

# ng 级加速度型 MEMS 微震仪研究\*

王秋<sup>1</sup>, 刘骅锋<sup>1</sup>, 涂良成<sup>1,2</sup>

1. 华中科技大学物理学院引力中心, 湖北 武汉 430074
2. 中山大学物理与天文学院 / 天琴中心, 广东 珠海 519082

**摘要:** 介绍一种基于微机电系统传感技术(MEMS)制备的ng级微震仪, 利用MEMS技术开发的微震仪采用加速度输出, 具有极低的固有噪声、高的矢量保真度和良好的低频响应, 与已商业化的Nanometrics Trillium Compact微震仪性能相当。MEMS微震仪竖直轴器件采用弹簧结构预拉伸设计来克服地球上1g的重力, 使得检验质量在正常工作时处于工作点平衡位置。利用基于边缘效应的电容位移传感技术, 大幅提高位移传感灵敏度, 保证仪器在相同带宽范围内具有与商用微震仪相当的测量分辨率, 从而实现对地脉动振动峰观测。采用互谱相关法对MEMS微震仪及商用微震仪采集的数据进行处理, 实验评估MEMS微震仪噪声谱密度优于 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \sim 10 \text{ Hz}$  ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ )。在实验室内, MEMS微震仪成功监测到2019年12月26日18时36分湖北省孝感市发生的4.9级地震, 初步证明了MEMS微震仪具有地震监测的能力。本文将对MEMS微震仪的工作原理、结构、工艺加工和静态噪声测试、环境适应性测试、原理样机研制情况进行详细介绍。

**关键词:** MEMS微震仪; 低噪声; 地震监测

**中图分类号:** P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)06-0144-07

## Research on the ng-scale MEMS seismometer

WANG Qiu<sup>1</sup>, LIU Huafeng<sup>1</sup>, TU Liangcheng<sup>1,2</sup>

1. Centre for Gravitational Experiments, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. TianQin Research Center for Gravitational Physics, School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** In this paper, a ng-scale low-noise seismometer based on Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) technology has been introduced. The seismometer developed using MEMS technology presents the characteristics of an acceleration detector, with extremely low inherent noise, high vector fidelity and incredibly low frequency response. Like the commercialized Nanometrics Trillium Compact seismometer, except that the spring vibrator structure of the MEMS seismometer is processed by silicon-based penetration etching. The MEMS seismometer vertical device uses a spring-structure pre-stretch design to overcome the gravity of 1 g on Earth, so that the inspection mass is in the working point position during normal operation. Significantly, based on the fringe-effect of the capacitive displacement transducers, the instrument has a measurement resolution equivalent to that of a commercial seismometer within the same bandwidth range. So that it has a measurement resolution equivalent to that of a commercial seismometer and can detect the earth tremors in our cave laboratory.

\* 收稿日期: 2021-12-20

录用日期: 2022-02-26

网络首发日期: 2022-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3201603); 国家自然科学基金(41874089)

作者简介: 王秋(1993年生), 女; 研究方向: 高精度MEMS惯性传感器; Email: qiuwang@hust.edu.cn

通信作者: 刘骅锋(1987年生), 男; 研究方向: 高精度MEMS惯性传感器; E-mail: huafengliu@hust.edu.cn

The co-spectrum correlation analysis method is used to process the data recorded by the MEMS seismometer and the commercial seismometer at the same time, showing the evaluated noise floor of the proposed MEMS seismometer lower than  $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}@0.1-10 \text{ Hz}$  ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1-10 \text{ Hz}$ ). The developed MEMS seismometer in our lab has successfully recorded the earthquake with a magnitude of 4.9 happened in Xiaogan, Hubei at 18:36 on December 26, 2019, preliminarily proving that the MEMS seismometer has seismic monitoring capabilities. The working principle of the MEMS seismometer, the structure, process processing and static noise test, environmental adaptability test, and the development of the principal prototype are introduced in detail in this paper.

**Key words:** MEMS seismometer; low-noise; seismic monitoring

微震仪在地震监测、地质勘查、矿产与油气田资源勘探等领域有较为广泛的应用价值<sup>[1]</sup>。根据能够检测的地震幅度大小和应用的差别,微震仪一般分为微震计和强震计<sup>[2]</sup>。微震计主要用于微弱震动信号测量,如地震监测、地质调查和建筑微震测量等,其自噪声要求优于 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ),带宽在360 s~50 Hz,动态范围一般大于130 dB。常见的商用微震仪有Guralp公司的CMG-3T、CMG-3ESPC和Nanometrics公司Trillium 120等。目前部分微震仪的仪器自噪声已经低于地球新低噪声模型NLNM<sup>[3]</sup>,如美国Kinemetrics公司的STS 2.5微震仪强震计要求噪声优于 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ ,带宽大于100 Hz,动态范围大于90 dB。小量程( $\pm 1 \text{ g} \sim \pm 4 \text{ g}$ )、低成本的MEMS加速度计也越来越多用于强震监测。随着MEMS技术的快速发展,MEMS传感器噪声越来越低,已经可以满足微震测量的需求<sup>[4-6]</sup>。帝国理工学院Tom Pike课题组研制的InSight洞察号火星微震仪<sup>[7]</sup>,采用高精度变面积电容位移传感检测和电磁力闭环反馈的方式,其仪器自噪声为 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}@0.01-3 \text{ Hz}$  ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}@0.01-3 \text{ Hz}$ ),频带范围为 $10^{-3} \sim 40 \text{ Hz}$ ,是目前已经报的噪声最低的MEMS微震仪,作为NASA洞察号火星登陆器的核心载荷已于2018年5月成功发射,并于2019年4月首次监测到火星内部地震信号。基于MEMS技术的高精度的地球物理仪器的出现,为研制小型化、低成本和低功耗的地球物理仪器指明了可行的技术路线<sup>[8]</sup>。

目前已经商用的几款高精度加速度传感器如Sercel公司研制的Sercel DSU-508其噪声可达 $15 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,质量为0.485 kg;Nanometrics公司的Trillium compact微震测量传感器噪声低至 $0.3 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,质量为1.2 kg;Colibrys公司的Colibrys-SF1500传感器噪声低至 $300 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,详细介绍见文献<sup>[9]</sup>。华中科技大学引力中心对高精度MEMS惯性器件

研制有多年的积累,目前已经研制出重力梯度仪用MEMS高精度加速度计<sup>[5]</sup>、MEMS微震仪和MEMS重力仪<sup>[10-11]</sup>等。本文主要介绍采用弹簧结构预拉伸设计,来抵消竖直方向1 g重力的ng级加速度型MEMS微震仪研制。并进行了MEMS微震仪静态噪声本底初步测试。同时,由于MEMS微震仪不具备传统地震仪类似的锁摆机构、核心敏感单元处于自由运动状态,本文还进行了部分环境适应性测试,以达到在输运过程中保证结构完整,并满足用于空间微振动测量的发射条件的目的。

## 1 MEMS微震仪传感器模型

单轴MEMS微震仪传感器基本模型为弹簧—振子结构,由质量块、弹簧以及空气或者结构的阻尼组成,是一个典型的二阶线性系统,其运动学方程满足

$$m\ddot{d} + \gamma\dot{d} + kd = F(t), \quad (1)$$

式中 $m$ 为检验质量块的质量, $d$ 为检验质量相对于惯性系的位移, $k$ 为弹簧的刚度系数, $F(t)$ 为系统所受到的外力函数, $\gamma$ 为阻尼。式(1)两边同时除以质量 $m$ ,得

$$\ddot{d} + 2\xi\omega_0\dot{d} + \omega_0^2 = a(t), \quad (2)$$

其中 $\omega_0$ 为整个振子结构的本征频率, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ; $\xi$ 为阻尼率, $\xi = \gamma/2\sqrt{km}$ 。

对弹簧—振子结构设计,需要考虑弹簧的灵活性,包括材料的选择、几何形状、尺寸的确定、载荷及边界条件<sup>[12-13]</sup>。具体而言,不同的材料具有不同的刚度,刚度取决于材料的杨氏模量及泊松比。对单晶硅来说,杨氏模量是晶向的函数,在 $\{100\}$ 面上,在 $[110]$ 方向硅的杨氏模量是最大的(168 GPa),泊松比在 $[100]$ 方向上是最小的(130 GPa)。在 $\{110\}$ 面上,在 $[111]$ 方向硅的杨氏模量是最大的(187 GPa)。硅的泊松比很大,从

0.055 到 0.36, 与方向和测量结构有关<sup>[14]</sup>。形状和尺寸对柔韧性影响很大, 对于一端固定, 另一端自由的悬臂梁, 施加负载以及边界条件, 都会改变其灵活性。在设计时, 需要综合考虑作用于梁上的负载引起的梁的弯曲或伸缩<sup>[13]</sup>。取变形前梁的轴线为  $X$  轴, 与轴线垂直且向上的轴为  $W$  轴。在平面弯曲的情况下, 长度为  $l$  的梁轴线在  $X-W$  平面内弯成一曲线  $AB'$ , 称为梁的挠曲线。

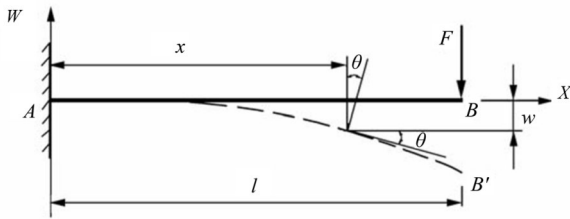


图 1 悬臂梁结构示意图

Fig. 1 Diagram of the cantilever beam structure

可用挠度  $w$  和转角  $\theta$  两个位移量来表示梁的变形, 梁横截面的挠度  $w$  和转角  $\theta$  随截面位置  $x$  而变化, 是  $x$  的连续函数, 即

$$w = w(x), \quad \theta = \theta(x), \quad (3)$$

在小变形条件下, 两者之间满足以下关系

$$\theta = \tan\theta = \frac{dw}{dx}. \quad (4)$$

因此, 挠曲线上任一点处切线斜率都等于该处横截面的转角, 可将梁的挠曲线近似微分方程书写为

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}, \quad (5)$$

其中  $E$  为单晶硅的杨氏模量,  $I$  为悬臂梁横截面惯性矩,  $M$  为弯矩。对方程 (5) 进行积分, 可以得到转角  $\theta$  和挠度  $w$  为

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \int \frac{M(x)}{EI} dx + C, \quad (6)$$

$$w = \iint \left( \frac{M(x)}{EI} dx \right) + Cx + D, \quad (7)$$

其中  $C$ 、 $D$  为积分常数, 可以通过梁的边界条件和挠曲线来确定。

对于单端导向的悬臂梁, 为了保证没有角度偏转, 在梁末端存在一个弯矩  $M_0$ , 梁的水平方向长度由  $l$  变成  $l_0$ , 其变形后形状呈现一个中心反对称, 在中点处其转角最大为  $\theta_{max}$ , 曲率  $d\theta_{max}/ds$  为 0; 根据伯努利-欧拉假设, 其弯矩应该正比于其曲率, 因此梁的中点处弯矩为 0。

梁弯矩方程为

$$M(x) = -F(l - x). \quad (8)$$

将 (8) 式代入式 (6)、(7), 可解出转角和挠度为

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \frac{F}{2EI} x^2 - \frac{Fl}{EI} + C, \quad (9)$$

$$w = \frac{F}{6EI} x^3 - \frac{F}{2EI} x^2 + Cx + D. \quad (10)$$

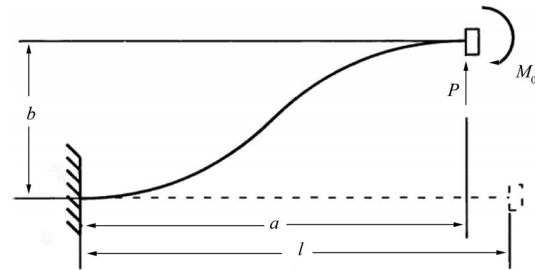


图 2 单端导向悬臂梁结构示意图

Fig. 2 Diagram of the single-ended guidance cantilever beam

考虑 MEMS 微震仪本征频率较低的情况下, 在地面工作会使垂直轴器件质量块在重力场下 (1 g) 产生较大的下垂位移。因此, 对垂直器件采用弹簧结构预拉伸设计, 梁的设计是非线性的<sup>[15-16]</sup>。联合方程 (9)、(10) 确定梁的边界条件后, 在 MATLAB 中代入参数进行验证, 得到梁的挠度方程曲线如图 3 所示。

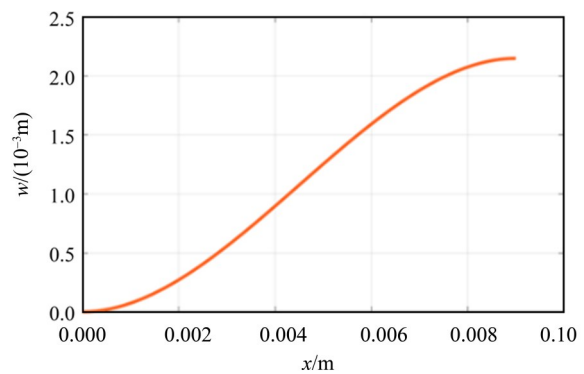


图 3 梁的挠度方程曲线

Fig. 3 Deflection equation curve of the beam.

MEMS 微震仪垂直轴传感器的弹簧振子结构如图 4(a) 所示, 质量块上下的梁成中心对称分布, 上端梁处于压缩状态, 下端梁处于拉伸状态, 对左半边的质量块和梁进行 COMSOL 仿真, 如图 5 所示。从仿真结果可以看出, 梁在 1 g 重力下产生的形变。

在实际工作中, 垂直轴器件采用预拉伸梁设计, 质量块在重力场下下垂至中心工作点附近, 与水平轴器件结构设计状态基本相同, 如图 4(b) 所示。

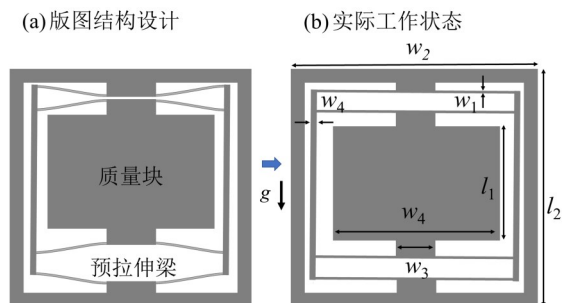


图 4 MEMS 微震仪传感器弹簧振子结构示意图

Fig. 4 Diagram of the MEMS seismometer spring structure

表 1 MEMS 微震仪传感器弹簧振子结构参数

Table 1 Parameters of the MEMS seismometer spring-mass structure

名称	参数	数值	mm
梁宽	$w_1$	0.02~0.03	
边框宽	$w_2$	25	
锚点宽	$w_3$	2.3	
检验质量宽	$w_4$	0.1~0.2	
检验质量长	$l_1$	13	
边框长	$l_2$	25	

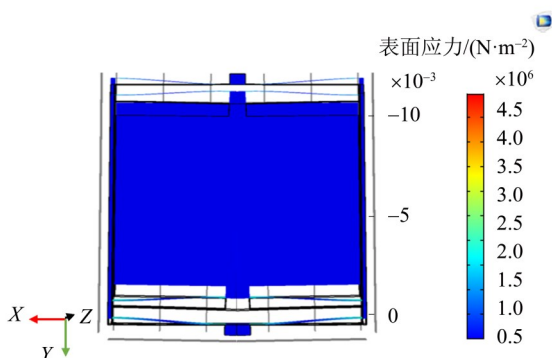


图 5 弹簧振子结构仿真

Fig. 5 Spring oscillator structure simulation

单轴敏感的 MEMS 微震仪传感器整体结构设计如图 6 所示。整体结构包括上板, 弹簧振子结构, 下板和闭环反馈用永磁体组合。

当外界有振动加速度输入时, 中间检验质量在弹簧梁的支撑下相对于边框在面内方向上产生相对位移, 通过基于边缘效应的电容位移传感将位移变换为与之成正比的电容变化, 再通过微弱信号检测电路输出可供采集的电压信号<sup>[17]</sup>。通常情况下, MEMS 微震仪传感器工作在闭环反馈模式下, 即采用电磁力反馈执行机构(质量块上线圈与永磁体构成的磁场)将质量块的位置始终保持在初始工作中心位置从而增加系统的工作频带和线

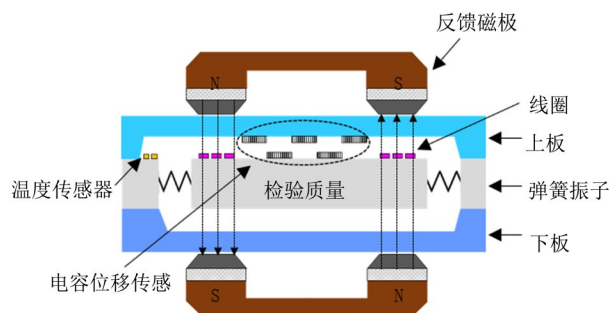


图 6 MEMS 微震仪传感器结构示意图

Fig. 6 Diagram of the MEMS seismometer

性度。线圈通过微机械加工制备, 线圈引线从弹簧振子上通过与玻璃上盖板封装实现电气连接, 从前端放大电路上输入电流工作。

后端测试控制电路采用实验室较成熟的电容位移传感电路, 为 PID 反馈控制, 其原理图如图 7 所示。MEMS 微震仪传感器拾取到外界加速度变化信号, 通过电容位移传感电路转化为可以检测的电压信号, 通过 PID 反馈控制输出, 反馈执行机产生大小相等方向相反的反馈力, 控制检验质量处于平衡位置状态, 实现闭环输出。

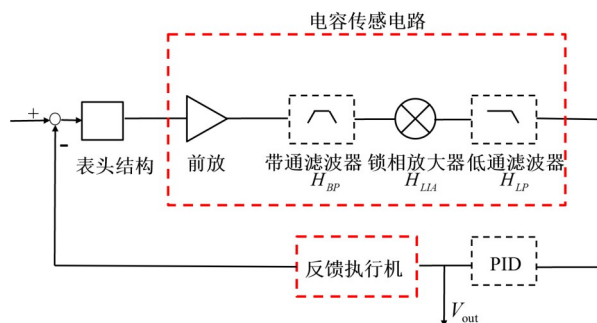


图 7 MEMS 微震仪后端电路原理图

Fig. 7 Schematic of the back-end circuit of the MEMS seismometer

## 2 MEMS 微震仪结构的加工

MEMS 微震仪传感器采用微纳加工工艺进行制备, 主要通过光刻、薄膜沉积、薄膜刻蚀、电镀、深硅刻蚀等工艺步骤加工而成, 采用深硅刻蚀使得硅晶圆免划片释放可动微机械结构的工艺获得 MEMS 微震仪核心敏感单元。MEMS 微震仪可动微机械结构采用一体化硅基穿透刻蚀工艺获得质量块、挠性弹簧梁和框架。MEMS 加工工艺包括背面氧化层去除, 背面金属沉积、正面光刻图形化、叠片、氧化层刻蚀、深硅刻蚀、去胶和去除金属层, 直至器件释放等, 其工艺流程示意如图 8 所示。

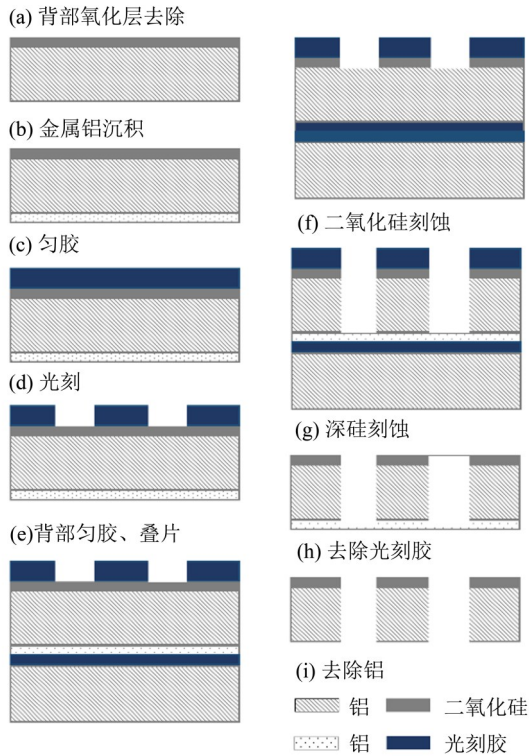


图 8 MEMS 微震仪可动微机械结构工艺

Fig. 8 Through silicon etching process of the MEMS seismometer

MEMS 微震仪核心敏感单元工艺加工难度较大,基本上是现阶段微米量级工艺加工 MEMS 芯片的极限。工艺步骤中深硅刻蚀技术难度最大,在此基础上可实现硅基穿透刻蚀。采用此种工艺制作的 MEMS 微震仪敏感结构,充分利用四寸晶圆  $500\ \mu\text{m}$  厚的单晶硅作为惯性质量块。相较于 MEMS 领域传统的表面加工工艺和基于 SOI 的体硅加工工艺,基于硅基穿透刻蚀的加工工艺可以在有限尺寸下最大程度地降低 MEMS 微震仪的机械热噪声。其难点在于满足 MEMS 微震仪核心敏感单元所需的高刻蚀深宽比、高陡直度和低侧壁粗糙度等。刻蚀后,在扫描电子显微镜(SEM)下观察刻蚀槽,梁的情况如图 9 所示,从图 9 中可以看出,刻蚀形貌较好,陡直度达到  $89.4^\circ$ ,满足工艺需求。

MEMS 微震仪核心敏感单元经释放后,依次进行机械结构性能、电气性能测试,测试后满足条件的结构通过后续封装工艺,与基于玻璃基底的电容位移传感器以及电磁反馈执行机构实现集成。封装后的 MEMS 微震仪传感器芯片结构,如图 10 所示。

通过引线键合工艺将 MEMS 微震仪传感器芯片与电容传感微弱信号检测电路中的前端放大电

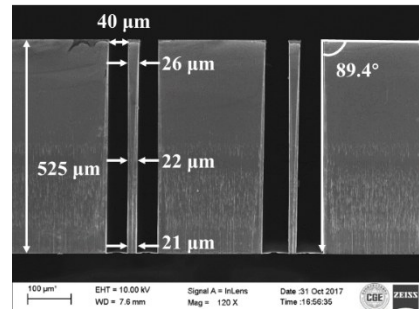


图 9 深硅刻穿工艺加工实物图

Fig. 9 SEM photo of the structure using through silicon etch process

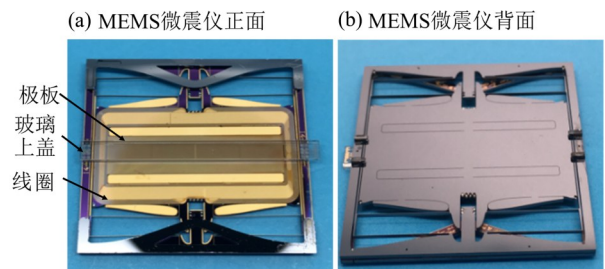


图 10 封装后的 MEMS 微震仪芯片

Fig. 10 Packaged MEMS seismometer chip

路实现电气连接,再与反馈所用磁极进行组装得到单轴敏感的 MEMS 微震仪芯片及其装配体,如图 11 所示。MEMS 微震仪芯片固定在相应装配体中,使得永磁体构成的恒定磁场通过检验质量上的线圈,线圈通电后利用洛伦兹力实现对质量块的力反馈控制。



图 11 MEMS 微震仪单轴装配体

Fig. 11 Assembly of the single-axis MEMS seismometer

### 3 性能测试与样机研制

#### 3.1 实验环境

MEMS 三轴结构由 2 个水平轴和 1 个竖直轴 MEMS 微震仪传感器模块通过正交安装组成。MEMS 微震仪与参考仪器商用传统微震仪进行同址静态测量,利用互谱相关法<sup>[18]</sup>进行数据处理,

以评估仪器噪声。在山洞实验室的隔振地基上进行静态测量实验, 将MEMS微震仪、作为参考的低噪声商用微震仪 CMG-3ESPC 放置在隔振地基上, 进行敏感轴对准, 而后对两台仪器的输出数据进行采集, 时间不少于20 min。采用互谱相关法对数据进行噪声评估, 互谱相关法相应的程序可以进行角度修正, 进而得到单轴MEMS微震仪传感器自噪声测试结果, 如图12所示。噪声谱采用加速度输出, 因其具有极低的固有噪声、高的矢量保真度和良好的低频响应。

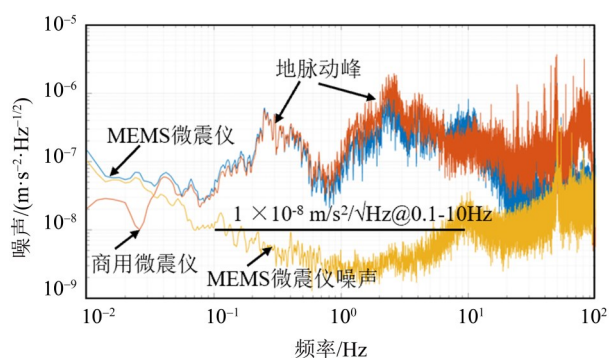


图12 MEMS微震仪的静态噪声测试结果

Fig. 12 MEMS microseismograph static noise test result

图12中可以清楚地观察到MEMS微震仪和商用传统微震仪采集到的地脉动信号(0.2~0.3 Hz, 2~3 Hz 特征峰)。根据测试, 传统商用微震仪具有更低的噪声水平, 经过互谱相关法扣除相关信号后剩余部分认为是MEMS微震仪的自噪声, 可见在0.1~10 Hz范围内的加速度自噪声低于 $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1~10 Hz ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz), 在1 Hz处最低达 $2.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $0.25 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz)。

MEMS微震仪传感器于2019年12月26日18时36分成功监测到湖北孝感地区发生的4.9级地震。微震仪一般采用速度输出, 在MEMS微震仪采集到的地震加速度信号后, 经过一次积分就得到速度信号。图13(a)为武汉地震局地震仪监测的数据, 图13(b)为MEMS微震仪在实验室监测的地震数据。在两个监测点相距约10 km的情况下, 两者记录的地震数据有较高的吻合度; 因地震波传播介质不同, 地震数据不会完全吻合。

### 3.2 原理样机研制

前期对MEMS微震仪进行了三分量原理样机研制, 组装好的MEMS微震仪如图14所示。样机直径130 mm, 高160 mm。3个轴互相垂直放置, 分别测量三个方向的信号, 表头与电路通过排线实现电气连接; 三路电路独立工作, 不产生干扰,

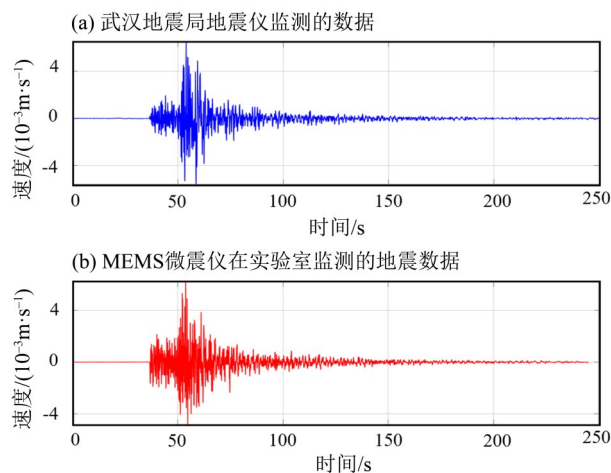


图13 MEMS微震仪记录孝感4.9级地震数据

Fig. 13 Xiaogan M4.9 earthquake recording of the MEMS seismometer

整个原理样机采用接插件与外部实现电连接及信号传输。三分量原理样机可以正常监测实验室所处位置的地脉动信号及地震数据, 目前整个样机总重量小于1.5 kg, 质量主要来源是金属外壳及机械骨架。对单个MEMS微震仪而言, 表头、磁极、电路质量均小于100 g, 后续可以采用不同材料外壳对其重量进行优化。



图14 MEMS微震仪原理样机

Fig. 14 Principal prototype of MEMS seismometer

### 3.3 部分性能测试

对MEMS微震仪传感器进行了基本参数测试, 主要包括带宽、灵敏度、量程、功耗等静态测试。随后进行环境适应性测试, 如随机、正弦振动测试, 冲击测试等。

对标Nanometrics Trillium compact, 本文研制的MEMS微震仪在商业化生产上还与之有差距, 但器件本身性能已经优于前者, 实现批量化生产后可应用于对体积、重量敏感的相关领域。

表2 MEMS微震仪部分参数  
Table 2 Parameters of the MEMS seismometer

参数	数值
道数	三分量
带宽/Hz	0.1~10
灵敏度/(V·g <sup>-1</sup> )	2 000
量程/mg	±2
采样率/sps	200/100
线性度/%	<0.02
总功耗/W	<3
随机振动(20~2 000 Hz RMS)/g	12.45
正弦振动(5~100 Hz)/g	14
冲击振动(100~3 000 Hz)/g	750

#### 参考文献:

- [1] LOWRIE W, FICHTNER A. Fundamentals of geophysics [M]. London: Cambridge university press, 2007.
- [2] LIU H. Design, fabrication and characterization of a MEMS gravity gradiometer [D]. London: Imperial College London, 2016.
- [3] YAN S, XIE Y, ZHANG M, et al. A subnano-g electrostatic force-rebalanced flexure accelerometer for gravity gradient instruments[J]. Sensors, 2017, 17: 2669.
- [4] DAVIES E, GEORGE D S, GOWER M C, et al. MEMS Fabry-Pérot optical accelerometer employing mechanical amplification via a V-beam structure [J]. Sens Actuat A Phys, 2014, 215: 22-29.
- [5] WU W, LIU D, QIU W, et al. A precise spacing-control method in MEMS packaging for capacitive accelerometer applications [J]. J Micromechanics Microengineering, 2018, 28(12): 125016.
- [6] ZHAO C, PANDIT M, SOBREVIELA G, et al. A resonant MEMS accelerometer with 56ng bias stability and 98ng/Hz<sup>1/2</sup> noise floor [J]. J Microelectromechanical Syst, 2019, 28(3): 324-326.
- [7] PIKE W T, STANDLEY I M, CALCUTT S B, et al. A broad-band silicon microseismometer with 0.25 ng/rtHz performance [C]. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018: 113-116.
- [8] MIDDLEMISS R P, SAMARELLI A, PAUL D J, et al. Measurement of the earth tides with a MEMS gravimeter [J]. Nature, 2016, 531(7596): 614-617.
- [9] 王秋, 刘骅锋, 涂良成. 面向地球物理应用的高精度 MEMS 惯性传感器[J]. 导航与控制, 2018, 17(6): 1-9.
- [10] 王秋, 刘骅锋, 许强伟等. 0.3 ng/Hz<sup>1/2</sup> 超高灵敏度 MEMS 加速度计研究进展[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 100-105.
- [11] TANG S, LIU H, YAN S, et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range [J]. Microsyst Nanoeng, 2019, 5: 45.
- [12] HOWELL L M S P, HOWELL L L, MAGLEBY S P, et al. Handbook of compliant mechanisms [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [13] 毕勤胜, 李纪刚. 工程力学. 下册[M]. 北京大学出版社, 2007.
- [14] YI T, LI L, KIM C. Microscale material testing of single crystalline silicon: Process effects on surface morphology and tensile strength [J]. Sens Actuat A Phys, 2000, 83(1/2/3): 172-178.
- [15] SHOUP T E, MCLARNAN C W. On the use of the undulating elastica for the analysis of flexible link mechanisms[J]. J Eng Ind, 1971, 93(1): 263-267.
- [16] HOLST G L, TEICHERT G H, JENSEN B D. Modeling and experiments of buckling modes and deflection of fixed-guided beams in compliant mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(5): 051002.
- [17] WANG Q, LI Z, LIU H, et al. MEMS microgravity measurement module with nano-g/Hz noise floor for spaceborne higher-level microgravity scientific experiment applications [J]. ACS Appl Electron Mater, 2021, 3(8): 3379-3390.
- [18] BARZILAI A, van ZANDT T, KENNY T. Technique for measurement of the noise of a sensor in the presence of large background signals [J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69 (7): 2767-2772.

## 4 结 论

本文主要介绍了一种 ng 级加速度型 MEMS 微震仪。MEMS 微震仪垂直轴器件采用弹簧结构预拉伸设计来克服地球上 1 g 的重力, 使得检验质量在正常工作时处于工作点平衡位置, 其测试噪声水平在 0.1~10 Hz 范围内优于  $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $1 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz), 在 0.1 Hz 处最低为  $2.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $0.25 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz)。MEMS 微震仪于 2019 年 12 月 26 日成功监测到上百公里外孝感发生的 4.9 级地震, 并与武汉地震局台站监测到的地震波形吻合, 初步证明本文提出的 MEMS 微震仪具备地震监测的能力。相较于传统微震仪, MEMS 微震仪具有体积小、成本低、噪声低、精度高、质量轻等优势, 将可用于对体积、质量敏感的空间微重力环境和深空探测等领域。

(责任编辑 王海蓉)

(终校 本刊编辑部)