

Design of the Data-Acquisition System of the Borehole Magnetometer*

HU Xingxing, TENG Yuntian*, ZHANG Lian, WANG Xiaomei, ZHANG Min

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The borehole comprehensive observation system is used for monitoring seismic precursor information, and the borehole magnetometer is one part of the system. The paper introduced the design of the digital circuit and the inbedded program of the magnetometer, including the control hardware design using MSP430F1611 MCU, high-precision A/D conversion circuit, background magnetic field compensation circuit which can be auto & hand operated, program design of protocol analysis and data transmission, etc. The results of practical observation at Jinhai Seismic Station show: a) the magnetometer is reliable on continuous observation; b) its veracity of measurement is high, which resolution is 0.043 nT; and c) magnetometer meet the demand to auto remote-monitor & control.

Key words: borehole magnetometer; data acquisition systems; compensating field; MSP430F1611

EEACC:3210B;7210G

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.11.016

井下磁力计数据采集系统的研制*

胡星星,滕云田*,张炼,王晓美,张敏

(中国地震局地球物理研究所,北京 100081)

摘要: 根据用于地震前兆信息监测的井下集成综合观测系统对各传感器单元的高可靠性和高精度实时观测及便于远程监控要求,提出了井下磁力计单元的数据采集、控制和实时传输系统。针对井下仪器不能进行人工直接操作的情况,设计了高精度的背景磁场自动补偿系统;在上位机 GPS 定时授时控制下和采用温度补偿有源晶体,设计了高采样时刻记录精度和高幅值记录精度的三通道 24 位 AD 采集;设计了高可靠的采集软件。通过井下集成系统的联调和在天津静海地磁台站的应用表明,该采集系统连续工作稳定,观测结果准确,能够实现观测的自动化远程监控功能,满足井下实际观测要求。

关键词: 井下磁力计;数据采集系统;背景地磁场补偿;MSP430F1611

中图分类号:TH762

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2011)11-1590-06

地震观测是地球科学研究和地震监测与预报研究的基础,地磁观测是地震观测的重要组成部分。中国已经建成了分布较广、观测手段较为完备的数字化地面观测台网。但地面观测易受交通、工业等人为噪音影响,使微小地震和来自地下微弱的地球物理信息混杂在高噪音背景下无法辨认和识别^[1-2]。而井下观测则可以极大地减小地面噪音干扰的影响,提高观测的信噪比^[1-2]。因此,20 世纪 90 年代以来,随着世界科学技术的进步,深井地球物理综合观测在世界发达国家迅速得到发展^[1-2]。由于深井观测仪器要固定在井底,即使仪器发生故

障也不能从井下取出来。因此深井观测仪器不同于一般仪器,要充分保证仪器几乎不发生任何故障^[1-2]。仪器所有的功能操作也只能在地面远程控制^[3]。本文针对井下仪器的高可靠性和高精度实时观测及需要远程监控要求,以 MSP430F1611 单片机为主控制器设计了井下磁力计传感器单元的数据采集、控制和实时传输系统,对 AD 采集的高分辨率和高实时性、背景磁场的自动补偿控制方案的设计,以及和其它传感器单元共用 RS-422 总线与上位机进行数据通信的可靠性协议解析等问题进行了讨论和分析,介绍了监控软件的功能设计,最后给出了磁

项目来源: 中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(DQJB11C30);“十一五”国家科技支撑子专题(2006BAC01B01-02-05)

收稿日期: 2011-05-17 **修改日期:** 2011-07-29

力计整体单元的测试和应用结果。

1 井下磁力计数据采集系统

1.1 系统设计

井下集成综合观测系统是在一口深井中自上而下分别布置着宽频带地震计、温度计、倾斜计、应变计、地磁计等,各传感器探头实现观测数据数字化,地面主机用 RS-422 总线与各传感器进行实时数据通讯,如图 1 所示。

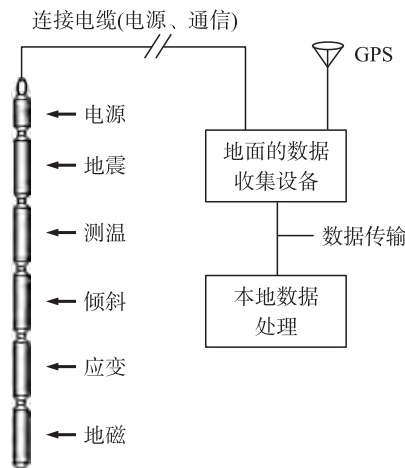


图 1 井下综合观测系统示意图

井下磁力计位于井下集成综合观测系统的最下端,用以探测微弱的地磁变化信号及为井下集成综合观测系统下井安装时提供安装方向指导。它主要由传感器探头、模拟信号调理电路以及采集数字电路三部分组成。其采集、控制部分由控制单元、实时时钟、三分量的地磁信号 AD 模数转换单元、作为地磁场背景场补偿的三通道 DA 数模转换单元、温度/倾角测量单元、RS-422 通讯单元等组成,如图 2 所示。

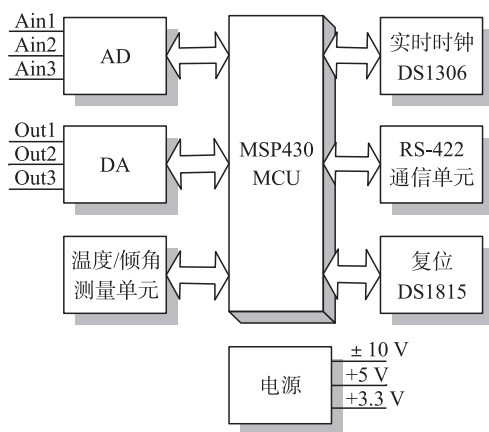


图 2 磁力计数字采集/控制框图

系统采用 MSP430F1611 作为磁力计控制、采集和数据通信的控制处理单元。MSP430 是 TI 公司的

16 位 RISC 混合信号处理器,它具有集成度高、处理能力强、片上外围设备丰富、在线调试、超低功耗及内置看门狗等特性^[4],能适应井下综合观测系统对单机的功耗、体积和实时采集、通信的要求。在井下综合观测集成系统中,由地面主机向各传感器发出命令进行控制。按协议要求,采集时,主机以 1 min 的时间间隔轮流向各传感器发出实时数据传输命令,传感器收到发给自己的传输命令后,解析出命令中的时间参数,并在 1 s 内把主机所请求的该时间内采集的数据按要求发送到 RS-422 总线。为了防止各传感器的时钟不能完全同步以及其它原因带来的处理时间差异,要求各传感器探头能保存当前时刻之前采集的 5 min 的数据。由于磁力计是秒采样,每次采集有 9 个字节(水平分量、竖直分量以及磁偏角分量,每分量 24 位 3 字节),加上时间、温度、倾斜角、背景磁场补偿值以及协议开销等,每分钟的实时数据量为 600 字节左右,所以至少要有 3 kB 左右的数据存储缓冲区。MSP430F1611 集成了 10 kB 的片上 SRAM 以及 48 kB 的程序存储空间^[3],能够满足井下磁力计较大容量的存储空间要求,因此不用片外扩展 Flash 程序存储器和数据存储器,简化了整机硬件电路设计和软件设计,节省了电路板空间,提高了系统稳定性,也降低了系统功耗。

1.2 高精度实时 A/D 采集

数据采集系统关键在于数据的精确采集与可靠传输^[5]。对井下磁力计来说,精确采集包括空间和时间两个方面。地震信号的一个特点是空间分辨率或信号的动态范围要求很高,另一个重要特点是对采样点的采样时刻精度要求很高^[6-7]。

磁力计要求相对观测的测量范围为 $\pm 2\ 500\ \text{nT}$,分辨率要高于 $0.1\ \text{nT}$,观测值保留两位小数,其动态范围达 94 dB。因此 A/D 转换要选用 17 位分辨率以上的芯片。采集系统采用了有较高分辨率的 24 位 Σ - Δ 模数转换芯片 AD7732,在 500 Hz 的采样率下它可以达到 18 位的 p-p(峰-峰)分辨率。2.5V 的参考电压也采用最大温度系数只有 $1\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 以及低至 $1.5\ \mu\text{V}$ 峰-峰值噪声的 MAX6325。由于地磁信号变化缓慢,因此磁力计多用 1 Hz 的采样率^[8]。为获得尽可能高的分辨力,降低采集部分的自身噪声,对 AD7732 初始化时设置其转换时间寄存器值最大为 0xFF ,即 2.686 ms 的转换时间,此时的最大数据输出速率(最大采样率)为 372 Hz,内部 RMS 噪声为 $9.6\ \mu\text{V}$ 。此外,系统还通过电路的精心设计以降低噪声^[9]。

对地震记录信号而言,每一个采样点的采样时

刻记录精度和幅值记录精度同样重要^[6-7]。例如,根据地震波的波速和走时就可以反演地质构造,确定震中的距离和深度^[10]。多个台站组成地震观测台阵网络时,各仪器的时钟守时精度要优于1 ms^[6-7]。磁力计采集系统以实时时钟 DS1306 提供实时采集数据帧的实时时间。为保证守时精度:其一通过上位机的 GPS 定时授时进行时钟的精确校准,其二采用高精度低温漂的温补晶体振荡器提供实时时钟脉冲,使系统达到很高的守时精度。此外,为达到每一个采样点都有精确的采样时刻,在 AD 转换电路中,采用三片 AD7732 并行转换三个分量,保证 3 个分量的同步一致性。各 AD 均编程工作在单次转换状态,即发一次命令转换一次。触发时间由 MSP430F1611 的 Timer0 的定时中断控制,而定时器 Timer0 的计数脉冲由前述供给实时时钟脉冲的同一个晶体振荡器提供,因此可以保证 AD 的采集时刻有与实时时钟 RTC 一样的精度,不受 AD7732 的自身时钟稳定性的影响。并且,这种采集方式即使没有 GPS 授时或采用精度不高的时钟振荡器,在相对于实时时钟提供的基准时间内采样时刻仍然是十分精准的。制作好的电路及磁力计整机如图 3 所示。

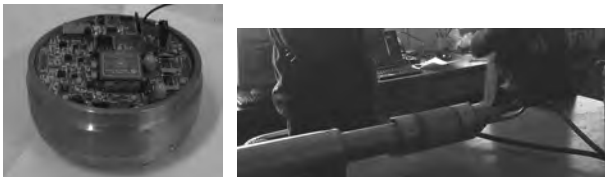


图3 井下磁力计数据采集系统

1.3 背景磁场自动补偿设计

磁通门磁力计一般仅作为磁场的相对观测^[3,8],同时为提高磁力计的分辨率及改善线性特性,使磁通门传感器探头工作于零磁场附近^[3,8]。磁力计的动态范围要求为 $\pm 2\ 500\ \text{nT}$,而地球表面地磁场的大小约为 $60\ 000\ \text{nT}$ ^[11],所以要设置背景磁场补偿。由于补偿磁场要远远大于磁力计相对观测的动态范围,其稳定性和补偿精度是影响磁力计测量精度、有效动态范围、工作稳定性以及分辨率等重要性能的关键环节^[3,12]。以往磁通门大多采用手动电位器的模拟补偿方式^[3,12],或手动数字设置补偿值的方式^[3,12],补偿精度低,操作不便,尤其是需要实地操作,不能适于井下磁力计的远程控制需要。因此井下磁力计设计了单片机控制下高精度的D/A加恒流源反馈的数字自动补偿方式,其实现原理见文献^[3]。D/A采用16位双极性输出的MAX5442,取 $2\ \text{nT/LSB}$ 的补偿灵敏度,可满足 $\pm 65\ 000\ \text{nT}$ 的测

量范围的要求。

背景磁场的补偿还设有手动设置补偿值的补偿方式,上位机专用监控软件的设置对话框操作界面如图4所示。自动补偿方式下,单片机执行自动补偿算法程序,一次补偿过程大约持续4 min~5 min时间,补偿后零点可控制在 $\pm 30\ \text{nT}$ 范围内(零点精度可根据实际需要调整)^[3]。自动补偿方式准确快捷,操作简便,适于井下的实际观测过程。手动补偿可以根据需要人工设置 $\pm 65\ 000\ \text{nT}$ 范围内的任一补偿值,响应速度快,在实时实验、调试中可以即时监测所需要的补偿效果,在下井时也用于系统的安装定向。



图4 背景磁场补偿设置对话框

1.4 软件设计

由于井下各仪器单元共用RS-422总线与上位机通信,各传感器的故障或不严谨的程序可能会使得整个系统不能正常工作。因此,高可靠性是对各仪器的基本要求。

为了兼顾井下磁力计适应井下综合观测的统一监控和单机调试及井下安装定向时的实时传输要求,磁力计程序设计了两种工作状态:被动发送的协议传输状态和主动发送的实时传输状态。在进行井下观测时,工作于协议传输状态下,磁力计采集的数据先放入以分钟数据量为帧长度单位的帧缓存,然后在地面主机的传输控制命令下,向地面主机发送之前的5 min内的某个数据帧。当磁力计工作于实时传输状态下时,采集的秒数据帧实时地向上位机发送。秒数据帧由帧开始标识、时间、温度数据、两分量的倾角数据、三分量的地磁背景磁场的补偿值以及三分量的地磁相对观测值加上帧校验几个部分组成。磁力计主程序流程如图5所示。在命令控制传输状态下,磁

力计不断查询串口中断的输入数据缓冲池,根据缓冲池中接收到的控制命令字节调用相应的命令协议解析程序,进而执行相应的命令控制操作。磁力计进入实时传输状态时,除复位(或停止实时传输)命令外,对其它的控制命令均不响应。

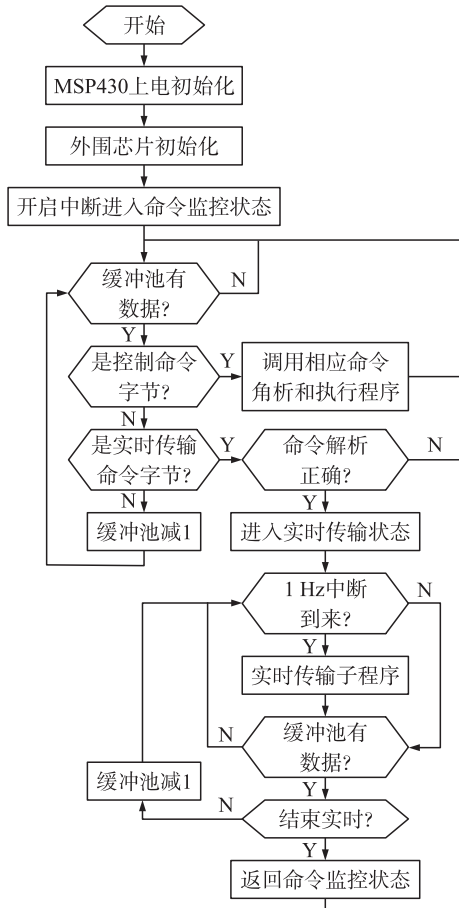


图 5 磁力计主程序流程

井下仪器与上位机通讯时,上位机用单播向井下各传感器发出传输控制命令,传感器则根据地址进行响应。为简化协议,各命令只在帧末尾添加了一帧字节累加和的低字节作为帧校验,但这也增加了对传送中出错命令不能够正确校验的可能性。为提高正确识别控制命令的准确性,首先采用中断方式准确接收串口每一个数据,并设置命令循环缓冲池,在主程序中为每一条应响应命令编写命令解析函数;其次在进行协议解析时,采用精确到每一字节检验的命令协议解析方式,以弥补原协议校验方法的不足。

2 监控软件

监控软件是仪器的一部分,是仪器使用的人机接口。良好设计的软件对仪器的研制和调试能够起到事半功倍的效果,也能极大地方便仪器在实际中

的应用。井下磁力计监控软件采用 VC++ 编写,用多线程实现数据的接收、实时波形的显示、数据计算处理、人机干预和文件存盘等任务,用来对井下磁力计的时间、背景磁场补偿等参数进行设置;监控三分量磁场相对观测和温度的实时波形;显示当前各参数的实时数值,包括三分量磁场相对观测值、当前波形的峰-峰值、三分量背景补偿值、两分量倾角以及温度、采集时间等。监控软件界面简洁,实时波形显示采取自右向左“滑动”的波形显示方式^[13],有很好的视觉效果;根据波形的最大值和最小值自动调整最大、最小显示刻度范围使实时波形总是能够以满幅的方式显示在波形窗口中,使任何时刻都能看到最好效果的完整波形;波形窗口显示的数据长度可以在 30 s 到 1 d 的范围内进行动态设置。此外,监控软件还设有按小时或每天一个文件的长度进行数据的存储等功能。软件运行界面如图 6 所示。

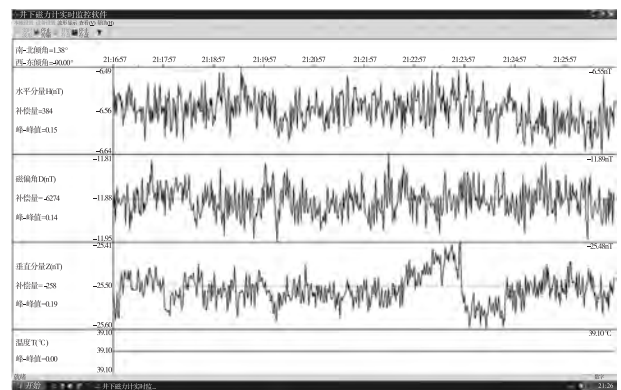


图 6 井下磁力计专用实时监控软件运行界面

3 系统测试及应用

井下系统在实际工作中,由于与上位机的通讯距离远(井下 1000 m),信号发生畸变的可能性较大,以及野外复杂的地面环境产生的各种电磁辐射,使得数据在传送中受到干扰而出错。使用串口调试工具模拟上位机的各种控制命令,并在帧前帧后加入长度不等的各种干扰字节以及人为发送各种可能出现的错帧数据,以检验磁力计程序工作的稳定性。单机测试结果以及后来进行的集成系统长时期的联调测试表明,磁力计在各种情况下均能正常工作,没有出现程序跑飞、响应错误或没有响应等异常。

把磁力计整机放入磁屏蔽筒,记录其噪声,选取稳定后 100 s 的数据,按“地震观测仪器进网技术要求”方法计算其峰-峰值噪声为 0.043 nT,此即为磁力计整机噪声或磁力计分辨率^[14]。然后给磁屏蔽筒加上标准信号源,用正弦信号分别测试磁力计的频率响应、线性等指标,如表 1 所示。

表1 性能指标测试

指标	研制要求	实测
测量分量	三分量磁场	三分量磁场+温度
测量范围	$\pm 62\ 500\ \text{nT}$	$\pm 65\ 000\ \text{nT}$
动态范围	$\pm 2\ 500\ \text{nT}$	$\pm 2\ 500\ \text{nT}$
分辨力	$0.1\ \text{nT}$	$0.043\ \text{nT}(\text{min})$
噪声	$0.2\ \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$	$0.014\ \text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$
最大误差	$0.1\% \text{ FS}+0.5\ \text{nT}$	小于 $2\ \text{nT}$
线性度	优于 0.5%	0.45%
频带范围	$\text{DC}-0.3\ \text{Hz}$	$\text{DC}-0.4\ \text{Hz}$
采样率	1次/s	1次/s
功耗	2 W	3 W

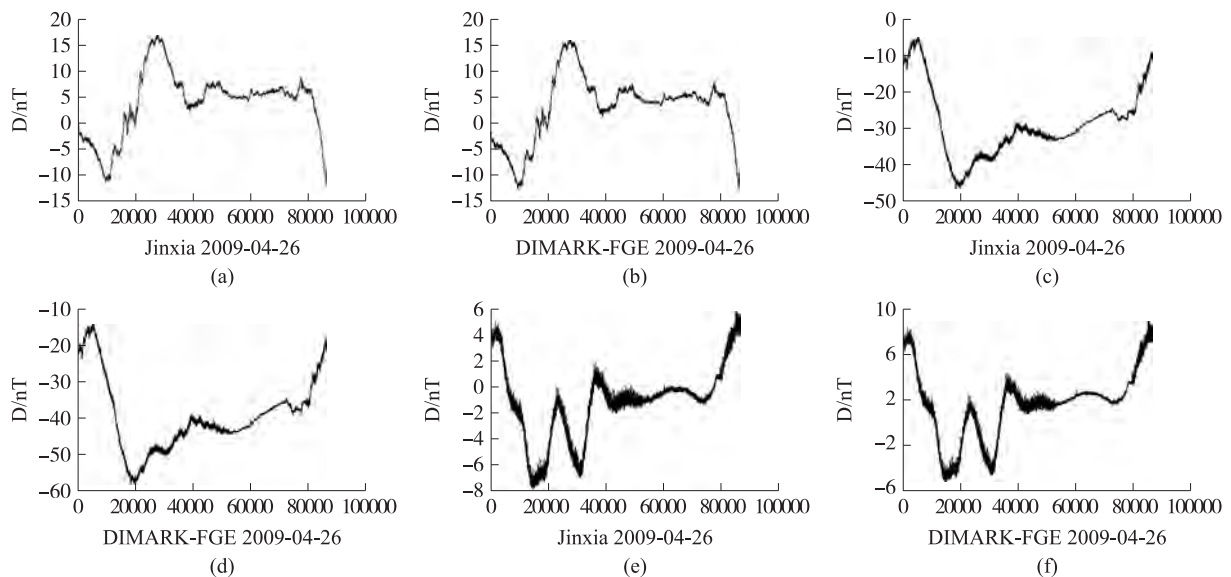


图7 井下磁力计与 DIMARK-FGE 一天(UT)记录的波形比较

4 结论

本文研制的井下磁力计数据采集系统实现了多通道地磁信号的高采样时刻记录精度和高幅值记录精度(高分辨率)的24位采集。提出高精度磁通门背景磁场的自动补偿控制系统,克服了以往磁通门需要实地操作的缺陷,使井下磁力计能够实行地面主机的远程监控。讨论了对于井下仪器的高可靠性设计。该采集系统中针对井下应用和地震信号采集要求提出的解决方法和技术,同样适用于一般地震地磁仪器的应用。

致谢

在本文的研究过程中,得到了周鹤鸣研究员、周勋研究员、周海南副研究员的耐心细致的指导和热忱的帮助,谨向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 徐纪人,赵志新. 深井地球物理观测的最新进展与中国大陆科

井下磁力计完成设计并经实验室性能测试、校准标定及集成系统的联调测试后在天津静海地磁台站进行实际应用观测。静海地磁台站环境干扰少,地下磁房具有理想的恒温性,其日变温差一年中最大只有 $0.2\ ^\circ\text{C}$,并配有进口的秒采样磁通门磁力计 DIMARK-FGE(丹麦)和分钟采样磁力计等多种进口磁力计设备^[15]。连续观期间井下磁力计工作十分稳定,记录的地磁信号与 DIMARK-FGE 等高性能地磁仪器完全一致,限于篇幅,这里只取一天的波形记录以作比较,如图7。从波形上明显可见离台站30 km 远的地铁运行所产生的磁场干扰。

学钻探长期观测[J]. 地球物理学进展,2009,24(4):1176-1182.

- [2] 徐纪人,赵志新. 深井地球物理长期观测的最新进展及其前景[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2006,31(4):557-563.
- [3] 胡星星,滕云田,谢凡,等. 磁通门磁力仪背景磁场的自动补偿设计[J]. 仪器仪表学报,2010,31(4):1-5.
- [4] 靳孝峰,邢文生. 一款三轴磁监测系统低功耗设计与应用[J]. 传感技术学报,2008,21(11):1950-1953.
- [5] 鲁力,张波. 嵌入式 TCP/IP 协议的高速电网络数据采集系统[J]. 仪器仪表学报,2009,30(2):405-409.
- [6] 朱祖扬. 地震数据采集器 GPS 授时系统[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所,2007:1-15.
- [7] 王家行,王大为,胡振荣. GPS 授时技术在地震观测中的应用[J]. 地震工程与工程振动,1997,17(3):124-130.
- [8] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995:123-151.
- [9] 朱欣华,夏云翔,万德钧. 分布式捷联姿态基准中数据采集系统的设计[J]. 传感技术学报,2006,19(3):741-745.
- [10] 潘纪顺,颜廷松,徐朝繁,等. 利用地震走时反演阿尼玛玛缝合带东段及两侧基底结构[J]. 地震研究,2009,32(3):258-263.
- [11] 刘佳,段红梅,李伟. 井中磁通门磁力仪探磁技术研究[J]. 地质装备,2007,8(5):21-23.
- [12] 李江,周勋. 磁通门磁力仪自动补偿的实现[J]. 地震地磁观测与研究,2002,23(3):59-64.

- [13] 胡星星,滕云田,王喜珍,等. 地震波形数据实时监控软件的实现[J]. 地震地磁观测与研究,2008,29(1):104-108.
- [14] DB/T 30.2—2008《地震观测仪器进网技术要求 地磁观测仪



胡星星(1978-),男,2007年毕业于中国地震局地球物理研究所,获工学硕士学位。现为中国地震局地球物理研究所助理研究员,博士研究生。主要从事地球物理观测仪器研发和地球物理信息技术研究,huxx05@sohu.com;

- 第2部分:磁通门磁力仪》.2008,08.
- [15] 庞群英,徐学恭,胡培元,等. 静海地震台地磁加卸载响应比与邻区地震关系研究[J]. 地震地磁观测与研究,2007,28(1):52-56.



滕云田(1966-),男,1988年毕业于北京理工大学电子工程系,获学士学位;1991年在中国地震局地球物理研究所获得硕士学位,2001年于中国地震局地球物理研究所获得博士学位,同期攻读并获得北京大学工商管理硕士(MBA)学位。现为中国地震局地球物理研究所研究员,研究室主任,博士生导师。中国地震局“十五”重大建设项目分项目“国家数字前兆台网建设”首席专家。主要研究方向为地球探测与信息技术,tyt1966@sohu.com。