

一种适用于地震监测的地声传感探头

黄继攀^{1,2,3} 雍珊珊^{1,2} 王新安^{1,2,3,†} 庞瑞涛^{1,2} 曾敬武^{1,2}

1. 北京大学深圳研究生院集成微系统实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学深圳地震监测预测研究中心, 深圳 518055;
3. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

摘要 为了研究地声信号能否作为一种可靠的地震前兆信号, 设计一种基于压电薄膜的地声传感探头, 用于地震监测。该探头支持0.1 Hz~7 kHz宽频段地声信号采集, 电压分辨率为19.073 μV , 幅值一致性误差小于5.5% (0.47 dB)。该探头通过盐雾试验、随机振动及包装跌落等6项可靠性测试, 并应用到包括川滇国家试验场的178个台站的地声监测中。现场观测表明, 震中周边的台站能够捕捉到地震前后的地声信号。

关键词 地震监测; 地声; 压电薄膜; 传感器探头

A Geo-Acoustic Sensing Probe for Seismic Monitoring

HUANG Jipan^{1,2,3}, YONG Shanshan^{1,2}, WANG Xin'an^{1,2,3,†}, PANG Ruitao^{1,2}, ZENG Jingwu^{1,2}

1. The Key Laboratory of Integrated Micro-System Science and Engineering Applications, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. The Research Center of Earthquake Monitoring and Forecasting Technology, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 3. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

Abstract In order to study whether the geo-acoustic signal can be used as a reliable earthquake precursor signal, a geo-acoustic sensing probe based on piezoelectric film is designed for seismic monitoring. The probe supports 0.1 Hz–7 kHz wide-band geo-acoustic signal acquisition, 19.073 μV voltage resolution, and amplitude consistency error less than 5.5% (0.47 dB). The probe passed 6 reliability tests including salt spray test, random vibration and package dropping, and applied to 178 stations including the Sichuan and Yunnan National Test Site for geo-acoustic monitoring. Field observation experiments show that the stations around the epicenter can capture the underground geo-acoustic signals before and after the earthquake.

Key words seismic monitoring; geo-acoustic; piezoelectric film; sensing probe

地震发生前和发生时, 通常伴随异常声音^[1-3], 20世纪20年代以来, 国内外研究人员对地声的产生机理、特性及其与地震的相关性等方面开展研究^[4-7]。地震的数据记录和岩石破碎实验均证明地声的存在^[8], 但由科学仪器记录的地震相关地声数据仍然匮乏, 地声能否作为一种可靠的地震前兆信号, 目前尚无定论, 需要进一步的研究。

本文设计一种适用于地震监测, 基于压电薄膜, 支持宽频段地声信号采集, 具有高分辨率和高一致性的地声传感探头。该探头支持0.1 Hz~7 kHz宽频段地声信号采集, 电压分辨率为19.073 μV , 幅值一

致性误差小于5.5% (0.47 dB)。通过盐雾试验、随机振动及包装跌落等6项可靠性测试, 证明该探头达到批量生产的标准, 并已应用到包括川滇国家试验场的178个台站的地声监测中。

1 地声传感探头设计与实现

对地震的观测表明, 在较大的地震发生前, 地壳上层在很大的范围内会出现某种异常现象, 断层不过是最后的爆发点, 这个范围称为孕震区或红肿区^[9-10]。本研究中地声传感探头的设计目标是监测台站附近的异常地声信号, 频率在0.1 Hz~7 kHz之

间的次声波、可听声波和超声波,幅值一致性误差小于 15% (1.4 dB)。

1.1 地声传感器的选择

在地声传感器方面可供选择的有压电薄膜传感器、压电陶瓷传感器和光栅光纤传感器等。其中,压电陶瓷传感器的监测频段为 22~220 kHz,不满足要求^[11];光栅光纤传感器价格昂贵,结构复杂^[12];压电薄膜传感器的频响在 10^{-3} ~ 10^9 Hz 之间,在同等受力下比压电陶瓷传感器的输出电压高 10 倍^[13-14]。因此,本研究的地声传感探头选用 TE Connectivity 公司的 LDT4-028K 压电薄膜传感器,选取压电薄膜尺寸为长 20 cm,宽 2 cm。

1.2 地声传感探头电路的设计

如图 1 所示,地声传感探头的电路包括电荷放大电路、低通滤波电路、二级放大电路、AD 转换电路、数据采集电路、数据传输电路和供电电路。

利用电荷放大器,将压电薄膜的电荷量转换为电压量。由于电荷放大器的输出电压与电缆电容无关,所以放大倍数由加入的反馈电容决定。电荷放大电路可以使得传感器与电路板之间的路径长度不会影响电荷放大器的输出电压,同时还可以有效地降低传感器周围寄生电容带来的电荷泄漏。电荷放大电路中的运放选用 TI 公司的 OPA353 芯片,具有单电源供电、正常工作功耗小、输入/输出轨到轨、增益带宽积高 (44 MHz) 以及转换速率高 (22 V/ μ s) 等特点。

电荷放大器需要有合适的放大倍数、电压摆幅和较小的直流漂移。考虑到地声信号比较微弱的特点,本设计中电路初级放大倍数为 100 倍。为了增

大电路的摆幅,输入信号被钳制在 2.5 V。为了不影响后级放大电路,以便得到极小的直流漂移,我们在电荷放大电路之后加入隔直网络。低频截止频率 f_p 的计算公式如下:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (1)$$

考虑到拟采集低至 0.1 Hz 的地声信号,所以将 f_p 理论值设为 0.08 Hz。本设计使用 T 型反馈电阻来实现高达 4.85 G Ω 的反馈电阻 R_f , C_f 为 390 pF。

设计低通滤波电路时,使用高频截止频率为 7 kHz 的低通巴特沃斯滤波器。巴特沃斯滤波器具有结构简单、带内平坦等优点。滤波器中的关键部件——运放芯片的带宽应足够大、噪声足够低,所以选用 ADI 公司的 AD8646 芯片。AD8646 具有 24 MHz 宽带宽、低电压噪声 (8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz) 和低失调电压 (典型值为 0.6 mV) 等特点。

地声信号经过电荷放大器和滤波器处理后,利用二级放大电路进一步放大,同时提供一个低阻抗输入信号给后级电路。在器件选型方面,同样采用 OPA353,放大倍数为 3 倍。

AD 转换电路选用 TI 公司的 ADS8885。该芯片具有 400 kSPS 采样率,18 位数据分辨率,真差分输入,使用简单,无需额外电路,具有较好的移植性。

数据采集电路选择支持高速数据处理速度的器件,本设计采用 ST 公司的 STM32F407,具有丰富的片内资源和高速的数据处理速度 (168 MHz),可以很好地完成对信号的处理和传送。该芯片主要完成 ADS8885 数据读取,根据探头与上行终端的数据协议,将数据进行整理和打包,然后将数据发送给

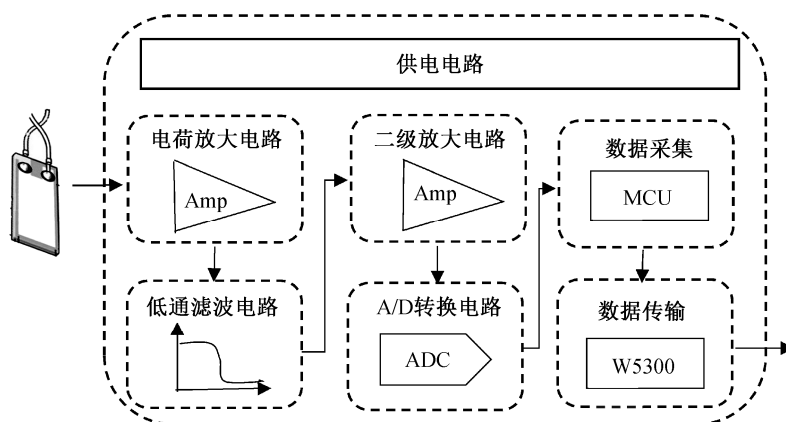


图 1 地声传感探头电路框图

Fig. 1 Circuit diagram of geo-acoustic sensing probe

数据传输电路模块。

数据传输电路模块选择具有高速传输速度的器件 W5300。W5300 是一种高速以太网通信接口器件,其内部集成百兆以太网 PHY 和 TCP/IP 内核,可以支持百兆速度传输。

在供电电路方面,设计目标是将地声传感探头的供电电压 24 V 转换为其他电路所需的 +5、+2.5 和 +3.3 V 等。我们使用单端线性稳压器 TPS73801 输出 +5 和 +2.5 V 电压,使用 AMS1117-3.3 输出 +3.3 V 电压。

1.3 地声传感探头结构的设计

地声传感探头要感知地下传来的地声信号,波动类型为机械波。在结构设计时,需要保证探头具有一定的刚性、防水性和抗干扰性等,最重要的是尽量减小对声波的衰减。本研究选择刚性金属材料通过机加工而成,并充分考虑防水设计,如图 2 所示。

2 地声传感探头性能测试

地声传感探头 AD 转换器的分辨率为 18 位,摆幅电压为 5 V,电压分辨率为 $5/2^{18}=19.073 \mu\text{V}$ 。地声

传感探头其他指标需要使用相关仪器进行测试,包括功能、频响、一致性和可靠性测试等。

首先进行功能测试,测试探头能否正确采集信号。图 3 为地声传感探头敲击功能测试图,用固定大小的金属球从固定距离和高度滑下,撞击地声传感探头。数据采集结果如图 4 所示,在 0~0.02 s,金属球未撞击探头,地声信号保持不变;0.02 s 左右,探头受到金属球撞击,信号开始上下振动,并随时间逐渐衰减;在 0.06 s 后,振幅衰减到零,信号再次平稳不变。由图 4 可以看出,探头能够实现正确的传感和采集功能。

然后,进行地声探头的频响测试,结果如图 5 所示。依据 -3 dB 点的截止频率,探头的频响范围为 0.1 Hz~7 kHz,达到 0.1 Hz~7 kHz 的设计要求,可以实现从次声波、可听声波到超声波间地声信号的采集。

由于探头需大规模布设,所以需要有足够好的一致性。本文设计一种小球撞击一致性测试方法,将同一小球从同一高度落下,分别对不同的传感探头进行撞击,记录输出信号,进而进行一致性的计算。一致性的标准如表 1 所示,参数的偏差范围

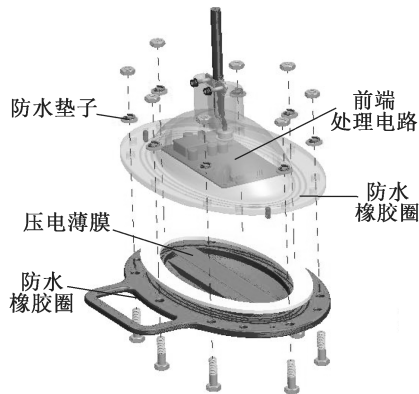


图 2 地声传感探头结构透视图

Fig. 2 Structural scenograph of geo-acoustic sensing probe

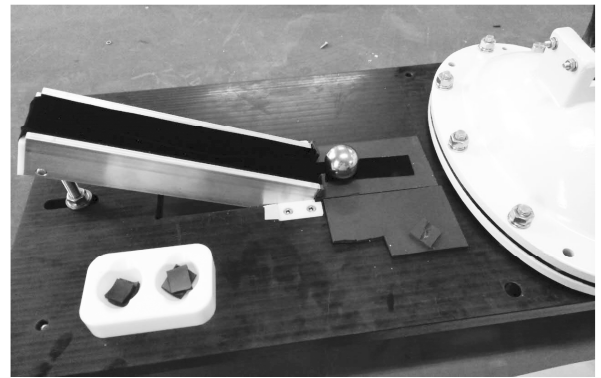


图 3 地声传感探头敲击测试

Fig. 3 Tap test photo of geo-acoustic sensing probe

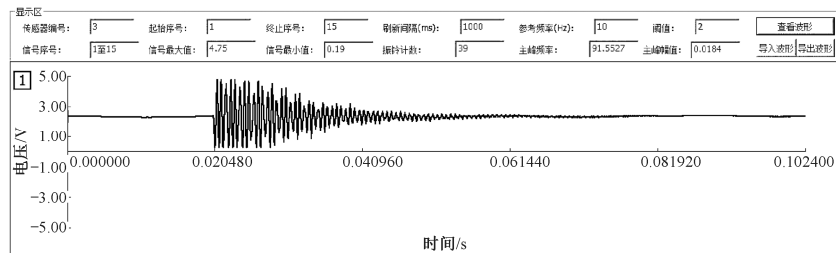


图 4 地声传感探头敲击测试结果

Fig. 4 Tap test result of the geo-acoustic sensing probe

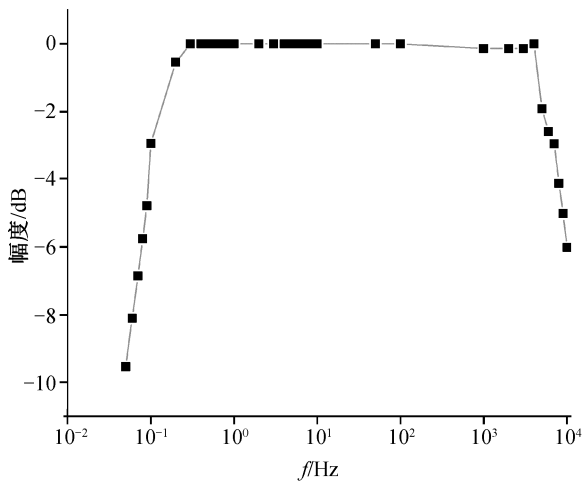


图 5 地声传感探头频响曲线
 Fig. 5 Frequency response curve of geo-acoustic sensing probe

表 1 地声传感探头一致性测试参数
 Table 1 Consistency testing parameters of geo-acoustic sensing probe

阈值	测试时间	最大值	最小值	振铃计数	初值范围
3 V	3000 ms	4.75±15%	0.18±15%	55.8±15%	2.5±15%

为 15%(1.4 dB)。通过对 10 组探头的对比测试, 计算输出信号的最大值、最小值、振铃计数(与电压阈值相关)和初始值范围等, 并根据偏差范围判定是否合格。测试结果如表 2 所示, 地声传感探头输出信号幅值一致性偏差小于 5.5%(0.47 dB), 振铃计数一致性偏差小于 12.2%(1.13 dB), 初始值范围一致性偏差小于 4.8%(0.41 dB), 因此一致性较好。

最后, 进行可靠性测试。测试结果如表 3 所示, 可以保证地声传感探头的工业品质。此外, 地声传感探头还通过 GB/T 17626.5-2008 标准的 EMC-浪涌测试。

综上所述, 该探头功能正常、频率响应曲线平

表 2 地声传感探头一致性测试结果
 Table 2 Consistency testing result of geo-acoustic sensing probe

序号	最大值	最小值	振铃计数	初值范围
1	4.77	0.18	57	2.61~2.62
2	4.76	0.19	57	2.58~2.59
3	4.77	0.18	63	2.51~2.52
4	4.77	0.18	61	2.50~2.52
5	4.77	0.19	60	2.50~2.51
6	4.77	0.18	49	2.42~2.43
7	4.77	0.18	50	2.44~2.45
8	4.77	0.18	50	2.46~2.47
9	4.77	0.19	58	2.45~2.46
10	4.77	0.18	53	2.45~2.46
最大偏差	0.4%	5.5%	-12.2%	4.8%
	(0.04 dB)	(0.47 dB)	(1.13 dB)	(0.41 dB)

坦, 范围为宽频带的 0.1 Hz~10 kHz, 一致性较好, 可靠性达到大批量生产的标准, 可以应用到多分量地震监测预测系统 AETA 中。

3 探头现场观测

地声传感探头已经应用于 AETA^[15]中, 我们开展了广泛的观测实验。多分量地震监测预测系统 AETA 在中国布设有 178 个台站(包括川滇国家试验场), 位置如图 6 所示。

考虑到台站较多, 我们从 178 个台站中挑选 3 个不同省份的台站, 利用地声探头进行监测, 如图 7 所示。3 个台站分别是四川省九寨沟防震减灾局台站(104.25°E, 33.26°N)、河北省赤城地震台台站(115.84°E, 40.96°N)以及云南省丽江市山洞台站(100.17°E, 26.97°N)。

AETA 系统中, 地声监测的目的是对比有/无地声信号的差异。为了避免物理量换算中损失精度,

表 3 地声传感探头可靠性测试
 Table 3 Reliability test of geo-acoustic sensing probe

测试项	测试过程	测试结果
盐雾实验	35℃温度下连续喷雾 48 小时, NaCl 溶液浓度为 5%。温度在 35℃时经喷雾后收集液的 pH 值为 6.5~7.2	通过
随机振动	设置振动参数: 频率范围 5~20 Hz, 加速度谱密度为 0.96 m ² /s; 频率范围为 20~500 Hz, 加速度谱密度为 0.96 m ² /s (20 Hz 处), 其他为-3 dB/oct; 每个轴向进行 1 小时, 3 个轴向, 共进行 3 小时	通过
包装跌落	在跌落实验机上, 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(实验总计加压测试 44 小时)	通过
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	通过

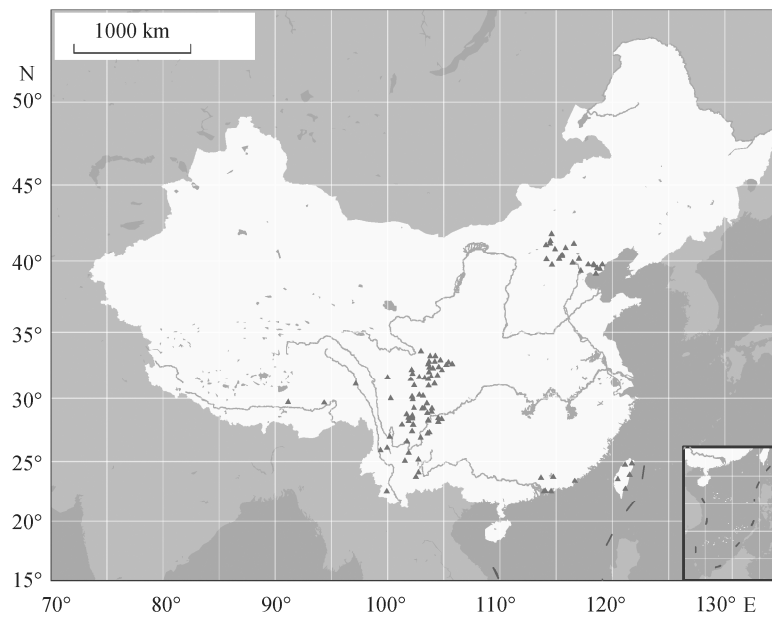


图6 AETA设备在中国布设分布

Fig. 6 Deployment scattergram of AETA equipment in China

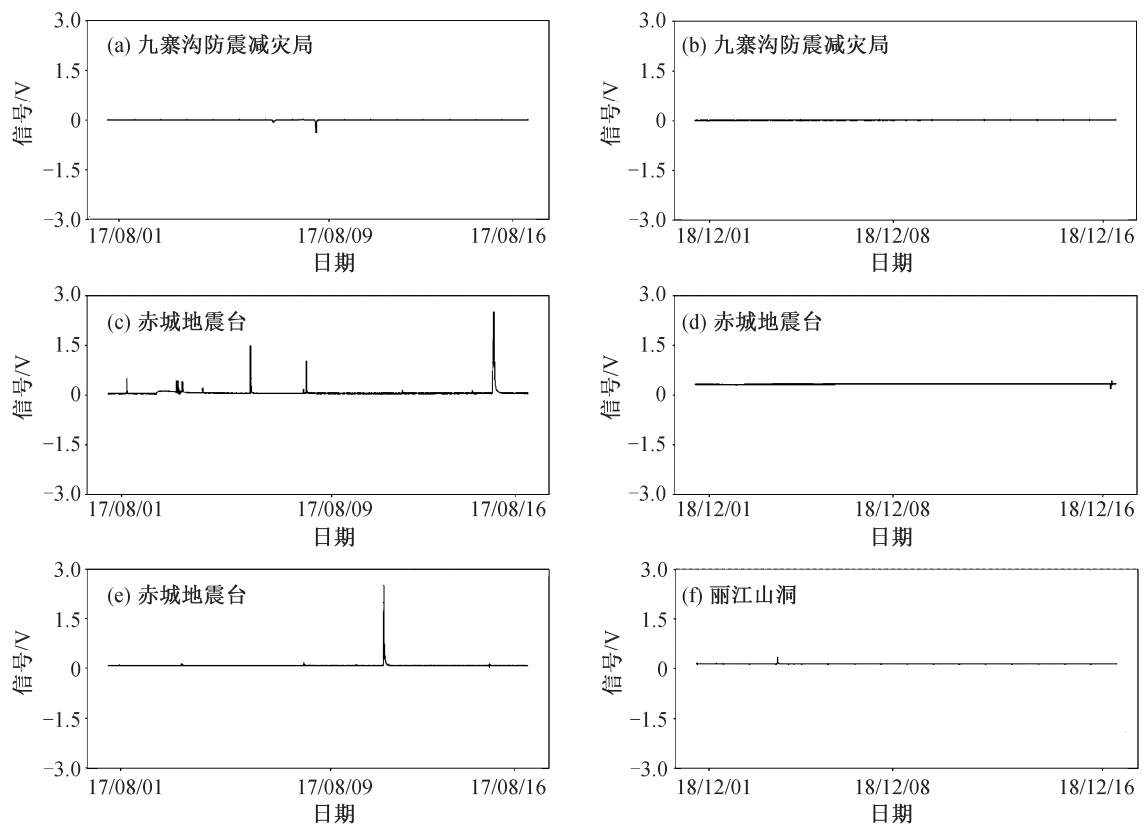


图7 地声传感探头监测信号示例

Fig. 7 Examples of signals monitored by geo-acoustic sensing probe

没有进行物理量之间的换算, 所以图7中地声信号的单位为V。

2017年8月1—16日, 3个台站附近有地震发

生; 2018年12月1—16日, 3个台站附近无地震发生。通过图7可以看出, 2017年8月1—16日监测到的地声信号有一定程度的波动, 捕捉到地声变化信

息; 2018 年 12 月 1—16 日的监测数据为平静状态下的信号, 有接近于 0 值的微小波动, 近乎一条直线。

4 总结

本文设计并实现一种基于压电薄膜传感器的宽频段地声传感探头。传感探头通频带较宽(0.1 Hz~7 kHz), 电压分辨率较高(19.073 μ V), 幅值一致性误差较小, 小于 5.5%(0.47 dB)。该探头通过了盐雾试验、随机振动、包装跌落等 6 项可靠性测试, 达到批量生产的标准。将该探头应用到多分量地震监测预测系统 AETA, 并进行实际的观测, 结果表明地声传感探头能够监测到地下的地声信号。随着 AETA 系统的大规模布设, 该探头将采集到更丰富的数据, 进而能够深入地研究地声与地震发生的关系。未来, 我们也会进一步提高电压分辨率, 降低幅值一致性误差, 使得地声传感探头的监测更加准确。

参考文献

- [1] Tosi P, Sbarra P, Rubeis V D. Earthquake sound perception. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): L24301
- [2] 赵刚. 地声观测的技术研究[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 2002
- [3] Steinbrugge K V. A catalog of earthquake related sounds. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1974, 64(5): 1409–1417
- [4] 丁丹, 倪四道, 田晓峰, 等. 地震相关的声音现象研究进展. *华南地震*, 2010, 30(2): 46–53
- [5] Pichon A L, Guilbert J, Vallée M, et al. Infrasonic imaging of the Kunlun Mountains for the great 2001 China earthquake. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(15): 1814
- [6] 郑治真. 我国前兆地声的观测与研究. *地球物理学报*, 1994, 37(增刊 1): 251–260
- [7] Huang C J, Yeh C H, Chen C Y, et al. Ground vibrations and airborne sounds generated by motion of rock in a river bed. *Natural Hazards Earth System Science*, 2018, 8: 1139–1147
- [8] 田时秀. 地声和地震预报. *物理*, 1978(1): 58–62
- [9] 傅承义. 地球十讲. 北京: 科学出版社, 1976
- [10] 陈运泰, 傅承义. 我国的震源物理研究. *地球物理学报*, 1979, 22(4): 315–320
- [11] 潘玉安, 曹荣祥, 曹良足, 等. 压电陶瓷传感器灵敏度的研究. *压电与声光*, 2005, 27(2): 128–130
- [12] 窦金林. 宽频带光纤声波传感技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015
- [13] 赵东升. PVDF 压电薄膜制作传感器的理论研究. *物理测试*, 2005, 23(2): 748–750
- [14] 赵洪利. PVDF 压电薄膜传感器的研究及其在 PCBA 模态分析中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2009
- [15] 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 487–494