

# 一种高冲击 MEMS 加速度传感器的仿真与优化

侯 帅<sup>1</sup>, 张振海<sup>1</sup>, 林 然<sup>1</sup>, 张东红<sup>2</sup>, 李科杰<sup>1</sup>, 柳新宇<sup>1</sup>, 张 亮<sup>1</sup>,  
李治清<sup>1</sup>, 李 剑<sup>1</sup>, 许 涛<sup>1</sup>, 何 隼<sup>1</sup>, 史秀峰<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 合肥市新星应用技术研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 基于高冲击 MEMS 加速度传感器的冲击灵敏度、频率响应与敏感芯片的结构尺寸存在相互制约关系, 提出在满足传感器结构强度和固有频率条件下, 提高传感器冲击灵敏度的理论分析、仿真模拟与实验验证的方法; 运用 ANSYS 软件对敏感芯片的弹性膜片厚度与中心岛厚度进行多次设计与仿真, 通过多组仿真数据对传感器的结构尺寸进行优化; 高冲击实验验证表明, 优化的传感器结构尺寸、性能指标能够满足设计要求, 冲击灵敏度较高。

**关键词:** 高冲击; 加速度传感器; MEMS; 有限元; 尺寸优化

## Research on Simulation and Optimization of a High-g MEMS Accelerometer

Hou Shuai<sup>1</sup>, Zhang Zhenhai<sup>1</sup>, Lin Ran<sup>1</sup>, Zhang Donghong<sup>2</sup>, Li Kejie<sup>1</sup>, Liu Xinyu<sup>1</sup>,  
Zhang Liang<sup>1</sup>, Li Zhiqing<sup>1</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Xu Tao<sup>1</sup>, He Xu<sup>1</sup>, Shi Xiufeng<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Hefei XinXing Application Technology Research Institute, Hefei 230031, China;)

**Abstract:** Since the structure size of the concerned sensor chip is mutually restricted with the performance of high-g MEMS accelerometer, such as the sensitivity and frequency, under the condition of the required strength and natural frequency of the sensor chip, try to improve the sensor sensitivity through size optimization, thus to improve the comprehensive performance of the sensor. After many times simulation of the diaphragm thickness and the central proof mass of the sense chip using the ANSYS software, the model size of the sensor chip is optimized according to groups of simulation data. It is verified by high-g experiments that the optimized sensor can satisfy the experimental requirement, and has high sensitivity.

**Keywords:** high-g; accelerometer; MEMS; finite element; size optimization

## 0 引言

随着现代武器系统的发展, 硬目标侵彻武器研究具有非常重要的意义。高 g 值的加速度传感器已经在军事领域得到了广泛的应用, 如控制侵彻弹药在预定层数起爆, 各种高冲击过载测试等, 具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。微机电系统 (MEMS) 具有微型化、集成化、微能化、可大批量生产、成本低廉的特点, 尤其适合在武器系统中应用, 为推动武器系统小型化和智能化提供了技术支撑<sup>[2-3]</sup>。

常见的高冲击 MEMS 加速度传感器可分为电容式、压电式、压阻式等多种形式<sup>[4]</sup>。电容式高 g 值加速度传感器信号处

理电路复杂, 造价高。压电式高 g 值加速度传感器回零慢, 不适宜多层连续高冲击信号测试, 对多层、长时间历程冲击的测量效果较差<sup>[5]</sup>。由于压阻式高 g 值加速度传感器的工艺成熟, 生产重复性好, 测试相对简单, 批量生产时价格低廉, 可通过补偿电路抑制温度漂移和零点漂移, 适合于大批量生产, 且成本低。

本文提出了一种的高冲击 MEMS 压阻式加速度传感器, 设计量程为 15 万 g。通过在敏感芯片上合理布置压阻力敏电阻, 利用惠斯通电桥实现加速度值的测量。运用有限元软件对敏感芯片进行仿真和优化, 得出优化的尺寸参数, 并通过空气炮高冲击校准设备对传感器进行的标定和实验验证。

## 1 系统的结构及原理

高 g 值 MEMS 压阻式加速度传感器的敏感芯片采用中心岛质量块 E 型膜片结构, 中心岛质量块是方形结构, 在敏感芯片硅框架外侧底面施加 3 个方向的约束, 压阻力敏电阻对称布设于敏感膜片外槽和内槽边缘的上表面。图 1 为传感器敏感芯片模型, 其中直线 AA 是敏感芯片压阻力敏电阻中心轴线。

沿敏感芯片中心轴在敏感膜片外槽边缘和内槽边缘表面, 制作四个压阻力敏电阻, 通过真空蒸铝工艺将其互联, 构成惠斯通全桥电路, 通过测量惠斯通电桥电路的电压改变量来测量加速度值。为了提输出灵敏度, 将 4 个压敏电阻构成全桥电路<sup>[6]</sup>。没有外界惯性加速度作用时, 全桥电路平衡, 输出值为零。当传感器受到敏感轴方向的惯性力作用时, 质量块受到惯

收稿日期: 2014-09-22; 修回日期: 2014-10-17。

**基金项目:** 国防基础科研项目 (C××2011××03、A××2011××05; A××2013××10); 国家自然科学基金面上项目 (61273346); 教育部博士点基金 (20121101120009); 北京理工大学“优青资助计划”项目 (2012YGO203); 基础研究基金项目 (2014CX02031 和 2015CX×××××)。

**作者简介:** 侯 帅 (1988-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事微系统测试技术方向的研究。

张振海 (1974-), 男, 吉林抚松人, 副教授, 工学博士, 主要从事军用特种 MEMS/NEMS 微纳传感与测控技术、微机器人编队协同与智能微系统、生物 MEMS、微纳机器人与生物医学机器人化微纳操作、全景视觉与图像处理、无人系统环境感知及识别与控制等方向的研究。

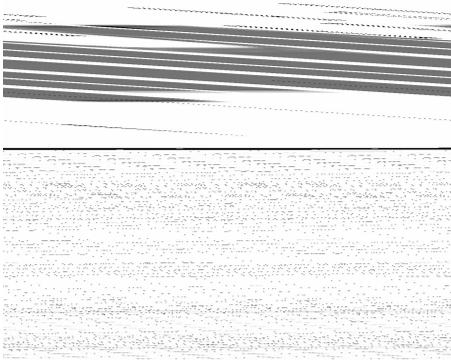


图 1 传感器敏感芯片模型

性力作用,使敏感膜片发生变形,沿路径 AA 的变形示意图如图 2 所示。由单晶硅的压阻效应原理,膜片上的力敏电阻 R1、R4 受到拉应力作用阻值增大,而力敏电阻 R2、R3 受到压应力作用阻值减小。电桥的输出电压发生变化,输出电压变化与外界加速度成正比。通过测量出电桥的输出电压,即可得到被测的加速度值。



图 2 敏感芯片受惯性力作用时沿路径 AA 的变形示意图

1.1 单晶硅的压阻效应

敏感芯片采用 N 型单晶硅,在传感器敏感芯片的上表面(100)晶面上制作压阻力敏电阻。在(100)晶面上大的压阻系数最大的晶向,是制作压阻条的最佳晶向,因此 P 型压敏电阻均位于 [011] 晶向<sup>[7]</sup>。

依据压阻效应,单晶硅力敏电阻的变化主要是由电阻率的变化引起,因而电阻的相对变化可以写成:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} \quad (1)$$

式 1 中  $\pi_{\parallel}$ 、 $\pi_{\perp}$  分别是纵向压阻系数和横向压阻系数, $\sigma_{\parallel}$ 、 $\sigma_{\perp}$  分别是纵向压阻应力和横向压阻应力。

P 型压敏电阻的立方晶系中不同晶向上的横向和纵向压阻系数可以推出,沿 [011] 晶向,压阻系数有以下关系<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \pi_{\parallel} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2} \approx \frac{\pi_{44}}{2} \\ \pi_{\perp} = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2} \approx \frac{\pi_{44}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

由式 (1)、(2) 得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \quad (3)$$

1.2 压阻力敏电阻布置

当传感器受垂直于敏感芯片方向上的冲击加速度作用时,由于力敏电阻是对称布置且结构对称,因此,力敏电阻处的应力分布对称,4 个力敏电阻变化值表示如下:

$$|\Delta R_1| = |\Delta R_2| = |\Delta R_3| = |\Delta R_4| = \Delta R$$

由 ANSYS 有限元分析得当敏感芯片的尺寸为中心岛厚度为 240  $\mu\text{m}$ 、膜片厚度为 40  $\mu\text{m}$  时,敏感芯片受 15 万 g 加速度

冲击时沿 AA 路径上的应力变化曲线,如图 3 所示。可知  $\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R$ 、 $\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R$ ,且靠近根部的纵向应力和横向应力都是最大的。

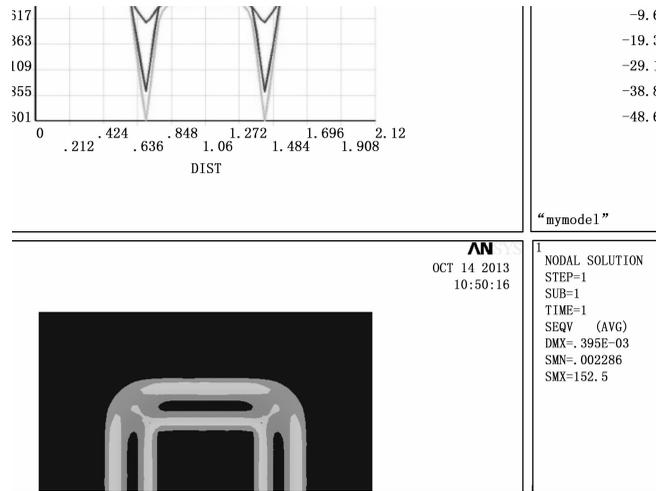


图 3 受敏感轴方向加速度冲击时 AA 路径上的应力分布曲线

则可得惠斯通电桥输出:

$$V_{out} = \left| \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \right| V_{in} \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出,为了提高输出灵敏度,需要把力敏电阻对称布置构成全桥电路,且力敏电阻布置于外槽边缘和内槽边缘的应力应变的最大区域。即  $\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$  达到最大值。

2 敏感芯片的性能分析及尺寸优化

敏感芯片的结构及尺寸决定了芯片的弹性性能,从而影响了传感器的灵敏度、线性度、频响等主要性能参数,需要对敏感芯片进行性能分析和尺寸优化<sup>[9]</sup>。

2.1 灵敏度与固有频率分析

单位加速度引起的弹性结构的变形量定义为结构的静态灵敏度<sup>[10]</sup>:

$$S_1 = \frac{x_{static}}{a} = \frac{M}{K} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (5)$$

其中:  $x_{static}$  为结构变形,  $a$  为加速度大小,  $K$  为弹性结构的刚度系数,  $M$  为质量块的质量,  $\omega_0$  为系统的固有谐振频率。

弹性结构的单位位移引起的传感器结构的单位变形为电路的静态灵敏度:

$$S_2 = \frac{V_{out}}{x_{static}} \quad (6)$$

传感器的静态灵敏度为:

$$S = \frac{V_{out}}{a} = \frac{M}{K} \cdot \frac{V_{out}}{x_{static}} = \frac{M}{Kx_{static}} \left| \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \right| V_{in} \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出,当压敏电阻位置与检测电路确定的情况下,增大质量,减小膜片厚度,能够提高灵敏度。

由公式  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  可知,增大质量,减小膜片厚度,敏感

芯片的固有频率下降,由于高量程加速度计需要能够承受高冲击过载,过载时间短,需要有较高的频响。这些特性在结构尺寸上存在着一定的相互制约关系,所以有必要进行尺寸优化,得到适合的结构尺寸以满足测试要求。

## 2.2 敏感芯片的有限元分析与尺寸优化

### 2.2.1 敏感芯片的有限元分析

有限元分析能够对复杂结构进行各种条件下的模拟与仿真, 定量分析各个尺寸对灵敏度和固有频率的影响。用 ANSYS 进行有限元分析时, 在敏感芯片外侧底面施加 3 个方向的约束, 以满足周边固支条件, 在垂直于芯片的敏感轴方向施加 15 万 g 惯性加速度, 图 4 为求解后的 Von Mises 等效应力云图, 从图中可以看出, 敏感芯片受力具有良好的对称性, 在敏感芯片内槽和外槽边缘处, Von Mises 等效应力取最大值。仿真得到的各阶模态结果如表 1 所示, 一阶模态对应的频率为固有频率。图 5 所示为敏感芯片前六阶模态沿中心轴 AA 的截面图, 从图 5 中很容易看出, 一阶模态是敏感芯片在 z 方向的振动, 二阶模态是敏感芯片绕 y 轴的旋转, 三阶模态是敏感芯片绕 x 轴的扭转, 四阶模态是敏感芯片在 y 方向的振动, 五阶模态是敏感芯片在 x 方向的振动, 六阶模态是敏感芯片绕 z 轴的扭转。一阶模态的频率是传感器敏感芯片的最低谐振频率, 即固有频率。

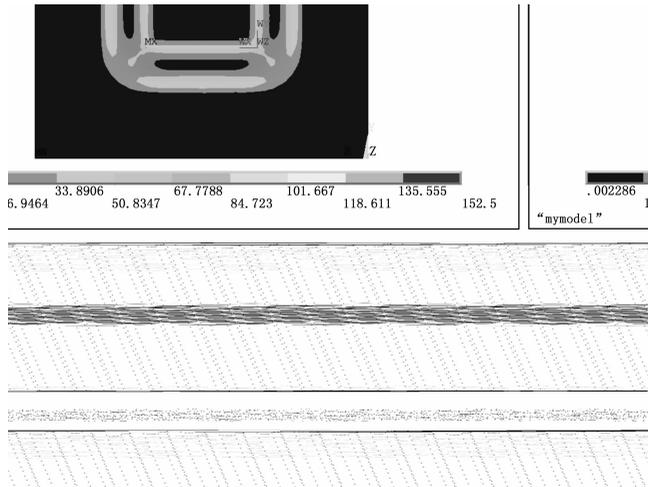


图 4 Von Mises 等效应力云图

表 1 各阶模态结果

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUB STEP	CUMULATIVE
1	0.31762E+06	1	1	1
2	0.50114E+06	1	2	2
3	0.50115E+06	1	3	3
4	0.15559E+07	1	4	4
5	0.15559E+07	1	5	5
6	0.19029E+07	1	6	6
7	0.21068E+07	1	7	7
8	0.26458E+07	1	8	8
9	0.27902E+07	1	9	9
10	0.30767E+07	1	10	10

在敏感芯片的其他尺寸保持不变情况下, 利用 ANSYS 有限元软件分析膜片厚度、中心岛厚度与结构最大应力、固有频率的关系, 以利于优化出最佳尺寸。敏感芯片最大应力与膜片

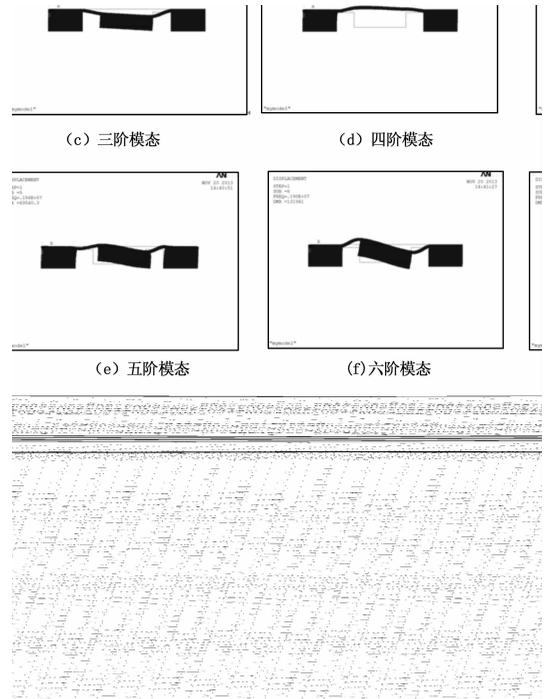


图 5 敏感芯片的各阶模态振型截面图

厚度的关系如图 6 所示, 膜片厚度增加, 膜片等效应力减小, 固有频率增加。敏感芯片等效应力与中心岛厚度的关系如图 7 所示, 中心岛厚度增加, 膜片等效应力增大, 固有频率减小。从图 6、图 7 可以看出, 中心岛厚度增加对等效应力和固有频率影响较小, 而膜片厚度对最大应力和固有频率影响较大, 当膜片厚度增加时, 最大应力急剧减小, 固有频率急剧增加。

### 2.2.2 敏感芯片的尺寸优化

考虑到高冲击加速度传感器要满足高冲击过载情况下不失效, 在保证高 g 值加速度传感器具有较高可靠性前提下, 尽可能提高灵敏度和固有频率。但提高灵敏度与提高固有频率是相矛盾的, 需要优化出合适的尺寸。

敏感芯片的尺寸优化采用的优化原则是: 1) 保证器件可靠性。硅许用应力  $[\sigma]$  为 340 mPa<sup>[11]</sup>, 根据结构的可靠性、工作条件等因素综合考虑, 实际优化条件要求等效应力不大于许用应力的 50%。2) 提高敏感芯片灵敏度, 即在保证可靠性的前提下提高最大应力值。3) 保证较高的固有频率。固有频率越高越好, 一般固有频率  $f \geq 250$  kHz<sup>[12]</sup>。经过有限元分析, 得到的分析结果如表 2 所示。

由表 2 知, 1、2、3 组固有频率较低, 且最大应力较高; 4、5 组最大应力较高, 7 组最大应力较低, 敏感性较差。综合考虑敏感芯片的最大应力和固有频率的影响, 最终选定第 6 组敏感芯片尺寸, 固有频率较高, 且最大应力满足强度和灵敏度要求。

## 3 实验验证

对第 6 组芯片完成 MEMS 传感器的实物加工与封装。对于该种尺寸的敏感芯片, 理论冲击灵敏度计算如下: 从图 3 可知, 15 万 g 冲击过载情况下此敏感芯片的纵向应力和横向应力之差  $(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp})_{\max} = 41$  MPa, 电桥输入电压  $V_{in} = 3.3$  V, 由参考文献 [10] 得  $\pi_{44} = 138.1 \times 10^{-11} / \text{Pa}$ , 由式 (3) 得  $V_{out}$

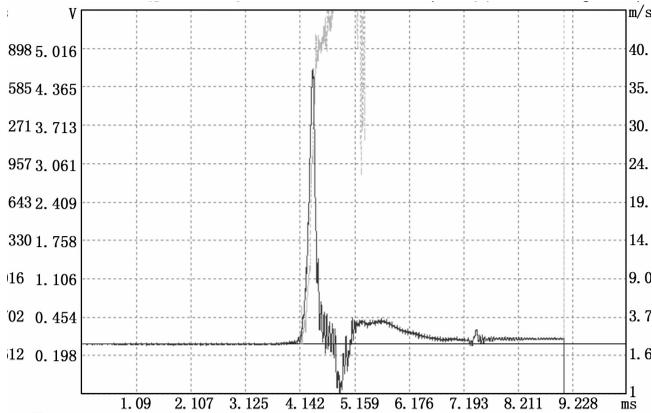


图 6 等效应力、固有频率与膜片厚度关系

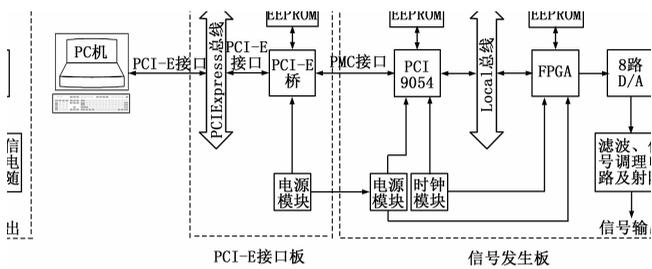


图 7 等效应力、固有频率与中心岛厚度关系

= 93.42 mV。理论冲击灵敏度为  $0.62 \mu\text{V/g}$ 。

表 2 不同尺寸的敏感芯片有限元仿真结果

组号	中心岛厚度/ ( $\mu\text{m}$ )	膜片厚度/ ( $\mu\text{m}$ )	最大 Mises 应力/ (MPa)	固有频率/ (kHz)
1	240	30	223.19	227.51
2	230	30	222.81	231.79
3	220	30	192.13	236.54
4	220	35	171.17	283.67
5	230	35	179.63	277.85
6	240	40	152.50	317.62
7	240	45	129.20	360.57

利用空气炮高冲击装置对加速度传感器进行高冲击试验，在 15 万 g 的加速度冲击下，得到输出电压如图 8 所示。输出的最大电压是 4.65 V，应变仪的放大倍数为 50，即加速度传感器实际输出电压为 93 mV，与理论估算值一致。

#### 4 结论

根据高 g 值加速度传感器设计原则，利用有限元分析，对

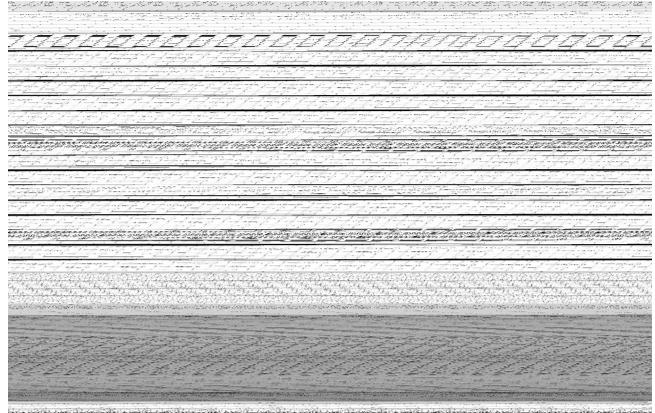


图 8 加速度计高冲击试验曲线

敏感芯片的结构尺寸进行计算和优化。仿真计算得到中心岛厚度为  $240 \mu\text{m}$ 、膜片厚度为  $40 \mu\text{m}$  的敏感芯片的优化尺寸，然后通过 MEMS 工艺流片加工制作出传感器芯片，最后装配成传感器。利用空气炮高冲击装置进行高冲击试验，试验结果与理论分析计算结果相一致。

#### 参考文献:

- [1] 牛兰杰, 施坤林, 赵旭, 等. 微机技术在引信中的应用 [J]. 探测与控制学报, 2008, 30 (6): 54-59.
- [2] Andrew R. Atwel, Robert S. Okojie, Kevin T. Kornegay, Scott L. Roberson, Alain Beliveau, Simulation, fabrication and testing of bulk micromachined 6H-SiC high-g piezoresistive accelerometers [J]. Sensors and Actuators A 104 (2003) 11-18.
- [3] Robert Stewart, Robert Thede, Paul Couch, Dave Tarrant, High G MEMS Accelerometer For Compact Kinetic Energy Missile (CKEM) [Z].
- [4] Jun L, Yun B S, W D Z. Micro Inertial Measurement Unit based integrated velocity strapdown testing system [J]. Sensors and Actuators A 112 (2003): 44-48.
- [5] 李仁峰. MEMS 高 g 值加速度计设计技术研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003.
- [6] 张振海, 李科杰, 任宪仁, 等. 高过载三维 MEMS 加速度传感器敏感芯片设计仿真与优化 [J]. 2008, 兵工学报, 29 (6), 690-696.
- [7] Roylance L M, Angell J. A batch-fabricated silicon accelerometer [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1979 (26): 1911-1917.
- [8] Werner Karl Schomburg. Introduction to Microsystem Design [M]. Springer, 2011.
- [9] Aaron Partridge, J. Kurth Reynolds, Benjamin W. Chui, et al. A High-Performance Planar Piezoresistive Accelerometer [J]. Journal Of MicroElectroMechanical Systems, 2003, 9 (1).
- [10] 王喆垚. 微系统设计与制造 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] 王钻开. 微机械压阻式冲击加速度传感器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2003.
- [12] 石云波, 祁晓瑾, 刘俊, 孟美玉. MEMS 高 G 值加速度传感器设计 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (16): 4306-4309.