

Performance Testing of a High Range Accelerometer *

ZHOU Zhijun^{1,2}, SHI Yunbo^{1,2*}, TANT Jun^{1,2}, DING Yukai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
2. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, Shanxi, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A high range accelerometer with a pair of double-clamped beam-mass structure can measure in-plan acceleration. Machete hammer and Hopkinson bar are used to test the sensitivity and the dynamic response of the sensor. The results show that the sensitivity of the sensor is $0.126 \mu\text{V}/g_n$, working frequency is 21.46 kHz, the dynamic repeatability of working band is 3.9%, meeting the actual requirements. To achieve triaxial accelerometer the sensors on single-chip integration of three independent mass structure the reference data are provided.

Key words: accelerometer; high measure range; Machete hammer; Hopkinson bar

EEACC:7230M

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.06.016

一种大量程加速度传感器的性能测试 *

周智君^{1,2}, 石云波^{1,2*}, 唐 军^{1,2}, 丁宇凯^{1,2}

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘 要: 设计的一种大量程加速度传感器敏感单元采用一对双端固支结构, 实现硅平面内加速度的测量, 通过马歇特锤冲击测试试验和 Hopkinson 杆激光干涉冲击测试, 分别标定了传感器的灵敏度和动态响应, 试验结果表明: 测试传感器的灵敏度为 $0.126 \mu\text{V}/g_n$, 工作频带为 21.46 kHz, 工作频带的动态重复性为 3.9%, 能够满足实际的测试需求, 为实现单芯片集成三独立质量块结构的三轴加速度传感器提供了参考依据。

关键词: 加速度传感器; 大量程; 马歇特锤; Hopkinson 杆

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)06-0834-04

大量程加速度传感器是指具有大动态测量范围的加速度计, 范围可以在几百 g_n 到上万 g_n , 甚至高达几十万 g_n 。目前主要用在炮弹引信和航空、航天惯性导航等领域。在这些领域中需要进行大量的振动和冲击测试, 测试环境比较恶劣, 采用传统工艺生产的加速度传感器难以实现。而采用微机械加工工艺制造的 MEMS 大量程加速度传感器由于具有耐冲击、抗过载能力强、响应快、稳定性高等特点, 能满足恶劣环境下的测试要求, 因此大部分的大量程加速度传感器都采用 MEMS 加工工艺。大量程加速度传感器在军事领域当中具有非常重要的应用价值, 是 MEMS 技术在军事武器装备, 尤其在引信侵彻过程的惯性测试和控制应用中的关键技术之一^[1-3]。

目前, 国内外已成功研制出了性能优良的高 g 值加速度传感器, 并已成功装备到侵彻弹并应用

于工程实际中。美国 NASA 中心研制的单晶 6H-SiC 压阻式加速度传感器^[4-5], 量程可达 $10^5 g_n$, 固有频率 600 MHz 以上, 传感器灵敏度为 $343 \text{ nV}/g_n$ 。浙江工业大学董健等人设计的整体式悬臂梁结构的加速度传感器^[6], 灵敏度达到 $3.024 \mu\text{V}/g_n$ (5 V 工作电压), 工作频率带宽达到 $0 \sim 81 \text{ kHz}$, 程达到 $0 \sim 5 \times 10^4 g_n$ 。

本文介绍的一种大量程加速度传感器, 采用一对双端固支结构^[7]: 质量块、悬臂梁、外框组成, 用于测量硅平面内的加速度。设计量程为 $15 \times 10^4 g_n$, 抗过载 $20 \times 10^4 g_n$, 频率响应大于 20 kHz。

1 传感器结构

设计的加速度传感器基于压阻效应, 采用硅梁外加质量块的双端固支结构, 如图 1 所示, 质量块由悬臂梁支撑连接在硅基框架上, 其敏感方向在硅

平面内,在受到敏感方向的加速度时,质量块会在敏感方向上带动悬臂梁结构发生弯曲,使得悬臂梁产生轴向的拉伸和压缩变形,在梁上变形区内布置压敏电阻,形成惠斯通电桥,悬臂梁上电阻值随应力作用发生变化,引起测量电桥输出电压变化。该传感器芯片设计量程为 $10^5 g_n$,抗过载能力为 $15 \times 10^4 g_n$ 。图 2 是加速传感器芯片的裸片图。

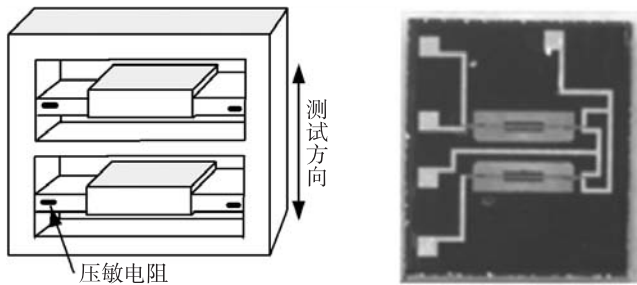


图 1 传感器结构图

图 2 传感器裸片图

该传感器的最大特点是,实现了硅平面内对加速度进行测量的构想,为单芯片上集成三质量块独立结构的三轴加速度传感器奠定了基础。

2 马歇特锤冲击测试试验

马歇特锤结构简单,冲击试验装置如图 3 所示,利用马歇特锤可对传感器的灵敏度进行标定。

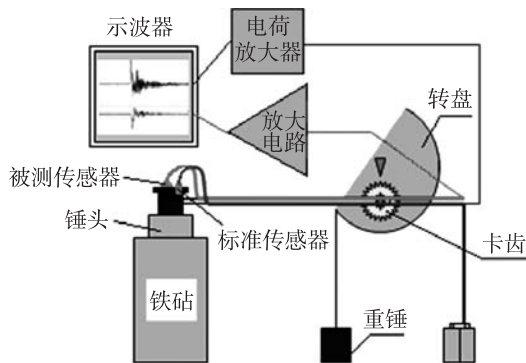


图 3 马歇特锤试验装置示意图

本文采用被测传感器与标准传感器对比的方法对传感器进行冲击测试,标定传感器的灵敏度。将被测传感器和标准传感器固定在特制铝夹具上,然后将其安装在马歇特锤锤头上,将传感器的调理电路、信号输出线固定在连接马歇特锤的锤杆上。在试验中,标准传感器选择为 204 所研制的 988 压电加速度传感器,灵敏度为 $0.253 \text{ pC}/g_n$,988 传感器输出通过外接 KISTLER 5015A 型电荷放大器后与 Tektronix TDS3054B 四通道示波器一路通道相连接,电荷放大器放大倍数 $10,000 \text{ pC}/\text{V}$;被测传感器通过调理电路将输出电桥电压信号放大 18.56 倍的后,接入示波器的另一路通道输出。测试结果如表 1 所示。

表 1 马歇特锤冲击测试结果

988 输出电压值/V	988 输出对应的加速度值/ g_n	被测传感器输出电压值/V
1.1	11 000	0.027
1.38	13 800	0.033
1.58	15 800	0.039
1.74	17 400	0.043
2.06	20 600	0.047
2.26	22 600	0.051
2.46	24 600	0.055
2.7	27 000	0.061
2.78	27 800	0.065
2.81	28 100	0.068
2.90	29 000	0.071
3.11	31 100	0.076

对 988 传感器输出的加速度值与被测传感器输出的电压值通过最小二乘法进行线性拟合,得到拟合直线如图 4 所示。

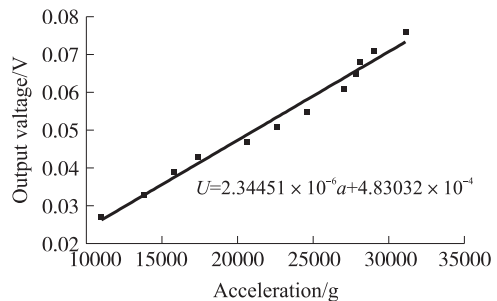


图 4 传感器灵敏度拟合曲线

由图 4,根据加速度值与电压之间的线性关系式,测得传感器的灵敏度为 $0.126 \text{ } \mu\text{V}/g_n$ 。

3 Hopkinson 杆激光干涉冲击测试^[8-11]

本文利用 Hopkinson 杆激光冲击试验测试平台对研发的传感器进行频响校准测试试验,测试平台的工作原理如图 5 所示。

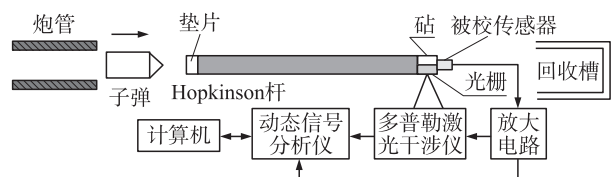


图 5 Hopkinson 杆激光干涉测试原理图

将被测传感器安装在 Hopkinson 杆的尾部,由压缩空气发射一子弹,经炮管,同轴撞击 Hopkinson

杆的起始端的垫片,将会在 Hopkinson 杆中产生近似半正弦的压应变脉冲,并沿 Hopkinson 杆纵向传播。子弹选用直径为 16 mm,材料为 45 钢的平头弹,采用铝制垫片,可以获得激励脉冲脉宽小,幅值能量高的加速度激励信号,能够将被校准系统的全部模态频率都能进行激发,以期能得到被校准传感器完整的动态响应。图 6(a)为激光干涉仪测得的多普勒频移信号经相位解算法得到的激励加速度值,峰值为 85 673.6 g_n ,脉宽 27 μs 。图 6(b)为待校准的电压输出信号。

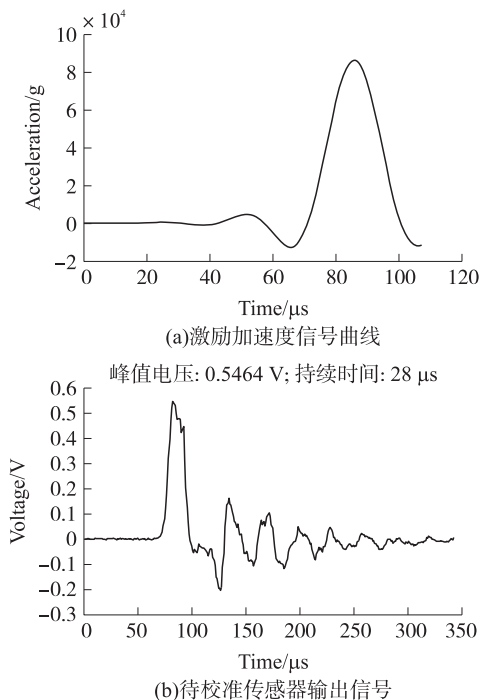


图 6 Hopkinson 杆实验测试数据

利用镜像映射法^[12]对上述的数据进行处理得到传感器的对数幅频特性曲线如图 7 所示。

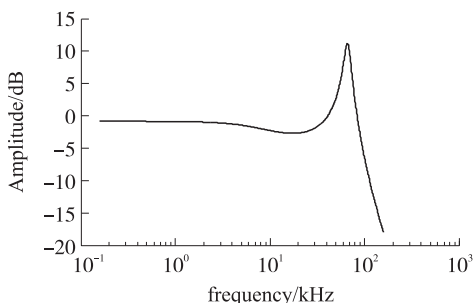


图 7 对数幅频特性曲线

从图 7 可知,封装后传感器的通频带 ω_b 为 90.85 kHz,谐振频率 ω_x 为 66.24 kHz,谐振峰值 L_m 为 11.15 dB,幅值误差在 5% 内的工作频带 ω_g 为 21.92 kHz。对有峰值的对数幅频特性曲线,谐振峰值 L_m 与阻尼 ζ 的关系为

$$L_m = -20 \lg(2\xi\sqrt{1-\xi^2}) \quad (1)$$

固有频率 ω_n 与谐振频率 ω_x 和阻尼 ζ 的关系为

$$\omega_x/\omega_n = \sqrt{1-2\xi^2} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可求出传感器的阻尼和固有频率分别为 $\zeta=0.13$ 和 $\omega_n=67.33$ kHz。

调整压缩空气,产生不同幅值的激励脉冲对传感器进行校准,校准数据见表 2 所示。

表 2 大量程加速度传感器校准数据

次数	激励加速度/ g_n	脉宽/ μs	工作频带/kHz 幅值误差 5%
1	59 634	29	20.42
2	66 945	28	21.16
3	85 673	27	21.92
4	111 761	25	22.34

工作频带平均值

$$\bar{\omega}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{gi} = 21.46 \text{ kHz}$$

工作频带的标准差

$$\sigma_{\omega_g} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\omega_{gi} - \bar{\omega}_g)^2} = 0.84 \text{ kHz}$$

工作频带的动态重复性

$$R_d = \frac{\sigma_{\omega_g}}{\bar{\omega}_g} \times 100\% = 3.9\%$$

4 结论

本文介绍了一种实验室研制的大量程加速度传感器,实现了硅平面内测量加速度的构想。在实验室现有的条件基础上,对传感器进行了马歇特冲击测试试验,标定其灵敏度;进行了 Hopkinson 杆激光干涉冲击试验,对其进行动态校准。试验结果表明,实验室设计的传感器结构合理,可满足实际的应用要求,为实现单芯片集成三独立质量块结构的三轴加速度传感器提供了参考数据。

参考文献:

- [1] 屈新芬,苏伟. 侵彻武器用 MEMS 大 g 值加速度计[J]. 传感器研究与开发,2002,21(3):7-10.
- [2] 祈晓瑾, MEMS 高 g 值加速度传感器研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [3] 许高斌,汪祖民,陈兴. SOI 特种高 g 值 MEMS 加速度计设计与分析[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(6):561-568.
- [4] Okojie R S, Atwell A R, Kornegay K T, et al. Design Considerations for Bulk Micromachined 6H-SiC High- g Piezoresistive Accelerometers [C]// Technical Digest of the 15th IEEE International Conference on MEMS, Las Vegas, NV, Jan. 20-24, 2002. 618-622.
- [5] Atwell A R, Roberson R S, Beliveau A. Simulation, Fabrication and

- Testing of Bulk Micromachined 6H-SiC High- g Piezoresistive Accelerometer[J]. *Sensors and Actuators A*,2003,14:11-18.
- [6] 董健,计时鸣,张立彬. 新型高量程冲击硅微机械加速度传感器的设计与制造[J]. *浙江工业大学学报*,2009,37(1):105-109.
- [7] 赵锐,石云波,唐军,等. MEMS 面内大量程加速度传感器设计与分析[J]. *传感技术学报*,2011,24(8):1118-1121.
- [8] 李玉龙,郭伟国,贾德新,等. 高 g 值加速度传感器校准系统的研究[J]. *爆炸与冲击*,1997,17(1):90-96.
- [9] 夏烈芳,高鹏,战丰丰,等. 基于 Hopkinson 杆的高 g 值冲击传感器校准[J]. *电子设计工程*,2009,17(8):68-70.
- [10] 王华军,王燕,李新娥. 基于 Hopkinson 杆的高 g 值加速度传感器的动态特性分析[J]. *应用光学*,2011,32(5):1049-1052.
- [11] 董力科,代月松,陈昌鑫,等. 基于 Hopkinson 杆的高 g 值加速度计的标定[J]. *电子设计工程*,2011,19(15):86-88.
- [12] 潘龙丽,石云波,周智君,等. MEMS 高量程加速度传感器的动态特性分析[J]. *传感技术学报*,2012,25(10):1392-1394.



周智君(1987-),男,汉族,硕士研究生,主要从事 MEMS 传感器设计、测试等方面的研究,zhouzhijun5@126.com;



石云波(1972-),男,中北大学副教授,目前主要从事 MEMS、微惯性器件等方面的研究,参加了国防 973、国家 863、国家自然科学基金等多项科研项目,y. b. shi@126.com。