光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023052602

高 g 值压阻式加速度计设计与仿真

李永伟[1,2]，郭晋秦[1,2*]，乔俊福[1,2]，李　峰[1,2]，乔志敏[1,2]，
张　烨[1,2]，芦　婧[1,2]，张　健[1,2]，闫莎莎[1,2]
（太原工业学院 1. 自动化系；2. 智能检测与控制工程(技术)研究中心，太原 030008）

摘　要： 研究了一种具有高灵敏度、小尺寸的四端梁结构的压阻式加速度计。利用有限元软件对不同悬臂梁、质量块尺寸的结构建立模型，并对该结构进行了灵敏度与应力分析、模态分析，以及动态响应分析。仿真研究结果表明，在 50 kg 量程内，传感器轴向灵敏度达到 7.40 μV/g，横向灵敏度为 0.33%，线性度为 0.06%，响应时间为 20.3 μs，固有频率为 111.2 kHz。抗冲击性能能达到 334 000 g，可以满足高 g 值环境下的测试需求，同时该研究为研制高性能传感器提供了一种准确且高效的仿真方法。

关键词： 压阻；高 g 值加速度计；有限元仿真
中图分类号： TH824　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0690－04

Design and Simulation of High g Piezoresistive Accelerometers

LI Yongwei[1,2], GUO Jinqin[1,2], QIAO Junfu[1,2], LI Feng[1,2], QIAO Zhimin[1,2],
ZHANG Ye[1,2], LU Jing[1,2], ZHANG Jian[1,2], YAN Shasha[1,2]
(1. Department of Automation, Taiyuan Institute of Technology; 2. Intelligent Detection and Control Engineering (Technology) Research Center, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030051, CHN)

Abstract: A four-end beam structure piezoresistive accelerometer with high sensitivity and small size is designed in this paper. The structure with different cantilever beam and mass block sizes is modeled using finite element software, and sensitivity and stress analysis, modal analysis, and dynamic response are performed on the structure. The simulation results show that the axial sensitivity reaches 7.40 μV/g, the lateral sensitivity is 0.33%, the linearity is 0.06%, the response time is 20.3 μs, and the natural frequency is 111.2 kHz within the 50 000 g range. The impact resistance can reach 334 000 g, which can satisfy the test needs in a high-g environment, and this research provides an accurate and efficient simulation method for the development of high-performance sensors.

Key words: piezoresistive; high g accelerometers; finite element simulation

0　引言

量程在 10 000 g 以上的高 g 值 MEMS 加速度计广泛应用于航天、军事技术以及科学实验等领域[1]。研究者通过采用不同的敏感原理，已经对多种形式的 MEMS 加速度传感器进行了研究，主要有压阻式、电容式、热流式、谐振式等[1-5]。压阻式加速度计具有结构简单、线性度高、后端信号易处理的优点。2022 年哈尔滨工业大学张宇[1]研究了一种量程为 50 000 g的压阻式高g值加速度计，灵敏度为

收稿日期：2023－05－26.
基金项目：太原工业学院第三届青年学科带头人支持计划项目(2020XKLG04)；山西省基础研究计划项目(202203021212335，202103021224337)；山西省重点研发计划项目(202202150401007).
* 通信作者：郭晋秦　E-mail：gjqsrh@163.com

0.48 μV/g；2020 年合肥工业大学许高斌等[3]研究了量程为 2 000 g 的压阻式加速度计，谐振频率为 294 kHz；2019 年中北大学林立娜等[4]设计了量程为 100 g 的单轴压阻式加速度计，灵敏度为 0.64 mV/g，具有低横向灵敏度的特点。在以上文献中所研究的手段是通过仿真出应力，通过公式计算出灵敏度，这种方法不能准确地评估压阻上的应力分布，得到的结果存在较大的误差。本文基于 COMSOL 软件，结合 MEMS 压阻模块，设计了一款高灵敏度、小尺寸的四端梁结构的压阻式加速度计，系统级的计算可以提高仿真的准确性。

1　工作原理

MEMS 压阻式加速度传感器的工作原理与压阻式压力传感器相同，也是基于压阻效应，在压阻式加速度计中常见的结构有单悬臂梁、双悬臂梁、四端悬臂梁、双四端悬臂梁结构。在悬臂梁的应力集中区布置四个压敏电阻，以惠斯通电桥的方式连接，如图 1 所示。当传感器有加速度信号时，悬臂梁发生形变，压敏电阻受压导致阻值变化，从而产生电压输出，即可将加速度变化转换成电信号。

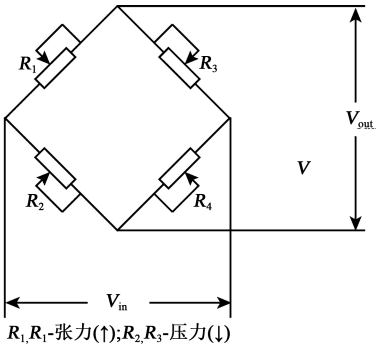


图 1　惠斯通电桥

2　仿真设计

2.1　传感器结构设计

依据项目的实际需求，确立设计指标，量程为 50 000 g，固有频率大于等于 100 kHz，灵敏度大于等于 7 μV/g，横向灵敏度小于 1%，响应时间小于 25 μs。本文设计的高 g 值加速度传感器采用四端悬臂梁结构，版图如图 2 所示。压敏电阻采用 p 型硅，掺杂浓度为 1.03×10^{18}，方阻为 425 Ω/□，布置在悬臂梁靠近质量块的一端。压敏电阻采用固定的参数，长宽分别为 60，5 μm，节深为 1 μm，与质量块的距离为 25 μm。

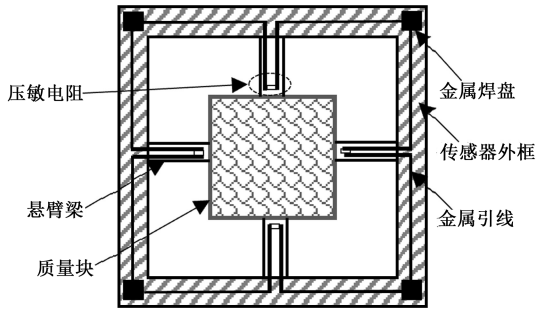


图 2　四端悬臂梁结构

2.2　仿真优化

由第一部分可知压阻式加速度计是基于压阻效应工作的，惠斯通电桥的输出与压敏电阻所处位置的应力有关，而悬臂梁、质量块的尺寸都会影响传感器的灵敏度，同时还会影响固有频率、响应时间、横向灵敏度等关键指标。因此，本文通过 COMSOL 对传感器结构建模，并对结构参数进行参数化，分析传感器的静态、动态指标。

在仿真中耦合了电流、固体力学物理场，其中在电流物理场中添加压阻模块，选择坐标系并设置压阻系数。固体力学模块中在传感器的外框底面施加固定支撑，规定正方向为 Z 方向，施加 50 000 g 的加速度体载荷。为了提高计算时效，仿真时将金属引线部分去除，在软件中将压敏电阻的各面通过电流接口相连接。网格划分会影响计算的准确性，因此对网格单独划分，得到平均网格质量为 0.8 的优质网格。

2.2.1　悬臂梁与质量块仿真

为了探究悬臂梁和质量块对传感器性能的影响，研究了不同长度、宽度、高度下的应力与灵敏度的关系，尺寸如表 1 所示。

表 1　敏感结构尺寸

结构名称	长/μm	宽/μm	高/μm
悬臂梁	300～500	60～200	50～90
质量块	600～1000		300
外框	2 000	2 000	300

通过初步仿真得到应力、位移分布云图，如图 3 所示。由图 3 可判断出该设计方案的最大应力分布在悬臂梁与传感器外框、质量块连接处两侧，为了保证设计的安全性，最大应力应小于硅材料许用应力 340 MPa[5]，即满量程工作的情况下传感器的物理结构不发生破坏。因此，仿真首先需要重点考核的是满量程情况下应力在最大许用应力内的同时灵敏度也要满足要求，悬臂梁、质量块不同尺寸对结构应

力和灵敏度的影响如图 4～7 所示。

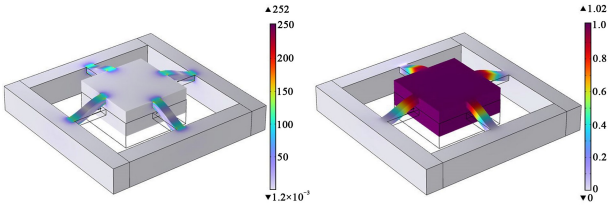


图 3 应力和位移云图

由图 4～7 的关系图可以得出，加速度计的灵敏度与应力随悬臂梁的长度变长而变大，随厚度和宽度的变大而变小，质量块边长越长灵敏度越高。结合应力和灵敏度的要求，初步判断传感器尺寸为悬臂梁长为 400 或 450 μm、宽为 100 μm、高为 65 或 70 μm，质量块边长为 800 μm。

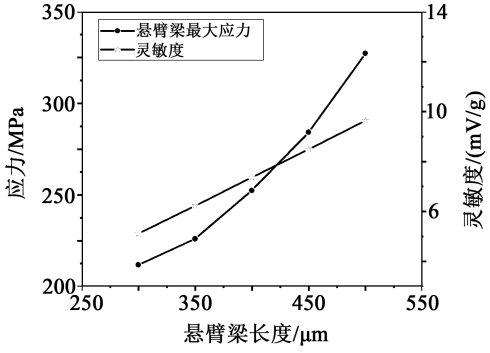


图 4 悬臂梁长度对应力和灵敏度的影响

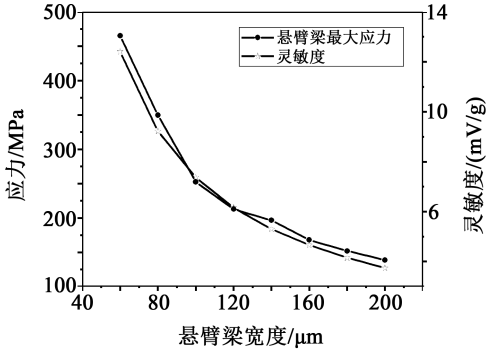


图 5 悬臂梁宽度对应力和灵敏度的影响

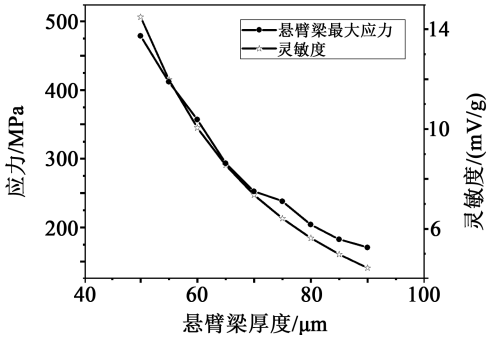


图 6 悬臂梁厚度对应力和灵敏度的影响

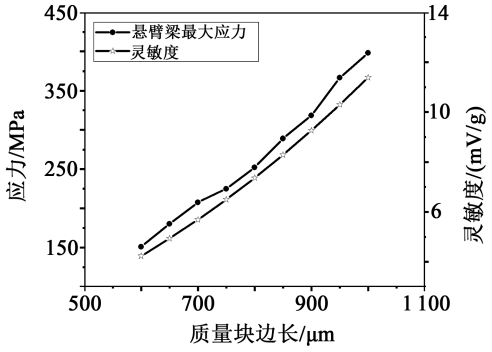
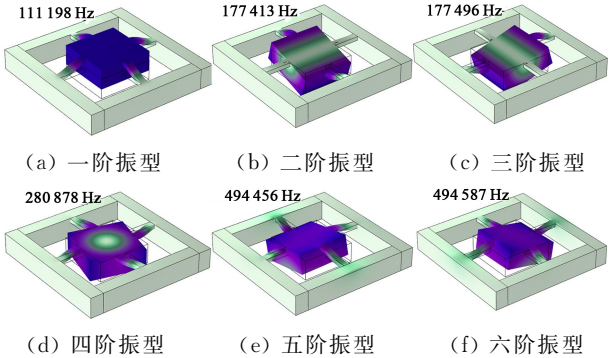


图 7 质量块边长对应力和灵敏度的影响

结合横向灵敏度指标要求再次确认传感器尺寸，横向灵敏度以主轴灵敏度的百分比表示。在传感器的 X，Y 轴分别施加 50 000 g 的加速度体载荷。仿真得到 X 轴的输出最大为 1.2 mV，Y 轴的输出最大为 0.5 mV，Z 轴的输出为 368.47 mV，因此 X，Y 轴的横向灵敏度分别为 0.33% 和 0.14%，均满足设计要求。

2.2.2 模态分析

加速度计在受到与固有频率相接近的频率激励时，传感器会产生共振现象，破坏传感器的结构。因此本文研究了加速度计的六阶频率和振型，其一阶频率即为固有频率，只要工作频率低于一阶固有频率即可认为传感器工作在安全区。当悬臂梁长度为 450 μm 时，固有频率为 95.8 kHz，厚度为 65 μm 时，固有频率为 99.8 kHz，均不满足设计要求，将悬臂梁长度、厚度分别设置为 400 和 70 μm，仿真得到各阶频率及振型，如图 8 所示。由图 8 可知，传感器的固有频率为 111.2 kHz，满足设计要求。



(a) 一阶振型 (b) 二阶振型 (c) 三阶振型

(d) 四阶振型 (e) 五阶振型 (f) 六阶振型

图 8 各阶振型及频率

2.2.3 动态响应的分析

对于高 g 值压阻式加速度传感器，动态性能对响应时间有一定的要求。通过仿真分析了传感器的响应时间。压阻式加速度传感器可认为是一个二阶

系统。当有一个阶跃输入后，传感器最终稳定值的 10%变化到最终值的 90%所需要的时间即为上升时间，响应时间是指输出量从开始变化到示值进入最终值的规定范围内所需时间[6]。在 COMSOL 中建立一个与时间有关的函数，链接到输入载荷，在 1 μs 设置阶跃，经过仿真计算，可得传感器上升时间的间隔是 1.1～2.2 μs，因此传感器上升时间为 1.1 μs，在 21.3 μs 时传感器输出达到稳定，因此响应时间为 20.3 μs，阶跃响应曲线如图 9 所示。

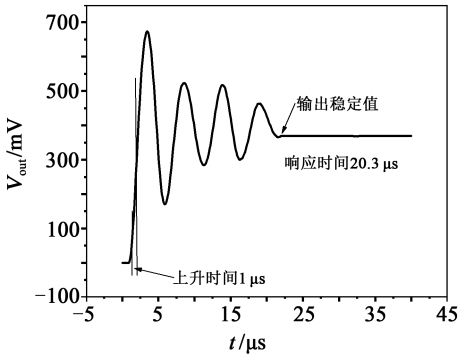


图 9　阶跃响应曲线

2.2.4　抗冲击分析

由图 3 仿真应力位移云图可以得知，敏感元件即悬臂梁和质量块部位，当加速度在工作量程内，敏感元件发生的弹性形变可以恢复，如果传感器工作在超量程情况下，敏感元件发生的弹性形变不可恢复。当物体在经历一定的应力后进入屈服阶段时，材料就会发生塑性变形[7]。其等效应力极限强度是一不变的定值，由材料的属性决定，硅的极限强度是杨氏模量的 1%[5]。硅材料杨氏模量为 169 GPa，所以硅的极限强度为 1.69 GPa，以此作为传感器的冲击极限应力，通过仿真计算，得到在加速度为 334 000 g 时应力为 1.69 GPa，耐冲击为量程的 6.67 倍。在工作量程内的电压输出如图 10 所示，计算得到传感器的线性度为 0.06%。

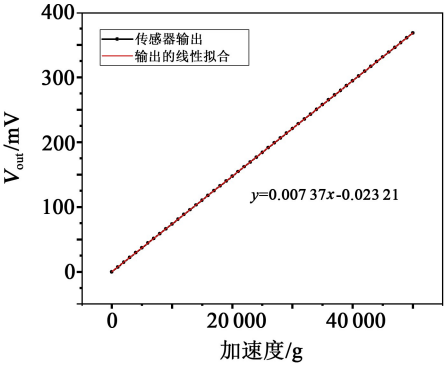


图 10　传感器输出与拟合曲线

3　总结

本文介绍了一种四端梁结构的 MEMS 压阻式加速度传感器，采用系统级仿真方法，通过 COMSOL 软件仿真得到传感器的结构尺寸。在 50 kg 量程内，传感器轴向灵敏度达到 7.40 μV/g，横向灵敏度优于 0.33%。响应时间为 20.3 μs，固有频率为 111.2 kHz，线性度为 0.06%，抗冲击性能达到 334 000 g，满足高 g 值环境下的测试需求。

参考文献：

[1] 张　宇. MEMS 压阻式高 g 值加速度传感器研究[D]. 黑龙江：哈尔滨工业大学，2022.
Zhang Yu. Study on MEMS high g piezoresistive acceleration sensor[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2022.

[2] 朴林华，佟嘉程，李　备，等. 动热源摆式单轴 MEMS 热加速度计敏感机理的研究[J]. 压电与声光，2023，45(1)：105-111.
Piao Linhua, Tong Jiacheng, Li Bei, et al. Study on sensing mechanism of single-axis MEMS thermal accelerometer with dynamic heat source pendulum [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(1): 105-111.

[3] 许高斌，花　翔，杜林云，等. 新型高 g 值压阻式加速度计设计[J]. 仪表技术与传感器，2020(10)：42-46，83.
Xu Gaobin, Hua Xiang, Du Linyun, et al. Design of a new high g value piezoresistive accelerometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10): 42-46, 83.

[4] 林立娜，梁　庭，李　鑫，等. 基于 SOI 的低横向灵敏度压阻式加速度计的设计[J]. 微纳电子技术，2019，56(6)：466-472.
Lin Lina, Liang Ting, Li Xin, et al. Design of the low cross axis sensitivity piezoresistive accelerometer based on SOI[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(6): 466-472.

[5] 祁晓瑾. MEMS 高 g 值加速度传感器研究[D]. 太原：中北大学，2007.
Qi Xiaojin. The reseach on the MEMS high g accelerometer [D]. Taiyuan: North University of China, 2007.

[6] 孟立凡，蓝金辉. 传感器原理与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2011.
Meng Lifan, Lan Jinhui. Principles and Applications of Sensor [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.

[7] 俞阿龙，李　正，孙红兵，等. 传感器原理及其应用[M]. 南京：南京大学出版社，2017.

作者简介：

李永伟(1989—)，男，山西省吕梁市人，博士，副教授，主要从事 MEMS 传感器设计与开发、传感器应用等研究工作。