

# Design of Multi-Channel Water Supply Automatic Switching Device Based on HART Protocol

LIU Feilong<sup>1</sup>, SUN Dongmei<sup>2\*</sup>

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

**Abstract:** In thermal power plants, the use of chemical analysis instruments to detect the concentration of sodium ions, silicates and phosphates in multi-channel water supply is of great significance to reducing the scaling and corrosion of thermal equipment. In high-performance STM32F103 processor environment, HART communication unit using AD5700 modem and AD5421 digital to analog converter, the paper designs a set of intelligent multi-channel water supply automatic switching device based on HART protocol and achieves software and hardware development, which effectively solves the automatic monitoring on 6 channel water supply problem under the condition of single channel instrument and has status display, history curve, HART data communication and other functions.

**Key words:** HART protocol; multi-channel water; automatic switch; STM32; AD5700; AD5421

EEACC: 7210A; 7320

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.041

## 基于 HART 协议的多路给水自动切换装置设计

刘飞龙<sup>1</sup>, 孙冬梅<sup>2\*</sup>

(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:** 在火力发电厂中, 使用化学分析仪表检测多通道给水中钠离子、硅酸根和磷酸根的浓度, 对减少热力设备的结垢和腐蚀具有重要意义。装置在高性能 STM32F103 处理器的环境下, 采用 AD5700 调制解调器和 AD5421 数模转换器的 HART 通信单元, 设计了一套基于 HART 协议的智能多路给水自动切换装置并进行软硬件开发, 有效地解决了在单通道仪表上自动监测 6 通道给水的问题, 具有状态显示、历史曲线、HART 数据通讯等功能。

**关键词:** HART 协议; 多路给水; 自动切换; STM32; AD5700; AD5421

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0213-05

目前, 国内的化学分析仪表在测量精度和稳定性上与国外的化学分析仪表存在一定的差距, 因此国内大规模的火力发电厂选择采用国外的仪表, 随之而来的是高昂的成本问题<sup>[1-2]</sup>。本文设计了一套多路给水自动切换装置, 在需要多个化学分析仪表检测多路样水的火力发电厂, 只使用一个化学分析仪表和给水自动切换装置便可在远程终端监测多路给水中的水质。由于模拟仪表大量使用、无线传输在传输过程中的不可靠性以及纯数字总线存在安全隐患<sup>[3]</sup>, 此装置通过 HART 协议可以充分利用现有的仪器设备及线路在传输模拟信号的同时传输数字信号。因此, 基于 HART 协议的多路给水自动切换装置在保证测量精度、数据传输准确度和稳定性的前提下, 有效地节省了仪表费用、配件费用和维护费用, 对火力发电厂多路给水监测具有重要的意义和价值。

### 1 系统总体方案设计

智能多路给水自动切换装置用于单通道化学分析仪表的通道扩展, 定时自动切换通道进行火力发电厂多路给水的水质检测。如图 1 所示, 用户可根据所采用的化学分析仪表使用薄膜按键搭配 LCD 显示屏进行通道使能、单位、量程、通道循环时间  $T_1$  和采集延时时间  $T_2$  等参数的设置。主控制器每隔  $T_1$  时间通过开关电磁阀的方式依次切换到下一路已使能的给水通道, 化学分析仪表测量当前通道的 4 mA ~ 20 mA 模拟信号经过 AD 转换后传输到主控制器, 主控制器进行数据处理后进行数据显示、数据存储和 HART 数据通讯。在通道刚切换时, 根据设置的  $T_2$  时间延迟接收化学分析仪表的模拟量信号, 以避免混合样品的交叉影响。当有样水断流、电流

信号低于 3.5 mA 或超过 20.5 mA 等故障时显示界面在呈现警告信息的同时通过干接点进行报警输出,并自动切换到下一路。此装置输出的 4 mA~20 mA 模拟信号叠加了 FSK(频移键控)信号支持 HART 协议<sup>[4-5]</sup>,远程监控中心的上位机或手持器等主设备可向自动切换装置发布符合 HART 协议读取命令和设定命令,自动切换装置根据接收到的命令发送所需数据,进行远程显示和统计<sup>[6]</sup>。

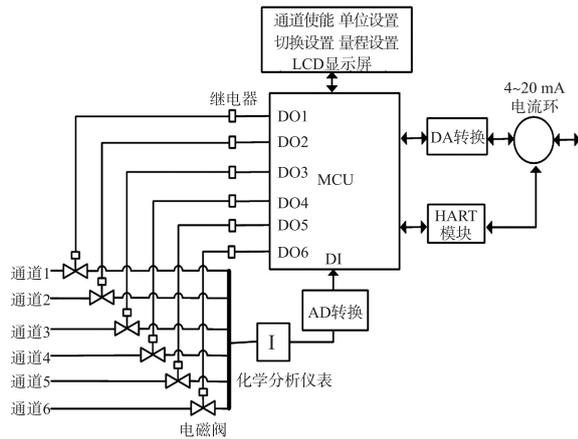


图 1 系统总体设计框图

## 2 硬件设计

### 2.1 总体硬件设计

多路给水自动切换装置硬件设计采用模块化设计如图 2 所示,总体硬件设计主要包括数据采集模块、人机交互模块、HART 通信模块 3 部分。装置的主控单元采用基于 ARM Cortex-M 内核的 STM32F103RBT6 处理器,其具有处理能力强、外设丰富、开发速度快等特点,符合装置对处理效率、运算精度、多路输出和低功耗等需求。数据采集模块中,通过控制电磁阀的开关使一路给水流入化学分析仪表,仪表输出的 4 mA~20 mA 的模拟电流信号通过电阻转换为电压信号,由于输入的模拟信号为 1%  $\mu\text{A}$  等级的微弱信号,因此采用精度为 16 位的 A/D 转换器 AD7705 将电压信号转换为数字信号并传输到微控制器。人机交互模块中的按键、串口屏、SD 卡存储器可实现通道使能、量程设置、单位设置、切换设置和装置校准等交互功能,也

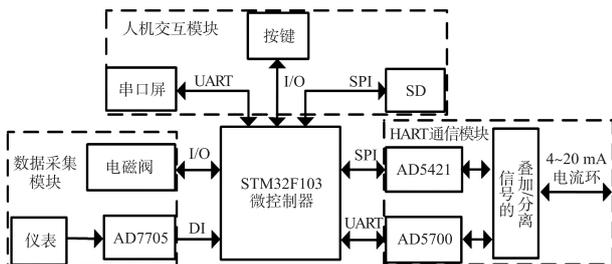


图 2 件总体框图

可实现多通道实时监测值和历史检测值的显示。HART 通信模块主要包括 SPI 接口的 AD5421 和 UART 接口的 AD5700 HART 调制解调器,可实现此装置与支持 HART 协议的远程上位机和移动手操器进行数据通讯。

### 2.2 HART 通信模块设计

可寻址远程传感器高速通道(HART)协议通过叠加正弦调制波的方式实现 4 mA~20 mA 模拟信号和数字信号同时传输,此协议得到工业界的深度认可且在工业控制领域应用广泛<sup>[7]</sup>。HART 协议物理层规定在 4 mA~20 mA 的模拟信号上叠加互不干扰的 FSK 信号,如图 3 所示,FSK 信号是由两个不同频率的载波在基带信号的控制下组合而成,其变化幅度是  $\pm 0.5$  mA 但平均值为零,所以不会影响模拟信号的传输<sup>[8]</sup>。FSK 基于载波频率的变化传输数字信号,频率为 2 200 Hz 的信号代表数字信号“0”,用频率为 1 200 Hz 的信号代表数字信号“1”<sup>[9]</sup>。此装置采用高性能的 16 位数模转换器 AD5421 接收来自 STM32 的数字信号并将其转换为 4 mA~20 mA 的模拟信号,采用 ADI 公司研制的 AD5700 芯片作为 HART 调制解调器,其集成了符合 Bell202 标准的生成信号电路、滤波电路、调制器和解调器,具有低功耗、集成度高和性能优等特点<sup>[10]</sup>。

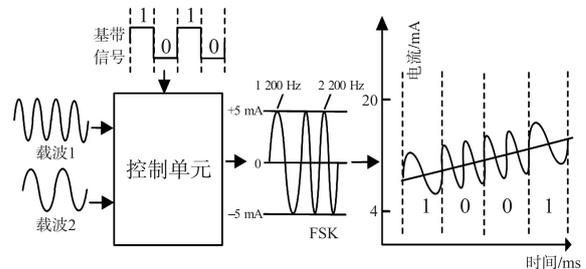


图 3 HART 协议原理图

TSSOP 封装的 AD5421 硬件电路图如图 4 所示,其中 SDO、SCLK、SYNC 和 SDIN 引脚分别与控

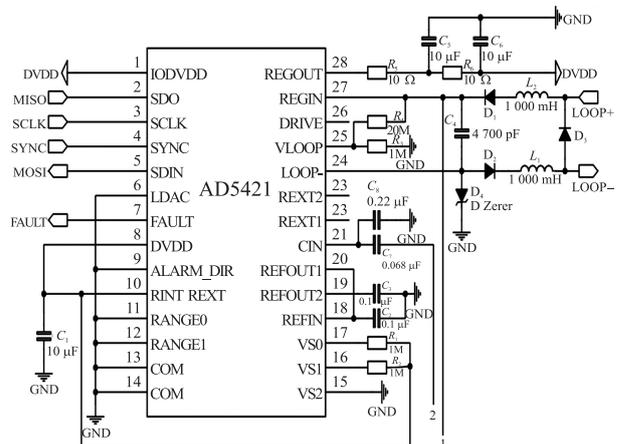


图 4 AD5421 硬件电路图

制器的 MISO、SCLK、SYNC 和 MOSI 引脚相连实现 SPI 通信。控制器通过检测 FAULT 引脚是否为高电平判断故障的存在性。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_5$ 、和  $C_6$  为去耦合电容至 COM。 $CIN$  引脚通过  $C_8$  电容连接到 COM, 主要作用是降低环路电流的变化率,  $CIN$  引脚与  $C_7$  电容耦合后连接到 AD5700 用于接收 HART FSK 输入信号。引脚 Loop+和 Loop-分别和 4 mA ~ 20 mA 电流环的正负极相连接。电阻  $R_4$  与  $R_3$  形成了电阻分压器与 VLOOP 相连接, 实现对环路电源电压的监控。

低功耗 HART 调制解调器 AD5700 的硬件电路图如图 5 所示, 其中 TXD(网络标号为 HART\_TXD) 和 RXD 引脚(网络标号为 HART\_RXD) 分别与微控制器 UART3 的 TXD 和 RXD 引脚相连实现 UART 通信。通过 XTAL\_EN 引脚接地使能晶振电路, XTAL1 和 XTAL2 引脚实现 3.686 4 MHz 外部晶振的连接, CLK\_CFG0、CLK\_CFG1 和 CLKOUT 实现时钟配置。ADC\_IP 引脚经过外部 RC 带通滤波器连接到 AD5421 的 LOOP+端。当此装置需要将采集到的化学分析仪表测量值传输到监控中心时, 首先将 RTS 引脚置为低电平, 使能调制器并禁用解调器, 表示发送状态, 然后将微控制器通过串口 TXD 引脚传输的数字信号, 通过使能的调制器转换为 2 200 Hz 和 1 200 Hz 的正弦波信号<sup>[11]</sup>, 此信号经过缓冲和整形后通过 HART\_OUT 引脚叠加到 4 mA ~ 20 mA 模拟信号上, 最终传输到监控中心的上位机或移动手操器<sup>[12]</sup>。解调器使能状态下, 当上位机或手操器发送命令到此装置时, CD 引脚置为高电平表示检测到载波, 数据首先通过滤波器进行滤波, 然后通过解调器将正弦信号转化为数字信号, 通过串口 RXD 引脚传输到微控制器进行处理。

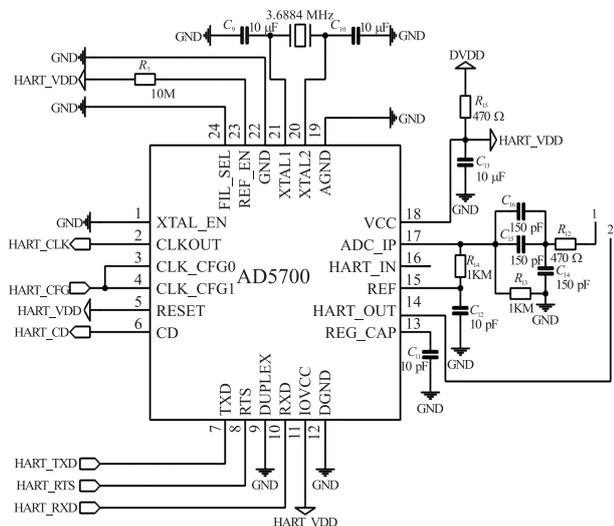


图 5 AD5700 硬件电路图

### 3 软件设计

多路给水自动切换装置软件按照功能可分为主监控程序、测控程序和 HART 通信程序三部分。主监控程序是自动切换装置软件部分的核心, 主要包括各个模块的初始化、内存中各个参数的自检、键盘中断和串口屏显示子程序。测控程序主要完成使能通道的循环开关以及数据的接收、处理和显示。如图 6 所示, 系统初始化程序中已完成使能通道、循环时间、延迟时间、单位和量程等参数设置, 测控程序首先开启第一个使能通道, 然后判断化学分析仪表检测当前通道的 4 mA ~ 20 mA 模拟信号输入值是否正常, 如果输入不正常立刻进行报警显示并关闭当前通道和开启下一个使能通道。正常情况下不断采样仪表输入值进行处理和显示, 同时不断判断输入值的正确性。如果各通道之间的循环时间  $T_1$  到达, 则关闭当前通道并开启下一个使能的通道, 为避免混合样水的交叉影响, 会进行  $T_2$  时间的延时后再进行下一个通道的测量与显示, 这样进行不断循环。当前给水通道的数据显示及模拟量和数据量的输出在切换到其他通道时会保持切换前的状态, 直至下一次测量该通道时更新。

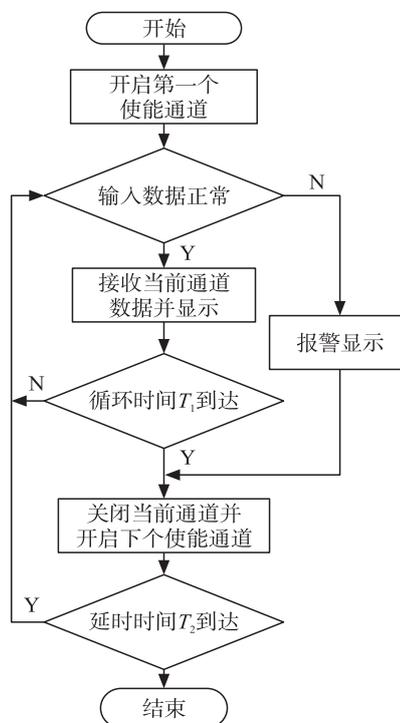


图 6 测控程序流程图

HART 通信程序是自动切换装置软件设计的关键, 在 HART 通信协议中作为从设备的多路给水自动切换装置, 主要完成主设备命令的接收和应答, 以及按照主设备的命令反馈相关数据<sup>[13]</sup>。为了能够

及时接收到上位机或手操器的命令且不影响主监控程序的运行,主要依靠串口中断实现数据的发送和接收<sup>[14]</sup>。如图 7 所示,首先通过接收状态标志位判断中断程序属于接收中断程序还是发送中断程序。接收中断程序主要是在奇偶校验有效、载波信号有效、当前为空闲状态的前提下,对所接收到命令的命令号进行相应的处理,比如单位设置、通道使能设置、切换时间设置等,然后按照一定的格式形成应答帧放到发送缓冲区中等待发送。如果接收标志不为 1,便进入数据发送中断程序,首先更改 AD5700 为调制器切换到发送状态,应答帧数据发送完成后,将当前状态的标志位更改为空闲状态,等待下一条命令的接收。

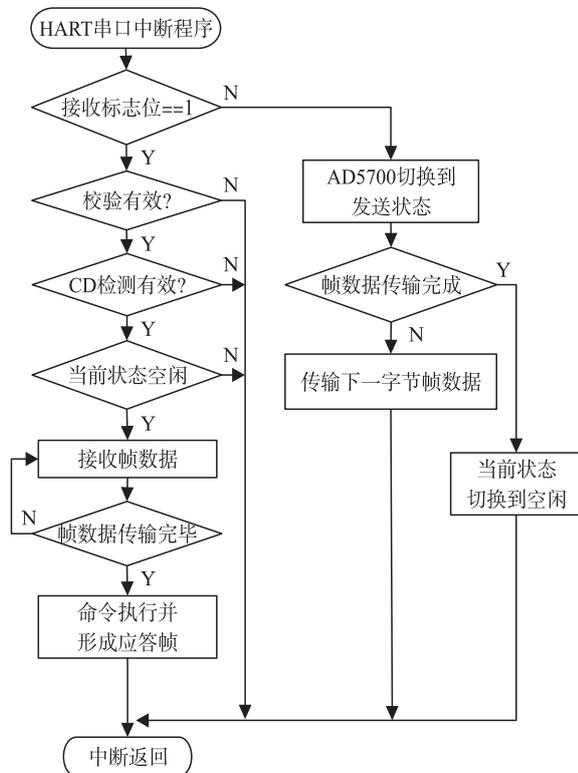


图 7 串口中断程序流程图

## 4 性能检验

在完成多路给水自动切换装置硬件和软件的设计和开发后,对其性能进行测试和分析,从而判断装置是否满足设计功能的需求。实验准备了 6 路样水,样水钠离子浓度分别为 1 ppb、2 ppb、10 ppb、100 ppb、1 000 ppb、5 000 ppb (1 ppb =  $10^{-9}$ , 即十亿分之一) 并分别接到通道 1 至通道 6,多路给水自动切换装置搭配在 0.01 ppb 至 2 ppb 误差率为  $\pm 0.1$  ppb,在 2 ppb 至 10 000 ppb 误差率为  $\pm 3\%$  的国产单通道钠表进行数据采集与显示,并基于 HART 协议与上位机和手操器进行通讯。如表 1 所示,多路样水自动

切换装置的输入电流值和输出电流值的误差值在 1‰ mA 之内,满足工艺要求。从理论电流值和输入电流值可以看出 LCD 串口屏显示值与理论值的偏差主要由单通道钠表产生,但是此偏差在单通道钠表的误差范围之内,而且经测试此装置能够很好地支持采用 HART 通信软件的上位机和手操器的所有命令。

表 1 装置测量数据

通道	理论值 /ppb	显示值 /ppb	偏差	理论电流值/mA	输入电流值/mA	输出电流值/mA
CH1	1.00	0.95	0.05 ppb	4.003 2	4.003 0	4.002 9
CH2	2.00	1.94	0.06 ppb	4.006 4	4.006 2	4.005 9
CH3	10.00	10.14	1.40%	4.032 0	4.032 4	4.032 2
CH4	100.00	102.32	2.32%	4.320 0	4.327 4	4.327 1
CH5	1 000.00	983.67	1.63%	7.200 0	7.147 7	7.147 2
CH6	5 000.00	4 933.67	1.32%	20.00 0	19.787 7	19.788 0

## 5 结论

多路给水自动切换装置搭配单通道化学分析仪表可以精确地测量多路给水中化学离子的含量。实验室的测试结果和合作厂商的反馈意见都表明此装置具有低成本、使用方便、稳定、国产化等特点,能够很好地满足市场的需求。

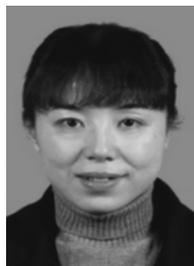
## 参考文献:

- [1] 唐浩楠. 基于 STM32 和  $\mu\text{C}/\text{os-III}$  的在线痕量钠离子分析仪的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019.
- [2] 钟红生, 李静林, 杨平. ORION 钠表碱化装置的国产化探索[J]. 仪器仪表与分析监测, 2018(4): 25-28.
- [3] 孙连开. 在线化学分析仪表在火力发电企业中的应用[J]. 中国盐业, 2016(18): 66-70.
- [4] 田俊伟, 王小鹏, 孙志成. 基于 HART 协议的核辐射法液位测量控制系统设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 72-74.
- [5] 彭鹏. 基于 HART 协议压力变送器的设计与实现[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [6] 刘国锋. 高速 HART 通信控制器设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [7] 薛静云. 基于 HART 协议的智能压力变送器的研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.
- [8] Li Y, Wang Y, Ma C. Design of Communication System in Intelligent Instrument Based on HART Protocol[C]//IEEE International Conference on Mec-Hatronics & Automation. Beijing China, IEEE, 2015: 351-356.
- [9] Guochen A, Zhiyong M, Hongtao M, et al. Design of Intelligent Transmitter Based on HART Protocol[C]//International Conference on Intelligent Computation Technology & Automation. Changsha China, IEEE, 2010: 40-43.
- [10] 黄绍锋, 尹俭, 曹毅杰. 基于智能流量仪表的 HART 通信模块设计[J]. 仪表技术, 2015(9): 27-30.

- [11] Mitja Kolenc, Peter Nemček, Christoph Gutsch, et al. Performance Evaluation of a Virtual Power Plant Communication System Providing Ancillary Services [J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 149:46-54.
- [12] 崔龙. 基于 HART 总线的气体报警仪的硬件实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [13] 张燕, 沈昱明. 基于 AD5700 的 HART 协议通信接口设计[J]. *信息技术*, 2015(1):188-190.
- [14] 万彪. 基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器的开发[J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(3):248-251.



刘飞龙(1994—),男,汉族,江苏徐州,南京工业大学,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统软硬件开发,443199460@qq.com;



孙冬梅(1975—),女,汉族,安徽合肥,南京工业大学,博士后,副教授,主要研究方向为嵌入式系统及虚拟仪器的软件开发,17164830@qq.com。