

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802252

# 基于 STM32 的矿用随钻测斜仪低功耗模式研究

宫浩

(中煤科工集团西安研究院有限公司 西安 710077)

**摘要:** 为了提高矿用测斜仪在煤矿井下钻探施工时的工作时间,以 STM32 嵌入式芯片为核心,提出了一种基于低功耗模式的测量方案。利用磁传感器和加速度传感器配合专用驱动芯片感知地球磁场和重力场,从而获得钻孔姿态信息。通过对 STM32 低功耗模式的研究,使仪器在非测量时间进入休眠状态,从而降低仪器功耗,提高工作时间。通过现场工业性试验表明,在保证测量精度和时间同步性的前提下,仪器单次使用时间超过 60 h,完全满足钻探施工时对钻孔轨迹测量的要求。

**关键词:** 随钻测斜仪;时间同步;低功耗;时间校准

**中图分类号:** TN7      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510

## Research on low power consumption model of drilling inclinometer based on STM32

Gong Hao

(CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to improve the working time of inclinometer in coal mine while drilling, a measurement scheme based on low power consumption mode is proposed with STM32 embedded chip as the core. Using magnetic sensor and acceleration sensor with special driving chip to sense the earth magnetic field and gravity field, then can obtain the drilling attitude information. By researching the low power consumption mode of STM32, the instrument can enter the dormancy state in non-measuring time to reduce the power consumption of the instrument and increase the working time. Through field industrial test, it is proved that under the premise of guaranteeing the measurement accuracy and time synchronization, the single use time of the instrument is more than 60 hours, which fully meets the requirements of drilling trajectory measurement.

**Keywords:** drilling inclinometer; time synchronization; low power consumption; time calibration

## 0 引言

煤矿安全生产中,钻孔测斜仪作为一种钻孔测量仪器,已成为钻探工艺重要的组成部分。20世纪90年代,煤科总院西安研究院率先研制出了煤矿井下全方位钻孔测斜仪及其误差校正算法,采用磁阻传感器来感知地球磁场信息,但处理电路相对复杂、体积大、功耗高、磁滞较大、续航时间较短<sup>[1-2]</sup>;近些年,采用磁通门、磁感式传感器、光纤陀螺的测斜仪在石油勘探、变形监测等领域都得到了良好的应用,但是大多数都采用有线传输方式,由孔口供电,并且体积较大,不适用于煤矿井下钻孔使用<sup>[3]</sup>。

煤矿钻孔施工具有空间狭小、深度高、时间长的特点,对仪器数据传输方式、功耗和续航时间都有着更高的要求,而目前对如何降低测斜仪功耗方面的研究还很少。因此,

本文在对比 STM32 单片机不同低功耗模式性能的基础上,采用外部时钟芯片配合片内时钟系统的测量方案,对测斜仪低功耗模式进行了研究与设计,并通过现场工业性试验对仪器测量精度、同步性和使用时间等性能进行了验证。

## 1 测斜仪同步测量原理

本文设计的钻孔测斜仪由主机和测量单元组成,主机与测量单元之间采用蓝牙方式通信。其测量原理是基于同步授时技术进行工作的,具体工作方式是在测量钻孔轨迹之前,先将主机与测量单元之间通过蓝牙连接,通过主机测量软件设置采样时间间隔,并按下同步键,使主机与测量单元同时开始按照设置的时间间隔进行采样工作<sup>[4]</sup>。同步后,测量单元自动断开蓝牙连接,以达到省电的目的。此时将测量单元安装在钻机上上进行钻进,测量单元采集并存储

钻孔内各位置的传感器数据,与测量单元同步工作的主机则记录各测点的有效性,并存储测点的时间和深度信息。测量完成后,再次将测量单元与主机通过蓝牙连接,由主机将有效测点进行计算并显示出各测点的倾角和方位角。

## 2 测量单元硬件结构设计

### 2.1 测量单元总体结构

测量单元主要由 STM32F103 嵌入式处理器、三轴磁感式传感器、三轴加速度传感器、FLASH 存储、实时时钟芯片和蓝牙芯片等构成。其主要功能是在钻进过程中采集磁传感器和加速度传感器的数据信息并进行存储。测量单元总体结构如图 1 所示。

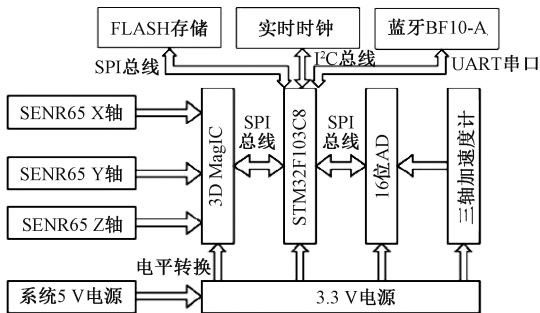


图 1 测量单元总体结构

### 2.2 磁传感器与加速度传感器

对钻孔轨迹测量主要是测量仪器在钻孔内部两个重要的姿态参数:倾角和方位角。而倾角和方位角的计算需要测量出地球磁场信息和地球重力场信息。因此,本文采用磁感式传感器和微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)加速度传感器来分别感知地球磁场和重力场。其中磁传感器选用 3 只磁感式传感器,该传感器配合专用驱动模块 3D MagIC 来测量地球磁场信息<sup>[5-6]</sup>。其测量原理为传感器内部电感与地磁场的变化成比例关系,通过测量传感器内部电感的变化,从而得到磁场信息。电路设计时,3 只传感器两两正交,以减小磁场梯度的影响,从而减小了安装误差<sup>[7-8]</sup>。

另一方面,本文选取 MEMS 三轴加速度传感器来感知地球重力场信息,从而测得倾角和工具面向角。该加速度计灵敏度系数为 560 mV/g,非线性度为 0.1 %FS,静态电流约 1.1 mA,采用模拟量输出。并且其内部对外部温度变化和电压波动引起的偏差进行了补偿,测量误差较小<sup>[9]</sup>。由于传感器为模拟输出,因此设计电路时需加入模数转换电路,将传感器输出的模拟量转换为数字量送入处理器进行计算。磁传感器与加速度传感器电路如图 2 和 3 所示。

## 3 测斜仪低功耗模式研究

煤矿井下钻探施工时,单个钻孔深度最深可达 200 m 左右,施工时间超过 60 h,如果仅仅从增加电池数量来延长

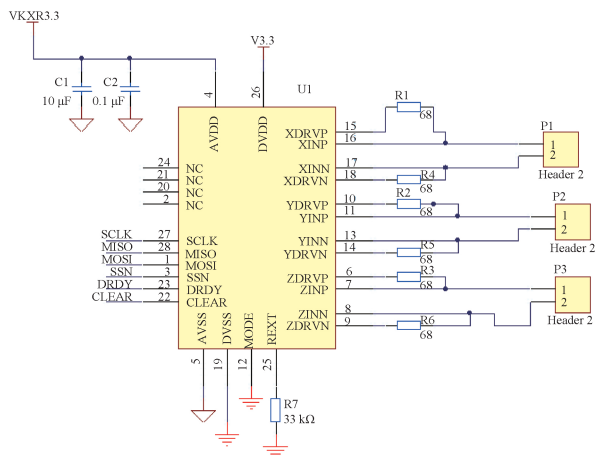


图 2 磁传感器电路

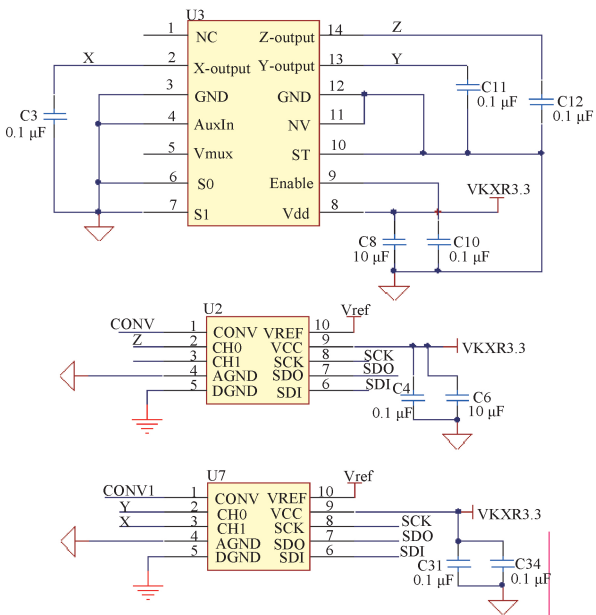


图 3 加速度传感器电路

仪器使用时间,就会造成仪器体积和重量的增加。测斜仪是基于同步测量原理进行工作的。钻进过程中,仪器按照设定的时间间隔进行数据采样并进行存储,而在采样时间点外,仪器不进行采样工作。因此,在采样时间点之外使仪器进入低功耗模式,从而降低仪器功耗,延长使用时间。

### 3.1 时钟系统设计

由于测斜仪是基于时间同步原理进行测量的,因此,时钟系统的准确性就显得尤为重要。因此在设计时,时钟系统采用实时时钟芯片配合处理器内部时钟来实现。处理器方面,采用基于 Cortex-M3 的 STM32F103 处理器作为仪器的核心部件,该芯片最高工作频率为 72 MHz,内嵌 1 个高速 RC 振荡器和 1 个低速 RC 振荡器,并可外接高速或低速晶体振荡器作为芯片时钟输入。具有睡眠、停机和待机

3种低功耗模式可进行选择,并且内嵌2个同步串行总线(inter integrated circuit, I<sup>2</sup>C)接口和3个串行外设(serial peripheral interface, SPI)接口<sup>[10-11]</sup>。

除此之外,在外围电路中还采用了实时时钟(real time clock, RTC)芯片,该芯片采用I<sup>2</sup>C双向总线串行传输,0℃~+40℃范围内时钟精度为±2 ppm,同时该芯片还具有可编程方波输出接口。此外,芯片还具有精密的、经过温度补偿的电压基准和比较器用于监视电源状态,以检测电源故障、提供复位输出。

### 3.2 低功耗模式分析及实现

STM32F103嵌入式单片机具有睡眠、停机和待机3种低功耗模式,3种模式对比如表1所示。

表1 3种低功耗模式对比

模式	唤醒方式	对时钟影响	唤醒后程序执行地点
睡眠	任一中断	CPU时钟关,对其他时钟无影响	从中断处开始执行
停机	任一外部中断	所有使用1.8 V区域时钟都关闭,HIS和HSE振荡器关闭	从中断处开始执行
待机	WKUP上升沿、RTC警告、NRST外部复位、IWDG复位	所有使用1.8 V区域时钟都关闭,HIS和HSE振荡器关闭	程序复位,从头开始执行

由表1可知,睡眠和停机模式唤醒后,单片机程序是从进入睡眠模式后的语句继续执行的,而待机模式唤醒后单片机复位,程序从头开始执行<sup>[12-13]</sup>。由于测斜仪在进入睡眠模式后需保存当前采样时间值,因此不允许唤醒后程序复位。另一方面,测斜仪在进入低功耗模式后需要单片机自动唤醒,而停机模式唤醒条件为外部中断唤醒。因此,本文采用睡眠模式作为测斜仪的低功耗模式。

在睡眠模式下,单片机是靠内部实时时钟(RTC)进行唤醒的。如图4所示,RTC时钟来源分别为外部高速时钟(high speed external, HSE)、外部低速时(low speed external LSE)钟和内部低速时钟(low speed internal, LSI)<sup>[14-16]</sup>。但由于一方面睡眠后CPU时钟关闭;另一方面,因为仪器体积受限,并未设计外部低速时钟,因此,只能选取内部低速时钟(LSI)作为RTC时钟来源。但LSI时钟频率并不精确(约为40 kHz),因此,唤醒时间也变得不精确。

为了解决这个问题,本次设计采用了外部实时时钟(RTC)芯片,具体思路为:正常测量时,使用芯片可编程方波输出接口,进行采样时间计时;休眠后,使用处理器内部RTC时钟记录睡眠时间;唤醒后,使用外部RTC芯片对处理器进行校时,这样,就避免了低功耗模式下,内部低速

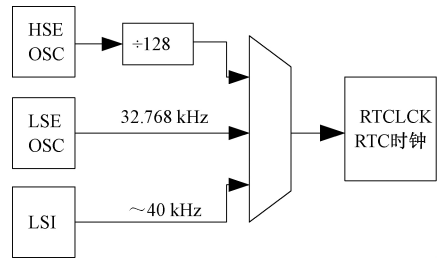


图4 STM32内部RTC时钟源

时钟不准导致同步时间点丢失的情况发生。

### 4 试验结果

为了验证低功耗模式下,测斜仪的采集精度、使用时间以及仪器的稳定性,在淮北矿业集团某矿1035底抽巷进行了现场工业性试验。由于测斜仪在振动时对传感器测量影响较大,相邻采样点的数据会出现较大跳动,因此测量时仪器必须静止。这样在钻进过程中就可以对低功耗模式下同步时间的准确度进行验证。现场试验时,仪器单次使用时间为7个班次,超过60 h,共测试钻孔7个,本文选取其中一个钻孔数据进行说明。

本次试验钻机搭载测量单元进行钻进施工,测量单元采集钻孔数据。主机采样间距为3 m,测量单元采样间隔为30 s。钻机开孔倾角为48.27°,方位角143.63°,测量主机共采样11个测点。测量过程中,仪器测量单元共测量数据440组,表2所示为探管与主机11个测点同步后的有效数据,图5所示为钻孔轨迹三维图形显示。测量完成后,使用矿方全方位钻孔测斜仪对钻孔进行复测验证,矿方仪器测量数据如表3所示。

表2 钻孔测量数据

序号	深度/ m	倾角/ (°)	方位角/ (°)	左右 偏差/(°)	上下 偏差/(°)
1	0	48.27	143.63	0	0
2	3	48.27	143.63	0	0
3	6	45.63	141.14	-0.046	0.047
4	9	48.04	138.64	-0.179	0.098
5	12	50.72	138.09	-0.358	0.06
6	15	53.55	141.36	-0.485	-0.06
7	18	58.48	139.73	-0.574	-0.314
8	21	57.11	140.57	-0.671	-0.613
9	24	59.29	140.19	-0.76	-0.924
10	27	60.3	140.07	-0.852	-1.277
11	30	60.63	139.35	-0.953	-1.649

测量过程中,测量单元每隔30 s测量一次,为保证测量稳定性,每个测量周期留出10 s进行测量,其余20 s进入休眠模式。测量单元的测量精度和与主机的时间同步性

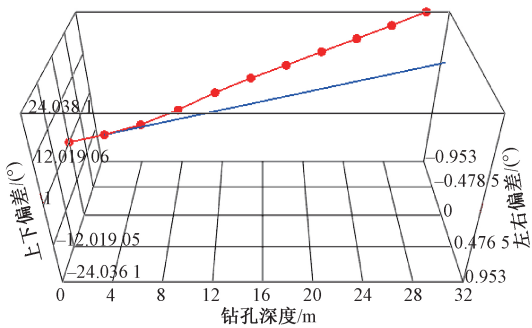


图 5 钻孔三维图形显示

表 3 钻孔复测数据

序号	深度/ m	倾角/ (°)	方位角/ (°)	左右 偏差/(°)	上下 偏差/(°)
1	0	48.18	143.07	0	0
2	3	48.18	143.07	0	0
3	6	45.85	142.22	-0.045	0.041
4	9	47.77	138.54	-0.178	0.091
5	12	49.05	138.81	-0.361	0.063
6	15	52.41	142.08	-0.492	-0.065
7	18	58.59	140.23	-0.581	-0.323
8	21	56.33	140.89	-0.679	-0.617
9	24	60.52	140.54	-0.768	-0.909
10	27	61.09	140.35	-0.857	-1.271
11	30	60.5	140.54	-0.957	-1.653

可由相邻采样点数据和复测数据进行验证。由表 2 可以看出,仪器在相邻采样点处的倾角和方位角的偏差在正常范围内,并未出现较大跳动。由表 3 的复测数据与表 2 测量数据对比可以看出,每个采样点复测数据与钻进时测量数据基本吻合,终孔位置和开孔位置基本相同,证明在低功耗模式下,测量单元与主机的时间同步性满足要求。

通过本文采用的低功耗设计,在保证了测量精度和时间同步性的同时,仪器单次使用时间与传统矿用测斜仪相比有了较大提升。

## 5 结 论

本文设计了一种基于 STM32 的矿用低功耗测斜仪,采用磁感式传感器配合加速度传感器实现了对钻孔姿态的高精度测量。针对煤矿井下钻孔施工时,测斜仪功耗高、使用时间短的问题,通过采用单片机内部时钟配合外部实时时钟芯片的硬件方案,使仪器在非测量时间段内进入休眠模式。仪器唤醒后,通过时间校准保证了测量单元与主机的同步性,降低了仪器功耗,提高了仪器续航能力。通过现场工业性试验以及复测结果,证明了仪器具有测量精度高、

稳定性好的特点,并且在保证测量精度与时间同步性的前提下,采用本文设计的低功耗模式可使仪器使用时间大幅提升,并可为煤矿钻探施工提供指导性建议,具有良好的现实意义。

## 参考文献

- [1] 郭爱煌,薛忍霞.矿井全方位钻孔测斜仪的数值计算与误差校正[J].物探化探计算技术,1997(1):50-55.
- [2] 张春华,刘广华.随钻测量系统技术发展现状及建议[J].钻采工艺,2010,33(1):31-35,124.
- [3] 陈开圣,彭小平.测斜仪在滑坡变形监测中的应用[J].岩土工程技术,2006(1):39-41.
- [4] 张典荣.新型矿用无缆钻孔测斜仪的设计[J].工矿自动化,2012,197(8):18-20.
- [5] 马学东,吴傍斌,林培立,等.基于 PNI 传感器的电子指南针[J].电子设计工程,2011,19(12):181-183.
- [6] 樊依林.基于磁感式传感器的随钻测斜仪的研究[J].工业仪表与自动化装置,2018(3):112-115.
- [7] 郭爱煌,傅君眉.基于地球重力场和磁场测量的测斜技术[J].仪器仪表学报,2001,22(4):400-403.
- [8] 张建海,柴小丽,范海明,等.基于磁感传感器 SEN-S 的电子指南针系统[J].微计算机信息,2009,25(13):115,160-161.
- [9] 刘建强,汪小华,林新华,等.三维磁感式电子罗盘的研制与标定[J].仪表技术与传感器,2012(6):19-21.
- [10] 徐洋,马跃.STM32F103 系列微控制器在应用编程技术研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2013,13(8):35-37,40.
- [11] 孙书鹰,陈志佳,寇超.新一代嵌入式微处理器 STM32F103 开发与应用[J].微计算机应用,2010,31(12):59-63.
- [12] 刘森,王田苗,魏洪兴,等.基于 uCOS-II 的嵌入式数控系统实时性分析[J].计算机工程,2006(22):222-224,226.
- [13] 陆正杰.基于 AM2301 单总线协议数据采集系统的设计[J].河池学院学报,2015,35(5):98-104.
- [14] 张端阳,肖力,付忠敏.基于 STM32F407 的精确时钟同步协议的实现[J].计算机与数字工程,2018,46(3):620-626.
- [15] 寇海洋,段雄英.基于 STM32F407 的时钟同步系统的实现[J].计算机测量与控制,2015,23(8):2759-2761.
- [16] 荆海霞.STM32 系列微控制器的时钟系统分析[J].科技信息,2008(33):511-512.

## 作者简介

宫浩,硕士、工程师,主要从事地球物理勘探仪器和方法的研究工作。

E-mail:gonghao@cctegxian.com