

# 适用于大地震临震预测的地声传感单元

曾敬武<sup>1</sup>, 雍珊珊<sup>1</sup>, 郑文先<sup>2</sup>, 韩朝相<sup>1</sup>, 林科<sup>1</sup>, 张国新<sup>2</sup>, 王新安<sup>1</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 深圳市微纳集成电路与系统应用研究院, 广东 深圳 518055)

**摘要:**震前地声是一种重要的地震前兆信息, 对其进行有效的监测有助于对地震孕育机制研究和地震预报工作。一种适用于大地震临震监测的地声监测系统, 通过深井放置在基岩附近绕过地表的滤波, 直接监测来自地下的地震前兆地声信息。文中对该系统中的地声传感单元的传感器特性及其接口电路的设计进行了介绍。传感器组包括三种传感器—压电薄膜传感器、MEMS 麦克风和压电陶瓷传感器, 分别用以监测震前地声信号中的次声波信号、可听波信号以及超声波信号; 传感接口电路用于将传感器采集到的信号处理后由串行通信控制模块上传。

**关键词:**临震预测; 震前地声; 传感系统; 压电陶瓷; 压电薄膜; MEMS 麦克风

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2015)12-0133-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2015.12.030

## Geo-sound Sensor Unit for Imminent Violent Earthquake Prediction

ZENG Jing-wu<sup>1</sup>, YONG Shan-shan<sup>1</sup>, ZHENG Wen-xian<sup>2</sup>, HAN Chao-xiang<sup>1</sup>,

LIN Ke<sup>1</sup>, ZHANG Guo-xin<sup>2</sup>, WANG Xin-an<sup>1</sup>

(1. Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Micro & Nano Research Institute of IC and System Applications,  
Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Geo-sound is a kind of very important precursor signal before earthquake. To make an effective monitoring on geo-sound precursory is of certain significance for earthquake mechanism and imminent earthquake prediction. A geo-sound precursory monitoring system for violent earthquake is proposed. It is placed near the bedrock through a deep hole which can eliminate human disturbance from surface and difference of soil structure in different regions. In this paper, the geo-sound sensors chosen and their interface circuits are introduced in detail. There are piezoelectric film sensor, MEMS microphones and piezoelectric sensors to sense infrasonic wave, sonic wave and ultrasonic. The interface circuits implement the function of transfer sensor signal to other terminal through serial communication protocol.

**Key words:** imminent earthquake prediction; geo-sound precursory; sensor system; piezoelectric sensor; piezoelectric film sensor; MEMS microphone

## 0 引言

中国是全球大陆地震灾害最严重的国家之一<sup>[1]</sup>, 地震对中国经济社会建设造成极大的破坏, 给人民生命财产造成巨大损失。近百年来先后发生了十多次大地震: 1920 年海原大地震死了 24 万人, 1976 年唐山大地震死伤 40 多万人, 2008 年汶川大地震死了 6 万~7 万人, 失踪 1.8 万人, 伤了 37 万多人, 经济损失 8 451 亿元, 损失触目惊心。

目前, 一种被广泛接受的地震成因是基于板块运动在边界处的挤压而导致的地壳或岩石圈块体内由于应力积累到一定程度时突然快速释放的过程。其间会产生地声辐射变化、地温、地磁场辐射、地下流体、地气等变化。作为一种显著的震前征兆, 地声已被国内外学者广泛地观测和研究, 他们为地声的产生机制和特性提供了深入完善的解释<sup>[2-4]</sup>。以往资料表明, 以声波的频率来看, 震前地声可以分为低频地声(60 Hz 以

收稿日期: 2015-03-29

修回日期: 2015-07-01

网络出版时间: 2015-11-19

基金项目: 深圳市战略新兴产业发展专项资金项目(JCYJ20130329113052637)

作者简介: 曾敬武(1989-), 男, 硕士生, 研究方向为集成电路设计与传感系统设计; 王新安, 教授, 主要从事数模混合集成电路可重构算子设计方法、传感器件及集成技术研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151119.1107.002.html>

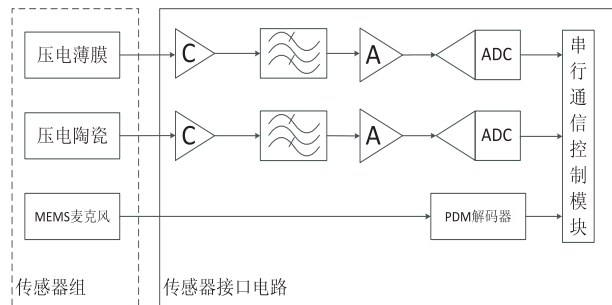
下)、中频地声 (60 ~ 300 Hz) 和 高频地声 (大于 300 Hz) [5]。

相关实验室岩石破裂实验已表明 [4], 岩体在受到挤压、微破裂时产生的地声频率可高达 1 MHz。然而, 大部分观测记录到的震前地声为中频地声以及一些低频地声, 而对于高频震前地声观测记录鲜有报道 [6]。其中存在两个原因: 一个是地声从震源向地表传播时就经历了巨大的衰减, 尤其是高频率的地声信号, 所以很难检测; 另一个是目前采用的检测传感器可检测的频带范围窄 [7-8]。

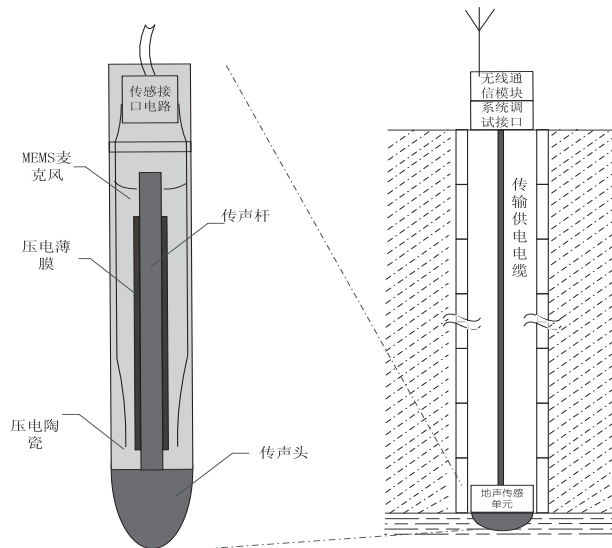
因此, 文中提出了一种适用于大地震临震监测的地声传感单元, 以期解决地声观测不能密集布设和频率响应范围窄、精度低等问题。该传感单元可密集布设, 通过无线传输, 实时将信号发送到数据中心, 进行后期的数据存储 [9] 和数据分析 [10], 探索地震机理。

## 1 地声传感单元系统结构

随着集成电路技术、信号处理技术、传感技术的高速发展, 针对震前地声监测的问题、困难以及发展要求, 文中提出了一种宽频率响应范围、高精度、耐寒耐高温、使用寿命长、可靠性高、成本低的适用于大地震临震监测的地声传感单元, 如图 1(a) 所示。



(a) 地声传感单元框图



(b) 地声传感单元物理结构及大地震临震监测的地声监测系统

图 1 地声传感系统结构

文中提出的地声传感单元由传感器组以及后端的接口电路组成。其中, 前端传感器组紧贴于同基岩直接耦合不锈钢锥形传声头以及传声头顶面链接的传声杆。后端接口电路与传感器组、传声头和传声杆用耐腐蚀、防水、抗摩擦的硬胶一同封装于锥形传声头等直径的柱形空间内, 如图 1(b) 所示。

基于提出的地声传感单元, 采用钻井的方式将其放置于地层深处, 并通过同轴电缆用蓄电池为传感单元供电, 并连接传感单元中的串行通信控制模块和地表的系统调试接口及无线通信模块, 可以构成一种适用于大地震临震监测的地声监测系统 [11], 如图 1(b) 所示。

## 2 传感器特性分析

文中提出的地声传感单元中传感器组包括三种传感器—压电薄膜传感器、MEMS 麦克风和压电陶瓷传感器, 分别用以监测震前地声信号中的次声波信号、可听波信号以及超声波信号。

### 2.1 压电传感器

文中选用压电薄膜传感器和压电陶瓷传感器可分别监测震前地声信号中的次声波与超声波频段。当压电材料受机械冲击或振动时, 其中的偶极子排列被打乱, 并试图恢复原来的状态, 在这一过程中, 就会有电荷形成, 其输出电荷  $Q$  可表示为:

$$Q = (d_{31}\varepsilon_1 + d_{32}\varepsilon_2)E_pS \quad (1)$$

式中,  $d_{31}$ 、 $d_{32}$  为压电常数;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  是应变;  $E_p$  是压电材料模量;  $S$  是压电传感器电极所覆盖的面积 [12-13]。

压电传感器产生的电荷须经过电荷放大器放大转化为电压信号, 再由后续电路处理。

压电薄膜传感器的灵敏度为  $-180 \text{ dB} \cdot \text{V} \times 104 / \text{Pa}$ , 低频响应为  $3.3 \text{ Hz}$  ( $@ R_L = 100 \text{ M}\Omega$ ), 工作温度范围为  $-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 可应用于检测振动与冲击等机械变化量。其适用于震前地声信号中次声波的检测、记录。其频响特性与物理结构如图 2(a) 所示。

压电陶瓷传感器的峰值灵敏度  $75 \text{ dB}$ , 频响范围  $22 \sim 220 \text{ kHz}$ , 工作温度范围  $-20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 可应用于检测材料破裂前的声发射信号。其适用于震前地声信号中超声波的检测、记录。其频响特性与物理结构如图 2(b) 所示。

### 2.2 MEMS 麦克风

MEMS 麦克风的传感元件采用先进的硅基微机电工艺制造, 可以用于检测声波等机械振动。文中选用的 MEMS 麦克风, 除 MEMS 传感元件外, 还集成了数字信号接口电路, 其输出的音频数据格式为 PDM 格式, 便于后续电路读数与处理。其灵敏度为  $-26 \text{ dBFS}$ ,

信噪比 63 dB,动态范围 120 dB SPL,频响范围 20 Hz ~ 20 kHz。

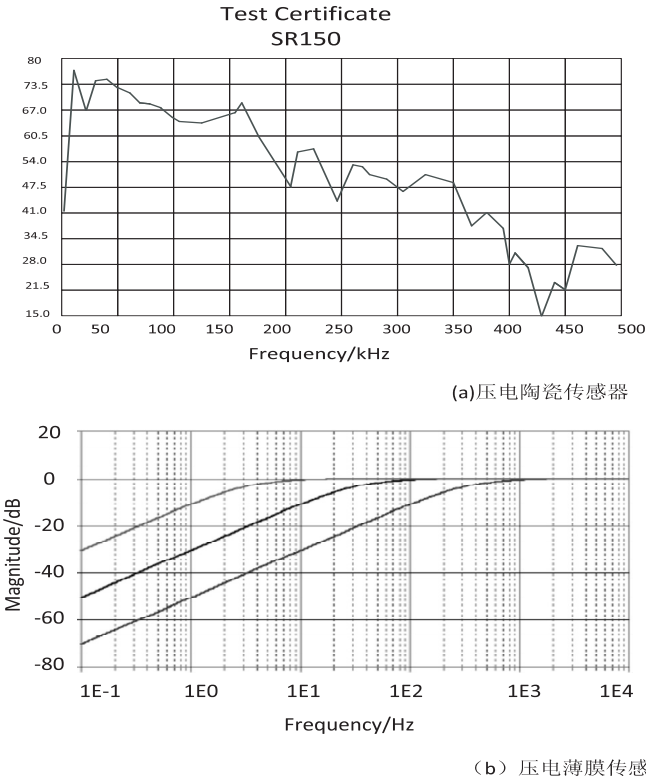


图 2 选用的传感器的频响特性与物理结构

3 传感接口电路设计

传感接口电路是地声传感单元的重要组成部分,一方面用于将压电传感器输出的模拟信号经过电荷放大器、滤波器、电压放大器处理后由模数转换器转化为数字信号后由串行通信控制模块上传;另一方面用于将 MEMS 麦克风输出的 PDM 数字信号经过 PDM 解码器转化为与模数转化器格式相同的数字信号后由串行通信控制模块上传。

3.1 压电传感器接口电路

用于压电薄膜与压电陶瓷的接口电路由电荷放大器电路、带通滤波器电路以及电压放大器和 ADC 电路组成<sup>[14]</sup>。当处理不同压电传感器的输出信号时,压电薄膜与压电陶瓷的接口电路仅电路参数不同,电路架构完全相同。下面将依次对各电路设计原理进行说明。

(1) 电荷放大器电路。

当压电传感器发生形变时,会输出电荷  $Q$ ,使得电荷放大器中的运放负端电压上升。根据运放的“虚短”特性,最终反馈回路会使得运放的负端电压又变为零,所有的电荷  $Q$  都通过  $C_f$  转移到了运放的输出,在输出端产生了一个输出电压。在电荷放大器中,  $R_f$  和  $C_f$  分别是反馈电阻和反馈电容,  $C_f$  将传感器输出的电荷转移到运算放大器的输出端,  $R_f$  为放大器提供直流通路。

电荷放大器的频率响应呈高通特性,如图 3 (a) 所示。

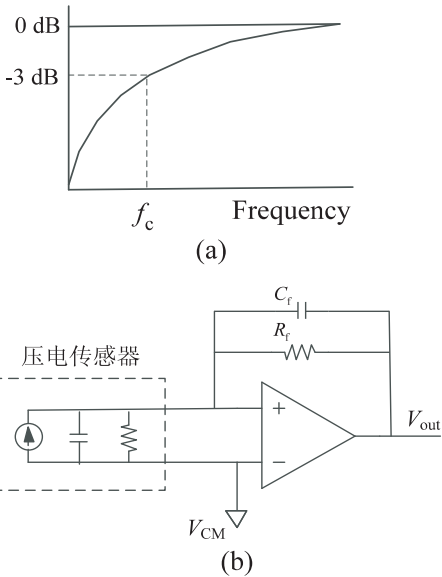


图 3 电荷放大器频率响应与电荷放大器电路

其-3 dB 截止频率为:

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi C_f R_f}$$

带内增益为:

$$\frac{U}{Q} = \frac{-j\omega A}{(1+A)(j\omega C_f + \frac{1}{R_f})} \approx \frac{-A}{(1+A)C_f} \approx -\frac{1}{C_f}$$

其中,运放增益为  $A$ ,且  $A \gg 1$ 。

另外,电荷放大器的噪声主要由三部分组成:运放输入晶体管的热噪声  $en_1$ 、运放输入晶体管和传感器引入的闪烁噪声  $in$ 、反馈电阻  $R_f$  引入的热噪声  $en_2$ ,其总噪声可表示为:

$$ent^2(j\omega) = en_1^2 \left(1 + \frac{C_{in}}{C_f}\right)^2 + \left\{ in^2 + \left(\frac{en_2}{R_f}\right)^2 \right\} \frac{1}{(j\omega C_f)^2}$$

综上分析,电荷放大器的反馈电阻  $R_f$  与反馈电容  $C_f$  决定了其电路特性,应根据应用需求,合理选择电路参数。其中,压电陶瓷传感器与压电薄膜传感器均采用相同电路参数,取  $R_f = 100 \text{ M}\Omega$ ,  $C_f = 5 \text{ nF}$ ,如图 3(b)所示。

## (2) 滤波器电路。

为了达到出色的带内平坦度,较好的带外抑制,以及减少有源运放的数量,文中带通滤波器选择四阶巴特沃兹型滤波器结构,其分别由一个四阶高通滤波器与一个低通滤波器级联,同时,四阶高通或低通滤波器由两个二阶高通或低通滤波器级联组成,如图 4 所示。

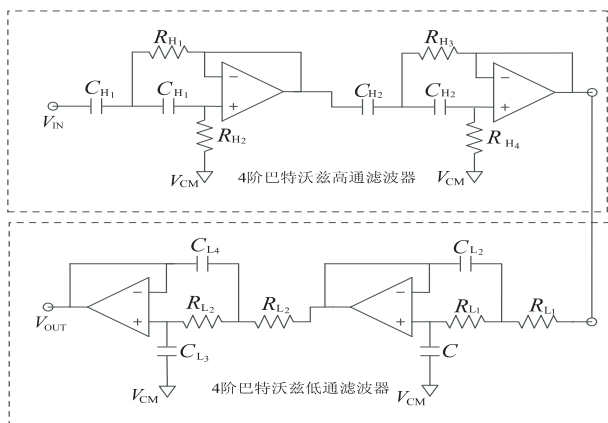


图 4 四阶巴特沃兹带通滤波器

对于巴特沃兹型四阶高通滤波器,其传递函数为:

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_H}{Q_H}s + \omega_H^2} \cdot \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_H}{Q_H}s + \omega_H^2}$$

其中,高通滤波器的截止频率为:

$$\omega_H = \frac{1}{\sqrt{R_{H1}R_{H2}C_{H1}}} = \frac{1}{\sqrt{R_{H3}R_{H4}C_{H2}}}$$

第一级与第二级的品质因数以及滤波器总品质因数为:

$$Q_{H1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{H2}}{R_{H1}}}, Q_{H2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{H4}}{R_{H3}}},$$

$$Q_H = Q_{H1} \cdot Q_{H2}$$

对于巴特沃兹型四阶低通滤波器,其传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_H}{Q_H}s + \omega_H^2} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_H}{Q_H}s + \omega_H^2}$$

其中,低通滤波器的截止频率为:

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{C_{L1}C_{L2}R_{L1}}} = \frac{1}{\sqrt{C_{L3}C_{L4}R_{L2}}}$$

第一级与第二级的品质因数为:

$$Q_{L1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{L2}}{C_{L1}}}, Q_{L2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{L4}}{C_{L3}}},$$

$$Q_L = Q_{L1} \cdot Q_{L2}$$

由于压电陶瓷传感器捕获的是震前地声中的超声波信号,故其传感接口电路的带通滤波器带宽设为 22 ~ 220 kHz。而压电薄膜传感器捕获的是震前地声中的次声波信号,故其传感接口电路的带通滤波器带宽设为 0.5 ~ 20 Hz。

## (3) 电压放大器和模数转换器电路。

压电传感器的输出信号经电荷放大器和滤波器处理后,还需经过电压放大器处理,之后由 ADC 转化为数字信号。电压放大器一方面将传感器信号放大至 ADC 有最优信噪比时所需的电压幅度,另一方面给 ADC 提供一个低阻抗输入信号。

## 3.2 MEMS 麦克风接口电路

文中选择的 MEMS 麦克风内建  $\Sigma\Delta$  调制器,将 MEMS 传感元件采集到的模拟振动信号转化为 PDM 编码的数字信号,故还需使用抽取滤波器对其解码。当 MEMS 麦克风工作始终为 2 MHz 时,使用 25 倍抽取率的抽取滤波器,其输出信号为 80 kHz,整体接口电路如图 5 图(a)所示,其中抽取滤波器的 Matlab 设计频率响应如图 5(b)所示。

## 4 系统功能实现与测试

文中所提出的适用于大地震临震监测的地声单元功能样机如图 6 所示,其中 MEMS 麦克风接口电路与串行通信控制模块基于 FPGA 实现。实验证明该系统能够对震前地声信号中次声波、可听波和超声波进行有效地监测,下一阶段将对实验样机进行集成化开发,并进行实地测量验证。

## 5 结束语

针对地震前兆地声信号的特点,文中提出了一种适用于大地震临震监测的地声传感单元。主要介绍了地声传感单元中各个传感器特性及其接口电路的设计,其中传感器组包括三种传感器——压电薄膜传感器、MEMS 麦克风和压电陶瓷传感器,分别用以监测震前地声信号中的次声波信号、可听波信号以及超声波信号;传感接口电路一方面用于将压电传感器输出的模拟信号经过电荷放大器、滤波器、电压放大器处理后由模数转换器转化为数字信号后由串行通信控制模块上传,另一方面用于将 MEMS 麦克风输出的 PDM 数字

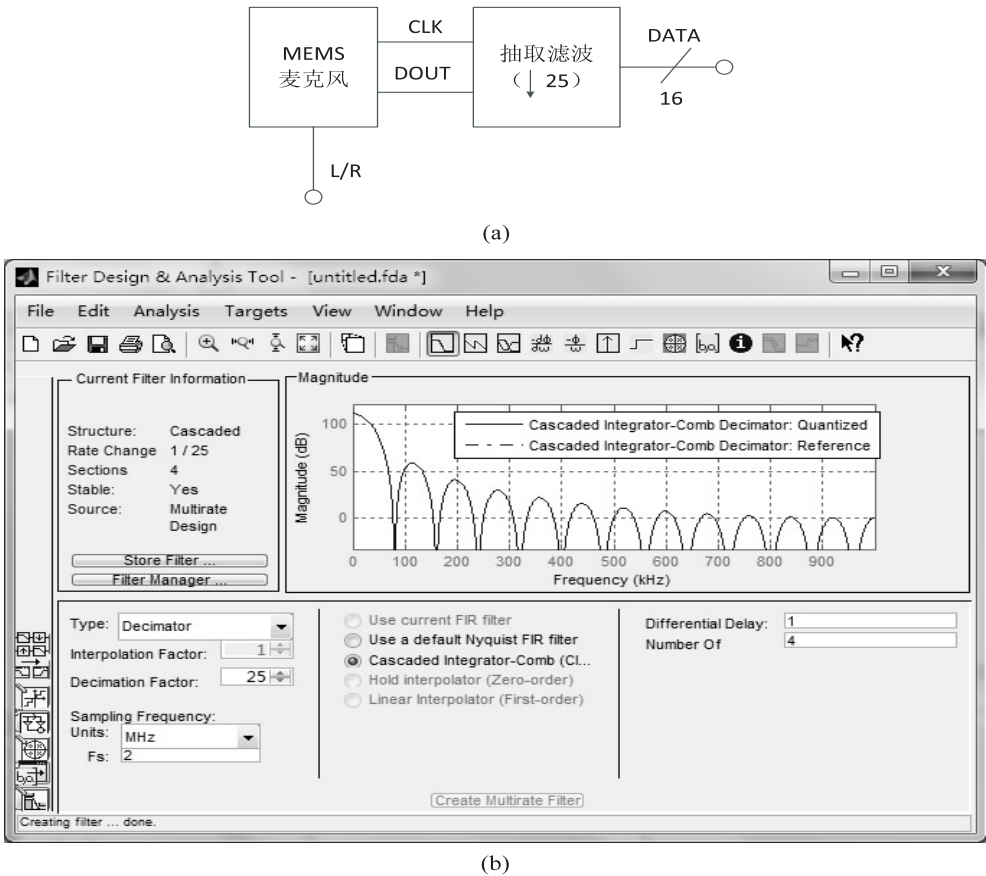


图 5 MEMS 麦克风接口电路与抽取滤波器的 Matlab 设计频率响应

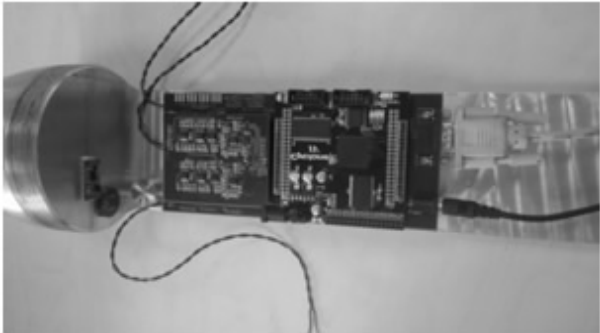


图 6 适用于大地震临震监测的地声单元功能样机  
信号经过 PDM 解码器转化为与模数转换器格式相同的数字信号后由串行通信控制模块上传。

该传感单元可密集布设,通过无线传输,实时将信号发送到数据中心。通过对地震频发区域密集布设该系统,实时对该地区的多种前兆信号在地震孕育过程中的变化以及震前的突变进行监控,对地震孕育机制研究和地震预报具有重要意义。

参考文献:

[1] 张国民. 我国的地震灾害和震灾预防[J]. 科学与社会, 1999(2):44-47.  
[2] Uyeda S. On earthquake prediction in Japan[J]. Proceedings of the Japan Academy Ser B Physical and Biological Sciences, 2013,89(9):391-400.

[3] 李三练. 面对地震[M]. 北京:地震出版社,2009.  
[4] 丁丹,倪四道,田晓峰,等. 地震相关的声音现象研究进展[J]. 华南地震,2010,30(2):46-53.  
[5] 田时秀. 地声和地震预报[J]. 物理,1978(1):58-62.  
[6] 郑治真. 我国前兆地声的观测与研究[J]. 地球物理学报, 1994,37(S1):251-260.  
[7] 池顺良. 深井宽频钻孔应变地震仪与高频地震学—地震预测观测技术的发展方向,实现地震预报的希望[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1164-1170.  
[8] 李建国,刘祖沅,陈献程. 浙江湖南镇水库 1982 年 5 月 22 日 3.1 级地震序列的近场地声观测和初步研究[J]. 地震学报,1985,7(3):314-325.  
[9] 孙毅,韩坤亮. 地震数据的无损压缩存储[J]. 计算机技术与发展,2011,21(8):177-180.  
[10] 李炜,潘作舟,杨静. RI 地震预测模型的分析及其验证[J]. 计算机技术与发展,2013,23(9):255-257.  
[11] 林科,王新安,张兴,等. 一种适用于大地震临震预测的地声监测系统[J]. 华南地震,2013,33(4):54-62.  
[12] 具典淑,周智,欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料,2004,35(4):450-452.  
[13] 曹碧生. 基于 PVDF 的次声波传感器设计[D]. 昆明:昆明理工大学,2012.  
[14] 沈劲鹏. 无源心动传感标签的关键技术研究[D]. 北京:北京大学,2013.

作者：

[曾敬武](#), [雍珊珊](#), [郑文先](#), [韩朝相](#), [林科](#), [张国新](#), [王新安](#), [ZENG Jing-wu](#), [YONG Shan-shan](#), [ZHENG Wen-xian](#), [HAN Chao-xiang](#), [LIN Ke](#), [ZHANG Guo-xin](#), [WANG Xin-an](#)

作者单位：

[曾敬武](#), [雍珊珊](#), [韩朝相](#), [林科](#), [王新安](#), [ZENG Jing-wu](#), [YONG Shan-shan](#), [HAN Chao-xiang](#), [LIN Ke](#), [WANG Xin-an](#)(北京大学深圳研究生院, 广东 深圳, 518055), [郑文先](#), [张国新](#), [ZHENG Wen-xian](#), [ZHANG Guo-xin](#)(深圳市微纳集成电路与系统应用研究院, 广东 深圳, 518055)

刊名：

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名：

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期)：

2015, 25(12)

引用本文格式：[曾敬武](#). [雍珊珊](#). [郑文先](#). [韩朝相](#). [林科](#). [张国新](#). [王新安](#). [ZENG Jing-wu](#). [YONG Shan-shan](#). [ZHENG Wen-xian](#). [HAN Chao-xiang](#). [LIN Ke](#). [ZHANG Guo-xin](#). [WANG Xin-an](#) 适用于大地震临震预测的地声传感单元[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(12)