

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902518

AETA 电磁扰动传感探头系统集成与测试*

何春舅^{1,2} 雍珊珊^{1,2} 王新安^{1,2}

(1. 北京大学 深圳研究生院 集成微系统科学与工程与应用重点实验室 深圳 518055;

2. 北京大学 深圳研究生院 地震监测预测技术研究中心 深圳 518055)

摘要:为了研究电磁信号是否能作为一种可靠的地震前兆信号,设计了一种基于感应式磁传感器用于地震监测的电磁传感探头。该探头电路由前端信号处理电路和后端采集电路组成,可支持频段为 10 Hz~10 kHz,0.1~1 000 nT 较宽动态范围的甚低频、超低频电磁波段的电磁信号采集,灵敏度大于 20 mV/nT@0.1 Hz~10 kHz,18 位分辨率,并通过了多项可靠性测试。此外,该探头已经应用到包括川滇国家试验场在内的 221 个台站中的电磁监测中。现场观测实验表明,该电磁传感探头能有效捕捉到高度相关的电磁信号。

关键词: AETA;地震监测;电磁扰动;磁传感器

中图分类号: TN79+2;O441.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

System integration and test of AETA electromagnetic disturbance sensing probe

He Chunjiu^{1,2} Yong Shanshan^{1,2} Wang Xin'an^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Integrated Micro-systems, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055 China;

2. The Research Center of Earthquake Monitoring and Forecasting Technology, Peking University

Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to study whether the electromagnetic signal can be used as a reliable earthquake precursor signal, an electromagnetic sensing probe based on inductive magnetic sensor for earthquake monitoring is designed. The probe is composed of a signal processing and an acquisition circuit, which can support electromagnetic signal acquisition in very low frequency (VLF) and ultra low frequency (ULF) from 10 Hz~10 kHz in a wide dynamic range 0.1~1 000 nT. The sensitivity of the probe is greater than 20 mV/nT@0.1 Hz~10 kHz, 18-bit resolution. Besides, the probe has passed many reliability tests and has been applied to 221 stations including the Sichuan and Yunnan National Test site for electromagnetic monitoring. Field observation experiments show that the probe can capture a highly correlated electromagnetic signal effectively.

Keywords: AETA; seismic monitoring; electromagnetic disturbance; magnetic sensor

0 引言

电磁扰动即电磁波观测,是一种捕捉地震短临异常的方法之一,受到国内外学者的广泛关注并开展了相关研究^[1-3]。我国于 20 世纪 70 年代中期开始开展相关的研究和观测工作,目前已经取得了很多震例数据,如 1984 年 5 月 21 日的南黄海 M6.2 级地震,1999 年 9 月 14

日和 1999 年 11 月 30 日四川绵竹两次 5.0 地震^[4],特别是大地震,如 2008 年 5 月 12 日的汶川 8.0 级大地震^[5],2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.3 级大地震^[6],2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级大地震^[7]均有电磁辐射异常。丰富的观测资料和实验研究表明,从震前电磁扰动观测信号中提取短临前兆信息是有希望的^[8]。

我国现有电磁扰动台站约 150 个^[9],数字化程度占约一半。现有的电磁扰动观测分量包括电场、磁场和电

收稿日期: 2019-08-28 Received Date: 2019-08-28

* 基金项目: 深圳市科技计划(KJYY20170721151955849)资助项目

磁场 3 种,观测频段也各不相同,安装方式以及标定方法等均存在差异性,导致基于这些观测数据开展的研究带来较大的困难。同时,台站分布很不均匀,东边密集,西边稀少,相对我国如此辽阔的疆域,这样的观测台站分布远远不能满足需求。本项目针对以上问题,提出研制一种易布设、抗干扰、高稳定和高可靠性,且低成本易于广泛布设推广的电磁扰动传感探头^[10-11],该探头监测电磁扰动中的交变磁场分量。本文将采用自主研制的感应式磁棒和采集电路^[12-15],对系统的集成设计和测试进行说明。

1 AETA 电磁扰动传感探头系统集成

本文采用自主研制的感应式磁棒作为传感单元,该传感器监测电磁信号频率范围为 10 Hz~10 kHz,工作温度范围在-40~130 ℃,监测的磁场强度范围为 0.1~1 000 nT。感应式磁棒实物图和频响曲线如图 1 所示,根据频响曲线可知传感器在 0.1 Hz~1.5 kHz 的幅频曲线为线性上升,在谐振频率后信号线性下降。

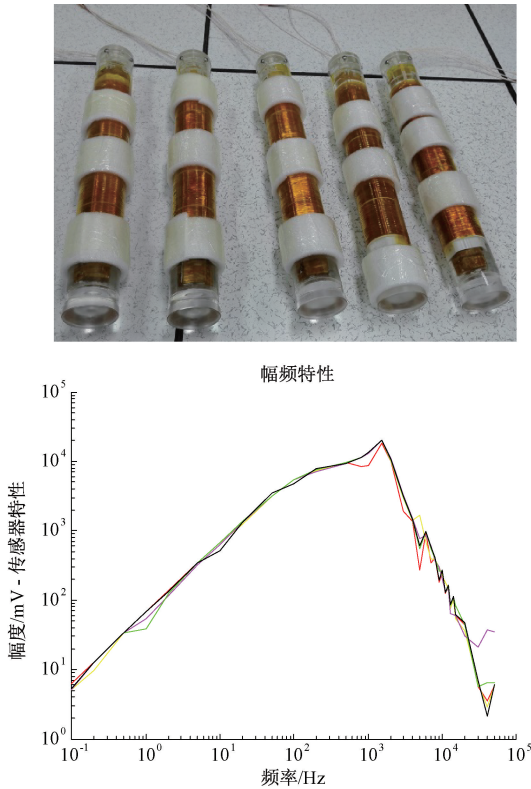


图 1 感应式磁棒实物图和频响曲线
Fig. 1 Physical diagram and frequency response curve of inductive magnetic core

多分量地震监测系统 (acoustic & electro-magnetic testing all in on system, AETA) 电磁扰动传感探头采集电路由前端信号处理电路和后端采集电路组成。前端信号

处理电路由第一级放大电路、磁反馈电路、滤波电路、第二级放大电路、A/D 转换电路组成,如图 2 所示。

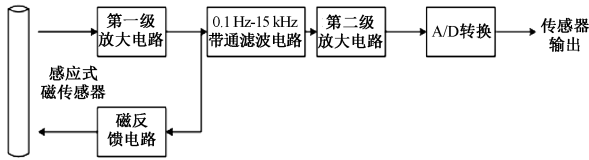


图 2 AETA 电磁扰动传感探头前端信号处理电路
Fig. 2 Block diagram of signal processing circuit at the front end of AETA electromagnetic disturbance sensing probe

后端采集电路采用具有丰富的片内资源和高速的数据处理速度的 STM32F407 作为控制单元,数据传输模块为高速以太网通信接口芯片 W5300,能够实现以太网高速数据传输,满足了实时监测的需求。

电磁传感探头结构及实物如图 3 所示,磁感应式传感单元放置在底部腔体内,电路在上部腔体内,电路与磁感应式磁传感单元之间进行了屏蔽隔离,距离为 15 cm,尽最大程度减小电路对感应式磁传感单元的影响。采用铠装电缆,供电与数据传输一体化,接口采用防水接头,内部做灌胶密闭处理,在 40 m 水压下可长时间防水和抗压。壳体采用特殊的无磁材料,通过有限元分析确认在 30 m 地下可长时间抗压,同时材质具有较高的抗腐蚀特性可长时间放置地下。



图 3 AETA 电磁扰动传感探头结构和实物
Fig. 3 Structure and physical diagram of AETA electromagnetic disturbance sensing probe

2 AETA 电磁扰动传感探头性能测试

AETA 电磁扰动传感探头性能测试项目包括噪声水平测试、灵敏度测试和可靠性测试。

1) 噪声水平测试

将电磁扰动磁传感探头平稳放置在磁屏蔽室内,在屏蔽室外使用系统数据收录软件进行数字信号的收录与存储。由于系统数据收录每次只能存储约 1 min 的数据长度,则分段采集多次数据段,如图 4 所示。最后通过数据分析来获取传感器噪声水平,如图 5 所示。

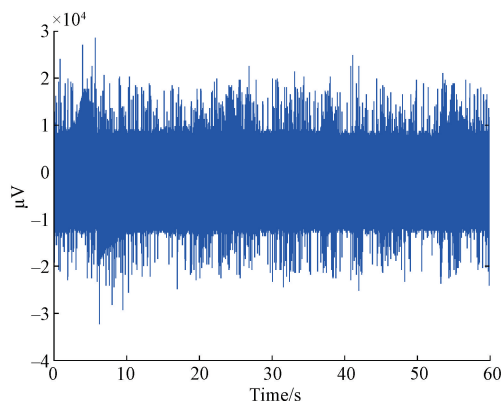


图4 噪声水平测试时间序列

Fig. 4 Time series of noise test

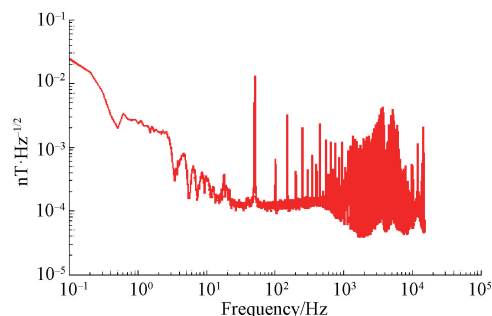


图5 磁场等效噪声曲线

Fig. 5 Magnetic field equivalent noise curve

根据测试结果,噪声水平为 $0.1 \sim 0.2 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ (10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz})$ 。

2) 灵敏度测试

使用任意波形函数发生器 (AFG3252) 产生正弦信号,信号馈入标定线圈中,被标定磁棒放置于标定线圈中,使用系统数据收存存储被标定磁棒输出的数字化信号。通过手动进行变换频率,实现点频信号发射与接收,最终实现设计工作带宽内的扫频标定。通过对系统数据收录仪存储的数字化信号进行数字化处理分析,获得被标定磁传感器的灵敏度曲线。电磁扰动传感探头灵敏度测试过程如图6所示,信号源输入幅度 $V_{pp} = 800 \text{ mV}$, $V_p = 400 \text{ mV}$,信号源内阻为 50Ω ;标定线圈总内阻为 5.7Ω ,转换系数为 15.6 nT/mA 。AETA 电磁扰动传感探头灵敏度曲线如图7所示。

测试结果显示,传感探头灵敏度为 $69.1 \text{ mV/nT} @ 2 \text{ kHz}$;带宽为 $10 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$ 。根据对两组探头的灵敏度测试结果,进行灵敏度一致性分析,如图8所示,两组传感探头一致性的误差约为5%。

3) 可靠性测试

为保证电磁扰动传感探头的工业品质,依照 GB 17799.4-2012《电磁兼容通用标准工业环境中的发射》

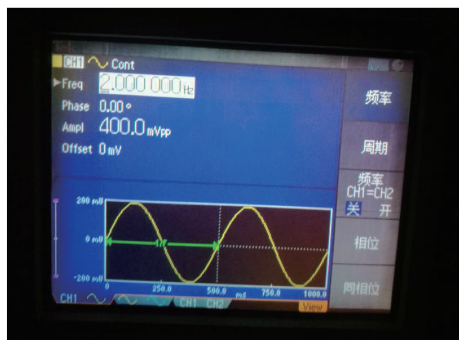


图6 电磁扰动传感探头灵敏度测试过程

Fig. 6 Testing process of sensitivity of electromagnetic disturbance Sensor probe

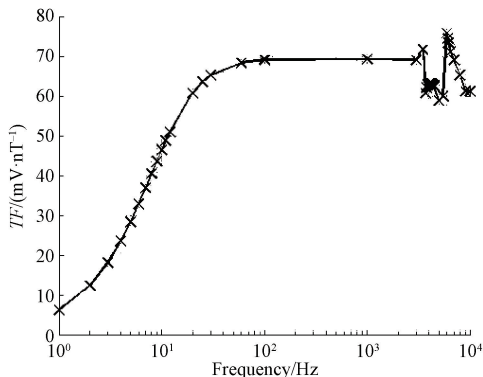


图7 传感探头灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curve of sensing probe

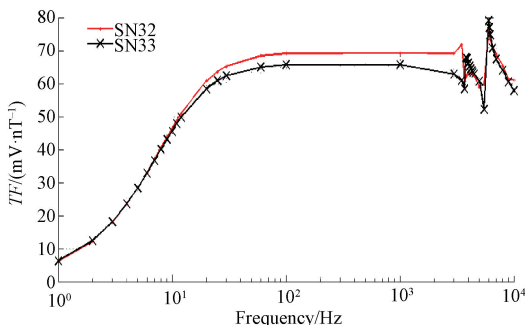


图8 两组传感探头灵敏度曲线对比

Fig. 8 Comparison of sensitivity curves of two Sensor probes
标准,进行电磁兼容辐射测试及传导测试。

在辐射测试中,使用电磁干扰接收机在屏蔽室中进行峰值检波模式的初始预扫描,准峰值测量是基于峰值扫描结果进行,电磁传感探头由双锥及对数周期天线分别进行水平和垂直极化方向测试,辐射测试布局如图 9 所示。频率在 30~230 MHz 时,准峰值限值 50 dB μ V/m,频率在 230~1 000 MHz 时其准峰值限值 57 dB μ V/m。测试结果如表 1 所示。

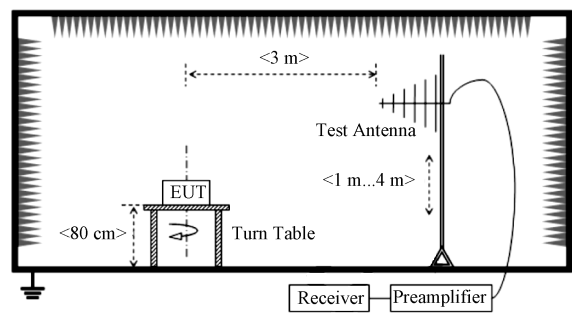


图 9 辐射测试布局

Fig. 9 Radiation test layout

表 1 测试天线垂直极化时测试结果

Table 1 Test results of vertical polarization of test antenna					
No.	频率/ MHz	结果/ (dB μ V $\cdot$ m ⁻¹)	限值/ (dB μ V $\cdot$ m ⁻¹)	余量/ dB	结果
1	39.46	46.67	50	3.33	通过
2	70.49	42.34	50	7.66	通过
3	96.43	39.31	50	10.69	通过
4	133.04	37.99	50	12.01	通过
5	150.01	37.11	50	12.89	通过
6	316.32	27.31	57	29.69	通过

如图 10 所示,在传导测试中,电磁传感探头通过阻抗为 50 Ω /50 μ H 的人工电源网络连接到电源,测试频率范围为 150 kHz~30 MHz。测试在屏蔽室进行,如果准峰值测试值不大于平局值限值,则认为平均值也满足限值水平,最终记录每条载流线上产生的最大骚扰点频率及测量值。在电源端口,频率范围 0.15~0.5 MHz 时,准峰值限值 79 dB μ V,频率范围 0.5~30 MHz 时,其准峰值限值 73 dB μ V;在电信/网络端口,频率范围 0.15~0.5 MHz 时,准峰值限值范围 97 dB μ V,频率范围 0.5~30 MHz 时,其准峰值限值 87 dB μ V。测试结果如表 2 所示。

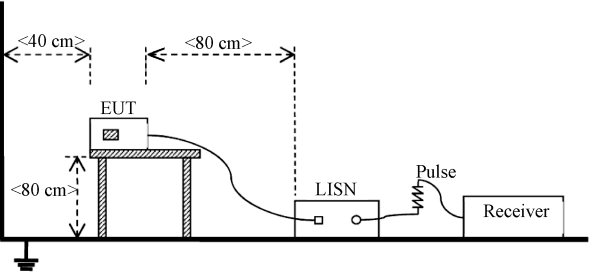


图 10 传导测试电源端口布局

Fig. 10 Conducting test power port layout

表 2 电源端口测试结果

Table 2 Test results of vertical polarization of test antenna

No.	频率/ MHz	结果/ (dB μ V $\cdot$ m ⁻¹)	限值/ (dB μ V $\cdot$ m ⁻¹)	余量/ dB	结果
1	0.27	52	79	27	通过
2	0.79	34.3	73	38.7	通过
3	2.42	51.4	73	21.6	通过
4	5.11	48.9	73	24.1	通过
5	11.83	50.3	73	22.7	通过
6	20.99	53.2	73	11.6	通过

测试结果表明,电磁传感探头电磁兼容测试满足工业品质要求,不会对外界环境及设备产生超过额度的电磁辐射。

为了保证电磁扰动传感探头在各种环境中仍有较好的可靠性,还对其进行了包括盐雾实验、随机振动、包装跌落、防水实验以及温升实验等老化及环境测试。测试详情如表 3 所示。

表 3 电磁扰动探头老化及环境测试

Table 3 Contents of reliability experiment report
of electromagnetic probe

测试项	测试过程	测试结果
盐雾实验	待试验箱内的温度达到 35℃ 后启动设备开始喷雾,连续喷雾 48 h;NaCl 溶液浓度为 5%,温度在 35℃ 时经喷雾后收集液,其 PH 值为 6.5~7.2	
随机振动	设置振动参数:频率范围 5~20 Hz,加速度谱密度 0.96 m ² /s;频率范围 20~500 Hz,加速度谱密度 0.96 m ² /s (20 Hz 处),其他 -3 dB/oct;每个轴向进行 1 h,3 个轴向,共进行 3 h	
包装跌落	跌落试验机上将样品反复从 800 mm 高度跌落。	通过
防水实验	启动无油空气压缩机待压力到达 6 bar 后切断电源,打开出气阀门;观察没入水中的探头及铠装网线是否有气泡产生(本次试验总计加压测试 44 h)	
温升实验	根据器件的功耗情况,选取 6 个温度测试点;电源线和温度测试线从顶端引出,开口用软纸封住;将探头上电,开启温度测试仪记录数据	

3 AETA 电磁扰动传感探头现场观测

本文设计与实现的 AETA 电磁扰动传感探头已经应用在多分量地震监测预测系统中并开展了广泛的观测实验。在中国地震局及省市地震局及防震减灾局的支持下,截止目前为止完成了北京、河北、四川、云南、广东以及台湾等地共计 221 个台站的布设,积累观测数据近 3 年。

因台站较多,这里从221个台站中截取了2017年8月8日四川九寨沟7级地震前后3个不同地区的台站电磁扰动传感探头所捕获到的信号^[16],如图11所示,由图11可以看到,AETA电磁扰动传感探头能捕捉到电磁变化信息。

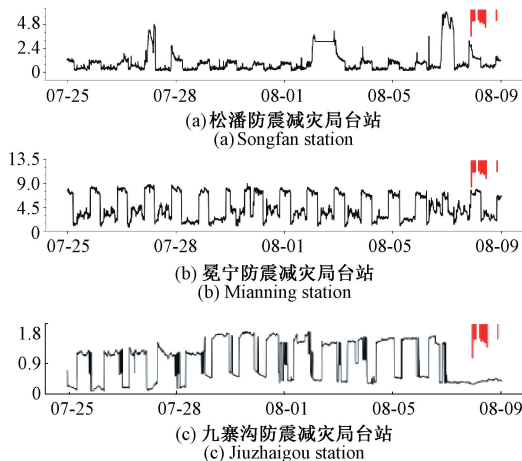


图11 九寨沟7级地震前后部分台站捕获到的电磁信号

Fig. 11 Electromagnetic signals captured by some stations before and after the magnitude-7 earthquake in jiuzhaigou

4 结 论

本文采用自主研制的感应式磁棒和采集电路,对电磁扰动传感探头的系统集成进行设计与实现,系统的性能指标为:传感探头带宽为10 Hz~10 kHz,灵敏度为69.1 mV/nT@2 kHz,噪声水平为0.1~0.2 pT/Hz^{1/2}@(10 Hz~1 kHz),在低频段(<1 kHz)具有较好的频率特性和噪声水平。系统经过了较全面的可靠性测试,包括电磁兼容和老化测试,满足了系统在环境适应性上的要求,使得系统满足了易布设、抗干扰、高稳定和高可靠性,且低成本易于广泛布设推广的设计需求。本文研制的AETA电磁扰动传感探头已经在全国范围内广泛应用,累计观测近3年,系统运行状态良好,积累了丰富的观测数据,为地震监测预测提供了有力的数据支撑。

参考文献

[1] 张治广,高歌,邢喜民,等. 新疆阿瓦提电磁扰动仪前兆异常特征初步分析[J]. 国际地震动态,2018(8): 76-77.
ZHANG ZH G, GAO G, XING X M, et al. Preliminary analysis of precursor anomaly characteristics of Awati electromagnetic perturber in Xinjiang [J]. Recent Developments in World Seismology, 2018(8): 76-77.

[2] 张世中,石航,王兰炜,等. 基于DDS技术的电磁扰动观测系统检查装置[J]. 地震学报, 2013, 35(1): 108-116.

ZHANG SH ZH, SHI H, WANG L W, et al. An inspection equipment for electro-magnetic disturbance observation based on DDS technique [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 108-116.

[3] 刘燕,卢永,刘静,等. 基于磁负反馈及斩波放大的地震电磁扰动感应式磁传感器的研制[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2019,22(3):14-18.
LIU Y, LU Y, LIU J, et al. Development of inductive magnetic sensor for earthquake electro-magnetic disturbance based on magnetic flux feedback and chopper amplifier [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2019, 22(3): 14-18.

[4] 刘君,安张辉,范莹莹,等. 芦山MS7.0与岷县漳县MS6.6地震前电磁扰动异常变化[J]. 地震, 2015, 35(4): 43-52.
LIU J, AN ZH H, FAN Y Y, et al. Anomalous electromagnetic disturbances of Lushan MS7.0 and Minxian-Zhangxian MS6.6 earthquakes [J]. Earthquake, 2015, 35(4): 43-52.

[5] 薛艳,刘杰,宋治平,等. 汶川地震前地震活动特征的普遍性及其机理探讨[J]. 地球物理学报, 2018, 61(5): 1891-1906.
XUE Y, LIU J, SONG ZH P, et al. On the universality and mechanism interpretation of the seismicity characteristics before the 2008 Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 1891-1906.

[6] 秦四清,薛雷,李培,等. 新疆于田7.3级地震前瞻性预测回顾及其震后趋势分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 679-684.
QIN S Q, XUE L, LI P, et al. A review of prospective prediction for the Yutian 7.3 earthquake in Xinjiang province and an analysis on future earthquake situation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 679-684.

[7] 刘君,杜学彬, ZLOTNICKI J, et al. 几次大震前的地面和空间电磁场变化[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2885-2897.
LIU J, DU X B, ZLOTNICKI J, et al. The changes of the ground and ionosphere electric/magnetic fields before several great earthquakes [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(11): 2885-2897.

[8] 中国地震学会地震电磁学专业委员会. 地震电磁扰动观测方法与技术专题研讨会纪要[J]. 国际地震动态, 2012(4): 49-51.
Professional Committee of Seismological Electromagnetics of the Seismological Society of China. Summary of symposium on methods and techniques of seismic electromagnetic disturbance observation [J]. Recent Developments in World Seismology, 2012(4): 49-51.

[9] 孙君嵩,杜学彬,王丽,等. 地电扰动指数GEI研究[J]. 地

- 球物理学报, 2018, 61(11): 4493-4503.
- SUN J S, DU X B, WANG L, et al. Study on the Geoelectric index (GEI). Chinese Journal of Geophysics 2018, 61(11): 4493-4503.
- [10] 王新安, 雍珊珊, 徐伯星, 等. 多分量地震监测系统 AETA 的研究与实现[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 487-494.
- WANG X AN, YONG SH SH, XU B X, et al. Research and implementation of multi-component seismic monitoring system AETA [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(3): 487-494.
- [11] 王新安, 雍珊珊, 黄继攀, 等. 基于 AETA 监测数据的地震预测研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 209-214.
- WANG X AN, YONG SH SH, HUANG J P, et al. Earthquake prediction research based on data of AETA [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 209-214.
- [12] 雍珊珊, 王新安, 庞瑞涛, 等. 多分量地震监测系统 AETA 的感应式磁传感器磁棒研制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 495-501.
- YONG SH SH, WANG X A, PANG R T, et al. Development of inductive magnetic sensor for multi-component seismic monitoring system AETA [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(3): 495-501.
- [13] 庞瑞涛, 雍珊珊, 王新安, 等. 地震监测系统的电磁信号的采集设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(2): 27-30.
- PANG R T, YONG SH SH, WANG X A, et al. Design and implementation of electromagnetic signal processing circuit for earthquake monitoring system [J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(2): 2730.
- [14] 刘长胜, 刘腾, 任同阳, 等. 地空频率域电磁系统空心线圈传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 140-147.
- LIU CH SH, LIU T, REN T Y, et al. Optimization and design of air-core coil sensor for ground-airborne frequency-domain electromagnetic detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 140-147.
- [15] 梁利平, 葛玉石, 徐科军, 等. 低功耗缩进式电磁流量传感器磁路结构优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 26-33.
- LIANG L P, GE Y SH, XU K J, et al. Optimization design of magnetic circuit structure for low-power electromagnetic flow sensor with shrunk measurement tube [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 26-33.
- [16] 张继艳, 王新安, 雍珊珊, 等. 基于 ARIMA 模型的九寨沟

沟 7.0 级地震前兆异常检测[J]. 华北地震学, 2019, 37(1): 28-33.

ZHANG J Y, WANG X A, YONG SH SH, et al. Precursory anomaly detection of Jiuzhaigou M7.0 earthquake based on ARIMA model [J]. North China Earthquake Sciences, 2019, 37(1): 28-33.

作者简介



何春舅, 1998 年于桂林电子科技大学获得学士学位, 现为北京大学深圳研究生院集成微系统科学与工程与应用重点实验室工程师, 主要研究方向为地震监测技术、传感技术。参加过国家重大专项、863 计划以及多项深圳市科技计划的研究, 主要负责相关项目的硬件系统设计以及测试。

E-mail: hechunjiu@pku.edu.cn

He Chunjiu received her B. Sc. degree from Guilin University of Electronic Science and Technology in 1998. Now she is an engineer in the key Laboratory of Integrated Micro-systems, Peking University Shenzhen Graduate School. Her main research interests are earthquake monitoring technology and sensing technology. She also participated in the national major projects, 863 projects and many Shenzhen science and technology projects, mainly responsible for the hardware system design and testing of related projects.



雍珊珊 (通信作者), 2014 年业于北京大学获理学博士学位, 2017 年北京大学博士后出站, 现为北京大学深圳研究生院集成微系统科学与工程与应用重点实验室助理研究员、高级工程师。主要研究方向为传感器及其电路设计、地震监测预测技术。

E-mail: yongshanshan@pku.edu.cn

Yong Shanshan (Corresponding author) received her Ph. D. from Peking University in 2014 and a postdoctoral candidate from Peking University in 2017. She is now an assistant researcher and senior engineer in the key Laboratory of Integrated Micro-systems, Peking University Shenzhen Graduate School. Her main research directions are sensor and its circuit design, seismic monitoring and prediction technology.



王新安, 1992 年于陕西微电子研究所获得博士学位, 现为北京大学深圳研究生院教授, 集成微系统科学与工程与应用重点实验室常务副主任, 主要研究方向为地震监测技术、集成电路与系统。

E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

Wang Xin'an received his Ph. D. from Shanxi Microelectronics Research Institute in 1992. He is now a professor at Peking University Shenzhen Graduate School and executive deputy director of the key Laboratory of Integrated Micro-systems. His main research interests include earthquake monitoring technology, integrated circuits and systems.