

基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器的开发

万彪

(武汉职业技术学院 计算机学院, 武汉 430074)

摘要: 以 HART 协议为通信标准, 提出了系统的总体方案设计, 通过对 HART 协议的理解与掌握, 详细的给出了基于涡轮流量变送器的软硬件设计; 硬件设计部分包括涡轮脉冲采集模块, 微处理器模块, HART 通信模块和 4~20 mA 环路电流模块 4 个模块, 其中 HART 通信模块采用 HART 调制解调器芯片 AD5700 实现, 4~20 mA 环路电流模块采用环路供电专用芯片 AD5421 实现, 二者共同构成了 HART 协议的物理层接口, 文章硬件电路所采用的都是低功耗芯片, 用纯硬件的方法解决了 HART 总线设备的低功耗难点; 软件设计部分包括主监控程序、变送计算程序和 HART 协议通信程序 3 个程序模块, 重点讲述了 HART 协议的数据链路层和应用层的实现过程; 最后文章对涡轮流量变送器的二线制传输功能和 HART 通信功能进行了测试; 测试结果表明, 变送器的设计要求基本实现了。

关键词: HART 协议; 涡轮流量变送器; 二线制

Development of Two Wire System Turbine Flow Transmitter Based on HART Protocol

Wan Biao

(Wuhan Polytechnic Computer Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Taking HART protocol as the communication standard, the overall scheme design of the system is proposed. Through the understanding and grasp of HART protocol, the detailed hardware and software design based on turbine flow transmitter is presented. Hardware design includes the four modules of turbine pulse acquisition module, microprocessor module, HART communication module and 4~20 mA loop current module. Among them, HART communication module adopts HART modem chip AD5700, and 4~20 mA loop current module adopts loop power supply special chip AD5421. The two together constitute the physical layer interface of HART protocol. In this paper, all hardware circuits adopt low power consumption chips. A pure hardware method is used to solve the difficulty of low power consumption of HART bus equipment. Software design includes three program modules: main monitoring program, transmission calculation program and HART protocol communication program. It focuses on the implementation process of the data link layer and application layer of HART protocol. Finally, the two wire system transfer function and HART communication function of the turbine flow transmitter are tested. The test results show that the transmitter design requirements are basically achieved.

Keywords: HART protocol; turbine flow transmitter; two wire system

0 引言

现场总线技术是近年来工业控制领域最热门的技术之一, 作为一种新型的控制技术, 它具有开放性、分散化、可互操作、低成本等诸多优势, 因此引起了各大仪表厂商的高度重视, 纷纷推出了具备现场总线通信能力的变送器, 其中, 为满足从模拟到全数字的过渡应运而生的 HART 通信协议得到了广泛应用。涡轮流量变送器在流量测量中应用广泛, 然而目前市面上的涡轮流量变送器很少有带 HART 协议的, 二线制的也不多, 既是二线制的仪表又同时支持 HART 协议的更是寥寥无几。因此本文就基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器做了研究, 将 HART 协议应用于涡轮流量变送器, 并利用 HART 网络为变送器供电实现其二线制传输。

1 系统总体方案设计

HART (可寻址远程传感器高速通道) 通信协议是为工业

过程测量和控制应用而设计, 是美国罗斯蒙特公司 (ROSEMOUNT) 公司于 1986 年推出的一种用于现场智能仪表和控制室设备之间的通信协议, 主要用于智能化压力、温度、流量、密度及分析仪表与控制系统间的数据传输。由于采用了可以从模拟信号中去除数字信号的标准过滤技术, 数字信号的存在并不会影响模拟信号的输出。

本文所设计的智能涡轮流量变送器仍是以传统变送器的硬件电路为基础的, 比如传感器电路、抗干扰电路等, 只不过它的优势在于引入了微处理器和 HART 总线技术。引入微处理器, 可通过软件编码来实现以及优化传感器的诸多功能, 而且可以减少外围电路元件, 从而使整个系统功耗更低。引入 HART 总线技术, 利用 HART 总线供电的特征实现系统的二线制传输, 以及利用 HART 总线特有的同时支持模拟信号和数字信号传输, 来实现多变量的传输。

传统设计智能仪表都是采取模块化思想来设计整体电路的, 这种设计方法简单易懂结构明朗。本系统也采取模块化设计方法, 主要分为 4 个模块, 分别是涡轮脉冲采集模块、微处理器模块、HART 通信模块和 4~20 mA 环路电流模块。基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器的模块结构如图 1 所示。

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2016-11-08。

作者简介: 万彪 (1975-), 男, 湖北荆门人, 硕士, 武汉职业技术学院计算机学院, 副教授, 主要从事计算机应用方向的研究。

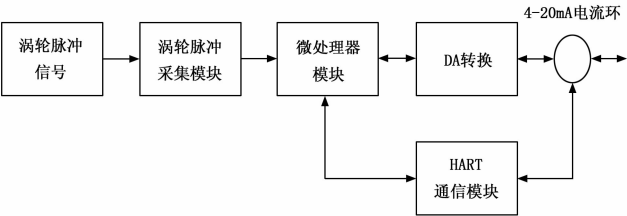


图 1 基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器的模块结构图

涡轮传感器输出的脉冲信号经涡轮脉冲采集模块进行处理之后，送入到微处理器模块进行流量积算等，然后输出对应的流量以及生产过程中相应的过程量如仪表系数等，然后通过 HART 通信模块调制成 0.5 mA 的 HART 频率信号，输送到 4~20 mA 回路上。DA 转换部分的作用是实现整个系统的二线制供电。

整个系统从 4~20 mA 电流环上得到供能，实现二线制传输。然而，4~20 mA 电流环供能有限，整个变送器系统所耗电电流加上 0.5 mA 的 HART 正弦调制波信号电流不允许超过 4 mA，即整个电路系统功耗必须在 3.5 mA 以下才能保证正常工作，因此在设计时所选的电路元器件都选用了低功耗的器件。系统具体硬件框图如图 2 所示。

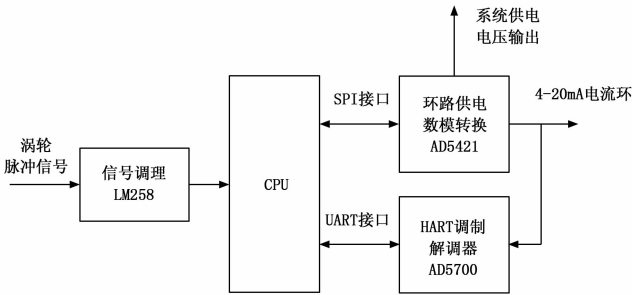


图 2 系统具体硬件框图

2 关键模块设计

2.1 涡轮脉冲采集模块

霍尔开关就是利用霍尔效应原理，再加以集成封装等工艺而制作成的一种磁感应式电子开关，便捷的把磁输入信号转化成开关量电信号输出。根据输出的电压脉冲，便可实现对旋转体各个物理量如转速、角速度等的测量了。在转轴上再固定一个叶轮，用液体或者气体等流体去推动叶轮让转轴转动，由此便构成了一个涡轮流量传感器。传感器输出的电压脉冲与待测流量成正比例关系，微处理器只需实时的捕获脉冲的频率就可以计算出流过涡轮的液体的实时流量了。

涡轮流量传感器输出的电压脉冲信号微弱，微处理器要实现对它的捕获处理工作，必须要经过信号的放大滤波处理。由此本设计选用了双运放集成器件 LM258，它的内部包含了两个完全相同的运算放大器，支持 3~32 V 单电源供电。如图 3 所示为涡轮脉冲采集电路，涡轮流量脉冲信号首先经过 RC 滤波去除信号中的干扰成分，然后进行合适的放大，再通过比较电路变换成方波信号送入微处理器进行频率计数处理和流量计算。

2.2 HART 通信模块

HART 通信模块是根据 HART 通信协议物理层的设计要

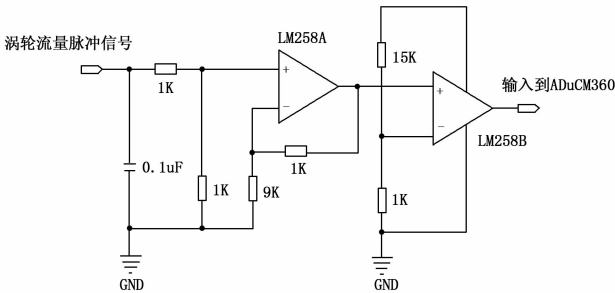


图 3 涡轮脉冲采集电路

求而设计的硬件电路，实际上就是 HART 通信协议物理层的硬件实现。它主要由 HART 调制解调器、调制器出口电路、解调器入口电路、信号整形电路、滤波电路和时钟电路组成。AD5700 是亚德诺半导体公司推出的一种低功耗 FSK 半双工调制解调器，符合 HART 通信协议物理层要求，性能优良，其内部集成了符合 BELL202 标准的解调器、调制器、滤波电路、信号检测电路、信号整形等电路，所需外部元件极少，且最大电源功耗仅为 115 μ A，是低功耗环路供电型应用的不错选择。

因为 AD5700 接收和发送数据采用的是半双工的异步串行通信方式，所以微处理器 ADuCM360 是与它进行数字通信是通过 UART 实现的，利用 SIN 脚（UART 串行输入）和 SOUT 脚（UART 串行输出）进行串行通信。ADuCM360 与 AD5700 的接线如图 4 所示。图中，AD5700 与 ADuCM360 之间有四根连线：ADuCM360 的任意两个 I/O 口（选用的是 P0.4、P0.5）连接 AD5700 的 $\overline{RTS}$ 脚和 CD 脚，控制调制解调器的使能和载波检测。ADuCM360 的串口输入端 SIN 脚连接 AD5700 的调制器数据输入端 TXD，控制发送数据，ADuCM360 的串口输出端 SOUT 连接 AD5700 的解调器数据输出端 RXD，用于接收数据。

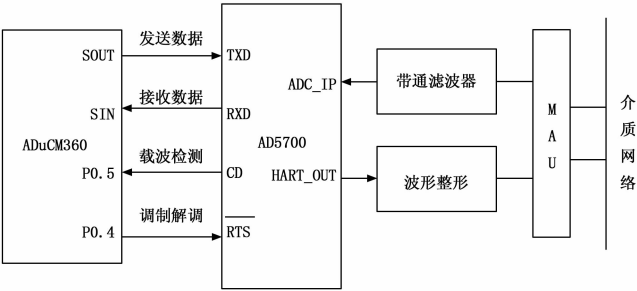


图 4 AD5700 与微处理器接口示意图

微处理器发出的控制信号送至 $\overline{RTS}$ 端。假如 $\overline{RTS}$ 为逻辑低电平，调制器被使能，发送的数据被调制成正弦波信号，在内部进行缓冲然后从 HART_OUT 引脚上输出。此时，解调器被禁用，以节省电源功耗。假如 $\overline{RTS}$ 为逻辑高电平，解调器被使能，从 HART_IN 脚上来的 FSK 信号数据被解调，输出至 RXD 脚上。此时，调制器被禁用，以节省电源功耗。解调器使能状态下，载波检测引脚 CD 检测到有效载波，被置位，变为高电平，开始输入解调数据。

HART 信号的调制过程为：微处理器向上位机发送数字信号时，首先经过微处理器的串口输出引脚 SOUT 将数字信号传送到 AD5700 的 TXD 调制器输入信号引脚，然后调制器

将数字信号 0 或 1 调制为 2.2 kHz 或 1.2 kHz 的正弦波，从 AD5700 的 HART_OUTHART 信号输出引脚输出，最后送至波形整形输出电路上，由此完成一次 HART 信号的调制过程。图 5 为解调过程波形。

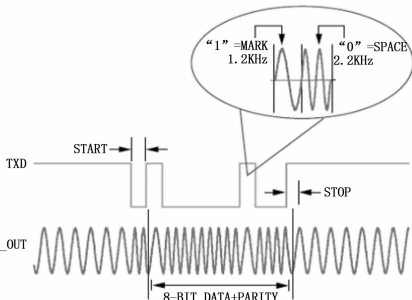


图 5 调制过程波形

HART 信号的解调过程为：外部带通滤波器输出的 FSK 信号从 ADC_IP 脚进入 AD5700 后，解调器将信号中的 2.2 kHz 解调为数字 0，将 1.2 kHz 解调为数字 1，经解调的数字信号从 AD5700 的 RXD 引脚输出，通过微处理器的串口输入引脚 SIN 进入微处理器，微处理器对接收到的数据进行分析 and 判断并做出相应的响应，由此完成一次 HART 信号的解调过程。图 6 为解调过程波形。

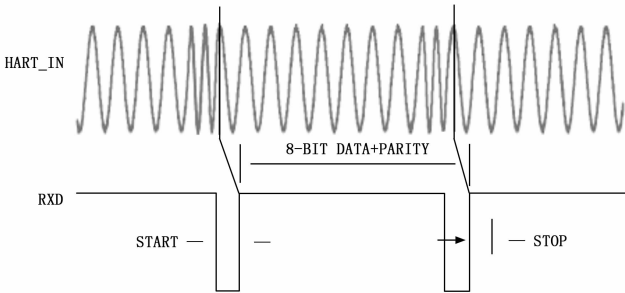


图 6 解调过程波形

2.3 4~20 mA 环路电流模块

在设计智能变送器硬件电路过程中，既要满足模拟信号 4~20 mA 的电流输出，又要考虑到整个变送器系统的低功耗要求。一般而言，有两种方法可实现输出电流控制。第一种方法是采用 D/A 转换芯片，模拟电路通过 D/A 转换芯片输出的期望电压信号实现对回路电流输出的控制。第二种方法是采用电流输出控制集成芯片，如 AD421 等。若采用第一种方法，外围电路必会使用一些分立的电容电阻等元器件，这会对整个系统的可靠性造成影响，并且带来误差。第二种方法中，采用电流输出控制集成芯片不仅可以提高电流精度，还可以降低温度漂移。对两种输出电流控制方法进行比较分析，并对 D/A 各个性能指标进行仔细评估之后，本设计选用的是美国 AnalogDevices 公司生产的一款数模转换器 AD5421。它的供电是由 4~20 mA 电流环路提供，而且可以为其他器件供电，不需要使用额外的分立电源，

符合本文的二线制设计要求。

AD5421 支持 3 种环路输出电流范围，如表 1 所示，可通过设置 RANGE1、RANGE0 引脚的状态来进行选择。本设计将 RANGE1、RANGE0 引脚与 COM 引脚相连，选择 4 mA 到 20 mA 的环路电流范围。

表 1 设置环路电流范围

RANGE1 引脚	RANGE0 引脚	环路电流范围
COM	COM	4 mA 至 20 mA
COM	DVDD	3.8 mA 至 21 mA
DVDD	COM	3.2 A 至 24 mA
DVDD	DVDD	3.8mA 至 21mA

如图 7 所示，AD5421 经过简单的二极管保护、电感稳流后直接输出 4~20 mA 电流，LOOP+、LOOP- 分别接 4~20 mA 电流环的正负。DVDD 为 AD5421 对外部提供的 3.3 V 供电电压。

2.4 二线制低功耗的实现

由于变送器二线制的设计要求，整个系统的功耗必须小于 3.5 mA，本文是采用纯硬件的方法来解决低功耗问题的。整个硬件电路采用的芯片都是高集成、低功耗的，外围电路所需元器件也很少。本文硬件系统使用了四块主芯片 LM258、ADuCM360、AD5421 和 AD5700，它们的功耗如表 2 所示。

表 2 硬件电路功耗

芯片型号	LM258	ADuCM360	AD5421	AD5700
最大消耗电流	500 μ A	1 mA	0.3 mA	115 μ A

可知，整个硬件电路中，除去外围少量的电阻电容的功耗之外，其他器件的总功耗最大值为 500 uA+1 mA+0.3 mA+115 uA=1.915 mA，小于 3.5 mA，完全符合二线制的低功耗设计要求，而且还有 1.5 mA 的裕量可供后续扩展其他芯片使用。

3 软件设计

基于 HART 协议的二线制涡轮流量变送器的软件系统按其功能分为 3 个模块：主监控程序、变送计算程序、HART 通信程序。主监控程序是整个软件系统的核心，初始化各个子程序，并调度各个子程序的运行。变送计算程序主要是对采集来的涡轮流量的方波信号进行频率的计算进而计算出待测流量。HART 通信程序是本系统软件设计的重要部分，也是主

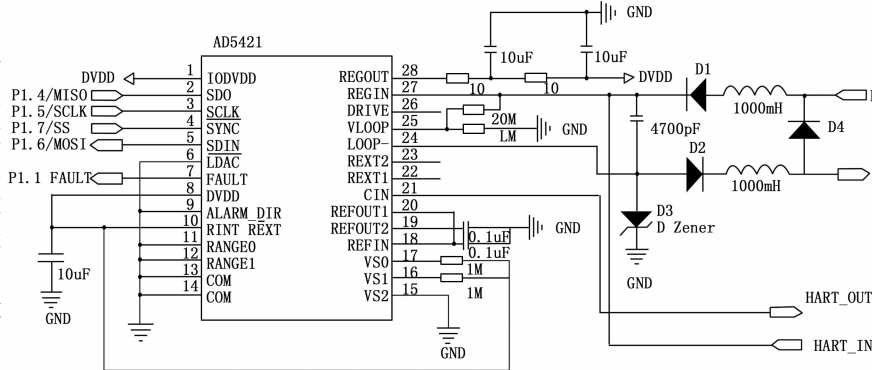


图 7 AD5421 电流输出电路及外围电路

体部分，将涡轮流量变送器的运行状态信息传至上位机，实现了上位机和变送器的实时数据通信，它实际上是 HART 通信协议的数据链路层和应用层的具体实现。软件体系组成框图如图 8 所示。

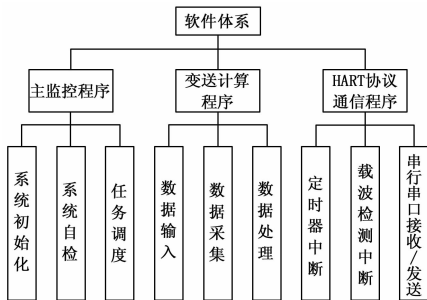


图 8 软件体系组成框图

变送计算程序包括对 LM258 所输入的方波信号的采样，频率计算和流量计算。本设计是采用中断方式实现的，由 5 ms 定时器触发。根据单位时间内采集到的脉冲个数计算出频率。根据频率与流量的正比例关系，由涡轮流量计算公式即可计算出对应的流量。

通信软件的主要功能是，现场仪表通过现场总线将其控制信息、运行状态信息等传到监控计算机，由安装在计算机内的 HART 协议的设备管理软件来完成计算、组态、故障诊断、监视等功能。HART 协议通信程序是基于 HART 协议二线制涡轮流量变送器整个程序设计的重点部分，是 HART 通信协议数据链路层和应用层的软件实现，同时变送器与上位机的互操作性也在此得到了实现。

HART 通信方式属于半双工方式，具体而言，HART 通信为主从方式，所以，在 HART 通信过程中，涡轮流量变送器作为从设备，一般情况下（突发模式除外），只有在接收到主设备（如上位机或者手操器）发送来的命令之后才会作出应答。为了保证对主设备发送来的命令的实时响应，同时又不干扰主监控程序的正常运行造成影响，HART 协议通信程序采用中断方式实现，主要由 3 个中断服务子程序组成：定时器 T1 的中断子程序、外部中断 1（INT1）的载波检测中断子程序和串行口接收/发送服务子程序。

4 功能测试

搭建硬件测试平台，接线图如图 9 所示，采用直流 24 V 电压供电，采样电阻 RL 串接于 4~20 mA 回路中，将电流信号和 HART 信号转换为电压信号，通过 RS232HART 转换器与上位机通信。此处的采样电阻取值要求在 250 Ω 到 1 000 Ω 之间，本设计中采用的是 300 Ω 阻值的电阻，因为取值太大的话可能会影响环路电流。此处的 RS232HART 转换器采用的是威盛公司生产的 ESH232U 型号的 HART 转换器，它具有与 PC 兼容的标准 USB—A 型接口，可以通过计算机的 USB 接口或者 RS232 串口发送、接收 HART 命令。

首先测试 HART 通信的接口是否满足其协议物理层要求，数据链路层是否搭建正确，以及整个二线制系统能否正常运行。采用一个第三方的 HART 接口测试软件来进行测试。测试结果即界面中的“Status”项显示测试通过，并检测到只连接了一个从设备。

然后对 HART 协议应用层进行测试。使用的是串口调试

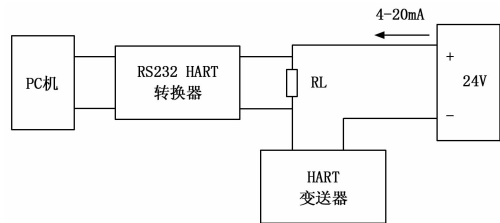


图 9 HART 变送器接线图

助手软件，它能够显示出 PC 机端与下位机端的数据交换过程。打开串口调试助手，选定对应的 COM 端口及波特率（1 200 bps），设置校验位、数据位、停止位等数据格式，接收区选择十六进制显示，发送区选择十六进制发送，最后打开串口，同时接通 24 V 电源，发送相关命令。

比如，发送的命令 0 的序文：FFFFFFFFF0280000082，其中 5 个 FF 是前导码，定界符 02 表示是短帧数据，80 是从设备地址，00 代表的是 HART 命令 0，00 是数据字节，最后 82 是校验字节。接收数据区返回了下位机端即变送器的响应数据，所返回的 HART 响应帧为：FFFFFFFFF068000180001FE04040507010208000000000050-40000000004000168，其中前 5 个 FF 是前导码；定界符 06 表示下位机传上来的是短帧数据；80 表示地址 0；00 代表的是 HART 命令 0；18 表示数据段字节数，18 转化为十进制是 24，表示在它和校验字节 68 之间有 24 个字节数据；0001 是响应码字节，第一个字节为 0 表示通讯是成功的，反馈了正确的命令信息。040001 表示这台设备的序号。

综上测试说明 HART 通信成功，基本实现了变送器的 HART 通信以及二线制传输功能。

5 结束语

本文以涡轮流量变送器为研究对象，从传统仪表的四线制这一缺陷出发提出了二线制的改进思想，然后利用 HART 总线技术既支持总线供电又向前兼容现有仪表这一特征提出了将 HART 通信协议运用于涡轮流量变送器上来实现二线制传输。通过理论分析、测试验证，涡轮流量变送器能进行二线制传输，而且与上位机的 HART 通信也正常，系统所要求的基本功能都实现了。本系统虽然是基于涡轮流量变送器而设计，但是其电路具有通用性，完全符合 HART 通信协议，软件、硬件稍加更改即可用于其他压力、温度等变送器，可移植性强，可靠性高。由于 HART 通信协议特有的优势，已成为智能控制领域中应用最广泛的现场通信协议，在今后很长一段时期内，HART 协议产品在国内具有十分辽阔的市场。

参考文献：

- [1] 王 科，雷 励，赵普俊. 气体涡轮流量计的现场应用 [J]. 中国测试技术，2003，(3)：18-20.
- [2] 薛文艳. 变送器输出信号的探讨 [J]. 计量与测试技术，2011，(5)：16-19.
- [3] 孙丽梅. 基于 HART 协议的智能电磁流量变送器关键技术研究 [D]. 天津：天津理工大学，2007.
- [4] 王 雨. 变送器常见问题解析 [J]. 云南电力技术，2009，(1)：33-35.
- [5] 孔祥伟，周杏鹏. 基于 HART 协议的智能压力变送器的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器，2010 (2)：15-17.