

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211306

一种高 g 值面内加速度传感器的设计与仿真*

王毓婷 石云波 赵锐 李艳 张浩宇

(中北大学电子测试技术重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了检测侵彻武器冲击硬目标产生的水平方向超高加速度,提出了一种单轴的面内高量程压阻式加速度传感器。该传感器的量程为 $150\,000\ g_n$,由支撑梁、质量块和4个微梁构成。当给传感器施加轴向加速度时,支撑梁两侧的微梁分别被拉伸和压缩,通过惠斯通全桥实现压阻信号的检测。将加速度传感器的固有频率、最大等效应力以及几何结构参数作为多目标函数,用OSF采样和克里金代理模型对加速度传感器进行优化,得到高谐振频率、高灵敏度和低交叉灵敏度的敏感结构。有限元仿真和电学仿真结果表明,传感器一阶固有频率为 $0.84\ \text{MHz}$, y 轴灵敏度为 $0.594\ \mu\text{V}/g_n$,非线性度为 3.26% , x 轴和 z 轴的交叉灵敏度均小于 1% 。

关键词: 高量程;多目标优化;面内加速度计;交叉灵敏度

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Design and simulation of a high-g in-plane acceleration sensor

Wang Yuting Shi Yunbo Zhao Rui Li Yan Zhang Jieyu

(Science and Technology on Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to realize the measurement of the horizontal ultra-high acceleration generated by the impact of penetration weapon on hard target, an in-plane high-range piezoresistive acceleration sensor with a single axis is proposed. The sensor has a range of $150\,000\ g_n$ and consists of two support beams, proof mass and four microbeams. When axial acceleration is applied to the sensor, the micro-beams on both sides of the support beam are stretched and compressed respectively, and the piezoresistive signal is detected by a Wheatstone full bridge. The natural frequency, maximum equivalent stress and geometric structure parameters of the accelerometer are used as multi-objective functions to optimize the accelerometer with OSF sampling and Kriging proxy model to obtain a sensitive structure with high resonant frequency, high sensitivity and low cross-sensitivity. The finite element simulation and electrical simulation results show that the resonant frequency of the sensor is $0.84\ \text{MHz}$, the y -axis sensitivity is $0.594\ \mu\text{V}/g_n$, the nonlinearity is 3.26% , and the cross-sensitivity of both x -axis and z -axis is less than 1% .

Keywords: high-g; multi-objective optimization; in-plane accelerometer; cross sensitivity

0 引言

现代战争中精确制导、引信侵彻日渐成为战争火力的主要打击方式^[1]。在武器的侵彻过程中, MEMS高量程加速度计作为环境信息敏感元件,起着至关重要的作用,当冲击到不同材料的侵彻硬目标时产生的加速度值是不同的,加速度传感器将侵彻过程产生的加速度信号转化为电信号并反馈至引信中利用信号处理模块,获取侵彻过程中弹体加速度信息,利用弹体加速度的变化信息实现起爆控制^[2-3]。侵彻武器冲击硬质目标时会产生不同方向数万 g 甚至数十万 g 的加速度,这就要求检测加速度信号的传感器既可以检测垂直方向加速度,也能检测水平方向,且具有体积小、

量程大、高过载的特点^[4]。压阻传感器的压敏电阻一般位于结构的支撑端,这将导致传感器最大等效应力与固有频率之间产生直接的耦合关系,影响传感器性能。相比于单支撑梁结构,复合梁结构有利于产生弯曲、轴向等应变,提升器件的稳定性的同时增大器灵敏度^[5]。Jia等^[6]制备了一种量程为 $100\,000\ g_n$ 的加速度计,通过测试,传感器的灵敏度为 $0.594\ \mu\text{V}/g_n$ 。Yu等^[7]设计了一种基于微梁的纯轴向弯曲的高灵敏度的面内加速度传感器。Wung等^[8]研制了一种垂直板上连接4个微梁的传感器结构,该结构通过微梁来减小其非敏感轴的交叉耦合,但却对敏感轴灵敏度和谐振频率有所限制。南京理工大学陈宏亮^[9]设计了一

收稿日期:2022-09-06

* 基金项目:国家自然科学基金(52175524)项目资助

种带微梁的双端固支高量程加速度传感器,然而其交叉灵敏度高达20%。

基于上述问题,本文设计了一种纯轴向变形的高量程压阻式加速度传感器。为减小传感器灵敏度与谐振频率之间的耦合,并且降低交叉灵敏度,本文在李祥设计的双轴面内压阻式加速度传感器^[10]的基础上改进,提出了一种将支撑梁和敏感梁单独设计的单轴加速度传感器结构,经仿真分析,加速度在150 000 g_n 量程范围内具有高谐振频率和低交叉灵敏度。

1 结构设计

高g值面内加速度传感器结构由两个支撑梁、质量块,4个微梁组成,如图1所示。该结构敏感方向为Y,质量块设计为“工”型结构,压敏电阻位于微梁上,在加速度作用下质量块带动4个微梁运动,使支撑梁两侧的微梁分别拉伸和压缩,导致压敏电阻阻值发生变化。

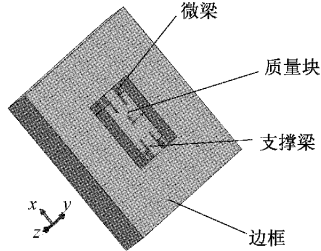


图1 压阻式加速度传感器结构图

设微梁长 l_1 ,宽 b_1 ,高 h_1 ;支撑梁长 l_2 ,宽 b_2 ,高 h_2 ;微梁和支撑梁的惯性矩分别为 I_1 、 I_2 ,由矩形惯性矩公式得: $I_1 = b_1 h_1^3 / 12$, $I_2 = b_2 h_2^3 / 12$ 。沿y方向施加一个集中载荷,设微梁的约束力为 F_1 ,支撑梁的约束力为 F_2 。根据材料力学方程得:

$$-EI_1 w_1''(x) = F_1(x-l) \quad (1)$$

等式的边界条件为 $w_1(0) = 0, w_1'(0) = 0$

由以上可得:

$$w_1(x) = \frac{F_1 x^2}{6EI_1} (3l_1 - x) \quad (2)$$

同理可得支撑梁:

$$w_2(x) = \frac{F_2 x^2}{6EI_2} (3l_2 - x) \quad (3)$$

由 $w_1(l_1) = w_2(l_2)$ 可求得:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{I_1(3l_2 - l_1)}{2I_2 l_1} \quad (4)$$

支撑梁横截面上的弯矩为常量,剪力为0,为纯弯曲变形,横截面上只有由弯矩引起得垂直于横截面得正应力。支撑梁一侧表现为拉应力,一侧表现为压应力。从梁中取长为 dx 的微段进行分析,弯曲变形前和变形后得梁段如图2所示,微段上作用的外力只有对z轴的力偶M,梁横截面上的应力为:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (5)$$

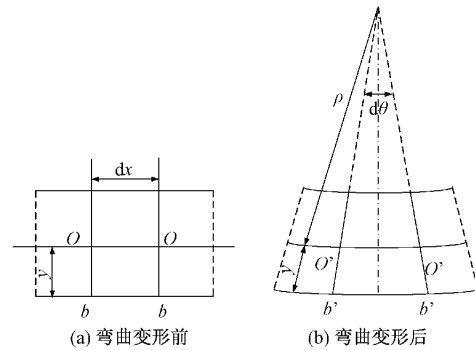


图2 微段梁变形前后图

所以,横截面上的最大应力发生在离中性轴最远的点处

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I} \quad (6)$$

微梁与主梁的最大应力的比值为:

$$\frac{\sigma_1(x)_{\max}}{\sigma_2(x)_{\max}} = \frac{3}{2} \left(\frac{l_2}{l_1} \right) - \frac{1}{2} \quad (7)$$

2 多目标算法优化

多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)是非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)的变体,能够同时存在多个目标函数进行局部约束,从而求解出全局最优解。在拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling, LHS)方法的基础上进行了优化,采用了最佳填充空间设计(optimal space-filling design, OSF)方法对样本进行采样,基于最大化样本点见最小距离理念,极大的改善了相关样本点在样本空间的分布质量^[11]。传感器的目标函数响应关于几何结构变量是非线性的,适用于低维非线性响应的代理模型克里金(Kriging)模型具有良好的插值特征。它是对未采样点的区域化变量的值无偏估计的一种模型,能够对空间分布的数据实现线性最优,预测各未知点处的方差,适用于空间最优设计采样方法^[12-13]。

为了实现加速度传感器性能最佳,将有限元仿真的固有频率和最大等效应力作为目标函数,仿真所需的材料参数如表1所示,提取30个样本,分析几何参数变化对目标函数的敏感性如图3所示,从图中可以看出, b_1 对谐振频率的影响最大,敏感性系数为61%。 b_2 对最大等效应力的影响最大,敏感系数为-46%。 l_2 增大时,传感器灵敏度明显增加,此时,会使敏感结构面积增加,所以加速度传感器的目标函数构造了全局近似模型 \hat{g} 。

$$\hat{g} = \begin{cases} \text{Max}[f, \sigma] \\ \text{Min}[l_2] \\ f \geq 0.5 \text{ MHz} \end{cases} \quad (8)$$

表 1 传感器敏感结构的材料及力学参数

密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/Pa	泊松比 ν	体积模量/ Pa	剪切模量 G/Pa
2 330	1.69×10^{11}	0.3	1.41×10^{11}	6.5×10^{10}

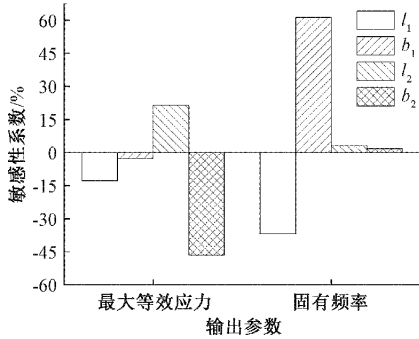
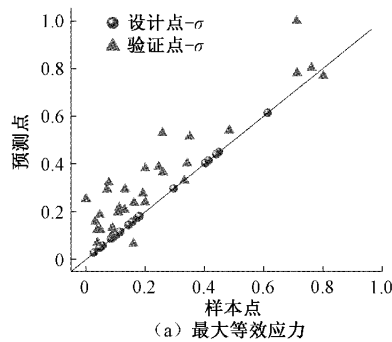


图 3 敏感性分析柱状图

考虑到模型可靠性和结果准确性,本文用复相关系数 R^2 ,均方根误差(root mean square error, RMSE),相对最大绝对误差(relative maximum absolute error, RMAE),相对平均绝对误差(relative average absolute error, RAAE)4 个指标作为校验标准,以确定其是否能真实反映优化目标与设计变量之间的统计关系,并通过决定因子检验进行验证^[14]。此外,还引入新的样本点以更新优化克里金代理模型,来提高模型精度。4 个指标的表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_t} [g(x_i) - \hat{g}(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^{n_t} [g(x_i) - \bar{g}(x_i)]^2} \quad (9)$$



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (10)$$

$$RMAE = \frac{\max(|y_1 - \hat{y}_1|, \dots, |y_n - \hat{y}_n|)}{\sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (11)$$

$$RAAE = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} [g(x_i) - \hat{g}(x_i)]^2}{n_t \cdot \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (12)$$

其中, n_t 为测试样本点的数量, y_i 为真实响应值, \hat{y}_i 为代理模型的预测值, \bar{y}_i 为真实响应的均值。

本次优化在已存在的变量空间中抽取 30 个样本点集的基础上,添加 20 个验证点验证模型及算法精度。图 4(a) 是更新前最大等效应力样本点的预测结果,图 4(b) 是更新前固有频率样本点的预测结果。图中验证点均偏离预测响应,多次更新这些偏离的验证点,重新计算设计点和验证点的响应,直到样本点与预测点的响应重合^[15],如图 5(a) 是更新前最大等效应力样本点的预测结果,图 5(b) 是更新前固有频率样本点的预测结果。更新后均方根误差的值都由 6 减小到趋于 0, R^2 的值增大为 1, RMAE 和 RAAE 均减小到 0,结果表明,更新后代理模型局部精度明显高于细化前。最后使用多目标遗传算法,由初步生成的 2 000 个样本中约束,寻求目标函数的最优集。因所选的目标函数之间存在冲突导致目标函数不能同时达到最优结果,所以选取目标同时达到较好结果且不受其他解支配的解,即非支配解。约束最大允许非支配百分比为 70%,最大迭代次数为 20,得到 3 组验证参数,将优化后的参数模型更新到有限元仿真模块中进行仿真验证。

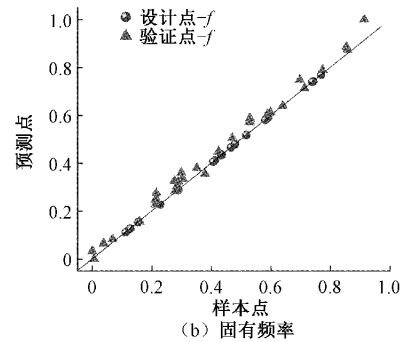


图 4 更新前代理模型精度

3 有限元仿真和电学仿真

在确定了传感器尺寸后,为了保证加速度计的测量精度和结构稳定性,对传感器进行有限元仿真通过模态分析,得到结构的固有频率和振型,如图 6 所示。传感器的一阶固有频率为 0.84 MHz,如图 6(a)所示,传感器振动方向为 Y 轴弯曲振动,为传感器敏感轴方向;二阶固有频率

为 1.01 MHz,如图 6(b)所示。可以避免由于共振引起的结构断裂,此外模态分析还可以辅助其他类型分析,例如谐响应分析^[16]。

为研究传感器的量程和灵敏度,对传感器进行静力学分析,如图 7 所示。给敏感单元施加 Y 方向的 150 000 g_n 的加速度,传感器的应力最大的位置为微梁上,应力云图如图 7(a)所示,最大应力大约 65 MPa,远小于硅的断裂强

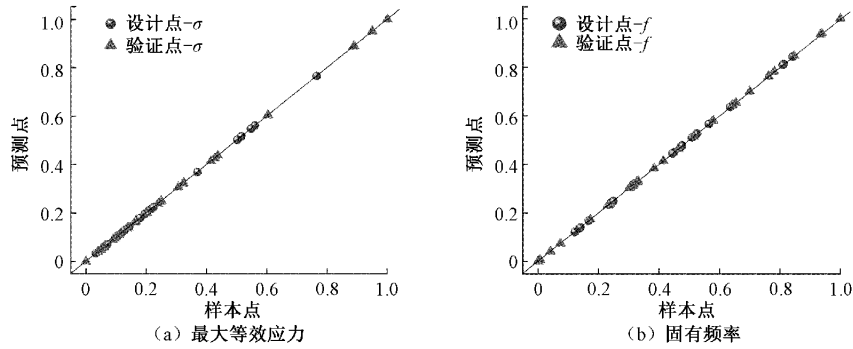


图5 更新后代理模型精度

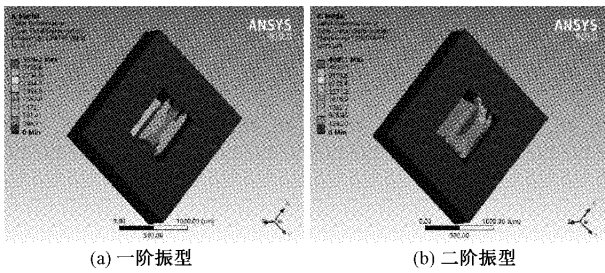


图6 模态仿真

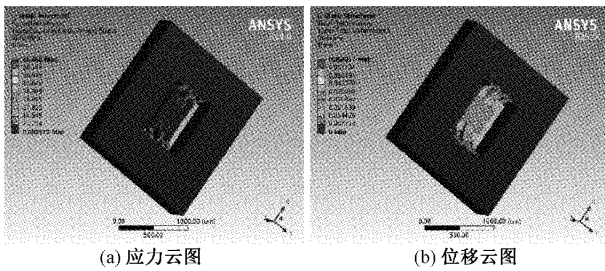


图7 静力学分析

度,最大位移为 $0.06 \mu\text{m}$,如图7(b)所示。

压阻式加速度传感器是利用压阻效应,在半导体芯片上掺杂形成扩散电阻制备而成^[17],其灵敏度可由其传感器压阻位置的应力决定,计算公式如下:

$$S = \frac{U_{out}}{a_{applied}} = \frac{\Delta R}{Ra_{applied}} U_{applied} = \frac{\pi\sigma U_{applied}}{a_{applied}} \quad (13)$$

式中: U_{out} 为输出电压, R 为压敏电阻阻值, $U_{applied}$ 为传感器的供电电压, π 为P型硅的压阻系数, σ 为压敏电阻上的最大应力。

用 comsol 对加速度传感器进行电学仿真,应用的物理场为结构力学中的固体力学场和压阻效应场,耦合接口为固体力学和电流,电阻材料为P型单晶硅,其材料参数如表2所示,压敏电阻为轻掺杂,取供电电压为5V,加速度传感器在 $150\,000 g_n$ 过载的加速度下的电学仿真结果如图8所示,电桥输出电压为 90.36 mV 。给传感器施加 $0 \sim 150\,000 g_n$ 的轴向加速度,传感器微梁上的最大等效应力和电桥输出电压如图9所示,计算得其平均灵敏度为 $0.594 \mu\text{V}/g_n$,非线性度为 3.26% 。

表2 硅在室温中的独立压阻系数

材料类型	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\pi_{11}/$ (100 GPa) ⁻¹	$\pi_{12}/$ (100 GPa) ⁻¹	$\pi_{44}/$ (100 GPa) ⁻¹
P型硅	7.8	6.6	-1.12	138.1
N型硅	11.7	-102.2	53.4	-13.6

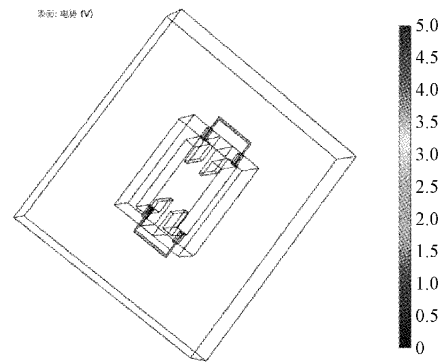


图8 电学仿真结果图

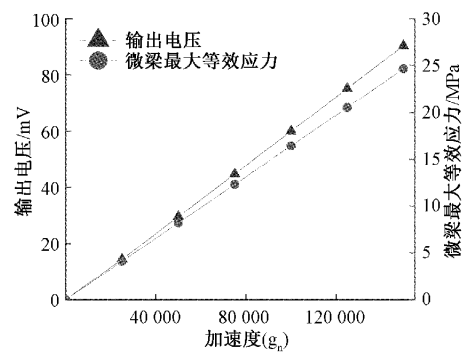


图9 输出电压与加速度的关系

传感器交叉灵敏度(S_c)是非敏感轴满量程输出电压与敏感轴满量程输出电压的比值可以表示为:

$$S_c = \frac{V_{c-FS}}{V_{FS}} \times 100\% \quad (14)$$

给传感器敏感结构施加X方向和Z方向的 $150\,000 g_n$ 的加速度,输出电压分别为 0.82 mV 和 0.88 mV ,根据式(14)计算得,传感器的交叉灵敏度分别为 0.9% 和

0.97%。与已有研究成果相比如表 3 所示,该传感器在保证高灵敏度和高固有频率的同时上,具有低的交叉耦合。

表 3 设计结果对比

方法	量程/ g_n	灵敏度/ $(\mu V/g_n)$	非线性度/%	固有频率/MHz	交叉耦合/%
本文设计	150 000	0.594	3.26	0.84	小于 1
文献[6]	100 000	0.54	1.6	0.445	—
文献[9]	150 000	0.302	1.42	0.457	21.4
文献[10]	150 000	0.470	4	0.371	4.8

4 结 论

本文设计了一种纯轴向变形的高量程面内加速度传感器,通过 OFS 采样和克里金模型对传感器进行多目标性能 and 尺寸优化。优化后的传感器通过有限元仿真和电学仿真分析得到传感器的一阶频率高达 0.84 MHz,在具有高的线性度的同时,X 方向和 Z 方向的交叉灵敏度均很低,小于 1%。

参考文献

- [1] 温晓杰,石云波,赵锐,等.复合封装高量程加速度计参数动态辨识方法[J].传感技术学报,2021,34(11):1475-1481.
- [2] 张亮亮,胡腾江,李村,等.适用于极端环境的 MEMS 传感器研究进展[J].无人系统技术,2021,4(5):15-22.
- [3] 张美云,石庚辰,刘强,等.侵彻硬目标引信侵彻信号获取与处理技术[J].制导与引信,2020,41(3):1-10,24.
- [4] NARASIMHAN V, LI H, JIANMIN M. Micromachined high-g accelerometers: A review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(3): 033001.
- [5] 王岩,赵剑,刘蓬勃,等.基于 PZT 管支撑结构的三轴加速度计设计及实验误差分析[J].仪器仪表学报,2020,41(7):91-98.
- [6] JIA C, MAO Q, LUO G, et al. Novel high-performance piezoresistive shock accelerometer for ultra-high-g measurement utilizing self-support sensing beams[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8): 085001.
- [7] YU M, ZHAO L, JIANG W, et al. A two-axis MEMS piezoresistive in-plane accelerometer with pure, axially deformed microbeams[C]. 2018 IEEE Sensors, IEEE, 2018: 1-4.
- [8] WUNG T S, NING Y T, CHANG K H, et al. Vertical-plate-type microaccelerometer with high linearity and low cross-axis sensitivity[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 222: 284-292.
- [9] 陈宏亮.三轴高 g 值加速度传感器试验技术研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [10] 李祥,石云波,董胜飞,等.基于微梁的面内高 g 值加速度计设计[J].传感技术学报,2014,27(10):1310-1314.
- [11] 孙权.基于自适应代理模型的序列迭代优化及其应用[D].太原:中北大学,2021.
- [12] 刘岩,柳强.基于天牛须搜索粒子群优化的改进克里金模型[J].国外电子测量技术,2020,39(4):6-10.
- [13] 李鑫.基于 Kriging 的高维模型表征方法及应用[D].北京:北京理工大学,2018.
- [14] XIE G, ZHANG S, WANG L, et al. Lightweight design of hinge beam based on Kriging agent model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(7): 3585-3595.
- [15] 张娟娟,石云波,赵锐,等.基于多目标优化的高量程加速度传感器小型化设计[J].传感技术学报,2021,34(9):1152-1157.
- [16] 李开富,蒋婷,郭小伟,等.三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计[J].电子测量与仪器学报,2021,35(10):193-201.
- [17] 蒋红娜,白雪,朱丽.压阻式差压传感器的迟滞非线性建模与补偿[J].电子测量技术,2016,39(6):138-140,148.

作者简介

王毓婷,硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 加速度传感器的设计、仿真、封装及测试。

E-mail: s2006034@st.nuc.edu.cn

石云波(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为 MEMS、硬件电路、算法、微惯性器件等。

E-mail: shiyunbo@nuc.edu.cn