（以百分比形式表示的运行负载数）或温差。如果以下条件成立，则减量请求将生效：（所有运行冷水机组的 %RLA 总和）/（运行冷水机组数量 - 1）≥ 80%。如果减量请求在整个减量延时（20 分钟，用户可调）期间保持有效，并且在此期间没有增加冷水机组的请求，则会减少一台正在运行的冷水机组。减法逻辑应与通过 CPM 进行的冷水机组加法序列相反。CPM 首先会停止正在运行的普通冷水机组，即编号为 CH-5、CH-6、CH-7、CH-8。当冷冻水运行负荷进一步减少的情况下，CPM 还会继续停止 PHR 冷水机组（即编号为 CH-3、CH-4），最后是 FHR 冷水机组。在任何时刻 CPM 都将有一台 FHR 冷水机组处于运行状态。在任何运行状态下，如果需要手动停止另一台冷水机组，可以在 PC 工作站上选择“强制停止”某一冷冻水机组。在所有冷水机组的蒸发器出水口处安装的专用电动冷冻水阀，通过 DDC 控制面板进行控制其的开闭。阀门的状态由 CPM 通过阀端的开关反馈信号进行监测，如果在 90 秒内未达到预期状态，则该阀门将被视为故障，阀门将被控制至关闭位置，并且该冷水机组将在冷水机组控制中被列为

禁用，随后将请求下一台冷水机组启动。

2.1 冷冻水机组启动逻辑：

一旦冷冻水机组在本地或远程通过冷水机组管理器（SC）被启用，CPM 将根据 DDC 控制面板中的控制器指令，将相应的电动阀驱动至开启位置。一旦通过阀端开关确认了专用电动阀门的“开启”状态，CPM 控制器便会启动主循环水泵。CPM 还会监测阀门和泵的运行状态，如果在 90 秒内（在调试期间暂设定为固定时间）未能达到预期状态，该阀门 / 泵将被视为故障。如果在运行过程中阀门出现故障，它将被控制至关闭位置，该冷水机组将在冷水机组控制中心被禁用，并会请求启动下一个冷水机组。冷水机组控制器会等到确认一定流量的水流流向冷水机组（通过硬件进行联锁）后才开始启动冷水机组。然后，冷水机组也将通过自身的安全检查后启动。

2.2 冷冻水机组的停运逻辑

一旦冷水机组被本地或远程通过冷水机组管理人员（SC）关闭，CPM 将执行以下操作：在固定时间为 10 分钟（在调试期间暂设定为固定值）内检查冷冻水机组运行状态是否已确认为停运状态。如果在该延迟时间内未确认冷冻水机组已关闭，则将该冷冻水机组标记为故障，并且泵将保持开启状态^[1]。如果冷冻水机组状态被确认为停运状态，那么冷冻水循环泵将在冷冻水机组关闭后的一分钟内停止运行。一旦冷却器的状态处于关闭状态且泵也已停止运转，该机组的专用冷冻水阀就应关闭，如果在 90 秒内（在调试期间暂设定为固定时间）未能达到预期状态，该阀门将被视为故障。

2.3 冷冻水机组轮转运行

冷冻水机组应按照每周循环的方式进行配置轮转运转。这样循环会每周改变主冷水机组和辅助冷水机组的运行顺序。这样可以确保所有冷冻水机组得到相对均衡的运行时长。

CPM 的整个冷冻水系统能效比 COP 计算方式如下：

所有运行的冷冻水机组所产生的有效制冷能力（kW）之和 /（有功冷冻水机组（kW）+ 有功循环水泵（kW）所消耗的电能总和）

2.4 冷冻水循环泵的控制

总共有 10 台变频泵（均由 CPM 进行控制），这些泵均采用变频器控制方式。这些泵可以分为两组，每组 5 台泵。泵组一为 5 台泵，其中 4 台运行泵 + 1 台备用泵，为四台热回收冷冻水机组编号为 CH-1、CH-2、CH-3、CH-4 及其主管道提供服务。泵组二也是 5 台泵（4 台工作泵 + 1 台备用泵），与 CH-5、CH-6、CH-7、CH-8 及其主管道提供服务。这些泵的主要功能是在任何时候确保为运行的冷冻水机组提供足够的冷冻水流量，并在冷冻水系统的回管中保持足够的压力。CPM 正在监测每台泵的状态，包含手动 / 开关、运行状态（通过 DP 连接变频器获取每个泵的状态）、转速反馈（来自变频器的 4-20 毫安信号以及所有变速泵的跳闸信号）。

泵转速的控制：由于这是一个可变的流量系统，因此所启用的泵的数量以及泵的转速取决于冷冻水系统中供回的压差情况，随时都会有所变化。在主管路的供回流管路上，共安装了2个压差传感器。冷冻水泵系统将以最少的泵数启动，该数量暂预设定值为1台泵。一旦第一台冷水机组请求启动冷冻水泵，该“请求”信号将传至CPM，后者将启用所需的最低泵数。然后，这些泵将从60%（即最小速度可调30赫兹）到100%（即最大速度可调的50赫兹）的范围调节其转速，以使系统压差接近设定值（用户可调节）。任何时候，所有泵运行都应以大致相同的转速运行。按照前面所述逻辑，CPM应启用供给热回收冷水机组的冷冻水第1台冷冻水泵，泵组一的循环泵计划在普通冷水机组之前投入运行，并将轮流运行以确保每台泵的运行时间均衡。由于CPM设计允许使用非热回收（普通）冷水机组，因此泵组2中相应的水泵也应投入运行。这些水泵应逐渐提升至与泵组1中的水泵相同的转速，以保持设定的冷冻水温度（DPT）值。

循环泵的增启泵逻辑：若运行中的泵已达到最大转速（用户可调，比如100%），且系统预设压差值在5分钟时间段内低于设定值，则会增启一台新泵。该新泵的转速也会逐渐提升以匹配其他运行泵的转速^[2]。集中控制系统（CPM）应增启额外的冷水机组以满足冷冻水的需求。

循环泵的减泵逻辑：如果运行中的泵以最低速度运行（30% - 可由用户调整）且系统压差值在预设5分钟时间段内持续大于设定值，则将减少一台运行中的泵。其余泵的速度将逐渐提升以匹配设定的压差值。泵曲线末端保护：可通过为每台运行中的泵定义最大和最小速度限制来纳入曲线末端保护逻辑。此数据需在调试期间由泵供应商提供。

2.5 冷冻水循环泵的轮转逻辑

将按照定期计划（如按照周或月，具体由用户选择）对泵进行轮转运行操作，该计划基于运行小时数进行计算。在以下情况发生时执行：泵未能确认“开启”状态；泵跳闸。

如果出现以下情况，冷冻水泵输出将被禁用：手动/自动开关处于手动或关闭位置；水泵跳闸；水泵在X秒内未能确认“开启”状态。

如果出现以下情况，则认为冷冻水泵出现故障：泵已跳闸（电气故障）；在x秒内未能确认所请求泵的状态（机械故障）

如果由于上述情况导致CHW泵出现故障，那么操作员就需要在CPM的PC工作站进行重置操作。

3 冷冻水旁通阀操作

此调节型旁通阀的目的是确保在运行的冷水机组在任何时候的流量都保持在最低水平。此旁通阀通常处于关闭状态，但在非常低负载条件下除外。此旁通阀根据通过冷冻水机组的冷冻水流量进行控制，该流量由安装在冷冻水回流总

管中的两个流量传感器测量^[3]。如果在运行过程中任何一台运行中的冷水机组的冷凝器上的流量低于允许的最低流量，则此阀将打开，以便将一定量的冷冻水重新引入冷冻水机组的冷凝器入口。一旦通过冷水机组的流量达到允许的最低流量以上的一定量，该阀将控制为关闭状态。总管流量将根据运行中的热回收冷水机组的数量进行分配，以确定运行冷水机组冷凝器的流量，并随后由CPM对旁通阀的调节进行操作，以确保足够的冷水机组冷凝器流量。

4 冷冻水机组的手动操作

当CPM处于不可用状态时，也可以手动启动冷冻水机组：1）在冷冻水机组显示屏上点击“设置”2）滚动至“设定点”并点击其选项3）将“REMOTE”（远程）的值更改为“LOCAL”（本地）4）点击“确定”。但需要返回CPM控制时，重复上述描述的步骤，并将数值再次从“LOCAL”（本地）更改为“REMOTE”（远程）。如果CPM工作站上出现任何故障警报，操作员需要进行重置操作。

CPM与BMS的完全集成：CPM将通过BACnet/IP协议与BMS供应商共享所有点的读取和写入权限，以实现与BMS的集成。

上文讲述的是该工厂采用风冷冷冻水机组及其配套泵等，按照一种所设定的机组与泵操作程序顺序进行运行。只描述了冷冻水系统的控制基本逻辑和相互间关系，各个参数的设置和优先级，需要根据实际调试期间的情况进行调整和优化。往往调试期间仅能按照预设的模拟部分使用工况，而且外围环境情况也仅为一年中某一季节等，需要根据长期实际运行情况进行调整或设置多套方案，如在不需热水循环运行的情况，设置为主冷冻水机组的不一定为全热回收的冷水机组等等变化。

5 结论

随着公用工程不断采用自动化控制，产生大量的数据，仅靠传统的人工分析，已经无法做到更优更全面的分析，应借助IA的数据分析，提前预判设备的故障，提升预防性维护水平，做好能效管理，优化系统运行参数，通过数据闭环推动全价值链的智能化升级。

参考文献

- [1] 生物制药厂房空调及通风系统设计要点. 路陶鹏. 工程建设与设计, 2022(18).
- [2] 生物制药厂房洁净空调步进式值班模式切换策略压差稳定性实测研究. 杨冕; 李修帆; 刘喜松; 吕强; 邵晓亮. 建筑科学, 2025(04).
- [3] 某低温工艺项目制冷机房系统高效优化研究[J]. 钱恒利; 邹思; 许宗金; 屈国伦; 谭海阳; 刘世豪; 黄冬娜; 林辉. 制冷与空调, 2024(06).