

# 小直径光纤陀螺测斜系统井下电路设计

叶鸣宇 史晓锋

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:**给出了一种基于嵌入式系统的小直径测斜系统井下电路系统解决方案,该方案以 ARM 为处理核心,实现对光纤陀螺和加速度计组成的惯性组件的信号采集,并对采集到的数据进行解算,井下电路系统与地面系统采用曼彻斯特码半双工方式通信,通过 ARM 用软件编程的方式实现对数据的编码及解码运算,实现与地面的远程通信。实际测试表明,此系统能够稳定、可靠的采集惯性组件的信号并与地面系统正常通信,并且系统具有尺寸小、耐高温、功耗低的特点。

**关键词:** ARM;小直径;光纤陀螺;加速度计;采集;通信

**中图分类号:** TP23    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of underground circuit in small-diameter fiber optic gyro inclinometer system

Ye Mingyu Shi Xiaofeng

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** This paper presents a underground circuit system solution based on the small diameter embedded systems. This solution collects the signal of the FOG IMU and accelerometers, and solves the collected data. The underground circuit systems uses Manchester coding to realize half-duplex communication with the ground systems, encodes and decodes the data through ARM software programming, to achieve the remote communication with the ground systems. Practical tests show that this system is able to acquire signal of IMU and communicate with the ground system stably and reliably, and this system's size is small, low power consumption, and can work in the environment with high temperature.

**Keywords:** ARM; small diameter; FOG; accelerometer; acquisition; communication

## 1 引言

随着石油资源的日渐枯竭,易开采石油资源的不断减少,人们不得不转向在复杂地带开采石油资源以及二次开发以前的老油井,钻井时所面对的环境更加复杂,对钻井精确度的要求逐渐提高。为了获取已钻井眼的当前轨迹,就需要确定井眼中每个位置的井斜角,方位角以及工具面角,这些功能的实现都依赖于高精度高可靠性的测斜设备。目前国内广泛使用的测斜仪器主要采用机械陀螺技术,磁通门技术或速率陀螺技术。机械陀螺技术的测量精度不高,寿命较低。磁通门技术是利用敏感地磁场强度进行测量,但是由于其本身原理上的特点,即工作在具有不确定磁场干扰的情况下,而又不能在套管上加入磁屏蔽罩,否则严重影响井斜测量的性能。特别地,许多测量设备含有铁磁成分和设备工作可能产生剩余磁场,极大地影响测量技术的

可靠性<sup>[1]</sup>。速率陀螺的抗振动和抗冲击能力差,不能支撑连续测量。光纤陀螺具有轻型的固态结构,可靠性高、寿命长、能够耐冲击和振动、瞬时启动、功耗低以及有很宽的动态范围宽,并且光纤陀螺不受铁磁物质的影响。国内目前的光纤陀螺测斜仪口径较大,不适合在石油套管井中应用,本文中所涉及的陀螺测斜系统直径小于 46 mm),适合在石油套管井中测量方位<sup>[2]</sup>。

## 2 陀螺测斜系统井下系统的基本组成

陀螺测斜系统井下系统由惯性组件和井下电路系统组成。光纤陀螺和加速度计采用捷联式的机械编排方式装配在具有精密定位基准的惯性基底上,组成惯性组件<sup>[3]</sup>。井下电路系统作为与惯性组件直接相连的前端设备,负责对惯性组件产生的信号进行采集,处理,以及与井上系统进行

通信。

在原有的测斜系统中,井下电路系统由单片机扩展一系列的外围设备组成,结构相对复杂。近些年来随着集成电路不断发展,芯片的集成度越来越高,功能也越来越强。本文在原系统的基础上,对基于以光纤陀螺为核心的惯性组件的井下电路系统进行设计,采用高集成度的芯片,给出了一种基于 STM32 的井下电路系统设计方案,实现对惯性组件信号的采集,处理,以及与井上系统进行通信。

### 3 井下电路系统总体设计方案

井下电路系统主要功能是准确采集光纤陀螺产生的含有地球自转角速度信息的脉冲信号,以及加速度计产生的含有重力加速度沿仪器坐标系的  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴的各个方向分量信息的电流信号,并对这些数据进行处理,进行解算,得到仪器当前所处位置井眼的井斜角,工具面角以及方位角,最后再将这些数据传输到井上,从而使得地面上的工作人员可以获知井眼的当前轨迹而采取进一步的措施。并且井下电路系统还需要能够及时响应井上系统下发的命令,并根据命令完成所要求的工作,使得地面工作人员可以在地面通过下发各种命令来控制井下电路系统的工作。

本系统设计中的主要难点是如何准确采集光纤陀螺和加速度计产生的信号,以及准确的将数据传输到井上。本系统的数据采集硬件部分是基于 STM32 设计的,并通过编写 STM32 嵌入式软件程序对光纤陀螺和加速度计的信号进行采集,通信部分在硬件上是设计了基于 STM32 的通信电路以及曼彻斯特码调理电路,并编写 STM32 曼彻斯特码通信程序。文中设计的井下电路系统结构如图 1 所示。

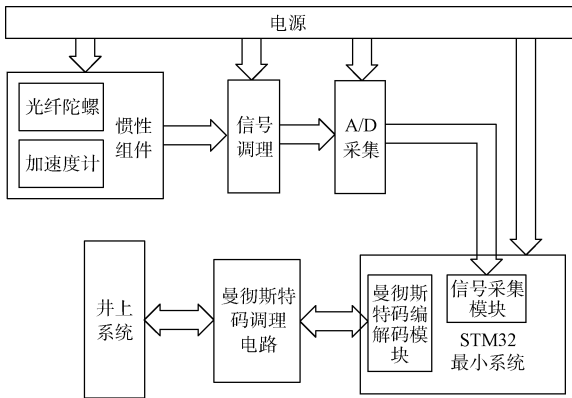


图 1 井下电路系统结构

### 4 电路设计

本系统主要应用在石油套管井中,而石油套管井的内径较小,严格限制了系统的外径,本文设计的井下电路系统的宽度被严格限制在了 28 mm 以内,并且由于本系统工作在井下,稳定性要求高,所以本系统在设计时尽量采用小直

径集成电路芯片,电路尽可能的简洁,以减小电路系统的宽度,并提高系统的稳定性。

#### 4.1 STM32 处理器电路设计介绍

STM32 是由意法半导体公司设计,基于专为要求高性能,低成本,低功耗的嵌入式应用专门设计的 ARM32 位 Cortex-M3 内核的处理器<sup>[4]</sup>。该处理器的工作频率最高可以达到 72 MHz,并且 STM32 内部集成了 FLASH 存储器,USB2.0 全速接口,模数转换器,可用于输入捕获的定时器,以及基本定时器。这些使得 STM32 具有强大的处理能力,性能较高并且稳定可靠,同时,STM32 内部的资源丰富,足够我们实现光纤陀螺和加速度计的数据采集和解算以及与地面进行通信的功能,并且 STM32 的芯片体尺寸为 10 mm×10 mm,能够满足我们对井下电路系统小直径的要求,所以我们选用 STM32 作为我们的核心处理器<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 惯性组件信号采集电路设计

本文所采用的光纤陀螺的输出信号为脉冲信号,脉宽大于 1  $\mu$ s,信号占空比不大于 2 : 3(低电平 : 高电平),脉冲信号在低电平  $\leq 0.7$  V,高电平  $\geq 3$  V,输出信号更新频率为 400 Hz。光纤陀螺输出的脉冲信号如图 2 所示。

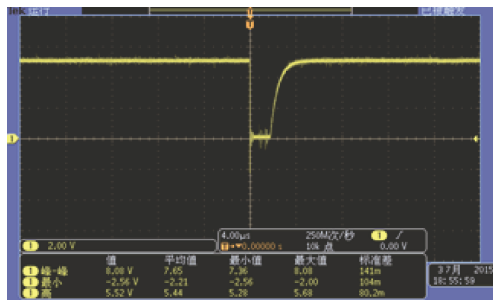


图 2 光纤陀螺输出脉冲信号图

光纤陀螺脉冲信号采集电路负责采集光纤陀螺的含有地球自转角速度信息的脉冲信号,是工程师能否准确解算出井眼中仪器当前所处位置的井斜角,方位角,以及工具面角的非常重要的一环。

本文中所使用的光纤陀螺共有 2 只,产生 4 路脉冲信号,所设计的光纤陀螺脉冲信号采集电路对光纤陀螺的脉冲信号输出接口产生的脉冲信号进行钳位,滤波处理后,输入到 STM32 片内的输入信号捕获器的 4 个 IO 口,然后通过嵌入式软件编程对 4 路脉冲信号进行采集<sup>[6]</sup>。光纤陀螺脉冲信号采集电路框图如图 3 所示。

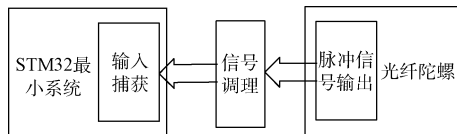


图 3 光纤陀螺脉冲信号采集电路框图

加速度计 A/D 信号采集电路负责采集加速度计产生的电流信号,本文中采用 3 支加速度计采集重力加速度信号,3 支加速度计分别将重力加速度沿仪器坐标系的  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴的各个分量转换为电流信号。加速度计 A/D 信号采集电路将加速度计产生的电流信号进行钳位,滤波处理后,通过采样电阻转换成模拟电压。由于 STM32 片内的 A/D 精度不够,所以本系统采用 ADI 公司的 A/D 芯片 AD7656 对 3 路模拟电压信号进行 A/D 采样。AD7656 是一款 6 通道,16 位,高精度逐次逼近型同步采样模数转换器,并且具有并行和串行两种接口,可以满足高分辨率、多通道、低功耗的要求,可以很方便的与本电路系统的核心处理器 STM32 进行连接<sup>[7]</sup>,由于 STM32 的 IO 口有限,所以本文设计的加速度计 A/D 信号采集电路采用 AD7656 的串行外设接口 SPI 与 STM32 相连以节省 IO 端口。然后通过嵌入式软件编程的方式控制 AD7656 将模拟电压信号转换成数字信号,STM32 通过读取 SPI 接口传过来的数据(即模拟电压转换成的数字信号)即可得到重力加速度沿仪器坐标系的  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴的各个分量的信息。加速度计 A/D 信号采集电路框图如图 4 所示。

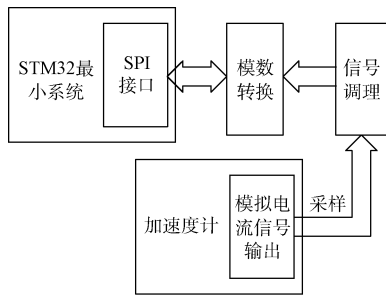


图 4 加速度计 A/D 信号采集电路框图

### 4.3 曼彻斯特码通信电路设计

测斜系统对数据传输的低误码率要求很高,由于曼彻斯特码抗干扰能力强,编码方法简单,并且曼彻斯特码将时钟和数据包含在数据流中,在传输数据的同时,也将时钟同步信号一并传输到接收端,每位编码中有一跳变,不存在直流分量,因此具有自同步能力和良好的抗干扰性能<sup>[8]</sup>。

在曼彻斯特编码中,每一位的中间都有一个跳变,通常将单位时间内发生低电平到高电平的跳变表示‘0’,高电平到低电平的跳变表示‘1’;由于跳变都发生在每一个码元的中间,消除了直流分量,降低了功耗,并且接收端可以方便地利用它作为位同步时钟。曼彻斯特码示意图如图 5 所示。

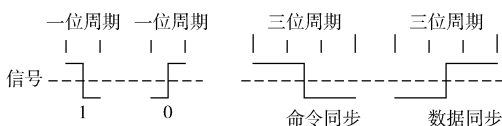


图 5 曼彻斯特码

本文采用软件编解码,硬件调理的方法实现曼彻斯特码通信。基于 STM32 进行曼彻斯特码的软件编解码,通过曼彻斯特码调理电路对井下系统接收以及发出的曼彻斯特码信号进行调理。

STM32 将光纤陀螺脉冲信号和加速度计 A/D 信号进行采集,解算后得到的数据进行曼彻斯特编码,将编码后的信号传入曼彻斯特码通信电路,然后经由曼彻斯特码调制电路发送到电缆上。同时,对曼彻斯特码调制电路传入的信号进行曼彻斯特码解码,获取井上下发的信息。

井下系统与地面系统通过电缆相连接,电缆长达几千米,信号在电缆中传输时会受到很多干扰,当地面系统向井下系统传输数据时,信号在经过电缆到达井下系统时,信号中存在很多尖峰和毛刺,影响井下系统对信号的检测,所以本文设计了曼彻斯特码调理电路。

曼彻斯特码调理电路对井下系统接收到的信号进行滤波,钳位,差分放大和整形。信号在到达井下系统后,首先经过 RC 滤波和电压钳位电路,尽可能的消除噪声干扰,去掉信号中的尖峰和毛刺,然后再通过 AD620 进行差分放大,信号在放大之后通过比较器 LM111 整形,整形之后的信号波形噪声小,上升沿和下降沿陡,便于解析,信号在经过曼彻斯特码调理电路后输入到 STM32 进行信号的采样并解析数据<sup>[9]</sup>。

井下系统向地面系统传输数据时,STM32 产生的曼彻斯特码信号如果直接在电缆上传输,那么很快就会被噪声淹没,并且 STM32 产生的信号电压较低,驱动能力差,不能够支撑在电缆上远距离传输,所以本文设计的曼彻斯特码调理电路对 STM32 产生的曼彻斯特码信号进行处理,首先经过与门驱动器 55451,提高信号的驱动能力,再经由变压器耦合到电缆上进行传输,信号在耦合到电缆上之后电压较高,长距离传输信号损耗较小,信号在经过电缆传输到地面系统后,由地面系统进行进一步的处理<sup>[10]</sup>。曼彻斯特码调理电路框图如图 6 所示。

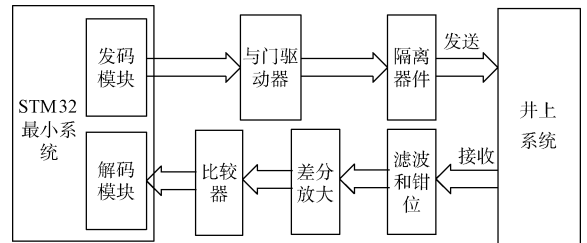


图 6 曼彻斯特码调理电路框图

## 5 功能测试实验

实验一:该实验用于验证光纤陀螺脉冲信号采集电路是否能够准确采集脉冲信号,图 7 显示的是当信号源设置为产生频率 50 kHz,脉宽 1  $\mu$ s,高电平为 3 V,低电平为 0 V 的脉冲信号时,将信号源产生的信号输入到光纤陀螺脉冲

信号采集电路,采集电路每 2.5 ms 将采集结果通过 USB 传到 PC 上通过串口打印出来的结果,2.5 ms 内信号源产生的脉冲个数为 125 个,采集电路实际采集到的脉冲个数为 16 进制数 7D,即 125 个。

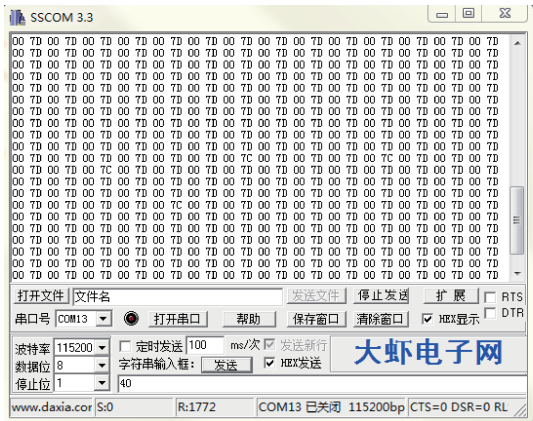


图 7 光纤陀螺脉冲信号采集实验

本实验使用信号源模拟光纤陀螺产生的脉冲信号,信号的各项参数都根据光纤陀螺脉冲信号的真实值进行设置,并用光纤陀螺脉冲信号采集电路对脉冲信号进行采集,根据光纤陀螺能够产生的脉冲信号频率范围,设置信号源为不同频率,根据实验,对比信号源在一定时间内产生的脉冲数和光纤陀螺脉冲信号采集电路在这段时间内实际采集到的脉冲个数,表明光纤陀螺脉冲信号采集电路可准确的采集脉冲信号。

实验二:该实验用于验证加速度计 A/D 信号采集电路是否能够准确采集电流信号,图 8 显示的是当电流源设置为产生 20 mA 的电流时,将电流源产生的电流信号输入到加速度计 A/D 信号采集电路,加速度计 A/D 信号采集电路将采集结果通过 USB 传到 PC 上通过串口打印出来的结果。本文中所使用的采样电阻大小为 0.1 kΩ,则输入的模拟电压为 2 V,第一个数 3 312 转换为 10 进制为 13 074,根据转换公式得到模拟电压  $U = 10 \text{ V}(13 074/65 536) = 1.99 \text{ V}$ 。其中的数据波动是由于所使用的电流源产生的电流有所波动。

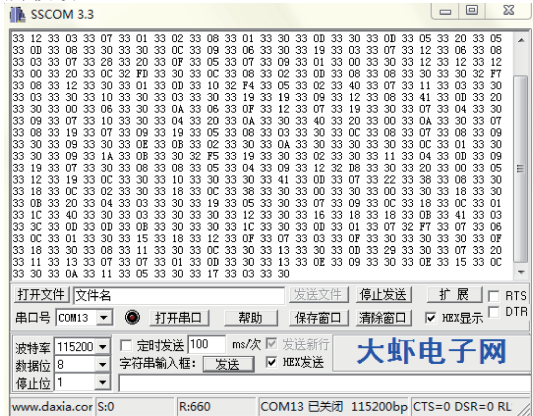


图 8 加速度计 AD 信号采集实验

本实验使用电流源模拟加速度计产生的模拟电流信号,并用加速度计 A/D 信号采集电路对电流信号进行采集,根据加速度计能够产生的电流范围,设置电流源输出不同大小的电流,根据实验,对比电流源产生的电流在采样电阻上的电压大小和加速度计 A/D 信号采集电路实际采集到的电压大小,表明加速度计 A/D 信号采集电路可准确的采集模拟电流信号,精度可满足需求。

实验三:该实验用于验证曼彻斯特码通信电路是否能够准确进行信号的曼彻斯特编解码,本文所设计的曼彻斯特码通信电路具有自检功能,即发出曼彻斯特码信号时,同时会收到相同的曼彻斯特码信号,测试时通过串口助手输入数据,将数据进行曼彻斯特编码后发出,同时发出的信号回传,通过曼彻斯特解码,将解码后结果通过 USB 传到 PC 上,在串口助手中显示如图 9 所示。

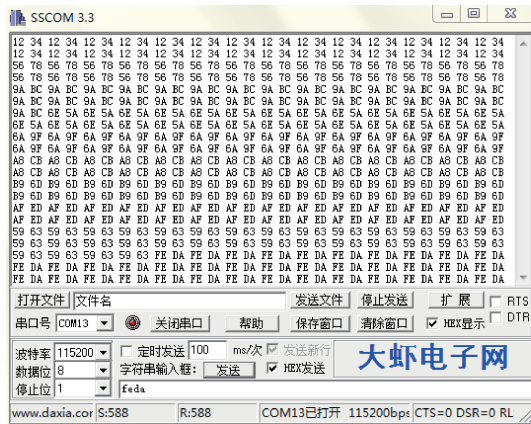


图 9 曼彻斯特码通信实验

本实验使用不同的数据进行曼彻斯特码通信电路的编解码功能的测试,图 9 中展示的是当曼彻斯特码通信电路发送不同的数据时,通信电路都能够准确的接收到相应的数据。根据实验,对比发送的数据与接收到的数据,发送的数据都能够准确的收到,表明曼彻斯特码通信电路能够准确的进行信号的曼彻斯特编解码。

## 6 结 论

本文提出的基于 ARM 的小直径测斜系统井下电路系统解决方案,能够准确的采集惯性组件的信号,并稳定可靠的与地面系统进行通信,本系统尺寸小,耐高温,非常适合在石油套管井中应用。经实际测试表明,此系统能够稳定、可靠的采集惯性组件的信号并与地面系统正常通信,并且系统具有尺寸小、耐高温、功耗低、可靠性高等优点。

## 参考文献

- [1] 邹岳元,任春华,刘赞. 光纤陀螺测井仪的研制[J]. 石油仪器, 2012, 26(2):10-12.
- [2] 高爽,张春熹,颜廷洋. 光纤陀螺油井测斜仪研究与设计[J]. 测井技术, 2006, 30(6):571-573.

- [3] 史晓锋. 捷联式惯性测向系统及其在石油工程中的应用[J]. 测井技术, 2007, 31(5): 466-468.
- [4] 郑一维, 李长俊, 吴讯驰, 等. 基于 STM32 的电能质量检测技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(6): 73-74.
- [5] 张锴, 李世光, 朱晓莉, 等. 基于 STM32 的智能巡线小车[J]. 电子测量技术, 2012, 35(2): 105-106.
- [6] 陈果, 郭庆, 王金宏, 等. 基于 STM32 的蓄电池检测系统[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(1): 71-72.
- [7] 袁雪, 张志文, 司庆丹. 基于 ARM 的智能数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 66-68.
- [8] 马秀妮, 梁羽佳. 曼彻斯特码地面解码方法与实现[J]. 石油仪器, 2009, 23(4): 30-31.
- [9] 张旭, 亓学广, 李世光, 等. 基于 STM32 电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 91-92.
- [10] 季力. 基于 STM32 芯片的电参数测量与数据传输[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(3): 137-139.

### 作者简介

叶鸣宇, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤陀螺测斜系统井下电路系统设计, 以及嵌入式软件设计等。

E-mail: ymyzdx@163.com

(上接第 171 页)

- [7] ABIRAMI M, HARIHARAN V, SRUTHI M B, et al. Exploiting GNU radio and USRP: An economical test bed for real time communication systems[C]. International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies. Thiruchengode: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [8] 彭伟. 嵌入式系统 CRC 循环冗余校验算法设计研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2012, 4(3): 258-265.
- [9] 张黎明. 高性能数字接收机 FPGA 设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 479-483.
- [10] 陈为刚, 李思, 赵干, 等. 基于软件无线电的 Turbo 码编码通信系统实现[J]. 电子测量技术, 2013, 36(11): 110-114.
- [11] 李永军, 徐晓蓉, 陈立家. 数字基带传输系统仿真与分析[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(4): 411-414.
- [12] 李庆坤, 全厚德, 李庆会. 数字锁相环在位同步中的应用与实现[J]. 通信技术, 2012, 45(9): 29-32.
- [13] 凌云志. TD-LTE 空中接口信号频偏估计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1266-1270.
- [14] YANG Z, BAI Y, ZHAO Z. Design and Implementation of the digital costas loop based on software defined radio[C]. International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Beijing: IEEE Press, 2011: 687-690.
- [15] 沈宙, 马忠松. 高速卫星通信中全数字载波同步算法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 36-39.
- [16] 乔纯捷, 马璐, 黄志刚. 一种星载数字波束形成系统的通道幅相校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 73-77.

### 作者简介

葛熠, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统的实现等。

E-mail: geyi@tju.edu.cn

陈为刚, 1980 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线通信理论与系统、无线网络与应用等。

E-mail: chenwg@tju.edu.cn