

孙路强,张明东,康健,等.低成本地磁场监测设备的设计与实现[J].地震工程学报,2024,46(3):665-671.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220906003

SUN Luqiang,ZHANG Mingdong,KANG Jian,et al.Low-cost geomagnetic field monitoring equipment:design and implementation[J].China Earthquake Engineering Journal,2024,46(3):665-671.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220906003

低成本地磁场监测设备的设计与实现

孙路强,张明东,康健,刘建波

(天津市地震局,天津 300201)

摘要:为能够在短时间内建成区域高密度地磁场观测台网,实现地磁场数据成网、成片观测,需要解决精准捕捉极震区特大震前磁场异常现象的问题。项目组利用物联网通信技术,基于RM3100三轴磁传感器,开发低成本地磁场监测设备,并部署在天津市宝坻区、武清区,同时利用人工智能数据分析技术和时序数据存储技术,开展地震前兆异常自动判定和可视化预报技术研究。该成果在2022年6月23日天津宝坻M2.0地震中得到了验证,说明低成本地磁场观测系统不仅对大震有察觉,对于近距离的中小地震同样敏感。

关键词:地磁场;地震预报;低成本;高密度;大数据

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)03-0665-07

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220906003

Low-cost geomagnetic field monitoring equipment: design and implementation

SUN Luqiang, ZHANG Mingdong, KANG Jian, LIU Jianbo

(Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China)

Abstract: We developed low-cost magnetic field monitoring equipment to accomplish the rapid establishment of a regional high-density geomagnetic field observation network, which is capable of recording geomagnetic field data and precisely identifying magnetic field anomalies preceding major earthquakes in the meizoseismal region. The devised equipment—based on Internet of Things communication and RM3100 triaxial magnetic sensors—was deployed in the Baodi and Wuqing Districts of Tianjin. Subsequently, the automatic judgment and visual prediction of earthquake precursor anomalies were investigated by employing artificial intelligence data analysis and temporal data storage techniques. The effectiveness of the proposed monitoring equipment was verified during the M2.0 earthquake that struck Baodi, Tianjin, on June 23, 2022, demonstrating its ability to detect anomalies preceding major earthquakes and its sensitivity to small- and medium-magnitude earthquakes over short distances.

Keywords: geomagnetic field; earthquake prediction; low-cost; high-density; big data

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH23003C); 中国地震局三结合课题(3JH-202402036)

第一作者简介: 孙路强(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地震预警风险预防和监测新技术研究工作。

E-mail: lqsun850330@163.com。

0 引言

地磁观测是地震前兆观测的一种重要手段,地磁现象可反映上至日地空间,下至大气层和固体地球中发生的与电磁有联系的各种物理过程,通过分析磁场在地球内部的电磁感应现象,可开展地震早期预报。强破坏地震发生时,由于地下岩浆潜流运行造成磁场出现不规则剧烈变化,引发电磁搅拌力运行,造成局部磁场发生突变^[1-2]。中国地震局自1987年开始探索震磁关系,研究中国大陆地区局部磁场异常变化现象,并开展实验性地震预报研究工作。地震预报专家通过多年来对震磁关系的研究,总结出多项理论支持震前磁异常这一现象,但所涉及磁场变化量级很小,难以解释极震区特大磁场异常变化现象。主要原因为地磁场专业设备成本高,不能进行大批量部署,很难在震中区的恰有观测点位去抓住地震发生前强磁场变化。项目组基于RM3100磁传感器,利用物联网技术研制了低成本地磁场监测设备,适合在短时间内在某一区域大面积部署,迅速提升该地区地磁场的监测能力,有助于捕捉强破坏地震发生前地磁场异常信息,以精准预报M6.0以上地震发生的位置与时间。同时,基于大数据分析技术,开展前兆异常自动判别,制作区域磁场变化云图。在《国家地震科技发展规划(2021—2035年)》^[3]中提倡发展低成本、抗干扰和多学科综合观测方法,这也为该项目的应用和推广指明了发展方向。

1 系统组成

低成本低地磁场监测设备主要由监测感知功能区、通信功能区和系统服务管理区三部分组成(图1)。监测感知功能区包括RM3100三轴磁传感器、重力加速度传感器和温度与气压监测传感器,实现对地磁场、重力加速度和环境要素的实时采集;通信功能区采用窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)模块,实现基于用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)的数据通信、组帧、解帧、校验、反馈、重传等通信管理功能,并提供精准的授时服务;系统管理区包括能源管理模块、存储管理模块和时间管理模块,通过串口、通用输入输出端口(General Purpose Input Output, GPIO)、二线串行数据传送接口(Two-Line Bus, I2C)、串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)等连接控制外

围硬件单元,并适时采用外设断电、低主频运行、休眠等模式降低系统功耗,实现对设备的能源使用管理,同时实现对采集数据的本地存储^[4-5],有助于断点续传功能的实现。

该装置体积小,采用内置电池供电方式,同时实现低压补偿功能,并配置太阳能充电系统。数据通信采用无线方式,适宜野外快速展开和安装。

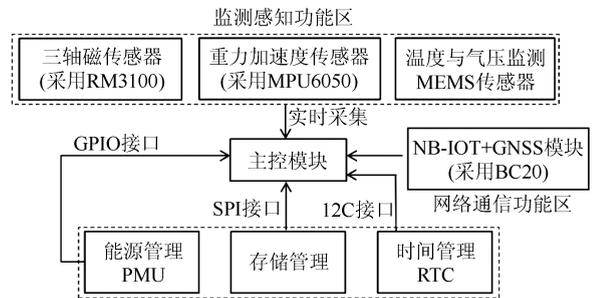


图1 地磁场监测装置结构

Fig.1 The structure of geomagnetic field monitoring device

2 系统硬件设计

该系统硬件设计采用模块化方案,主要由五个功能模组组成,分别为磁场检测功能模组、环境检测模组、通信模组、供电模组和主控制器,以主控制器为核心,向外连接各功能模组。各功能模组独立供电,降低了系统的总体功耗水平,以突出设备低功耗的特点。在硬件设计过程中实施组充分考虑野外外部部署和观测的需要,整机按照工业级IP67标准进行加工生产,适应野外防水要求。该装置采用了国产低功耗微控制单元作为核心处理器,板上运行FreeRTOS嵌入式操作系统^[6-7]。

2.1 磁场检测功能模组

磁场检测功能模组,采用RM3100三轴磁传感器,该传感器灵敏度为10 nT,测量范围为-800~800 μ T,通过SPI接口进行连接,工作过程中无需进行信号处理。考虑到地磁场观测台站附近会有汽车、行人等产生干扰的铁磁性物质的出现,该传感器能够准确识别这些“模糊”信息,从而消除因此而带来的测量偏差,且不需要进行温度校准和脉冲电流复位。

本项目中所采用的三轴磁传感器是一种采用磁场感应原理的传感器,可分别测量X、Y和Z轴上的磁场变化。当磁场感应到一个外部的磁场时,磁性将会发生变化,从而改变传感器的电性能参数,如电阻、电容、电感等,从而产生一个电信号。电子系统把这三个方向磁场变化数据综合起来,可以将其转换成数字信号,这个数字信号可以用来测量外部

的磁场强度和方向。

项目组在设计之初为减小装置体积,采取磁场检测功能模块内置的方式,但在实际观测中发现,装置内通信模组在定时传输数据,以及供电模组唤醒工作时,产生的电磁波均会对磁场检测单元产生干

扰,数据出现突跳,影响磁场观测数据质量。因此在定型生产的装置中,实施组在装置上加装了 30 cm 长过渡杆,并将磁场检测模组放置于过渡杆顶部,有效地避免了设备功能模组之间的干扰。装置外观及过渡杆见图 2 所示。

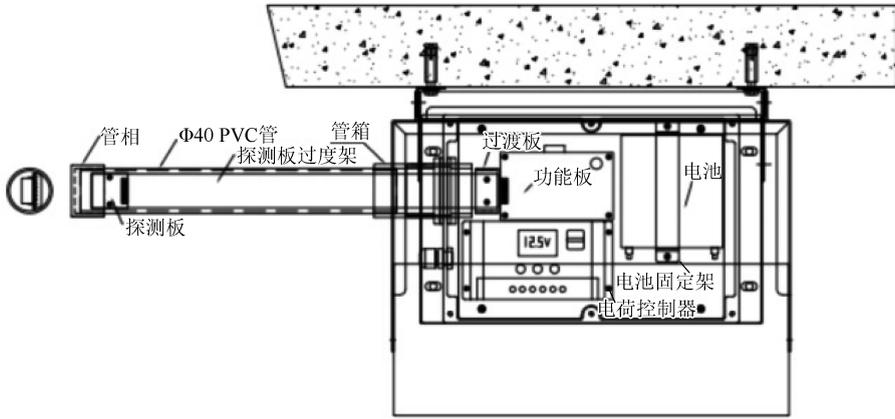


图 2 设备内部结构分布

Fig.2 Internal structure distribution of equipment

2.2 环境检测模组

实施组计划在天津建成地磁场观测网络,利用大数据的方式开展地震预报研究。为突出该观测系统具有大数据功能的特点,项目组在装置内部集成了环境检测模组,用于采集观测点附近气温、气压以及重力的变化,使单一观测点位产出多样化观测数据,同时气温、气压观测数据可辅助磁场观测,分析环境变化因素是否对磁场观测数据产生影响。环境检测微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)芯片通过 SPI 总线进行连接,工作温度范围在 $-45\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,适合野外部署需要。温度传感器具有 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量准确度,具有强化温度补偿功能。重力加速度传感器最大量程为 $\pm 16g$,数据输出功率 $1.6\sim 1\ 600\text{ Hz}$ 。

2.3 通信模组

项目组采用移动 BC20 无线通信模组,相比采用传统的 NB-IoT 方案,一体化设计使体积减小了 40%,同时具备超低功耗和超宽工作温度范围的特性,支持北斗和 GPS 的双卫星导航系统解调算法,对于地磁观测台站定位、授时等具有更强的技术支持。目前,在天津地区部署的地磁场监测装置通信质量良好,未出现较大延时现象。项目组在设备内部增加了实时时钟(Real-Time Clock, RTC)通过控制芯片来维持系统时间,在野外高低温环境下走时误差小于 $\pm 3.8\times 10^{-6}$ 。

2.4 供电模组

该装置原计划采用 19 Ah、3.6 V 长效锂电池为设备各功能模组工作提供供电。在测试期间由于北方冬季低温,造成锂电池夜间电量衰减快,电池实际电压过低,通信模组和采集芯片无法正常工作,出现数据断计、大脉冲突跳等情况。研发人员为解决该问题,将原有锂电池更换为稳定性更强的铅酸电池,增加太阳能充电管理微型电子芯片^[8-9],通过太阳能充电的方式补偿低温电量衰减,稳定工作电压。

3 系统软件设计

该装置采用 RM3100 三轴磁传感器测量地球磁场大小,适时采用外设断电、低主频运行、休眠等模式降低系统功耗。该装置在工作原理上采取系统上电完成初始化后,读取 FreeRTOS 操作系统发送的控制指令,如果为开始工作,则读取三轴地磁传感器测量出的空间物体三维地磁感应强度分量 X、Y、Z 并进行修正,通过地磁处理子程序得出横摆角 γ 的值^[10-11]。最终通过无线通信模块将数据传输至数据管理平台,进行数据的实时显示与存储。如果为工作停止,则停止数据的采集、处理工作。数据采集和处理流程如图 3 所示。

3.1 地磁干扰修正

低成本地磁场监测设备会受到来自设备自身和外界的磁场干扰,造成测量出现偏差,实施组通过磁干扰修正算法子程序实现对基本磁场的修正。首先

在该程序中构建地磁传感器误差模型,确定低成本地磁场监测设备测量数据与磁场真实数据之间关系为:

$$H_m = C_M C_{NO} C_{SF} (H_e + D_H + D_S) + D_0 + \omega$$

式中: H_m 表示设备采集到的三轴地磁场实时向量数据; H_e 为理想状态下真实地磁场数据; H_m 和 H_e 均采用长度为3的列向量表示,向量元素分别代表地磁向量在 Ox^m 、 Oy^m 和 Oz^m 轴的投影大小^[12]。

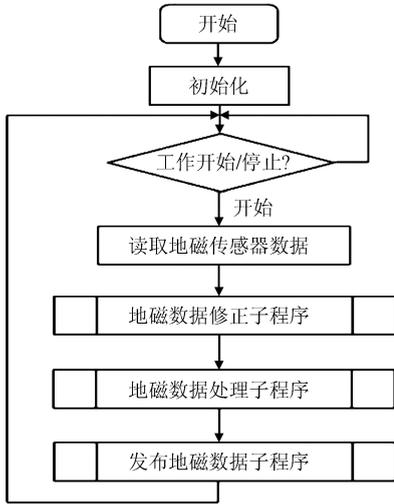


图3 数据采集与处理程序工作流程

Fig.3 Workflow of data acquisition and processing program

其次,在原始观测数据采集过程中地磁信号不可避免地混杂着一些高频的随机噪声,该噪声是符合高斯分布的,无法提前进行预知和处理。因此,在设备传输数据之前,需要通过边缘计算方法进行原始滤波,去除测量噪声影响^[13],项目组在设备边缘计算软件编程中采用滑动加权平均值滤波器进行该处理。

3.2 地磁场传感器干扰处理测试

通常用于校准磁传感器的方法是在 x 、 y 、 z 平面上转动传感器进行绕圈,然后抽取数据。在理想状态下一个地点的地磁场强度是一个常数值,因此绘制的数据应该是一个圆,这个圆球的半径为磁场强度,而事实上由于 x 、 y 、 z 轴的跨度范围有较大的差别,对于三分向上采集得到的观测数据,在空间上会形成一个类似椭球型包围图形(图4)。这一情况是由于仪器设备内部电子元件和外部环境带来的硬磁性干扰 D_H 、软磁性干扰 D_S 、安装误差 C_M 、随机测量噪声 ω 等原因作用的结果。

设备内部地磁干扰修正程序启动后,首先会对观测数据进行滑动加权平均值滤波,降低随机噪声带来的影响,并通过分析滤波数据得到去除干扰所使用的误差补偿参数,并将该参数带入地磁传感器误差模型中,此时会发现三分向地磁量形成的包络

图畸变基本消除。

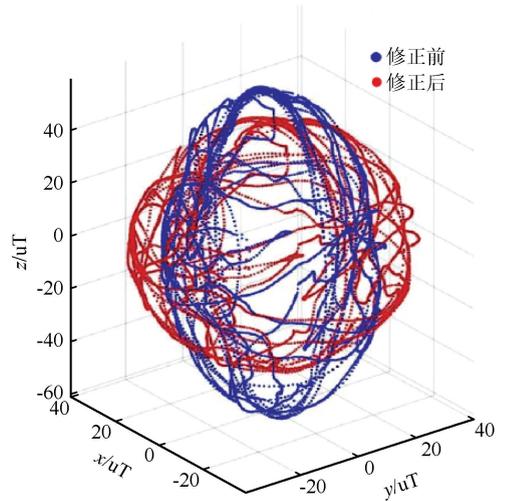


图4 地磁数据修正前后对比

Fig.4 Comparison between geomagnetic data before and after correction

低成本地磁场观测设备在启动数据干扰修正程序之前,观测得到的地磁场强度随着传感器方位的改变叠加不同的磁干扰量^[14],使总强度发生较大变化。启动数据修正程序后,地磁场强度均方根误差为8.21,修正之后为1.16,与原始观测数据相比减小了85.8%。磁干扰修正算法有效修正了地磁传感器被硬磁和软磁性物质带来的影响。

3.3 设备工作状态切换

低成本地磁场观测设备工作状态包括:初始态、暂停态、工作状态、采样状态、通信状态、故障状态、休眠状态和版本管理状态等^[15]。设备状态转化关系如图5所示。

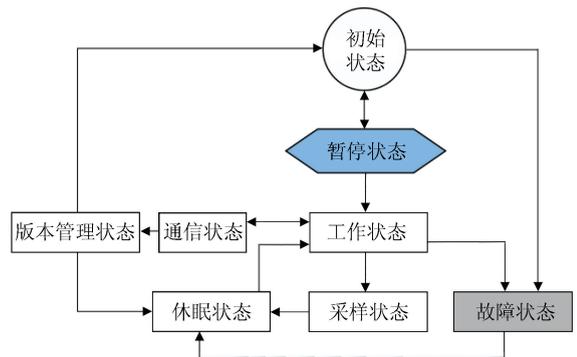


图5 低成本地磁场观测设备工作状态切换流程

Fig.5 Switching process of working state of the low-cost geomagnetic field observation equipment

设备启动后进入初始化流程,如初始化发生异常将进入故障状态运行,并向远端设备管理系统发出报警信息,并显示故障单元;如初始化成功后将检

测设备号、通信参数等基础功能项目,尚未完成设备配置将进入暂停态并启动蓝牙低功耗(Bluetooth Low Energy,BLE)配置通道^[16],安装人员通过手持终端进行参数配置并入网,设备检测参数成功后,将进入正常工作状态。在设备工作过程中,大部分时间将处于休眠状态以降低功耗实现超长待机,设备定期采集 MEMS 传感器数据存储在内存和 Flash 中,通过无线 4 G 网络定期集中上报到服务端^[17]。设备定期同数据管理系统(Data Management System,DMS)服务器握手同步时间、检查配置消息和版本信息等。当设备处于低电压或超低温状态时,将减少无线 4 G 网络接入次数,以保证设备可靠数据采集和缓存。

3.4 设备现场管理软件

为了实现设备的快速配置入网,实施组在设计设备内部管理模块时采用前、后端分离结构,后端程序采用开源 Python 框架 flask 实现,连接 PostgreSQL 数据库,并提供标准的 RESTful 结构的 Web Service 数据接口。前端程序采用 uni-app 开发工具生成微信小程序^[18],设备管理模块通过微信小程序链接设备蓝牙,对设备进行初始化入网、信息修改、更换、清除等操作。

4 设备应用产出

4.1 应用情况

低成本地磁场监测设备于 2021 年 3 月完成开发测试工作,并针对供电单元存在的问题进行了升级改造,实施组提出了落地安装、抱杆安装和壁挂安装三种方式,在天津宝坻区、武清区部署了 40 套监测设备,平均台站间距为 8.7 km,建成低成本地磁场观测网络,实现了地磁观测成网成片观测要求,同时也是对新时代群策群防技术的探索^[19]。全部监测站点建设在野外,通过内置电池和外设太阳能板的方式实现供电运转,数据传输采用物联网通讯模组和消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)协议方式,实现观测数据订阅式传输^[20]。图 6 为地磁场观测网络磁场实时变化示意。

目前项目组基于低成本地磁场观测网络建设经验,对观测设备供电控制器和 RM3100 芯片抗干扰性能进行提升,满足更复杂野外观测环境的需要。同时,联合中国地震局昆明地震预报研究所,计划在滇西南地区部署多套该类型设备,开展针对多发地

震地区的连续不间断观测。

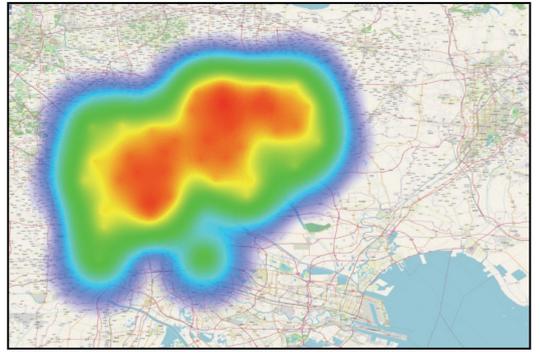


图 6 低成本地磁场监测系统磁场实时变化图
Fig.6 Real-time variation diagram of magnetic field from the low-cost geomagnetic field monitoring system

4.2 观测数据分析

天津低成本地磁场观测网络建成以来,为天津地区震情跟踪工作开拓了一种新的思路,更加密集的观测点位能够捕捉到过去不曾捕捉到的微震前的异常信息^[21]。2022 年 6 月 23 日天津宝坻区发生了一次 $M_{2.0}$ 地震,实施组选取了距离震中 1.2 km 的中关村中学、5.8 km 的宝坻台和 20.1 km 的新安镇三个观测点,对 2022 年 6 月 20—24 日的数据进行了对比,距离震中最近的中关村中学观测数据在震前 72 h 出现周期变化异常,而距离震中较远的宝坻台和新安镇观测点数据一致性较好,且观测数据周期变化一致。同时发现在震前 24 h 至震前 12 h 期间,中关村观测数据出现下降趋势,而宝坻台和新安镇观测数据为上升趋势。在数值变化趋势上反映出天津低成本地磁场观测网络对于微小地震发生前也能有所察觉,证明通过增加地磁观测台站密度可以捕捉到地震引发的局部磁场变化。

5 结论

实施组基于大数据思想,利用 MEMS 芯片和无线传输技术研制了低成本地磁场监测设备,满足了野外快速建设高密度观测台网的需求,同时实现了对地磁场、气压、气温和重力加速度观测数据的实时采集。业务中心采取时序存储方式对各测项数据进行存储,满足大样本数据快速存储、读取和计算的需要。采用大数据分析,对磁场观测数据进行分析,并以数据可视化的方式形成地磁场实时变化热力图,用直观的方式反映天津区域磁场强弱变化。地震预报从监测科学向数据科学迈进。

致谢:低成本地磁场监测设备在研制、测试过程

中得到了中国地震局第一监测中心吕传振,天津大学人工智能与计算学部马胜、赵靖老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 倪喆,袁浩浩,王黎,等.2014年云南鲁甸6.5级、永善5.0级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J].地震研究,2014,37(4):537-541.
NI Zhe, YUAN Jiehao, WANG Can, et al. Analysis of local anomalous characteristics of lithospheric magnetic field before Ludian M6.5 and Yongshan M5.0 earthquakes in Yunnan in 2014[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(4): 537-541.
- [2] 王青华,陈政宇,张忠龙,等.2014年鲁甸6.5级地震相关断裂的岩石圈磁异常分析[J].地震研究,2017,40(3):377-381.
WANG Qinghua, CHEN Zhengyu, ZHANG Zhonglong, et al. Lithosphere magnetic anomaly analysis of related faults of the 2014 Ludian M_s6.5 earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 377-381.
- [3] 陈宏涛.基于MEMS的小型高精度测斜仪的设计[J].物联网技术,2019,2:27-30.
CHEN Hongtao. Design of a small high-precision inclinometer based on MEMS[J]. Internet of Thing Technology, 2019, 2: 27-30.
- [4] 王建国,栗连弟,崔晓峰,等.数字化地震前兆台网日常工作管理软件[J].地震研究,2009,32(1):79-83.
WANG Jianguo, LI Liandi, CUI Xiaofeng, et al. Management software for daily routine of digital seismic precursor network[J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(1): 79-83.
- [5] 罗静博,林春生,陈浩.基于RM3100磁传感器的舰船磁场信号采集系统设计[J].传感器与微系统,2021,40(2):86-88.
LUO Jingbo, LIN Chunsheng, CHEN Hao. Design of vessel magnetic field signal acquisition system based on RM3100 magnetic sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(2): 86-88.
- [6] 陈斌,袁浩浩,王黎,等.流动地磁监测数据处理流程[J].地震研究,2017,40(3):335-339,510-511.
CHEN Bin, YUAN Jiehao, WANG Can, et al. Data processing flowchart of Chinese mobile geomagnet monitoring array[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(3): 335-339, 510-511.
- [7] 任保宏,徐科军.MSP430单片机原理与应用:MSP430F5xx/6xx系列单片机入门、提高与开发[M].北京:电子工业出版社,2014.
REN Baohong, XU Kejun. Principle and application of MSP430 single chip microcomputer: introduction, improvement and development of MSP430F5xx/6xx series single chip microcomputer[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [8] 魏小龙.MSP430系列单片机接口技术及系统设计实例[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
WEI Xiaolong. Interface technology and system design example of MSP430 series single chip microcomputer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2002.
- [9] 杨学慧,王赞辉,姚休义.云南地区岩石圈磁场特征及震磁特性[J].地震研究,2020,43(4):745-750.
YANG Xuehui, WANG Yunhui, YAO Xiuyi. Characteristics of lithospheric magnetic field and seismomagnetic characteristics in Yunnan area[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(4): 745-750.
- [10] 于勇吉,林春生.构建一种PNI磁传感器的舰船磁场信号检测系统[J].数字海洋与水下攻防,2018,1(3):54-57.
YU Yongji, LIN Chunsheng. Detection system of ship's magnetic field signal based on PNI magnetic sensor[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2018, 1(3): 54-57.
- [11] 孙永林,姜鑫.基于MEMS/地磁的无人机航姿自适应估计算法[J].传感器与微系统,2020,39(11):122-125.
SUN Yonglin, JIANG Xin. Adaptive algorithm for attitude estimation for UAV based on MEMS and geomagnetic[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 122-125.
- [12] 安亮亮,王良明,钟阳.弹载三轴磁强计的椭球拟合补偿方法[J].传感器与微系统,2020,39(12):4-6,13.
AN Liangliang, WANG Liangming, ZHONG Yang. Ellipsoid fitting compensation method for three-axis magnetometer on projectile[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(12): 4-6, 13.
- [13] 周阳.电子罗盘消除固定位置变磁场干扰方法[J].粘接,2021,47(8):158-161.
ZHOU Yang. The method of electronic compass to eliminate the interference of fixed position and variable magnetic field[J]. Adhesion, 2021, 47(8): 158-161.
- [14] 武建军,封维忠,于玮.基于MEMS三维磁阻传感器的电子指南针的研究[J].传感器与微系统,2011,30(8):83-85,88.
WU Jianjun, FENG Weizhong, YU Wei. Study on electronic compass based on MEMS 3D magnetoresistive sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(8): 83-85, 88.
- [15] 吴琼,滕云田,黄大伦,等.绝对重力仪研制中一种新的自由落体轨迹重建算法[J].地震学报,2012,34(4):549-556.
WU Qiong, TENG Yuntian, HUANG Dalun, et al. A new type of algorithm for rebuilding the trace of free-fall body in absolute gravimeter development[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(4): 549-556.
- [16] 周润景,李茂泉.常用传感器技术及应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2020.
ZHOU Runjing, LI Maoquan. Common sensor technology and its application[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [17] 张坚,林春生,邓鹏,等.基于小波域OBF分解的磁异常信号检测算法[J].弹箭与制导学报,2011,31(6):187-189,196.

ZHANG Jian, LIN Chunsheng, DENG Peng, et al. Detection of magnetic anomaly signal based on OBF decomposition in wavelet domain[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(6): 187-189, 196.

[18] 李英玲,牛美雅,兰宏富.基于 uni-app+SpringBoot 的移动智能办公系统设计与实现[J].西南民族大学学报(自然科学版),2022,48(3):313-321.

LI Yingling, NIU Meiya, LAN Hongfu. Design and implementation of smart mobile office system based on uni-app and SpringBoot[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2022, 48(3): 313-321.

[19] 王建国,刘春国,张彬,等.地下流体台网(天津)基础资料综合管理系统研制与应用[J].地震工程学报,2021,43(5):1014-1023.

WANG Jianguo, LIU Chunguo, ZHANG Bin, et al. Develop-

ment and application of an integrated management system for basic data of underground fluid network in Tianjin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1014-1023.

[20] 张晁军,陈会忠.密集地震观测带来的变革[J].地震研究,2017,40(1):1-14,167.

ZHANG Chaojun, CHEN Huizhong. The challenges brought by dense seismic observation[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(1): 1-14, 167.

[21] 周克昌,纪寿文,郑智江,等.地球物理场流动观测数据管理系统建设[J].震灾防御技术,2017,12(1):78-84.

ZHOU Kechang, JI Shouwen, ZHENG Zhijiang, et al. Construction of system of geophysical data management for field mobile surveying [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(1): 78-84.

(本文编辑:任 栋)



(上接第 643 页)

[13] 侯鑫,马巍,李国玉,等.木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J].岩土力学,2017,38(增刊2):18-26.

HOU Xin, MA Wei, LI Guoyu, et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Suppl02): 18-26.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the

People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

[15] DEKKER L W, DOERR S H, OOSTINDIE K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1667-1674.

(本文编辑:张向红)