

大型水厂配水泵房自动控制系统设计与应用

张小强¹, 杨 勇², 赵博龙³, 胡田力⁴

(1. 东莞市水务集团供水有限公司, 广东 东莞 523112; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031; 4. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要:为实现大型水厂配水泵房内众多设备之间的复杂联锁控制,以及配水泵机组的出口压力精准调控,设计了一套自动控制系统。在系统的硬件设计中,通过 PLC 硬冗余、双纤工业环网和子环网的形式增强了系统的稳定性及可靠性。结合详细的控制策略和 PID 算法编制系统的软件程序,该自动控制系统已稳定运行 3 个月,实际运行表明,该自动控制系统联锁控制准确可靠,水压控制精度高,较大程度地提高了配水泵房工艺单元的自动化水平,具有较强的实用价值及借鉴意义。

关键词:配水泵房;联锁控制;精准调控;控制策略;PID

中图分类号:TP391.9

文章编号:1000-0682(2024)03-0032-06

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.006

Design and application of automatic control system for water distribution pump house in large water plants

ZHANG Xiaoqiang¹, YANG Yong², ZHAO Bolong³, HU Tianli⁴

(1. Dongguan Water Group Water supply Co., Ltd., Guangdong Dongguan 523112, China; 2. Central & Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Hubei Wuhan 430010, China; 3. Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 4. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract:To achieve complex interlocking control among numerous equipment in the water distribution pump room of a large water plant, as well as precise control of the outlet pressure of the water distribution pump unit, an automatic control system has been designed. In the hardware design of the system, the stability and reliability of the system are enhanced through PLC hard redundancy, dual fiber industrial ring network, and sub ring network. Combining detailed control strategies and PID algorithm to develop software programs for the system, the automatic control system has been running stably for 3 months. Actual operation shows that the interlocking control of the automatic control system is accurate and reliable, with high precision in water pressure control, greatly improving the automation level of the process unit in the water distribution pump room. It has strong practical value and reference significance.

Keywords: water distribution pump room; interlocking control; accurate regulation; control strategy; PID

0 引言

配水泵房是给水厂中重要工艺单元之一,配水泵房内的水泵机组负责将处理过后的清水输送至市政管网,当前大型给水厂的配水泵房往往配置 10 kV 电压等级的大功率水泵机组,以满足市政管网对于压力及流量的需求。为满足 10 kV 水泵机组的安全、可靠运行,配套设置了 10 kV 中置柜、10 kV 变频调速装置、现场按钮箱、电磁流量计、压力变送器、

收稿日期:2024-02-05

第一作者:张小强(1983—),男,广东东莞人,本科,自动化工程师,主要从事城市供水行业信息化、仪表、自控专业技术审核及管理工作。E-mail:173768353@qq.com

通信作者:胡田力(1989—),男,江西南昌人,高级工程师,主要从事市政给排水工程的电气、仪表及自控专业设计工作。

E-mail:hutianli582@163.com

冷却水电动阀、流量开关、进口手电动蝶阀、出口液控蝶阀、阀门控制箱和温度采集箱等设备^[1],这些设备需要按起动、停止命令顺序开启,并完成一系列的联锁控制以及故障联锁等。

为保障配水泵房工艺单元的安全、稳定运行,设计一套自动控制系统,以完成工艺单元中众多设备的复杂逻辑控制要求,同时满足配水泵房出水压力恒定的控制需求。

1 工艺介绍

南方某大型给水厂的配水泵房设计规模为 110 万 m^3/d ,配水泵房和吸水井建在水厂东南侧,处理

后的清水通过清水池后进入吸水井、配水泵房,经配水泵加压后由配水管道送至市政配水管网。配水泵房内安装 10 kV 卧式离心泵 8 台,6 用 2 备(均为调速),电机功率为 1800 kW,配水泵电机采用水冷却,冷却水管安装 DN100 电动阀和流量开关各 1 个。每台配水泵机组前后分别设置手电动蝶阀及液控蝶阀,其中液控蝶阀可有效地预防和抑制水锤,确保关闭过程中的系统及管道安全,配水泵机组还配套设计了 10 kV 配电柜、10 kV 变频调速装置、PLC 控制站、阀门控制箱、温度采集器和现场按钮箱等,1#~8#水泵机组的工艺设计图详见下图 1 所示。

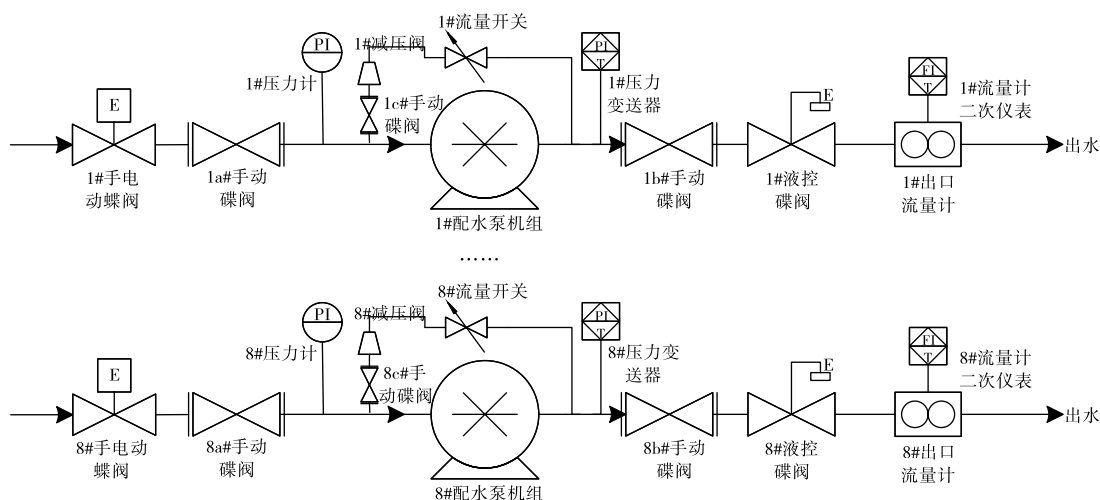


图 1 配水泵房工艺设计图

2 自动控制系统设计

2.1 系统架构

配水泵房的自动控制系统由信息层、控制层和设备层构成,其中信息层由 SCADA 软件、计算机监控站、服务器及以太网交换机组成,可实现配水泵房生产单元的集中监控;控制层主要指 PLC 控制站,用于采集设备层中各仪表、设备的实时状态及下达控制指令;设备层由水泵机组、电动阀门、压力变送器及电磁流量计等被控设备及智能仪表组成,它们通过硬接线及总线等方式与 PLC 控制站进行实时通信。

为提高设备层信息传输的可靠性,设计突破传统星型网络的约束,主干通信网络采用千兆双纤工业环网,配水泵配套的各变频器、液位蝶阀等共 34 套网络设备采用子环网方式与 PLC 控制站进行通讯,配水泵房自动控制系统的网络架构图详见下图 2 所示。

2.2 硬件设计

自动控制系统的硬件部分包含仪表、PLC 控制站及上位 SCADA 系统等。

2.2.1 仪表设计

每套水泵机组均预埋 6 组 Pt100 热电阻,并设置 1 台温度采集器,温度信号通过 Modbus 协议传送至 PLC 站,生产运行人员可实时掌握电机绕组及水泵轴承温度,如出现高温可通过 PLC 控制系统联锁关闭水泵机组及进出口阀门。

每套水泵机组出水管段上均设置 1 套压力变送器及 1 套电磁流量计,用以检测出水管上的出水压力及流量。其中,压力变送器选用 2 线制仪表,电源及信号由 PLC 站直接提供并收集。电磁流量计设计提供 4~20 mA 及 Modbus 的信号,PLC 站通过 AI 模块及通讯模块接收相应的信号。

压力变送器及电磁流量计采用 HART 通讯,它具有常规模拟量采集功能,还可读取仪表其他相关变量,包含量程、报警及制造商等相关信息。

2.2.2 PLC 控制站设计

本次配水泵房设置 1 套 PLC 控制主站,各配水泵 10 kV 变频调速装置和液控蝶阀分别自带 1 个 PLC 子站。PLC 控制主站和子站由 PLC 控制器、触摸屏、UPS、中间继电器、信号隔离器及配电断路器等组成,其中 PLC 控制主站采用施耐德 M580 BMEH584040 系列 PLC,PLC 电源模块、CPU 模块、通讯模块及以太网交换机采用冗余配置,2 个 CPU 模块之间采用千兆光纤通讯,同时配置 2 个 RJ45 以太网通信端口,用于环形连接远程 I/O 分站(EIO)以及分布式设备,AI 模块支持 HART 协议,所有 PLC 控制主站模块须支持热插拔功能。PLC 控制子站采用施耐德 M224 系列 PLC。

PLC 控制站通过用户定制化的组态及软件编程,可实现实时监测配水泵房工艺单元中所有生产过程参数、设备运行状态,并对采集的数据进行处理^[2],同时供上位机储存、显示,同时它可以完成自动控制或调节水泵、阀门及其他设备。

2.2.3 SCADA 系统设计

为实现配水泵房工艺单元的集中监控,上位 SCADA 系统设置 1 台工程师站、2 台操作员站、2 台数据采集服务器和 2 台历史数据服务器,其中数据采集服务器和历史数据服务器部署在中控室,其与全厂区自控系统共用。

工程师站可完成对 PLC 和上位机应用软件在线编辑、调试、在线诊断及仿真等,同时可以打开网络中的所有运行数据服务器的数据库和系统组件,并对其进行编辑、组态及开发^[3]。

操作员站通过以太网与运行数据服务器连接,获取实时的生产工况数据,它不仅能提供动态的工艺监控图形,还具备图形功能、动态显示、安全操作、报警功能和数据管理等功能^[3]。

数据服务器为整个控制系统的过程数据、系统组件如画面、报警 SOE、和操作员记录,提供大容量的存储和检索,数据服务器具有安全登录、密码保护和数据传输功能,支持 TCP/IP 协议。

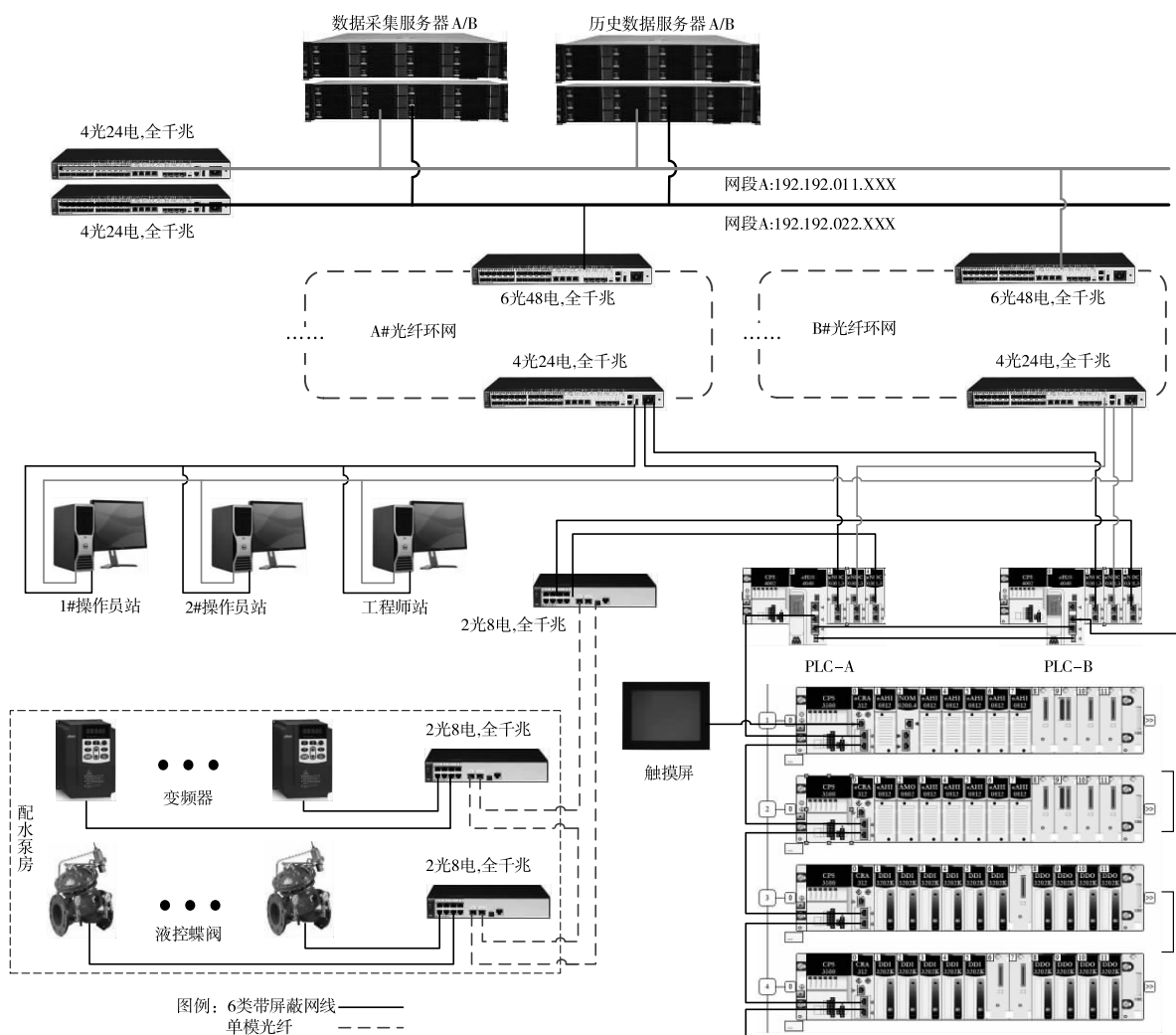


图 2 配水泵房自动控制系统网络架构图

2.3 软件设计

自动控制系统的软件主要是指下位机 PLC 程序及上位机 SCADA 组态软件设计,其中 PLC 程序编制需要有工艺控制逻辑策略的支撑。

2.3.1 控制策略

(1) 泵阀连锁控制

配水泵房中水泵机组、电动阀门及液控阀门等设备之间的连锁控制涉及的设备较多,其连锁控制较为复杂,为实现配水泵房工艺单元的自动化控制,设计了一套泵阀连锁控制逻辑,下面分别从水泵机组的起动、停止及其他连锁要求方面进行详细介绍。

① 起动

判断集水池液位大于启泵液位(5.75 m,可设置)和进出口电动蝶阀都开到位→远程手动设定 10 kV 变频调速装置启动频率(为达到启动转矩要求,预设启动频率 ≥ 35 Hz),10 kV 变频调速装置准备就绪→关闭水泵真空管路上电磁阀→打开水泵管路上冷却水阀→现场或远程发出 10 kV 中置柜合闸命令→10 kV 中置柜反馈合闸信号→发出启动 10 kV 变频调速装置命令→待 10 kV 变频调速装置持续运行 25 s(时间可调整),且水泵出口管段上压力值 ≥ 0.16 MPa 时,持续 30 s→发出打开液控阀门命令→液控蝶阀反馈全关信号→根据实际需求手动调整 10 kV 变频调速装置频率,或者切换至自动模式下,根据外部管网压力要求实时自动给定频率→起动结束^[1]。

泵阀起动时自动化联动控制的条件:水泵机组进口处电动阀门未开启,发出报警信号,且不可执行起动命令;水泵机组、液控蝶阀和变频调速装置均处于远程自动模式且均无故障,才可执行起动命令;当

水泵机组正常运行并液控蝶阀全开状态 ≥ 60 s,而 10 kV 水泵机组配套的冷却水流量开关未开启,则发出异常报警信号,先关闭液控蝶阀再关闭水泵机组;液控蝶阀自收到开启命令后 150 s(时间可调整)内,未反馈全开信号,则自控系统判定液控蝶阀故障,先关闭液控蝶阀再关闭水泵机组,同时发出报警信号。

② 停止

现场或远程发出停止命令→先执行关闭液控蝶阀操作,同时变频器频率降频至 40 Hz(上位机根据权限可调)→液控蝶阀发出全关到位信号→执行关闭 10 kV 变频调速装置命令→待 10 kV 变频调速装置发出停止信号→关闭结束^[1]。

泵阀停止时自动化联动控制的条件:液控蝶阀在关闭时发生故障(未能正常关闭或关闭超时),立即发出故障报警,即刻关断液控蝶阀的液压回路,使其重锤落下,关闭液控蝶阀,与此同时触发 10 kV 中置柜跳闸命令。

③ 其他连锁

当 10 kV 或 0.4 kV 电源故障、水泵机组超温、水泵机组或阀门机械故障时,连锁触发 10 kV 中置柜跳闸,自控系统立即发出故障报警,即刻关断液控蝶阀的液压回路,使其重锤落下,关闭液控蝶阀^[1]。

(2) 出水压力 PID 控制

为实现水厂配水泵房外部配水管网压力恒定,设计一套 PID 控制算法,它可通过调节水泵机组的电源频率实现出水压力恒定。

PID 控制是根据自动化系统的误差,利用比例、积分、微分计算出调节控制量进行反馈控制的技术,PID 控制模型如图 3 所示。

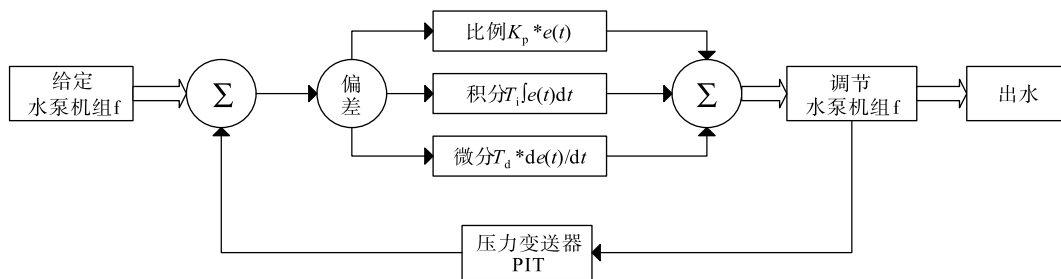


图 3 PID 控制模型图

PID 控制器由比例单元(P)、积分单元(I)、微分单元(D)组成^[4],其输入 $e(t)$ 与输出 $u(t)$ 的关系为:

$$u(t) = K_p [e(t) + 1/T_i \int e(t) dt + T_d * de(t)/dt]$$

式中: K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为

微分时间常数^[5]。

在实际的 PID 程序设计时,可先对 PID 参数进行经验值的设定,然后根据实际调节效果再进行修正。对于本次配水泵机组出口恒压力 PID 控制系统中,比例增益 K_p 取值 30 ~ 70%,积分时间 T_i 取值 0.4 ~ 3 min,微分时间 T_d (可根据需求设定)可取

0.1 ~ 5 min。

2.3.2 PLC 程序设计

配水泵房 PLC 控制站程序设计采用施耐德 EcoStruxure Control Expert 编程环境进行程序开发, 主要包含硬件组态、变量定义、功能块编制和程序编制。

(1) 硬件组态

创建项目工程并进行硬件配置, 根据系统架构、网络配置和实际 IO 点数等依次配置电源模块、CPU 模块、网络模块、IO 从站机架及其从站模块、IO 模块等。本次 CPU 模块为冗余配置, 因此需手动分别定义(拨码)双 CPU 模块为 A、B 站点, 同时 AI 模块选用了带 HART 协议, 机架需选用 BME 系列机架。

(2) 变量及功能块编制

在 EcoStruxure Control Expert 项目浏览器的“基本变量”处定义程序编制时所需要的中间变量, 包含符号名、数据类型和描述等; 对于 PLC 的 CPU、通讯及 IO 模块的设备 DDT 变量可以进行符号名及描述的定义, 通过对变量的定义使得编程及寻址较为便捷。

本次配水泵房的监控对象有仪表、电动阀门、水泵电机等, 为实现高效的编程设计, 对上述对象进行功能块编制。

① 模拟量仪表

以流量计为例, 流量计仪表至少具有 1 路模拟量输入信号表示瞬时流量值, 有的还具有 1 路开关量输入信号表示仪表故障信息, 重要计量流量计通常具备通讯接口输出累计流量值, 大多数流量计可以输出脉冲信号供 PLC 累计计算。流量计仪表输入转换程序可以实现模拟量输入物理值和实际仪表瞬时流量值数据的线性化转换、流量数据报警、二次线性化矫正、累计流量计算等功能, 下图 4 为流量计功能块、变量功能及 SCADA 画面示例。

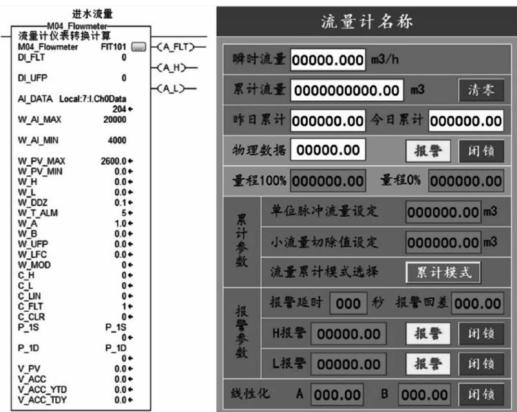


图 4 流量计功能块及 SCADA 画面实例图

② 电动阀门

此类设备利用控制驱动电机的正反转来开关阀门, 其自动控制接口一般包括“远程”、“全开”、“全关”、“故障”4 个开关量输入信号和“开阀控制”、“关阀控制”2 个开关量输出信号。部分设备还具有“开过扭矩”、“关过扭矩”等阀门故障输入信号或“开度反馈”模拟量输入信号。电动阀门类手动控制程序可以实现对电动开关阀门的远程手动控制和参数设置、故障诊断、数据显示等, 图 5 为电动阀门功能块、变量功能及 HMI 画面示例。

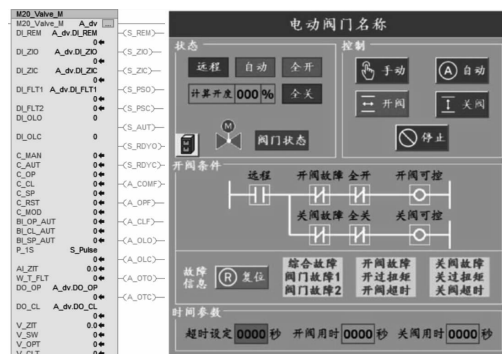


图 5 电动阀门功能块及 SCADA 画面实例图

③ 水泵电机

水泵电机自动控制接口一般包括“远程”、“运行”、“故障”3 个开关量输入信号和“控制命令”1 个开关量输出信号。部分设备还具有“超温”、“泄漏”等设备故障输入信号或“跳闸”、“过载”等电气故障输入信号。变频控制的设备还具有“频率反馈”和“频率设定”等模拟量信号。水泵电机类手动控制程序可以实现对正转变频或工频电机设备的远程手动控制和参数设置、故障诊断、运行条件诊断、数据显示等, 图 6 为水泵电机功能块、变量功能及 HMI 画面示例。

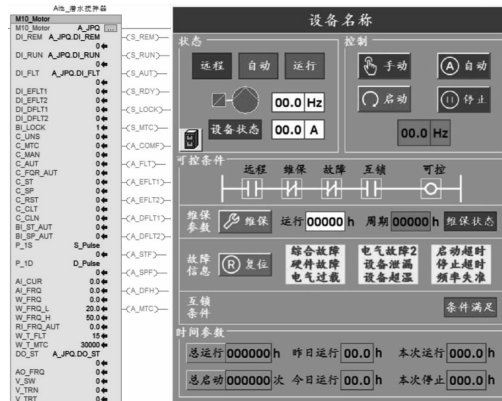


图 6 水泵电机功能块及 SCADA 画面实例图

(3) 程序编制

在 EcoStruxure Control Expert 项目浏览器的“程

序”的“逻辑”处新建 2 个程序段,分别为 MV_Con(泵阀联动控制程序)和 PIT_PID(出水压力 PID 控制程序),选择编程语言为 FBD,其他均为缺省设置。

下面结合控制策略,对配水泵房中泵阀联动及出水压力 PID 控制进行程序编制。

① 泵阀联动控制

结合 3.3.1 章节的控制策略编制泵阀联动控制程序,详见图 7。首先,对变频器、水泵电机和阀门进行数字类的功能块编制,对流量、压力和液位进行模拟量类的功能块编制。其次,对单组工艺段上的数字类及模拟量类被控对象分别进行统一的梳理及整合,最后在“MV_Con”主程序中进行泵阀联动控制的程序编制。

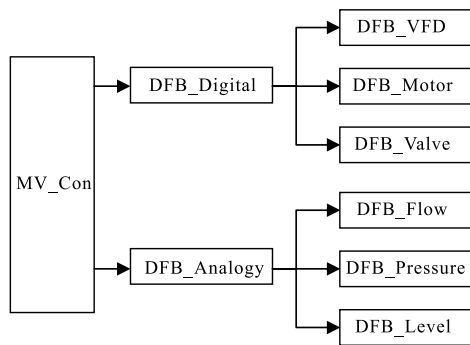


图 7 泵阀联动控制程序结构图

② 出水压力 PID 控制

采用 PID 算法控制配水泵房出口压力,在“PIT_PID”中编制控制程序,详见图 8 所示。其中 pid_sp: 压力设定值(可由上位机设置),pid_pv: 出厂水实际压力值;pid_gain: PID 的比例增益值(可由上位机设置),PID_Ti_s: PID 的微分值(可由上位机设置),PID_Td_s: PID 的积分值(可由上位机设置),pid_out_r: 实际输出的 PID 值,用于控制变频器调整压力。

2.3.3 SCADA 组态设计

本次水厂配水泵房 SCADA 监控系统基于 AVEVA System Platform 设计和编制的,它由 2 台操作员站和 1 台工程师站构成,可实现与 PLC 系统、高压变频器系统、液控蝶阀系统等信息的互通互联,并且具备设备实时监控功能、生产管理功能、报警管理功能、看板功能、历史趋势查询、报表功能等,实现了集中监控配水泵房生产过程及其状态。

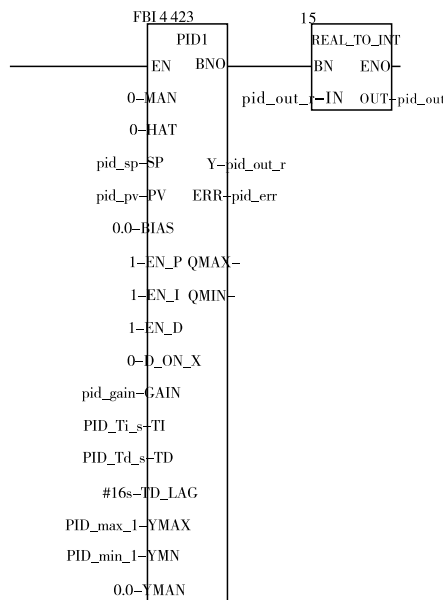


图 8 压力 PID 控制程序图

3 结语

配水泵房中自动控制系统的运行状况直接影响供水安全,对于大型水厂尤为凸显。由此,该文借鉴了成熟的自动控制系统架构,设置了冗余型上、下位机的硬件配置,提出了严谨细致的控制策略要求,设计了简洁而高效的软件程序,通过实践证明该自动控制系统稳定可靠^[6]。

该文为配水泵房的自动控制系统提供了一种解决方案,可供同行业建设、运营管理、设计、施工等人员参考。

参考文献:

- [1] 王胜利,胡田力.大型水厂 10 kV 水泵机组联动控制设计与实践[J].中国给水排水,2023,39(02):74-79.
- [2] 封帆.重钢 4#高炉易地大修计算机控制系统[D].重庆:重庆大学,2009.
- [3] 朱俊贤.基于 Wonderware 系统的 SCADA 在玻璃行业中的应用[J].中国设备工程,2021(03):94-96.
- [4] 陈洪辉.动态流变测试中的运动控制与测量技术开发[D].广州:华南理工大学,2020.
- [5] 刘瑜,郑明辉.基于 DSP 控制的弧焊电源的设计[J].电子设计工程,2017,25(21):96-99.
- [6] 张晓娟,李鹏飞.液压支架工作面自动化控制系统的设计实现[J].机械管理开发,2022,37(03):245-246+249.