

冷却循环水系统自动化研究

郭永朝*, 张 忆, 陈 静, 赵静静

北京航天试验技术研究所, 北京

收稿日期: 2022年5月26日; 录用日期: 2022年9月27日; 发布日期: 2022年10月9日

摘 要

某化工生产线的冷却循环水系统通过人工操作进行控制, 不仅效率低且异常情况发生时无法第一时间进行备用设备的切换, 易造成系统连锁停车的质量安全事故。通过对系统一系列自动化研究, 升级为远程监控, 并达到水池自动补水、循环水泵自动切换、水网流量监测, 达到冷却水循环系统远程可视化, 实现故障点快速定位的智能化控制。

关键词

冷却循环水系统, 自动化, 智能控制

Research on Automation of Cooling Circulating Water System

Yongzhao Guo*, Yi Zhang, Jing Chen, Jingjing Zhao

Beijing Aerospace Experimental Technology Research Institute, Beijing

Received: May 26th, 2022; accepted: Sep. 27th, 2022; published: Oct. 9th, 2022

Abstract

The cooling circulating water system of a chemical production line is controlled by manual operation, which is not only inefficient, but also unable to switch the standby equipment at the first time when abnormal conditions occur, which is easy to cause the quality safety accident of system chain shutdown. Through a series of Automation Research on the system, it is upgraded to remote monitoring, and achieves automatic water replenishment of the pool, automatic switching of circulating water pumps, water network flow monitoring, remote visualization of the cooling water circulation system, and intelligent control of rapid location of fault points.

*第一作者。

Keywords

Cooling Circulating Water System, Automation, Intelligent Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

某化工生产线若干个子系统工作时通过冷却循环水进行大量换热降温，日常操作通过人工巡视进行设备监控。该生产线运行过程中，冷却循环水系统故障发生时，人工操作不及时已造成下游须降温设备的温控异常，极易导致下游子系统核心设备的升温损坏，通过对原有冷却循环水系统现状及自动化控制的研究，进行智能控制改造升级，达到数据可视化、设备功能切换及时的目的。

2. 系统现状

2.1. 主设备

某化工生产线冷却循环水系统，其主要设备如图 1 所示。



Figure 1. Main equipment of cooling circulating water system

图 1. 冷却循环水系统主设备

设备现状如表 1 所示。

Table 1. Current situation of cooling circulating water equipment

表 1. 冷却循环水设备现状

序号	设备名称	数量	控制方式	操作频率
1	循环水泵	7 台	人工，现场配电柜控制	2 h/次巡视
2	冷却循环水池	500 m ³	人工补水，现场开关阀门	4 h/次补水
3	水路管网	7 条	人工操作管路蝶阀	2 h/次巡视
4	水塔及其风机	5 台	人工现场巡视	6 h/次巡视

通过 2 h/次的巡检无法及时发现故障点具体点位，即使操作人员处于故障点现场，由于循环水泵同时运行的水流声和电机运转噪音较大，无法迅速地识别发生故障的设备并进行及时的处理，造成表 1 中所示 7 条水路管网即下游用水子系统高温异常情况发生。

2.2. 系统现状研究

冷却循环水系统控制现状如表 2 所示。水泵的投运步骤首先需要人工操作打开相应水泵的进出口蝶阀，并现场启动水泵，同时在噪音较大环境中观察水泵、电机及其出口压力是否正常。

Table 2. Analysis of control status of cooling circulating water system

表 2. 冷却循环水系统控制现状分析

序号	设备名称	数量	功能	备注
1	循环水泵单向阀	7 个	避免其他水路管网的水流量影响该路管网的水流状况	手动控制单向阀启闭
2	机械式压力	7 个	与控制柜连接，控制柜报警指示	控制柜与水泵在同一现场
3	控制柜	7 路	对各个水路管网进行启动、停止并显示运行状态和故障	
4	循环水池	500 m ³	为循环水系统提供水源，冷却塔不断消耗水	需要手动定时补水进行补水

通过人工操作存在监控处理不及时、人为误差大、随意性强以及可靠性不高等问题，主要表现在下述一些方面：

2.2.1. 问题发生时反应滞后

现有冷却循环水泵的控制是通过接触器进行开环控制，观察水泵运行状态是否正常通过操作人员现场巡视时通过观测出水压力，用手触摸电机是否抖动升温，用耳朵听是否存在异响等手段现场监测工作状态，因岗位操作人员同时兼顾三套生产系统的运行，无法对水泵电机状态进行实时监测，当故障发生时，操作人员对于系统故障点的判断定位速度较慢，反应滞后。

2.2.2. 处理问题效率偏低

当冷却循环水系统当中的某台水泵发生故障停运时，岗位操作人员通过间接设备温升报警判断水泵故障后，快速跑到水泵房进行备用泵的切换。由于操作人员日常监控所处位置与水泵房之间存在一定物理距离，一旦出现紧急情况，如水泵突然跳闸停运，往往是下游水温升高报警之后反馈回该操作人员所处位置方能了解冷却循环水系统发生了故障，操作人员往往无法在故障发生的第一时间赶到故障现场处理，进而造成下游子系统需要持续降温的设备高温连锁，对于问题的处理效率较低，进而导致整个生产线停车的后果。

2.2.3. 不确定因素影响

冷却循环水系统的 500 m³ 蓄水池通过人工定时开启水井补水阀进行补水，由于冬季和夏季环境温度的差异，水池内的水量消耗和补水频次存在一定的差距[1]，如表 3 水池耗水量所示。人工操作容易受到其他因素影响，随意性大，例如当操作人员所监控的生产线其他设备的维修、操作等，补水阀开启后忘记关阀，导致水池溢水的情况造成水资源的浪费，或者由于补水不及时导致系统温度升高的情况。

Table 3. Water consumption of pool in winter and summer**表 3.** 冬夏季节水池耗水量

	频率(次/24h)	单次补水耗时(h)	消耗量(t/24h)
夏季	4	1	50t
冬季	3	1	30t

系统投产至今发生故障情况统计入表 4 的系统故障统计表所示。

Table 4. Historical fault statistics of the system**表 4.** 系统历史故障统计表

故障时间	故障原因	造成后果
2017.03	管道内异物与叶轮发生碰撞, 叶轮损坏, 水泵无法正常出水	换热设备温度上升导致下游子系统连锁停车
2018.06	水泵电机轴承损坏导致水泵电机温度升高, 损坏密封垫, 电机转子运转不平衡造成转子扫堂	中轴磨损轴承抱瓦电机烧毁, 最终造成系统停车
2019.08	水泵电路热继电器故障导致水泵停止运行, 生产系统冷却水水温飙升至 100℃, 系统内产品含水量激增污染某工段吸附剂	下游子系统连锁停车
2020.09	下游子系统板换清洗后, 流量过大导致水泵电机负载功率大于额定功率, 绕组电流过大导致过载保护停止运转	下游子系统连锁停车

3. 系统自动化

随着自动控制技术的发展, 自动化技术已经拓展到化工生产等多个领域[2], 对比人工操作来说可摆脱传统监控、手动启停泵的作业方法, 因此若能实现对循环系统的自动控制, 实现故障处理智能化, 运行数据可视化, 将显著提高生产过程中的安全性和稳定性, 降低人员劳动成本。

基于系统现状研究中所述三方面问题考虑, 为达到提高系统稳定性的目的, 采用 PLC 闭环控制的方案代替以往纯人工操作的方法, 实现冷却循环水系统实时监控、远程指令启停和故障报警、自动切换控制、自动补水以及数据趋势记录等功能, 将控制界面、数据图像等信息集成于生产线控制间上位机, 达到冷却水循环系统远程可视化, 实现故障点快速定位的智能化控制的目的[3]。

3.1. 核心控制单元

通过研究系统改造生产现场的需求, 依托生产系统原有上位机、PLC 控制柜等作为基础, 选择应经过市场验证的产品 SiemensS7 系列作为数控模块, 其具体参数如表 5 控制模块所示。

Table 5. Parameters of control module**表 5.** 控制模块参数

序号	核心控制单元	模块名称	数量
1	SiemensS7-200 系列	CPU224	1 个
2		开关量输入模块	1 个
3		开关量输出模块	1 个
4		模拟量输入输出模块	2 个
5		通信单元	若干
6		信号采集点	44 个

该系列的 Siemens S7-200 型号满足现场生产设备的现状及系统升级改造的使用要求，利用其作为核心控制单元，如图 2 控制模块所示。



Figure 2. Control module
图 2. 控制模块

3.2. 数据采集方式

为实现循环水泵自动切换的功能，需要对循环水泵的运行信号进行采集。通过分析对比压力开关、电机热继电器的各个辅助触点和外贴式流量计三种模式，对比不同辅助触点类型的优缺点，选择合适的数据采集方式，如表 6 所示辅助触点对比选择。

Table 6. Comparison and selection of auxiliary contacts
表 6. 辅助触点对比选择

辅助触点类型	优点	缺点	历史问题	判定
压力开关	配件简单，价格低廉	冷却循环水系统为半开放式，水质较差，热交换后产生水垢，易附着于管道内壁	曾发生多次出现被水垢堵塞后监测不到管道内数据情况	方法不可靠
电机热继电器	配件简单，价格适中	型号或参数设置不匹配情况下易发生越级保护	水泵电机绕组短路发生故障，控制柜内空气断路器断开，循环水泵停止运转，然而交流接触器和热继电器仍然正常工作，不产生电信号反馈	方法不可靠
外夹式流量传感器	准确、稳定，操作简便，无需破坏原有管道，施工工期短、精度高	价格较高	需要将水管外壁拟安装位置打磨光滑，用耦合剂将传感器(探头)贴于水管外壁，再用专用夹进行固定	可以避免接触恶劣水质影响工作效率

为满足自动化控制的需求，需要管路中的水流流量具备一定精度和稳定性，通过对比，选择外夹式流量传感器进行流量数据的采集，如图 3 外夹式流量传感器所示。



Figure 3. External clamp flow sensor
图 3. 外夹式流量传感器

3.3. 水池补水的自动化

3.3.1. 补水阀门

对原有补水管道进行改造——加装可远程控制开关的电动阀门，电动阀组成如表 7 水池补水设备明细所示。

Table 7. Details of water replenishment equipment of pool
表 7. 水池补水设备明细

序号	设备	结构优点	功能
1	电动执行器	AC220V, 硬密封结构、不锈钢材质	可调节型, 控制管道内的介质
2	球阀	密封性能好、动作可靠	流量
3	管道改造	补水旁通	备应急情况使用

另外, 管道进行一定的改造, 利于异常情况发生时的管道维修或手动操作等, 如图 4 水池补水阀所示。



Figure 4. Water make-up valve of pool
图 4. 水池补水阀

3.3.2. 液位指示

水池液位的情况是由操作人员通过现场巡视观测水池内水量获得数据, 通过个人经验积累判断当时水池状况是否需要加水, 存在人为主观因素影响, 不具备量化操作具体可实施性。

冷却循环水系统中的冷却水塔直接暴露于自然界中, 空气中的杂质, 如树叶、树枝、灰尘等会通过水塔顶部散热片进入循环水池中, 对液位计产生附着或者腐蚀, 影响精度状况, 甚至阻碍浮球液位计的正常运行, 因此, 原有浮球液位计需要进行更新, 以确保水池液位的实时数据的准确度。通过对比市场上常用液位计[3][4], 选择适用于该水池环境的液位计进行设备改造, 如表 8 液位计类型对比所示。

Table 8. Type of liquid level gauge

表 8. 液位计类型

液位计类型	工作原理	优点	缺点	适用性
浮筒液位计	利用浸没于液体中的浮筒受到向下的重力、向上的浮力和弹簧弹力的相互作用进行液位测量	测量范围大, 耐高温、高压, 耐腐蚀性能强, 现场调试方便, 易于检查和维修	不适合高粘度介质液位的测量	水池为下沉型, 无法另外设置连通管路
浮球液位计	根据阿基米德定律和磁耦合原理, 液位的变化导致磁性浮子位置的变化, 通过测量电学量变化反映液位	结构简单、使用方便, 性能稳定、使用寿命长、便于安装维护	球杆易变形、水中污染物较多时易附着浮球影响精度	开放式环境中杂质树叶灰尘等影响其精度
差压液位计	利用液体液位差引起的静压变化来测量液位高度	高温、高压、高粘度、强腐蚀性液体均可使用	不适用于易结晶液体	水池为下沉型, 无法另外设置连通管路
导波雷达液位计	利用于波导体在气体和液体中的导电性能不同计算出液位	不受罐体形状的影响, 不受介电常数、温度、压力和密度的影响, 不受物位表面波动、粉尘、蒸汽和泡沫的影响	液体的介电常数过低时, 信号太弱测量不稳定	冬季水雾影响其精度
玻璃管液位计	利用连通器原理来进行液位检测	读数清晰、直观、可靠, 结构简单、维修方便	易碎, 不适用于危险介质测量, 腐蚀玻璃的介质不能使用	水池为下沉型, 无法另外设置连通管路
磁翻板液位计	根据磁极耦合原理、阿基米德、连通器原理, 结合机械传动指示液位	测量范围大, 指示部分与被测介质完全隔离	不适合高粘度介质液位的测量	
Γ 射线液位计	通过测量 γ 射线辐射强度的变化测量出被测液位	可用于强腐蚀、剧毒、粘稠、结晶、固体颗粒的测量	放射源对环境存在一定危害	现场经常需要有操作人员巡视
超声波液位计	根据超声波发射到接收所需时间和声速计算出传播距离即液位	非接触式仪表, 可连续测量, 稳定性好	需要连接一定量的数据信号线	适用于现有环境条件

通过对比不同类型的液位计的优劣, 同时结合现场环境以及工艺需求, 选择安装超声波液位计传感器来监测水池液位, 通过 4 mA~20 mA 连接到显示表或 PLC 系统中, 提供生产现场实时液位数据, 为实现自动补水提供实时有效数据。

3.4. PLC 控制程序设计

通过可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller)设计, 通过逻辑程序控制包括 7 台泵的远程启

停, 实现冷却循环水系统的报警指示功能及自动运行功能, 具体如下: 水泵故障声光报警、水泵发生故障时自动切换、水池液位显示、水池液位高低位的声光报警、水池液位高低位自动补水程序以及循环水流量信息连锁报警等, 如图 5 所示。

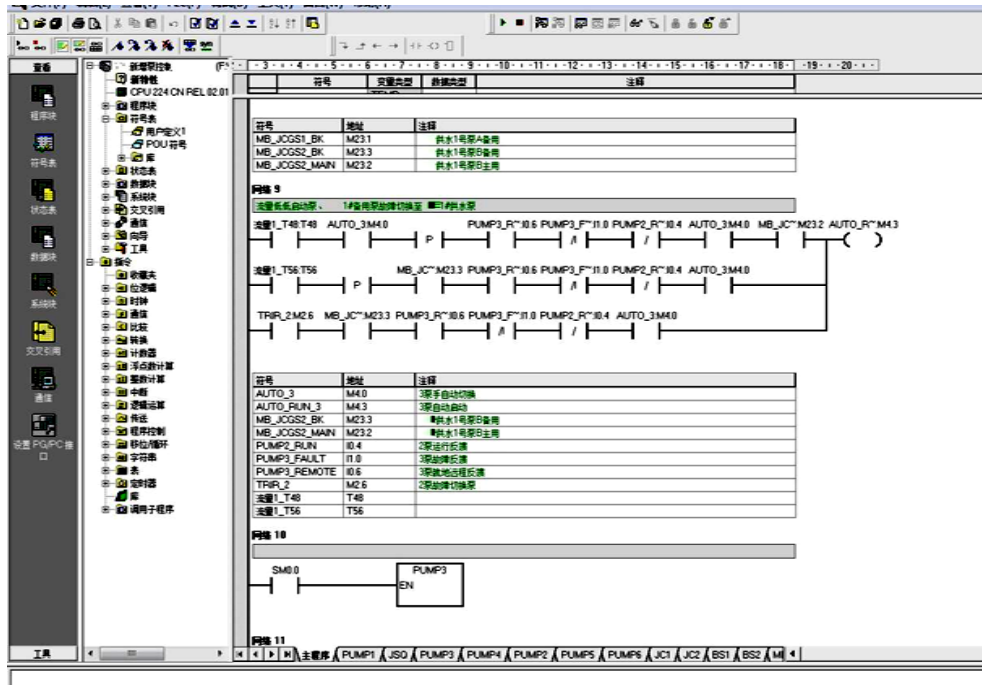


Figure 5. PLC design
图 5. 程序设计

利用上位机进行设计人机交互界面的设计, 便于岗位操作人员在监控室进行操作和数据检测, 如图 6 所示。

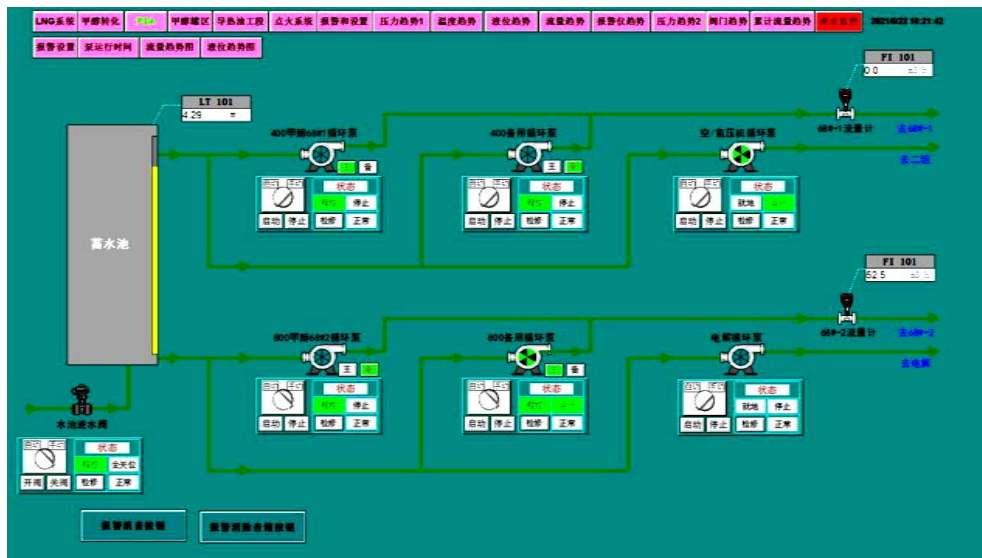


Figure 6. Operation main interface
图 6. 操作主界面

主界面由流程运行监控图、水泵运行动画、管道内流量数值显示、水池液位显示、流量计及参数和水池进水阀等构成，二级控制画面的设置由水泵主/备选择按钮、水泵远程/就地控制按钮、启动/停止按钮、水池液位上/下限设定、流量连锁参数设定、液位流量数据趋势图、泵运行时间统计组成，如图7所示，形成智能控制系统。

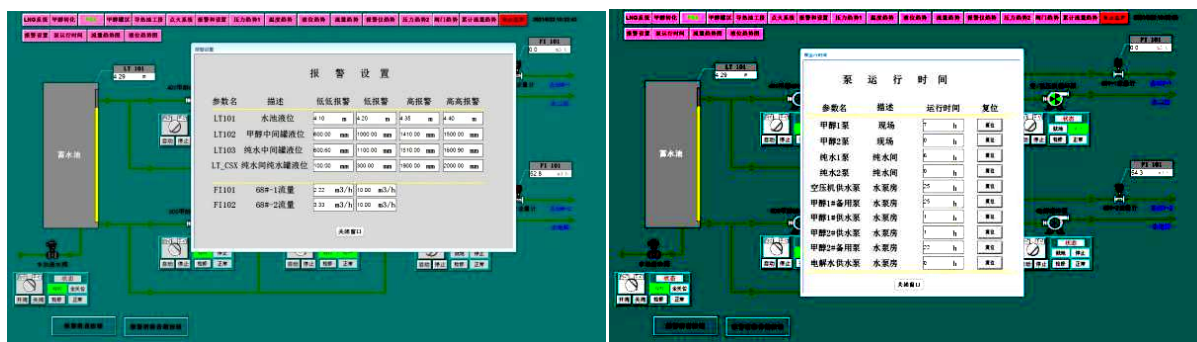


Figure 7. Secondary control interface
图7. 二级控制界面

3.5. 系统控制指标

技术升级改造完成后应满足冷却循环水系统自动化运行的要求，需要达到如表9技术指标所示的各项目标。

Table 9. Technical transformation indicators
表9. 技术改造指标

序号	项目	技术指标参数
1	冷却循环水泵	7台，实现上位机控制启动/停止，画面显示绿色旋转为启动运行状态，灰色为停止备用状态，红色为故障状态。
2	循环水流量	主管路流量在 $10 \text{ m}^3/\text{h} \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ 区间为正常状态，流量低于 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时声光报警，流量低于 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时声光报警并连锁启动备用泵。
3	水池液位	水池液位显示为绿色可变化画面，有数字显示值。
4	补水阀门启停	当水池液位低于2米时，声光报警并开启电动补水阀，当水位达到4米时报警并关闭补水电动阀。
5	历史数据趋势图	记录并保存循环水系统各参数历史数据，如流量数据、每台泵工作时间，液位数据等并形成趋势图，方便查看。
6	水泵累积运行时间	记录每台泵的运行时间，为维护保养做时间统计。

3.6. 系统研究成果

通过对系统一系列自动化研究并实施，该冷却循环水系统投入某化工生产线使用后升级为远程监控，并达到水池自动补水、循环水泵自动切换、水网流量监测，达到冷却水循环系统远程可视化，实现故障点快速定位的智能化控制。

技术升级完成后，形成符合生产线生产实际使用需求的软件1套、控制界面和安装符合使用要求的相应硬件，如图8现场示意图所示，实现循环水系统自动补水、运行水泵自动切换的功能，有效地避免了因循环水系统故障而造成整个下游生产线设备停车的情况，对发生故障的单一设备能够快速准确地定

位，方便操作人员对该故障设备进行快速处理——维修及维护，减轻了岗位操作人员的工作强度，同时确保水资源的合理利用，提高了设备运行稳定性。

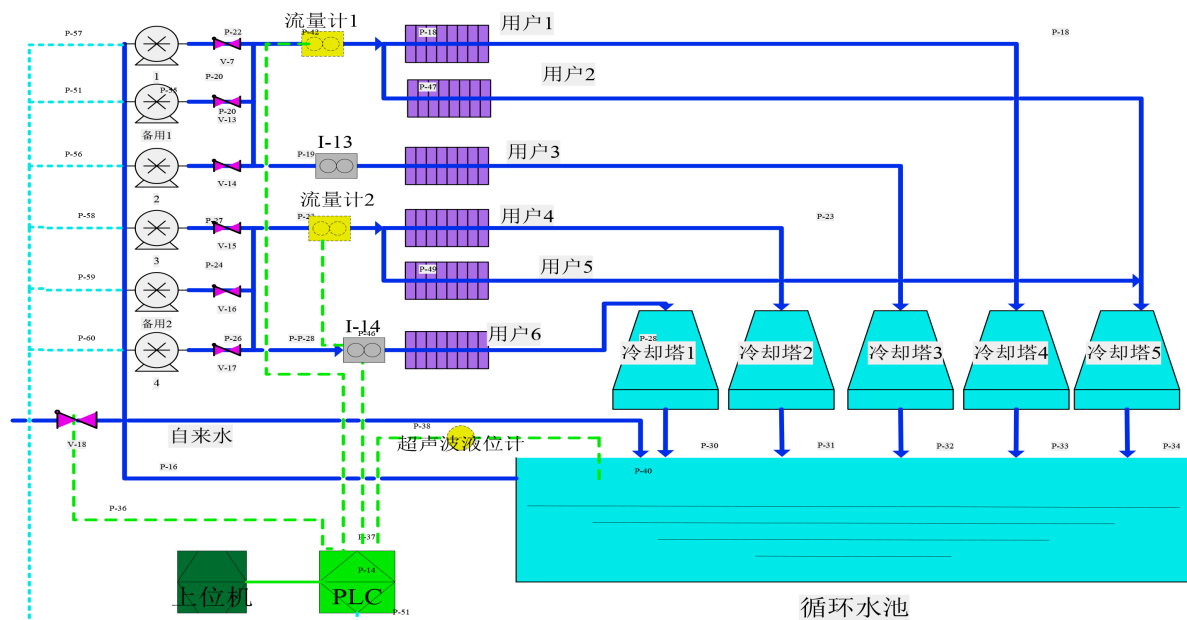


Figure 8. Site schematic diagram
图 8. 现场示意图

4. 结论

本文通过某冷却循环水系统自动化升级过程各个环节具体设备对比选择，实现了该系统的自动化控制。

在生产过程自动控制系统中，选择合理设计方案及其相应的硬件设施，对于生产自动化和安全稳定性有着重要意义。

参考文献

- [1] 水处理知识讲座. 循环水的冷却原理[J]. 工业水处理, 2015, 35(10): 68.
- [2] 吴爱萍. PLC 控制的设计技巧[J]. 工业控制计算机, 2003, 167(2): 61-62.
- [3] 梁海军. 液位计的选型[J]. 科技传播, 2011(12): 191-192.
- [4] 张新娟. 常用液位计的选型[J]. 科技信息, 2012(27): 53-54.