

文章编号: 1671-7449(2026)02-0205-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 205-212.

压敏电阻排布方式对四端固支梁压阻式 加速度计输出影响研究

卢晓曼, 李婉华, 邸瑜, 王思哲, 余建刚, 梁庭*

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 压敏电阻的排布位置对压阻式振动传感器的电压输出响应有着重要影响, 研究不同压敏电阻排布方式对四端固支梁式压阻式加速度传感器的输出影响具有重要意义。提出了4种不同的压敏电阻排列方式, 分别为4个电阻排布在悬臂梁根部, 4个电阻排布在质量块边缘, 传感器相对悬臂梁上根部电阻和质量块边缘电阻交错排布, 传感器相邻悬臂梁上根部电阻和质量块边缘电阻交错排布。对4种排布方式的加速度计芯片进行响应输出仿真, 分析加速度芯片在加速度为10g, 输入电压为5V时的输出电压, 确定了由相对悬臂梁根部电阻—质量块悬臂梁连接区域电阻—悬臂梁根部电阻—质量块悬臂梁连接区域电阻构成的惠斯通电桥的输出电压最大, 为1.36 mV, 是其他3种排列方式的3~8倍, 提高了加速度芯片的灵敏度。

关键词: 压阻效应; 加速度计; 惠斯通电桥; COMSOL有限元仿真; 应力分布

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026010

引用格式: 卢晓曼, 李婉华, 邸瑜, 等. 压敏电阻排布方式对四端固支梁压阻式加速度计输出影响研究[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 205-212.

LU Xiaoman, LI Wanhua, DI Yu, et al. Influence study of arrangement of varistor on output of a four-terminal fixed beam piezoresistive accelerometer[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 205-212.

Influence Study of Arrangement of Varistor on Output of A Four-Terminal Fixed Beam Piezoresistive Accelerometer

LU Xiaoman, LI Wanhua, DI Yu, WANG Sizhe, YU Jiangang, LIANG Ting*

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The arrangement positions of piezoresistors have a significant impact on the voltage output response of piezoresistive vibration sensors. Studying the effects of different piezoresistor arrangements on the output of a four-end fixed beam piezoresistive accelerometer is of great significance. Four distinct piezoresistor layout configurations are proposed: four resistors arranged at the root of the cantilever beam, four resistors distributed at the edges of the mass block, interleaved arrangement of resistors at the root of the cantilever beam and the edges of the mass block on opposite sides of the sensor, interleaved arrangement of resistors at the root of the cantilever beam and the edges of the mass block on adjacent sides of the sensor. Simulation analyses were

【收稿日期】2025-03-10

【基金项目】山西省科技重大专项“揭榜挂帅”项目(202301030201003)

【作者简介】卢晓曼(2001—), 女, 硕士生, 主要从事高温振动传感器研究。E-mail: S202206144@st.nuc.edu.cn。

*【通信作者】梁庭(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事微纳红外传感, 微纳压力传感及微纳器件制造与系统集成相关研究。E-mail: liangtingnuc@nuc.edu.cn。

conducted to evaluate the output response of accelerometer chips with these configurations. The simulations examined the output voltage when the accelerometer was subjected to an acceleration of $10g$ and an input voltage of 5 V . The results indicate that the Wheatstone bridge composed of resistors in the mixed arrangement—alternating between the cantilever beam root and the proof mass – cantilever beam connection region—achieves the highest output voltage of 1.36 mV . This value is 3 to 8 times greater than that of the other three configurations, demonstrating an enhancement in accelerometer sensitivity.

Key words: piezoresistive effect; accelerometer; Wheatstone bridge; COMSOL finite element simulation; stress distribution

0 引言

压阻式加速度计基于硅的压阻效应,将外界加速度信号转换为敏感结构的形变^[1],敏感结构的形变使得芯片表面应力发生改变,可通过感测电路将应力的改变转换为电信号的输出,从而达到测量目的^[2-3]。基于压阻效应的传感器的感测电路一般是惠斯通电桥^[4]。惠斯通电桥可以分为双臂式和全臂式电路,全臂式电路的灵敏度是双臂式的2倍^[5],但对于微小MEMS芯片来说,相同的压敏电阻构成全臂式电路所需占用的电路面积更大^[6-7],工艺也可能会更加复杂。对于压敏传感器来说,由于应力集中区的分布不同,压敏电阻的位置不同^[8],压敏电阻阻值的改变量也不同,因此,同一传感器在不同的应力集中区排布压敏电阻构成惠斯通电桥的输出也不相同。电桥的输出电压决定了传感器的性能,不同的压敏电阻排布方式将导致传感器的性能不同,因此,研究压敏电阻排布方式对加速度传感器输出响应的影响具有重要意义。

Ma等^[9]提出了一种双臂式感测电路的压阻式压力传感器,在缩小芯片体积的同时保证了传感器的高输出灵敏度。石云波等^[10]提出了一种开环式惠斯通电桥感测电路的三轴压阻微加速度计,很好地抑制了横向效应。刘林仙等^[11]提出了一种双T型检测单元,得到了较好的应力分布区,使其具有较高的灵敏度。

四端固支梁压阻式加速度传感器的输出电压根据压敏电阻的排布位置改变而改变,本文通过分析四端固支梁压阻式加速度计的应力分布,提出了4种不同的电桥电路,分析了各种电路的理论输出电压。

1 加速度计原理

1.1 力学模型

MEMS压阻式加速度计最常用的结构是“悬

臂梁-质量块”模型^[12],通常情况下,悬臂梁可以提供弹性恢复力^[13],质量块在空气中运动会形成阻尼,故“悬臂梁-质量块”加速度计受力分析可以简化为“弹簧-质量块-阻尼”的单自由度二阶振荡系统^[14-16]。在“悬臂梁-质量块”加速度计模型中,四端固支梁结构具有结构稳定性好、非线性误差小、横向灵敏度低等优点^[17]。四端固支梁加速度计模型如图1所示,外部加速度 a 作用到加速度计上,质量块受到作用力 $F_1=ma$ ^[18],质量块带动4个梁振动并产生位移,而且梁上产生相应的应力^[19]。由于四端固支梁属于左右对称及上下对称结构,故梁的受力情况一致,分析单个梁的受力情况即可^[20]。

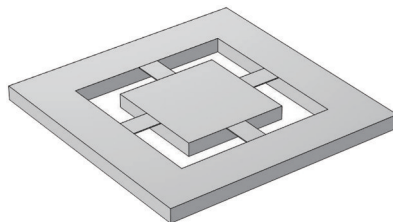


图1 四端固支梁加速度计模型

Fig. 1 Four-terminal fixed beam accelerometer model

图2所示为双端固支梁施加集中载荷的情况^[21],设固支端A和固支端B对梁作用的弯矩和垂直支承力分别为 M_A 和 F_A 以及 M_B 和 F_B ,则变形的微分方程可以表示为

$$\begin{aligned} EI \frac{d^2 w_1}{dx^2} &= M_A + F_A x (x \leq a), \\ EI \frac{d^2 w_2}{dx^2} &= M_B + F_B x (x \geq a), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: w_1 和 w_2 分别为梁在集中力作用点两侧的变形挠度; E 为悬臂梁材料的弹性模量; I 为截面相对于中性轴的惯性矩。梁在固支点的边界条件为

$$\begin{aligned} w_1(0) &= 0, w_2(L) = 0, \\ \left. \frac{dw_1}{dx} \right|_{x=0} &= 0, \left. \frac{dw_2}{dx} \right|_{x=L} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

尽管梁在集中力作用点两侧的变形微分方程不同,但是根据梁的连续性,梁在该点两侧的变形和转角满足连续性条件

$$w_1|_{x=a} = w_2|_{x=a}, \quad \frac{dw_1}{dx}|_{x=a} = \frac{dw_2}{dx}|_{x=a} \quad (3)$$

另外,根据梁的平衡关系,可以得到力和弯矩的平衡条件为

$$F_A + F_B = F, \quad M_A = Fa + M_B - F_B l \quad (4)$$

对式(1)积分,并利用边界条件式(2)、连续性条件式(3),以及力和弯矩的平衡条件式(4),得到变形表达式为

$$w = \frac{F_A x^3}{6EI} + \frac{M_A x^2}{2EI} \quad (x \leq a) \quad (5)$$

支承点的作用力 F 和弯矩 M 分别为

$$F_A = \frac{F}{l^3} (l-a)^2 (l+2a), \quad M_A = -\frac{Fa}{l^2} (l-a)^2 \quad (6)$$

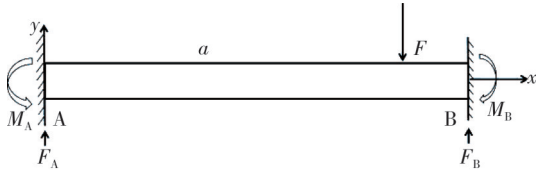


图 2 双端固支梁结构

Fig. 2 Doubly clamped beam structure

1.2 惠斯通电桥

惠斯通电桥如图 3 所示,当压敏电阻没有受力时,电桥处于平衡状态,输出电压为 0,电桥平衡状态为

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (7)$$

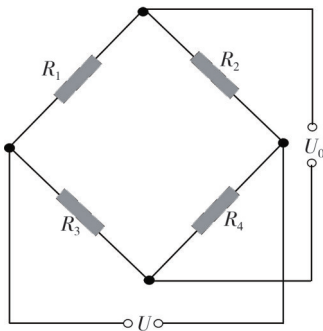


图 3 惠斯通电桥

Fig. 3 Wheatstone bridge

压阻式加速度计的电路属于全臂差动电桥电路,其中 4 个桥臂均为压敏可变电阻,压敏电阻的初始值相同,加速度计工作时,4 个桥臂电阻发生相应变化,其中,2 个压敏电阻阻值变大,另外 2 个压敏电阻阻值变小,且相邻桥臂电阻变化趋势

相反,构成全臂差动电桥电路,如图 4 所示^[22]。差动电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8)$$

式中: U 为电路输入电压; $\Delta R_1 \sim \Delta R_4$ 为 4 个压敏电阻的阻值变化量,根据受力情况其数值为正数或者负数,假设 4 个压敏电阻阻值改变量的大小相同,即 $\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R, \Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R$ 。将以上公式代入到电压输出表达式中,可以得到输出电压为^[23]

$$U_o = U \frac{\Delta R}{R} \quad (9)$$

可以看出,四臂差动电桥的输出电压是线性的,其电压灵敏度 $K_U = U_o$ 。

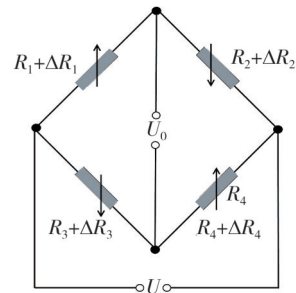


图 4 全臂差动电桥

Fig. 4 Full-arm differential bridge

2 加速度计仿真分析

2.1 加速度计梁上应力分析

2022 年, CSIR 中央电子工程研究所的 Mukhiya 等^[24-25]采用传统四端固支梁-质量块结构,基于湿法腐蚀工艺,用较低的成本完成了加速度计的制备。由于该加速度计已具备成品,相关尺寸完备,采用该加速度计的设计参数进行理论分析和仿真模拟;因质量块采用湿法腐蚀工艺制备,质量块大小从顶部测量的数据和底部测量的数据不同,为了减小建模难度,质量块的大小采用文中从顶部俯视测量的数据。加速度计的实物图如图 5 所示^[26],设计参数如图 6 和表 1 所示。芯片材料为 N 型硅,密度为 $2\,330\text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 170 GPa ,泊松比为 0.28 ;金属引线材料为 Au,电导率为 $4.56 \times 10^7\text{ S/m}$,相对介电常数为 9,密度为 $19\,300\text{ kg/m}^3$ 。

对芯片四周的框架底部施加固定约束条件,沿质量块 Z 轴方向施加幅值为 $10g$ 的阶跃加速度,分析芯片的应力分布情况,等效应力图如图 7 所

示,芯片上应力集中区有8处,分别在悬臂梁的根部和与质量块连接的地方,悬臂梁的中部应力较小^[27]。对芯片相对的梁上应力进行分析,等效应力如图8所示,可以看到相对的梁上应力基本呈对称分布,对于单个悬臂梁,悬臂梁根部的最大应力大于悬臂梁与质量块连接区域的最大应力。

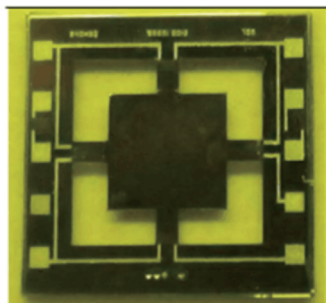


图5 加速度计实物图

Fig. 5 Physical image of accelerometer

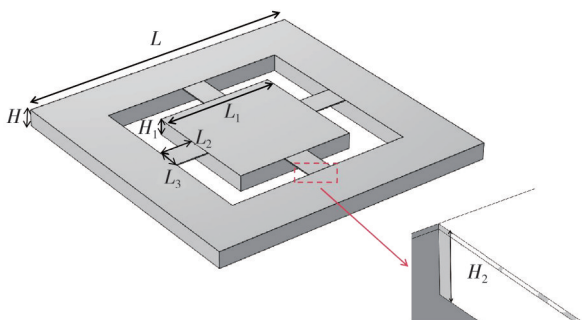


图6 加速度计模型尺寸标识图

Fig. 6 Accelerometer model dimension labeling diagram

表1 芯片参数表

Tab. 1 Chip parameters

参数	数值/ μm
L	6 000
H	350
L_1	2 500
H_1	330
L_2	700
L_3	500
H_2	20

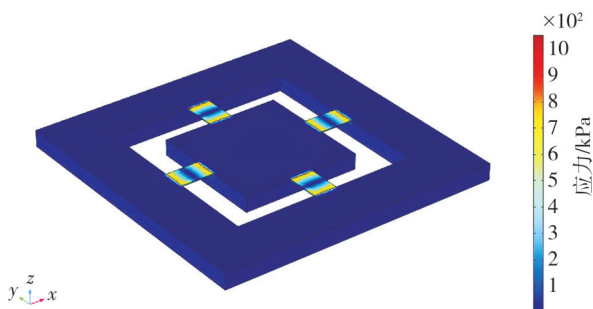


图7 等效应力云图

Fig. 7 Equivalent stress cloud diagram

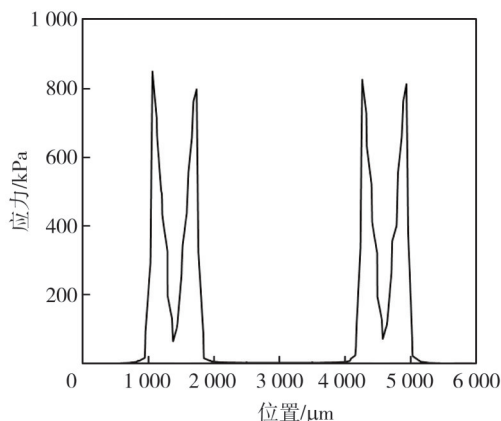


图8 梁上应力分布图

Fig. 8 Stress distribution diagram on beam

2.2 压敏电阻位置排布

单晶硅在(100)晶面上沿 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 1-10 \rangle$ 晶向有最大的压阻系数^[28],且P型掺杂比N型掺杂有更大的压阻系数^[29-31],故采用N型(100)硅衬底,P型电阻,并且电阻条沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向分布的模型^[32-33]。

任何材料的电阻变化都可由式(10)表示^[34-35]。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s}, \quad (10)$$

式中: ρ 为导线的电阻率; l 为导线的长度; s 为导线的横截面积。对于半导体材料来说, $\frac{\Delta l}{l}$ 、 $\frac{\Delta s}{s}$ 这两项很小,电阻主要由 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 决定。因此,压敏电阻

阻值变化可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma, \quad (11)$$

式中: π 为压阻系数; σ 为应力。根据硅的晶向,式(11)又可以表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi \sigma = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_s \sigma_s \approx \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_l - \sigma_t), \quad (12)$$

式中: σ_l 为纵向应力; σ_t 为横向应力; σ_s 为垂直方向应力,与横纵向应力相比很小可以忽略; π_l 、 π_t 、 π_s 分别为纵向、横向、剪切压阻系数; π_{44} 为P型硅的剪切压阻系数。

对芯片施加沿Z轴的幅值为10g的阶跃加速度,沿芯片中间绘制一条截线,如图9所示,分析截线上横向应力 T_{xx} 和纵向应力 T_{yy} , $T_{yy} - T_{xx}$ 结果如图10所示。由图可以看出,在加速度的作用下,梁的上表面两处应力集中区的合应力 $T_{yy} - T_{xx}$

的正负值相反,即电阻变化率的正负值相反,可以构成惠斯通电桥的相邻桥臂电阻。

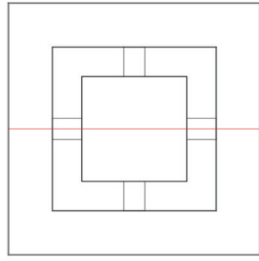


图 9 芯片截面图

Fig. 9 Chip cross-section diagram

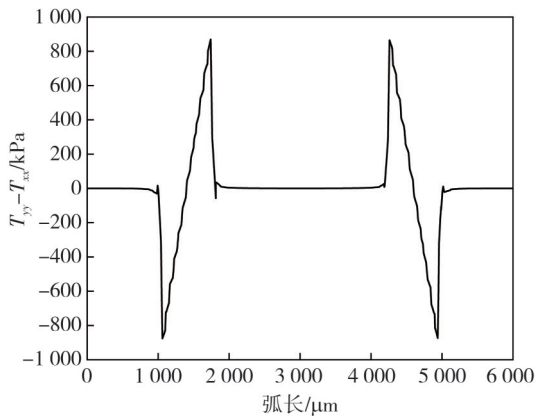


图 10 $T_{yy} - T_{xx}$ 分布图

Fig. 10 $T_{yy} - T_{xx}$ distribution diagram

压敏电阻的排布位置本质上取决于悬臂梁的应力分布特征。根据图 7 的应力分布云图,悬臂梁根部和悬臂梁-质量块连接区为最大应力集中区。根据压阻效应理论,电阻变化率与局部应力呈正相关,因此,压敏电阻必须布置于这两个高应力区才能实现有效信号转换。然而,由于悬臂梁根部与悬臂梁-质量块连接区的应力方向相反,不同位置的电阻在电桥中的极性组合将直接影响输出特性。

理论上,压敏电阻需要位于应力集中区,使其压阻效应产生的电阻变化率最大,灵敏度更高。根据悬臂梁上应力分析结果,梁上应力集中区一共有 8 处,其中,4 处位于悬臂梁根部,4 处位于悬臂梁与质量块连接的区域。考虑到工艺光刻误差,将电阻条放置于距离应力集中区边缘 $20\ \mu\text{m}$ 的地方,电阻条位置示意图如图 11 所示。力电耦合仿真中压阻效应数密度(压敏电阻掺杂浓度)条件设置为 $3 \times 10^{24}\ \text{m}^{-3}$,电阻条的尺寸为 $20\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$,压敏电阻阻值为 $1\ 068\ \Omega$ 。

压敏电阻的排布方式直接决定惠斯通电桥的

拓扑结构。根据悬臂梁对称性特征,悬臂梁根部与悬臂梁-质量块连接区的应力方向满足:相邻悬臂梁同位置电阻的应力方向相反,相对悬臂梁同位置电阻的应力方向相同。这一特性导致不同排布方式下电阻变化量的符号组合存在显著差异。

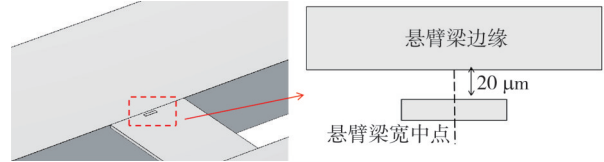


图 11 电阻条位置示意图

Fig. 11 Resistor strip position diagram

由上述分析可知,构成惠斯通电桥的电阻排布方式有 4 种,分别为 4 个电阻均位于悬臂梁根部,如图 12 所示;4 个电阻均位于悬臂梁与质量块连接的区域,如图 13 所示;两个电阻位于悬臂梁根部和两个电阻位于悬臂梁与质量块连接区域,这种又可以分为相邻悬臂梁和相对悬臂梁两种情况,如图 14、图 15 所示。

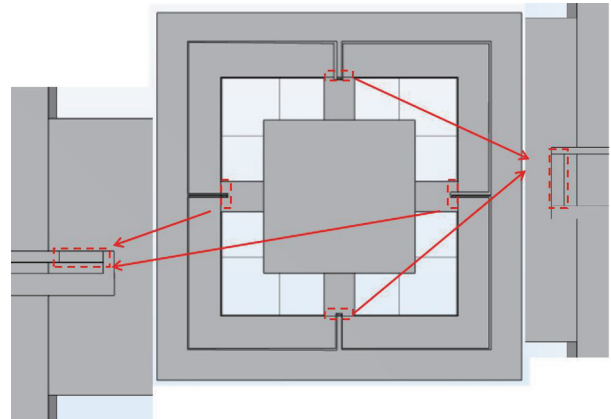


图 12 四端悬臂梁根部电阻排布

Fig. 12 Root resistance arrangement of a four-terminal cantilever beam

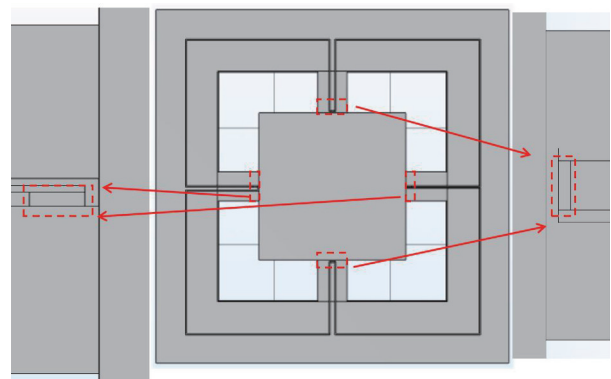


图 13 四端质量块边缘电阻排布

Fig. 13 Edge resistance arrangement of four-terminal quality block

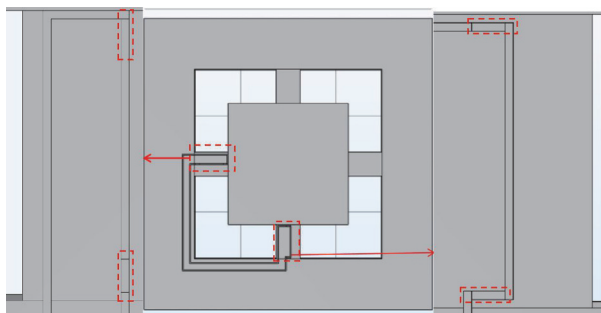


图 14 相邻悬臂梁排布

Fig. 14 Adjacent cantilever beam arrangement

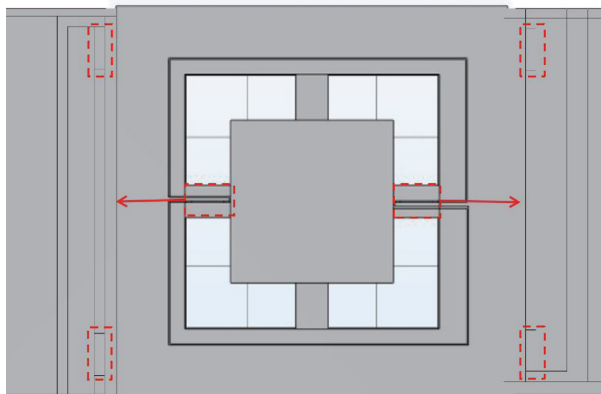


图 15 相对悬臂梁排布

Fig. 15 Relative cantilever beam arrangement

2.3 芯片输出响应分析

由 2.2 节可知, 对于四端固支梁的压阻式加速度计芯片, 惠斯通电桥共有 4 种连接方式, 对这 4 种不同的电桥进行力电耦合仿真, 分析相同加速度载荷的情况下, 惠斯通电桥的输出。外加载荷为沿 Z 轴幅值为 10g 的阶跃加速度, 惠斯通电桥输入电压为 5 V 时, 4 种不同电阻排列方式的电桥输出如表 2 所示。

表 2 不同电阻排布方式电路输出电压

Tab. 2 Output voltage for different resistor configurations

电阻排列方式	输出电压/mV
四端根部	0.171
四端质量块边缘	1.362
相邻悬臂梁	0.205
相对悬臂梁	0.371

由上表可知, 在外加载荷相同且电路输入相同的情况下, 选取悬臂梁与质量块连接区域的 4 个电阻构成惠斯通电桥的芯片输出电压最高, 是其他电阻排布方式的 3~8 倍。选取悬臂梁根部和与质量块连接区域的电阻的两种排列方式的输出电压都高于只选取悬臂梁根部电阻排布的输出电压。造成不同排布方式的芯片输出灵敏度不同的原因可能是梁上应力具有方向性, 应力极性抵

消, 根部和质量块边缘的应力方向相反, 同时使用这两处的电阻可能导致信号抵消, 从而降低整体输出。例如, 根部电阻受拉应力, 而质量块边缘电阻受压应力, 同时使用时可能相互抵消, 导致净输出减小。

3 结 论

对于四端固支的压阻式加速度计来说, 构成其输出电路的排列方式有 4 种, 分别为 4 个悬臂梁根部电阻连接, 4 个质量块与悬臂梁连接区域的电阻连接, 相邻悬臂梁根部电阻和质量块悬臂梁连接区域电阻交错连接, 相对悬臂梁根部电阻和质量块悬臂梁连接区域电阻交错连接。其中, 在相同的载荷和电路输入的情况下, 4 个质量块与悬臂梁连接区域的电阻连接的排布方式输出电压最高, 在外加载荷 10g, 输入电压 5 V 时, 输出电压为 1.362 mV, 高出其他 3 种电阻排列方式 3~8 倍, 可以有效提高加速度计的灵敏度。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 伍国伟, 伍斯龙. MEMS 传感器技术发展现状及应用初探[J]. 中国设备工程, 2019(17): 200-201.
WU Guowei, WU Silong. Development status and application of MEMS sensor technology [J]. China Plant Engineering, 2019(17): 200-201. (in Chinese)
- [2] LI J, XIA D, WANG S, et al. A novel non-vacuum packaged triaxial accelerometer with differential dual-axis resonators and torsional elements[J]. Microsystem Technologies, 2024, 30(1): 33-43.
- [3] 刘广玉. 微传感器设计、制造与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [4] SABHAPANDIT E, JINDAL S K, KANEKAL D, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of a single-turn MEMS piezoresistive pressure sensor for enhancement of performance metrics[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2023, 32(16): 2350276.
- [5] 文家雄, 朱俊. 传感器与检测技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2016.
- [6] 关旭东. 硅集成电路工艺基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.

- [7] QIN L, HE C, YU L X, et al. Multiple dependent reliability estimation of large range MEMS accelerometers in high temperature environment[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2019, 10(1): 9-15.
- [8] 赵源. 压阻式加速度传感器的设计与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [9] MA Y, LEI C, LIANG T, et al. Design and fabrication of a tiny micro-pressure sensor with improved linearity and sensitivity[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(5): 055018.
- [10] 石云波, 孟美玉, 刘俊, 等. 基于 SOI 的三轴压阻微加速度计的设计[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(3): 454-456.
- SHI Yunbo, MENG Meiyu, LIU Jun, et al. The design of three-axis accelerometer based on SOI[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(3): 454-456. (in Chinese)
- [11] 刘林仙, 张国军, 许姣, 等. 一种 MEMS 硅微三维加速度计设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2013(3): 15-18.
- LIU Linxian, ZHANG Guojun, XU Jiao, et al. Design of MEMS three-dimensional accelerometer based on silicon[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(3): 15-18. (in Chinese)
- [12] CHOI Y, SEOK M, YOON S H, et al. High-G MEMS accelerometer with cross-symmetric structures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 24(2): 1275-1286.
- [13] HARI K, VERMA S K, PRAVEEN KRISHNA I R, et al. Out-of-plane dual flexure MEMS piezoresistive accelerometer with low cross axis sensitivity[J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(5): 2437-2444.
- [14] 白贵文, 雷程, 梁庭, 等. 基于 4H-SiC 的低横向灵敏度压阻式加速度计设计仿真研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(8): 1-5.
- BAI Guiwen, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Design and simulation study of low lateral sensitivity piezoresistivity accelerometer based on 4H-SiC[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(8): 1-5. (in Chinese)
- [15] LÜ Y, XU S, HOU X, et al. High performance novel high-g piezoresistive micro-accelerometer with MHz natural frequency[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(11): 18841-18850.
- [16] XIA Y, WANG T, LÜ Y, et al. Simultaneous enhancement of sensitivity, resonant frequency, and overload capability of piezoresistive accelerometers by heavily-doped fillet structures on sensing beams[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(11): 19138-19146.
- [17] 白贵文, 田学东, 雷程, 等. 基于 4H-SiC 的开槽四梁式压阻式加速度计设计及仿真研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(2): 11-14.
- BAI Guiwen, TIAN Xuedong, LEI Cheng, et al. Design and simulation of slotted four-beam piezoresistivity accelerometer based on 4H-SiC[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(2): 11-14. (in Chinese)
- [18] 王毓婷. 压阻式三轴高 g 值加速度传感器设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [19] 胡少伟, 苗同臣. 结构振动理论及其应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [20] SINGH S, KUMAR V, SINGH S P, et al. Investigation of gold-silicon eutectic bonding to realize the symmetric sensing element of MEMS piezoresistive accelerometer[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2025, 15(4): 697-705.
- [21] 王喆焱. 微系统设计与制造[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [22] 应捷, 杨晖. 传感器原理与智能检测应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024.
- [23] ZHANG J, SHI Y, CAO H, et al. Design and implementation of a novel membrane-island structured MEMS accelerometer with an ultra-high range[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(21): 20246-20256.
- [24] MUKHIYA R, BAGOLINI A, MARGESIN B, et al. {1, 0, 1} bar corner compensation for CMOS compatible anisotropic TMAH etching[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(11): 2458-2462.
- [25] MUKHIYA R, BAGOLINI A, BHATTACHARYYA T K, et al. Experimental study and analysis of corner compensation structures for CMOS compatible bulk micromachining using 25wt% TMAH[J]. *Microelectronics Journal*, 2011, 42(1): 127-134.
- [26] MUKHIYA R, SANTOSH M, SHARMA A, et al. Fabrication and characterization of a bulk micromachined polysilicon piezoresistive accelerometer[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 48: 619-621.
- [27] 杨雨君. MEMS 高 g 值双轴压阻式加速度传感器研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.
- [28] 张洁宇, 石云波, 赵锐, 等. 压阻式加速度传感器动力学响应分析与验证[J]. *机械设计与制造工程*, 2024, 53(2): 114-118.
- ZHANG Jieyu, SHI Yunbo, ZHAO Rui, et al.

- Analysis and verification of dynamic response of piezo-resistive acceleration sensor [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2024, 53(2): 114-118. (in Chinese)
- [30] 姚东媛, 谢胜秋, 王俊巍, 等. 宽温区工作压力传感器热力学研究[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(6): 28-31.
- YAO Dongyuan, XIE Shengqiu, WANG Junwei, et al. Study on thermodynamics of pressure sensor in wide temperature range[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(6): 28-31. (in Chinese)
- [31] 陆学斌, 刘晓为, 揣荣岩, 等. 掺杂浓度对多晶硅纳米薄膜应变系数及其线性度的影响[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009(1): 5-9.
- LU Xuebin, LIU Xiaowei, CHUAI Rongyan, et al. Influence of doping concentration on gauge factor and linearity of polysilicon nanofilms [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009 (1): 5-9. (in Chinese)
- [32] MUKHIYA R, SANTOSH M, SHARMA A, et al. Fabrication and characterization of a bulk micromachined polysilicon piezoresistive accelerometer [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 48: 619-621.
- [33] YANG Y, ZHAO Y, WANG L, et al. High-temperature SiC piezoresistive accelerometer fabricated by femtosecond laser [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(11): 17461-17469.
- [34] ZHAI Y, LI H, TAO Z, et al. Design, fabrication and test of a bulk SiC MEMS accelerometer [J]. *Microelectronic Engineering*, 2022, 260: 111793.
- [35] 郝家奇. 低 g 值压阻式三轴加速度传感器研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.