

doi: 10.11720/wtyht.2022.1463

王旭,陈凯,芦勇健,等.便携式三分量磁场测量模块[J].物探与化探,2022,46(6):1528-1533. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1463>

Wang X, Chen K, Lu Y J, et al. Portable three-component magnetic field measurement module[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6):1528-1533. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1463>

# 便携式三分量磁场测量模块

王旭<sup>1</sup>,陈凯<sup>1</sup>,芦勇健<sup>2</sup>,尹曜田<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083;2. 齐鲁空天信息研究院,山东济南 250000)

**摘要:**高精度磁场测量模块主要用于地质、地球物理、国防等科学领域。现有的三分量磁场测量模块存在便携性差(需要连接 PC 交互)、本底噪声水平高、续航时间短等不足。针对现有磁场测量模块的不足,对便携式三分量磁场测量模块进行研发,研制了高精度数据模块,开发了 Android 手机端控制程序,并进行了性能指标测试。测量模块支持 Android 手机端交互,具有本底噪声水平低(动态范围>121dB@fs=1 000 Hz)、同步精度高(时间漂移±0.87 ms/day)、续航时间长(可连续工作一周)、扩展性强(支持多种磁通门传感器)的特点。便携式三分量磁场测量模块设计便携、简单易用,适合野外测试使用。

**关键词:**低功耗;低噪声;时钟同步

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)06-1528-06

## 0 引言

高精度磁感应强度的测量一直是地球物理学家追求的目标,主要用于地质、地球物理、国防等领域。英国 Bartington 公司的 Spectramag-6 测量模块可搭配磁通门测量,支持 6 通道 24 位高精度数据采集,是目前主流的三轴磁通门测量仪器,但需要通过 PC 端交互,难以满足野外便携的应用场景,无法实现多台仪器同步采集,时间一致性方面不够完善,整机功耗(约 9 W)较大。

张健<sup>[1]</sup>、刘斯等<sup>[2]</sup>、孙希<sup>[3]</sup>、杨圆圆<sup>[4]</sup>研制的高分辨率磁强计信号采集系统支持 24 位 A/D 采集,三通道噪声约为  $27.184 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,采用液晶屏显示,具有高分辨率、高性价比的优势。李松鹤等<sup>[5]</sup>、翁孟超等<sup>[6]</sup>、李艳<sup>[7]</sup>、廉征环<sup>[8]</sup>研制的双三分量 24 位磁通门传感器采集系统续航时间长,集成度高。杨鹏飞等<sup>[9]</sup>、章志涛<sup>[10]</sup>、梁洪勇<sup>[11]</sup>、王一等<sup>[12]</sup>、王超<sup>[13]</sup>研制的基于三端式磁通门传感器的弱磁测量采集系统线性度好,谐波小,适合低频弱磁场信号测量。蔡璨<sup>[14]</sup>、李庆等<sup>[15]</sup>、周逢道<sup>[16]</sup>针对未爆弹探测

研制的一种基于高分辨率磁通门传感器的同步采集系统,采用 32 位 A/D 采集芯片,配合数字滤波及斩波稳零技术,测量精度相比于 24 位采集卡提高 1 倍以上,噪声低于  $5 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ ,时间一致性较好。以上国外引进及国内自主研发的地磁采集系统,在推动地球物理勘探、国防安全等领域发展中起到了重要作用。

综合以上国内外同行研究成果,针对野外便携应用场景,现有的测量仪器在以下方面还存在升级空间:①野外测量时间长,现有测量模块功耗较大;②现有测量模块体积较大,便携性不够;③难以满足分布式测量,时间同步功能有待完善。借鉴国内外同行先进成果,研制了便携式三分量磁场测量模块 MagDAS-03。主要在以下 3 方面开展工作:①低功耗方面,采用低功耗设计,如低功耗 ADC、MCU 及磁通门传感器,高效率电源管理技术;②高精度时间同步方面,引入 GPS 授时和高精度温补晶振本地守时技术,实现多台测量模块之间的时间一致性;③便携性方面,硬件上增加 WiFi 模块,软件上开发了手机端应用程序,实现人机交互。

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2022-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目“海底 MT 的运动海水电磁噪声分离方法研究”(41804071)

第一作者:王旭(1998-),男,主要从事地球物理仪器开发及应用工作。Email:3466604515@qq.com

通讯作者:尹曜田(1986-),男,副教授,主要从事电磁法勘探技术相关研究工作。Email:yyt86@163.com

## 1 硬件设计

MagDAS-03 组成部件图如图 1 所示,由磁通门传感器、采集模块和手机组成,磁通门传感器将采集到的磁信号转换成电信号传递给采集模块,采集模块对电信号进行数据采集及存储,手机端通过 Wifi 控制采集启停、采集参数设置及实时数据显示。



图 1 MagDAS-03 组成部件

Fig. 1 Picture of MagDAS-03 component

### 1.1 磁通门传感器

常见弱磁传感器包括感应式线圈、SQUID、光泵、质子、SERF 等多种类型,综合考虑噪声、量程、体积、功耗、成本等因素,选择高精度磁通门作为磁传感器。相比其他类型传感器,磁通门具有低噪声、大量程、小体积、低功耗等优势。MagDAS-03 兼容 Bartington 仪器公司的 Mag-13、Mag-03 等多种磁通门。MagDAS-03 采用 Mag-13 磁通门对磁场强度进行测量。Mag-13 探头可对静磁场、时变磁场进行高精度低噪声的测量,具有更大的带宽、更高的精度和更低的内部噪声,且体积、质量与 Mag-03 接近,便携轻便。Mag-13 磁通门传感器参数如表 1 所示。

表 1 Mag-13 磁通门传感器参数

Table 1 Fluxgate sensor parameters of Mag-13

参数	测量范围
-3dB 带宽	DC~3k Hz
噪声	<4 pT/√Hz@1Hz
功耗	1140 mW(+65 mA@12V, -30 mA@-12V)
量程	±60~±1000 μT
线性度	15 ppm
体积	32(L)mm×32(W)mm×225(H)mm

### 1.2 数据采集模块

围绕低噪声、大动态范围、低功耗、时间同步及便携使用的要求,研制的采集模块内部集成电源模块、ADC 模块、CPLD 模块和 MCU 模块,硬件原理框图如图 2 所示。

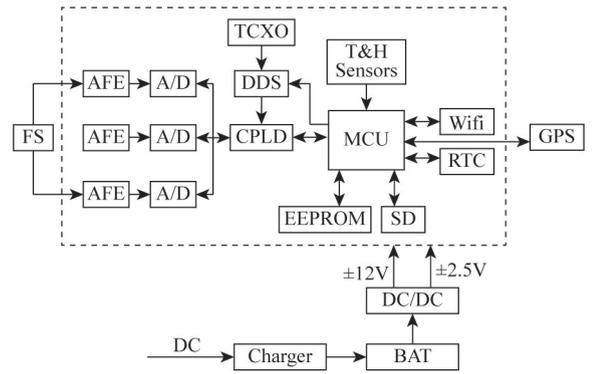


图 2 硬件原理框

Fig. 2 Hardware block diagram

磁通门将待测的磁场信号转换为电信号传递到采集模块,前端 AFE 实现信号衰减,输出至 A/D, A/D 将模拟信号转换为数字信号。CPLD 模块通过 SPI 协议与 A/D 采集模块及 MCU 进行通讯,对 A/D 采集模块配置参数并整合采集数据传输给 MCU,同时输出高稳时钟信号至 A/D 芯片,减小数据漂移,提高测量精度。MCU 采用 STM32L452VEI6 芯片,实现 GPS 授时、参数设置、状态查询、启停控制、采集存储、Wifi 通讯等功能。通过 GPS 校准时钟信号,由手机端控制对采集模块进行参数的配置、控制采集的启停;通过获取仪器状态可知仪器周围环境温湿度以及剩余电量,满足野外长时间无人看守的作业环境;通过 LED 指示开机电源、Wifi、GPS 和采集电路的工作状态。

#### 1.2.1 低噪声设计

Mag-13 磁通门的噪声功率谱密度为  $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1Hz,灵敏度为  $100 \mu\text{V}/\text{nT}$ ,因此电压噪声为  $400 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。采集模块的低噪声从前端运放、A/D 模块、参考电源、供电电源、布局布线方面综合设计。电源的质量将直接影响电路的稳定性,为达到更低的本底噪声水平,在电源中加上线性稳压器,提高电源反应速度、减小输出纹波。采用 Texas Instruments 生产的 A/D 芯片 ADS1282,该芯片具有极低的非线性度和极小的谐波失真。如表 2 所示,ADS1282 芯片在 1 000 Hz 处的信噪比为 124 dB,功耗仅为 25 mW。

表 2 ADS1282 参数

Table 2 Specification of ADS1282

参数名称	具体指标
信噪比	124dB@1000Hz
分辨率	31bits
供电	±2.5V
功耗	25mW@±2.5V

### 1.2.2 低功耗设计

采集模块的低功耗从电源管理及器件选择上综合考虑。图3为MagDAS-03的电源拓扑结构,MCU部分为值班电路,与CPLD、ADC等分开供电,保证仪器在数据采集、信息交互的同时兼备低功耗性能。MagDAS-03在采集存储时,仪器总功耗约为1800mW。电池分3组,每组8节,采用4串2并的组合方式,共计24节规格为18650的锂电池,每个独立电池组电压为16.8V,电池组总容量为84000mAh,确保仪器在野外能够连续工作一周。

CPLD采用低功耗芯片MAX II系列EPM570M100I5N,该芯片采用施密特触发器,有效抑制噪声输入,且每个引脚可编程,支持热插拔。MCU采用芯片STM32L452VEI6,该芯片为带有FPU的超低功耗80MHz Arm Cortex-M4 MCU,具有512KB Flash存储器、USB设备和DFSDM。

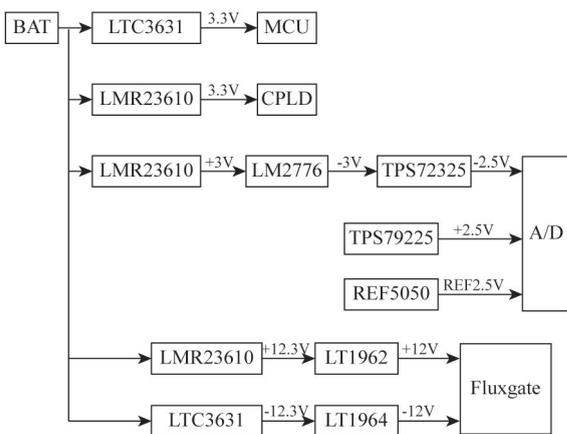


图3 MagDAS-03电源拓扑结构

Fig.3 Power supply topology structure of MagDAS-03

### 1.2.3 时钟同步技术

在观测采集磁场强度时,保证多台仪器的时间一致性。为使时间漂移小于±1ms/day,一般使用恒温晶振来保证时间同步,但恒温晶振功耗较大,不满足低功耗的设计需求,本文采用DDS配合TCXO微调技术,校正采样时钟并提高时钟同步精度,使稳定度达到±10ppb,减少时钟校准工作的频度,提高观测数据在时间上的准确性。图4为时钟同步原理,

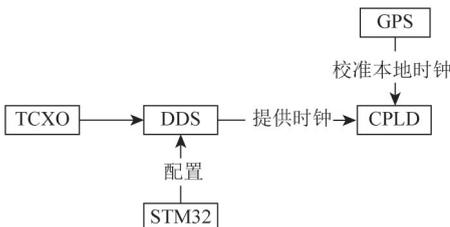


图4 时钟同步原理

Fig.4 Time synchronization schematic

通过GPS为CPLD提供标准时钟来校准本地时钟,CPLD将DDS提供的时钟与GPS进行对钟得到时钟偏差,STM32得到时钟偏差并依据时钟偏差对DDS进行配置,从而达到时钟同步。

## 2 软件设计

软件设计包括MCU程序和Android手机端程序,MCU程序主要实现接收串口命令、解析GPS信息以及数据接收存储功能,基于Android Studio平台开发的Android手机端程序主要实现Wifi通信、参数配置、状态检测和启停控制功能。

### 2.1 MCU程序

MCU程序框如图5所示,MCU首先进行外设初始化,然后进行FreeRTOS初始化,最后进行任务调度,包含串口命令处理任务、GPS解析任务、数据存储任务、时漂测量任务、电源检测任务和空闲任务。通过解析Wifi模块,获得手机端的传输信号,对仪器进行配置。通过解析GPS信号,产生PPS秒脉冲进行CPLD对钟,获得时钟偏差。MCU根据时钟偏差对DDS进行配置,修正时钟频率。SD卡对A/D的采集数据进行存储。

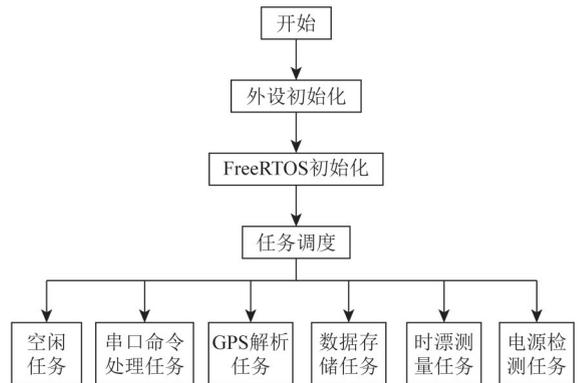


图5 MCU程序框图

Fig.5 MCU program diagram

### 2.2 Android手机端程序

采用Android手机端代替PC机提升便携性,通过Wifi模块与MagDAS-03信息交互,提升了工作人员在野外条件下现场交互效率。

打开MagDAS-03Android手机端软件,主界面显示功能如图6a所示,包括以太网通讯、状态查询、实时波形显示、采集参数配置以及控制采集的启停。状态查询如图6b所示,包括设备ID、采样率、增益、AC/DC输入、设备IP、设备所在经纬度及海拔、电池电压和内存容量。设置界面如图6c所示,包括设备ID配置、采样率设置、增益设置、磁场量程设置和



图 6 软件主界面 (a) 状态查询 (b) 设置界面 (c)

Fig. 6 Soft main menu (a), status query (b) and setting interface (c)

AC/DC 输入选择。采样率设置包括 250、500、1 000、2 000 Hz;增益可设置为 1、2、4、8、16、32、64;磁场量程可设置为 70  $\mu$ T/10V、100  $\mu$ T/10V、250  $\mu$ T/10V、500  $\mu$ T/10 V 和 1000  $\mu$ T/10V。

控制面板如图 7a 所示,包括 PPS 时钟同步、采集启停、Wifi 关闭按钮和软件升级按钮,若在软件中

关闭,Wifi 需要在硬件中按下 Wifi 按钮才能重启 Wifi。在控制面板中按下采集按钮后, MagDAS-03 开始采集数据,并将数据通过 Wifi 以数值形式和波形形式显示在手机端,如图 7b 和图 7c 所示,当不需要实时观察数据,关闭 Wifi 即可降低设备功耗。

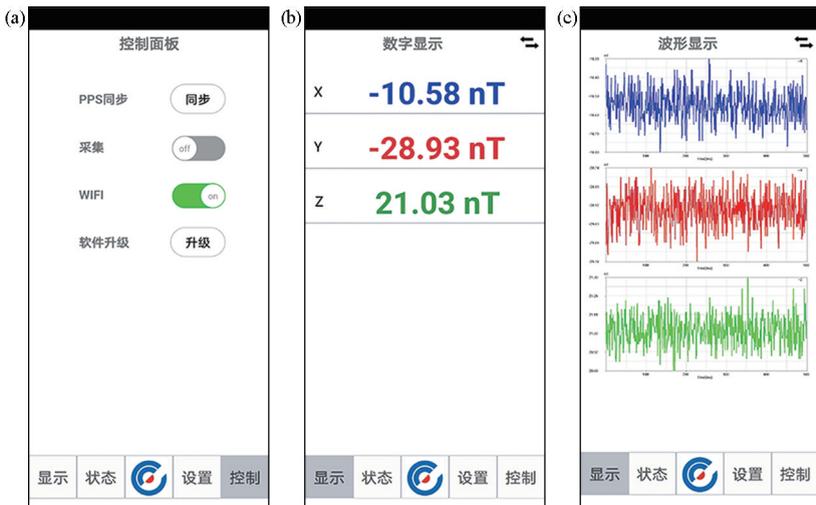


图 7 软件控制界面 (a) 数值显示 (b) 波形显示 (c)

Fig. 7 Soft control menu (a), digital mode (b) and waveform mode (c)

### 3 测试

在 MagDAS-03 仪器的研发中,测试是验证方案可行性的重要环节。为验证仪器的性能指标,对仪器的量程、本底噪声、动态范围、功耗、带宽等关键指标进行了测试。

#### 3.1 量程测试

量程为采集电路测量的最大信号范围,在测量

过程中 ADC 增益设置为 1,信号发生器输出 1Hz 的正弦波差分信号,输入信号并逐渐增大幅值直至采集波形出现饱和失真,测得量程约为 20 V<sub>pp</sub>。

#### 3.2 本底噪声及动态范围

MagDAS-03 采集电路本底噪声测试,首先输入对地短接,然后进行数据采集,设置采样率为 250 Hz,增益为 1,采集 800 s 噪声信号,得到如图 8 所示的噪声时域波形。采样率分别为 250 Hz 和 1 000 Hz 时,各通道的本底噪声有效值及动态范围如表 3

所示。计算的本底噪声功率谱密度(PSD)可表示其在频率域中的统计特性,从图 9 可以看出, MagDAS-03 采集电路的本底噪声功率谱密度为  $600 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1Hz。

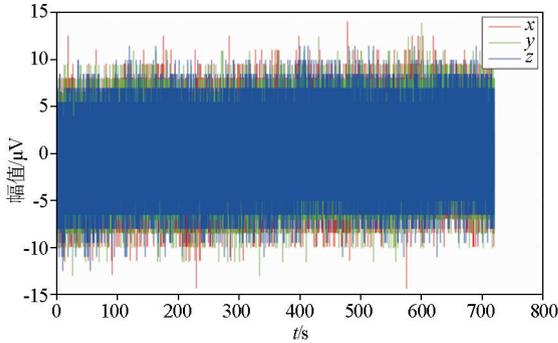


图 8 噪声时域波形

Fig. 8 Noisetime domain waveform

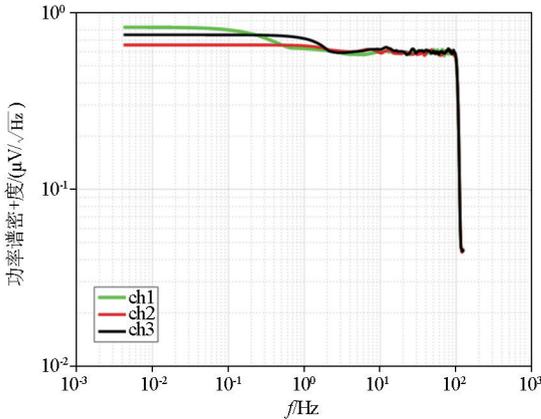


图 9 本底噪声功率谱密度

Fig. 9 Self-noisepower spectral density

表 3 本底噪声有效值及动态范围

Table 3 RMS of self-noise and dynamic range

采样率	通道	本底噪声有效值	动态范围
250 Hz	x	2.8740 $\mu\text{V}$	127.82 dB
	y	2.9094 $\mu\text{V}$	127.71 dB
	z	2.8008 $\mu\text{V}$	128.04 dB
1000 Hz	x	5.7232 $\mu\text{V}$	121.84 dB
	y	5.4717 $\mu\text{V}$	122.23 dB
	z	5.5558 $\mu\text{V}$	122.10 dB

### 3.3 功耗测试

如表 4 所示,仅采集模块运行时,功耗为 600 mW;当 GPS、Wifi 同时开启并采集数据时,功耗为 1 000 mW。在 12V 电压为 MagDAS-03 及磁通门传感器供电时,功耗为 2 140 mW。

表 4 MagDAS-03 功耗测试

Table 4 MagDAS-03 power test

工作模式	功耗
采集存储	600 mW
GPS、Wifi 采集存储	1000 mW
整机运行	2140 mW

### 3.4 带宽测试

MCU 设置采样率为 250 Hz,PGA 为 1,输入 10 V<sub>pp</sub>,80 Hz 正弦波,以 10 Hz 为频率步长逐渐增加,到 100 Hz 附近以 1 Hz 为频率步长逐渐增加,直至增加到 110 Hz,测得带宽约为 103 Hz,带宽测试结果如图 10 所示。对 Spectramag-6 和 MagDAS-03 进行性能对比,如表 5 所示。

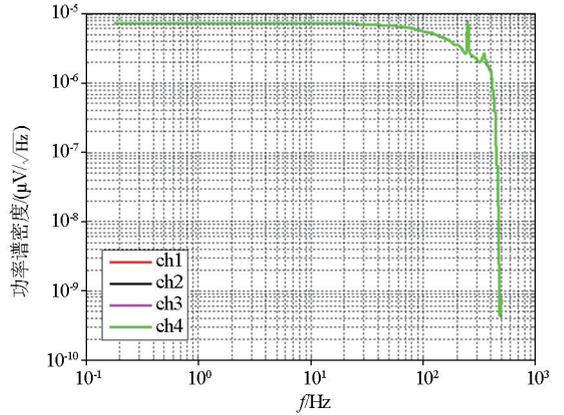


图 10 MagDAS-03 带宽测试

Fig. 10 MagDAS-03 bandwidth test

表 5 Spectramag-6 和 MagDAS-03 性能对比

Table 5 Performance comparison between Spectramag-6 and MagDAS-03

	Spectramag-6	MagDAS-03
通道数	6	3
采样率	0.1~10000 Hz	250、500、1000、2000 Hz
功耗	9W	1800 mW
上位机	PC	Android 手机端
时间同步	无	有

## 4 结论

结合高精度磁通门 Mag-13,三分量磁场测量模块 MagDAS-03 能够获得精确时间下高精度磁场强度相对变化。测试结果表明, MagDAS-03 具有分辨率高、功耗低、噪声小、时间一致性好等优势,且连续工作时间长、设计便携、简单易用,适合野外测试使用。

未来将进一步降低磁场测量模块的本底噪声水平,并搭载 4G 通信模块,支持采集数据远程实时查看,提高野外磁场测量效率。

### 参考文献 (References):

[1] 张健. 高分辨率磁强计信号采集系统[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.  
Zhang J. Signal acquisition system of high resolution magnetometer [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology,

- 2019.
- [2] 刘斯,曹大平,唐立军,等. 磁通门磁强计感应回路的稳态解析模型[J]. 传感技术学报,2017,30(4):555-559.  
Liu S, Cao D P, Tang L J, et al. Steady State analytical model of flux-gate magnetometer induction loop [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(4): 555-559.
- [3] 孙希. 高精度 ADC 在数据采集系统中的应用[J]. 电子世界, 2015(22):33-34.  
Sun X. Application of high precision ADC in data acquisition system[J]. Electronic World, 2015(22):33-34.
- [4] 杨圆圆. 三分量地磁场检测系统的设计与实现[D]. 南京:东南大学,2016.  
Yang Y Y. Design and implementation of three-component geomagnetic field detection system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [5] 李松鹤,曹大平. 基于 AD7791 的磁通门传感器数据采集与存储系统[J]. 计算机测量与控制,2017(8):315-318.  
Li S H, Cao D P. Data acquisition and storage system of flux-gate sensor based on AD7791 [J]. Computer Measurement and Control, 2017(8):315-318.
- [6] 翁孟超,杨志强,宣仲义. 微型磁通门传感器的制备与测试研究进展[J]. 仪表技术与传感器,2008(6):9-11,15.  
Weng M C, Yang Z Q, Xuan Z Y. Research progress on fabrication and testing of Micro flux-gate sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(6):9-11, 15.
- [7] 李艳. 基于单片机的传感器数据采集系统[J]. 化工自动化及仪表, 2013,40(10):1313-1316.  
Li Y. Sensor data acquisition system based on SCM [J]. Automation & Instrumentation in Chemical Industry, 2013, 40(10):1313-1316.
- [8] 廉征环. 基于 FPGA 的传感器数据采集研究[J]. 数字技术与应用, 2013(11):93.  
Lian Z H. The sensor data acquisition based on FPGA research [J]. Journal of Digital Technology and Applications, 2013 (11): 93.
- [9] 杨鹏飞,张朴,成鹏,等. 基于三端式磁通门传感器的弱磁测量系统设计[J]. 计算机与数字工程,2014,42(5):887-890.  
Yang P F, Zhang P, Cheng P, et al. Design of weak magnetic measurement system based on three-terminal flux-gate sensor. [J] Computer and Digital Engineering, 2014, 42(5):887-890.
- [10] 章志涛,张松勇,顾伟. 基于三端式磁通门技术的磁力梯度仪[J]. 上海海事大学学报,2008(2):35-38.  
Zhang Z T, Zhang S Y, Gu W. Magnetic gradiometer based on three-terminal flux-gate technology [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2008(2):35-38.
- [11] 梁洪勇. 基于磁通门传感器的弱磁感应强度测量系统设计[J]. 湖北成人教育学院学报,2014,20(3):12-13,11.  
Liang H Y. Weak magnetic induction intensity based on flux-gate sensor measuring system design [J]. Journal of Hubei Institute of Adult Education, 2014, 20(3):12-13, 11.
- [12] 王一,宗发保,赵瑜,等. 三分量磁通门传感器的三轴正交校正与测量[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2015,46(2):232-237.  
Wang Y, Zong F B, Zhao Y, et al. Triaxial orthogonal correction and measurement of three-component flux-gate sensor [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2015, 46(2):232-237.
- [13] 王超. 基于磁通门技术的海洋地理三分量磁力仪[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2019.  
Wang C. Marine geographic three-component magnetometer based on flux-gate technology [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.
- [14] 蔡璨,贾云飞,张燕强. 基于电磁法的未爆弹多通道同步探测系统研究[J]. 中国测试,2020,46(12):47-53.  
Cai C, Jia Y F, Zhang Y Q. Research on unexploded Ordnance multi-channel synchronous detection system based on electromagnetic Method [J]. China Measurement & Testing, 2020, 46(12):47-53.
- [15] 李庆,贾云飞,贺晨宇. 一种针对高分辨磁通门传感器的同步采集系统[J]. 南京理工大学学报,2020,44(1):7-14.  
Li Q, Jia Y F, He C Y. A synchronous acquisition for high resolution flux-gate sensor system [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(1):7-14.
- [16] 周逢道,韩思雨,綦振伟,等. 基于 FPGA+DSP 的浅地表频域电磁探测数字处理系统[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2016,43(10):94-101.  
Zhou F D, Han S Y, Qi Z W, et al. Digital processing system of shallow surface frequency domain electromagnetic probe based on FPGA+DSP [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2016, 43(10):94-101.

## Portable three-component magnetic field measurement module

WANG Xu<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>, LU Yong-Jian<sup>2</sup>, YIN Yao-Tian<sup>1</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Qilu Aerospace Information Research Institute, Jinan 250000, China)

**Abstract:** The high-precision magnetic field measurement module is mainly used in the scientific fields such as geology, geophysics, and national defense. However, the existing three-component magnetic field measurement module suffers poor portability (requiring a PC for data acquisition), large background noise, and short operating time. Therefore, this study developed a portable three-component magnetic field measurement module: a high-precision data measurement module and an Android control program. The test results show that the measurement module supports the interactive control using Android mobile phones and enjoys the advantages of low background noise (dynamic range > 121 dB @ fs = 1,000 Hz), high clock synchronization precision (time drift ± 0.87 ms/day), long operating time (for one-week continuous work), and high scalability (supporting multiple fluxgate sensors). Portable three-component magnetic field measurement module is portable, simple and easy to use, suitable for field testing.

**Key words:** low power consumption; low noise; clock synchronization