

±16 g 三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计的设计



虎 勇¹, 李绍荣², 郭 威², 蒋 婷², 郭小伟^{2,3*}, 邹 力², 任颖慧¹, 梁 杰¹

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司 成都 610051; 2. 电子科技大学光电科学与工程学院 成都 610054;

3. 电子科技大学长三角研究院(湖州) 浙江 湖州 313001)

【摘要】微电子机械系统(MEMS)惯性传感器(如加速计、陀螺仪)具有高性能、低功耗、低成本、集成度高、可靠性高、体积小等特点。但 MEMS 传感器交叉串扰仍较大,影响了加速度的测量。该文设计了一个量程为±16 g 的三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计结构,通过对所设计的结构进行静力学分析和模态分析,保证加速度计良好的抗过载能力。仿真结果表明,该结构实现了模态分离避免了模态干扰,且交叉灵敏度均小于 0.3%,有效地降低了交叉串扰。

关键词 电容式加速度计; 高精度; MEMS; 三质量块

中图分类号 TP73 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2022240

Design of ±16 g Three-Mass Three-Axis MEMS Capacitive Accelerometer

HU Yong¹, LI Shaorong², GUO Wei², JIANG Ting², GUO Xiaowei^{2,3*}, ZOU Li², REN Yinghui¹, and LIANG Jie¹

(1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd Chengdu 610051;

2. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

3. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China Huzhou Zhejiang 313001)

Abstract Micro-Electro-Mechanical system (MEMS) inertial sensors (such as accelerometers, gyroscopes) have the characteristics of high performance, low power consumption, low cost, high integration, high reliability, and small size. Cross-talk is a major issue in designing MEMS accelerator, which greatly affects the measurement of acceleration in the sensitive direction. In this paper, we propose a three-mass three-axis MEMS capacitive accelerometer structure with a range of ±16 g for reducing the problem. The static and modal analysis of the structure is made to ensure good anti-overload capability of the accelerometer. The simulation results show that the structure achieves modal separation and avoids modal interference, and the cross-sensitivity is less than 0.3%, which effectively reduces the cross-talk.

Key words capacitive accelerometers; high accuracy; MEMS; three mass blocks

微电子机械系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器具有体积小、集成度高、重量轻、功耗小、制作成本低、抗振动和抗冲击能力强等优势^[1]。MEMS传感器分为七大类: 1) 压力传感器,即探测绝对压力和计量压力的传感器; 2) 热学传感器,即温度和热量传感器; 3) 力学传感器,即力、压强、速度和加速度传感器; 4) 化学传感器,即化学浓度、化学成分和反应率传感器; 5) 磁学传感器,即磁场强度、磁通密度和磁化强度传感器; 6) 辐射传感器,即电磁波强度传感器; 7) 电

学传感器,即电压、电流和电荷传感器。目前正在开发的微机电传感器包括 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪和微压力表^[2-3]。

MEMS 传感器的商业化主要分为 3 次: 1) 1970 年代,在工业和航空航天中使用低成本产品,如压力传感器、应变表以及加速度计等; 2) 1980 年代,汽车工业大量使用低成本产品,如压力传感器、加速度计、偏航传感器及空气流量传感器等; 3) 2000 年代初,在消费电子产品中大量使用非常低成本的产品,如加速度计、陀螺仪及麦

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2023-02-22

作者简介: 虎勇(1973-),男,高级工程师,主要从事水电站智能电站建设和电站控制方式优化方面的研究。

*通信作者: 郭小伟, E-mail: gxw@uestc.edu.cn

克风等^[4-5]。

MEMS 技术的快速发展使 MEMS 加速度计日益成熟, 应用范围也不断扩大^[6]。通过 MEMS 加速度计的工作原理可将其分为压阻、压电、电容、隧道、共振、电磁、热电偶、光学、感应等^[7]。由于其在尺寸、质量、功耗和可靠性方面的突出特点, MEMS 传感器被用于军事和需要高环境抗性的地方。MEMS 加速度计发展迅速, 具有良好的应用前景^[8]。随着加速计的不断发 展, 在各种电子产品、无人驾驶以及飞行器等应用领域中, 对能够检测多个轴向加速度的加速度计需求越来越大, 因此 MEMS 电容式加速度计的设计成为该领域关注的重点^[9]。

目前出现的单一质量块的电容式 MEMS 加速度计存在加工工艺复杂、交叉灵敏度大、量程受限且灵敏度较低等问题^[10]。双质量块 MEMS 加速度计也存在交叉耦合较大、结构稳定性差、应用范围受限等问题^[11]。而三质量块加速度计能够改善上述问题, 但交叉串扰仍较大^[12]。本文设计一种新颖的三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计结构, 能极大地改善交叉灵敏度高的问题, 同时也能保证较高的灵敏度以及高度集成化, 且量程适中。

本文所涉及到的 MEMS 加速度计的仿真分析方法采用的是有限元分析法。

1 三质量块三轴加速度计的设计方案

为了降低工艺难度, 追求小的交叉灵敏度, 有效提升其他检测方向与检测方向的刚度差, 本文设计的新型三质量块三轴 MEMS 加速度计在水平轴 (X, Y 轴) 方向选用一字梁结构。垂直轴 (Z 轴) 方向选用斜置梁, 避免加工误差对器件性能的影响, 并且使水平轴方向与垂直轴方向灵敏度相适应。其具体结构由 3 个质量块构成, 分别检测 X, Y, Z 轴 3 个方向的加速度, X, Y 轴方向如图 1a 所示, Z 轴方向如图 1b 所示, 整体结构布局如图 1c 所示。

该结构在 X, Y 轴方向都采用同样的长方形框架式结构, 主要特点是在质量块中央也采用了一字梁结构, 对水平轴方向的加速度计结构增加弹性梁, 平衡了一字梁刚度较大的特点, 一定程度上提升了结构的灵敏度, 同时采用了梳齿定齿偏置结构, 实现差分电容检测。 Z 轴方向采用方形质量块连接斜置梁, 并在质量块上刻蚀了均匀的阻尼孔, 有效减小了检测时结构的压膜阻尼, 3 个质量块分别检测 3 个轴向的加速度, 能够降低交叉耦合对加速度计

灵敏度的影响, 同时本文设计的三质量块三轴 MEMS 加速度计的尺寸较小, 能满足高集成度的要求, 加速度计的量程也能更容易进行调整。

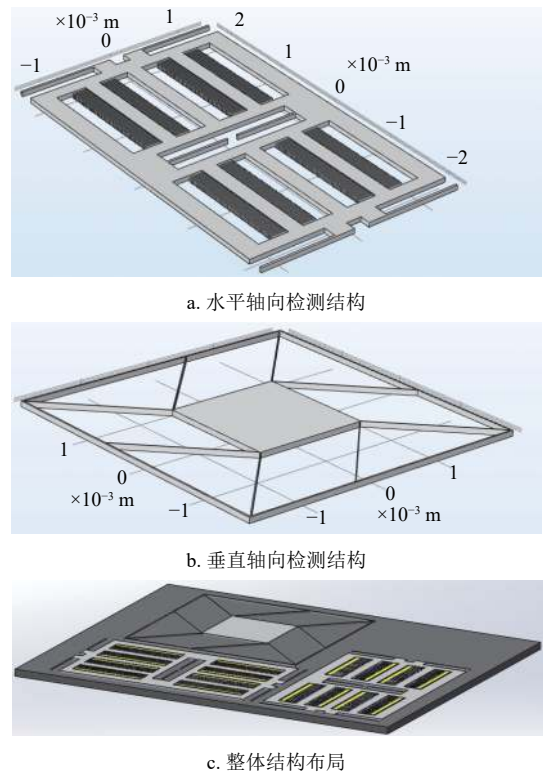


图 1 三质量块三轴加速度计结构

2 弹性梁选择及参数的确定

2.1 水平轴方向弹性梁参数的确定

在设计 MEMS 加速度计时, 弹性梁的选取及尺寸的确定是结构的关键^[13], 弹性梁的结构尺寸对加速度计的灵敏度、刚度、稳定性等性能有直接影响, 因此需要重点分析弹性梁尺寸变化对敏感质量块及梳齿位移的影响。

图 2 为一字梁结构尺寸对梳齿位移及频率的影响仿真分析, 可以看出一字梁的结构尺寸的改变对该检测方向结构的梳齿位移与固有频率影响是相反的。当一字梁及敏感质量块的厚度增加时, 梳齿位移先增加后减小且在 0.07 mm 处取得最大值, 而固有频率则是先减小后增大且在 0.07 mm 处取得最小值。当一字梁的宽度增加时, 梳齿位移减小, 固有频率增大; 当一字梁的长度增加时, 梳齿位移增大, 固有频率减小。

根据仿真结果呈现的变化规律可知, 在提升水平轴检测方向结构的机械灵敏度时, 势必会减小结构的固有频率, 从而减小结构的工作带宽, 故需要

进行综合分析以确定一字梁的结构尺寸。

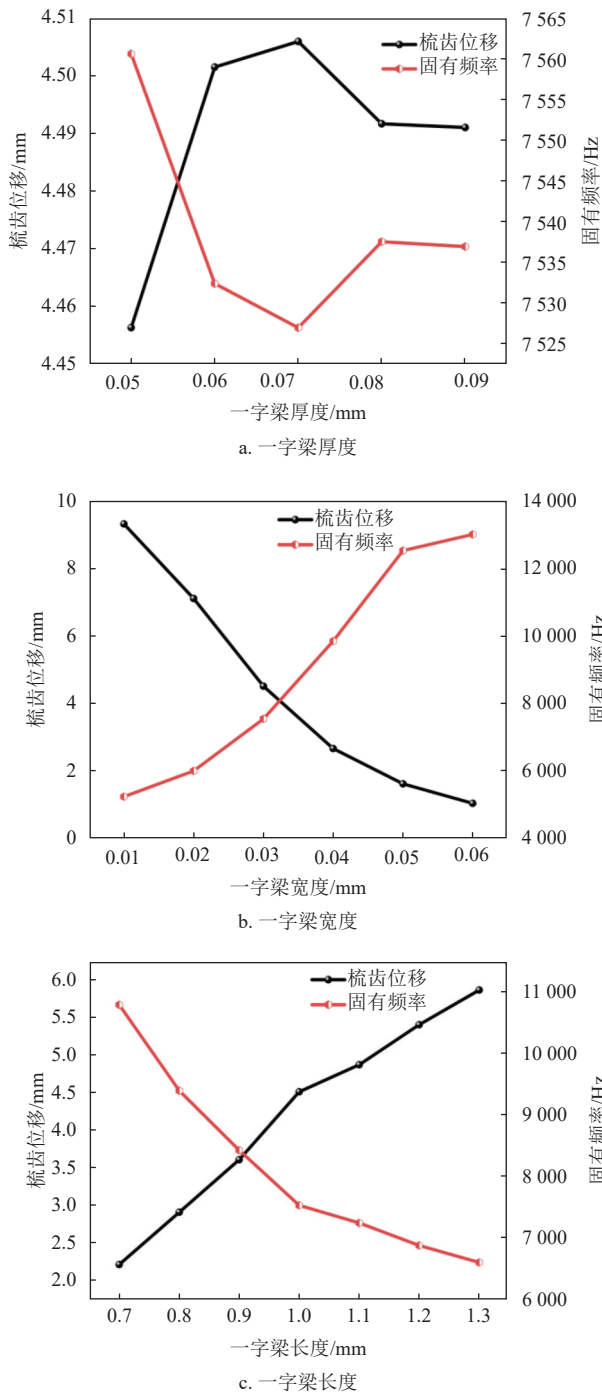


图 2 一字梁结构尺寸对梳齿位移及频率的影响

2.2 垂直轴方向弹性梁参数的确定

垂直轴检测方向结构采用 4 对平行斜置梁, 与水平轴加速度计分析类似^[4]。垂直轴检测方向结构平行斜置梁及质量块厚度、梁宽、梁长对敏感质量块的位移及结构的固有频率的影响如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 随平行斜置梁的厚度及宽度的增加其质量块位移减小, 结构固有频率增大; 随

平行斜置梁长度的增加其质量块位移增大, 结构固有频率减小。

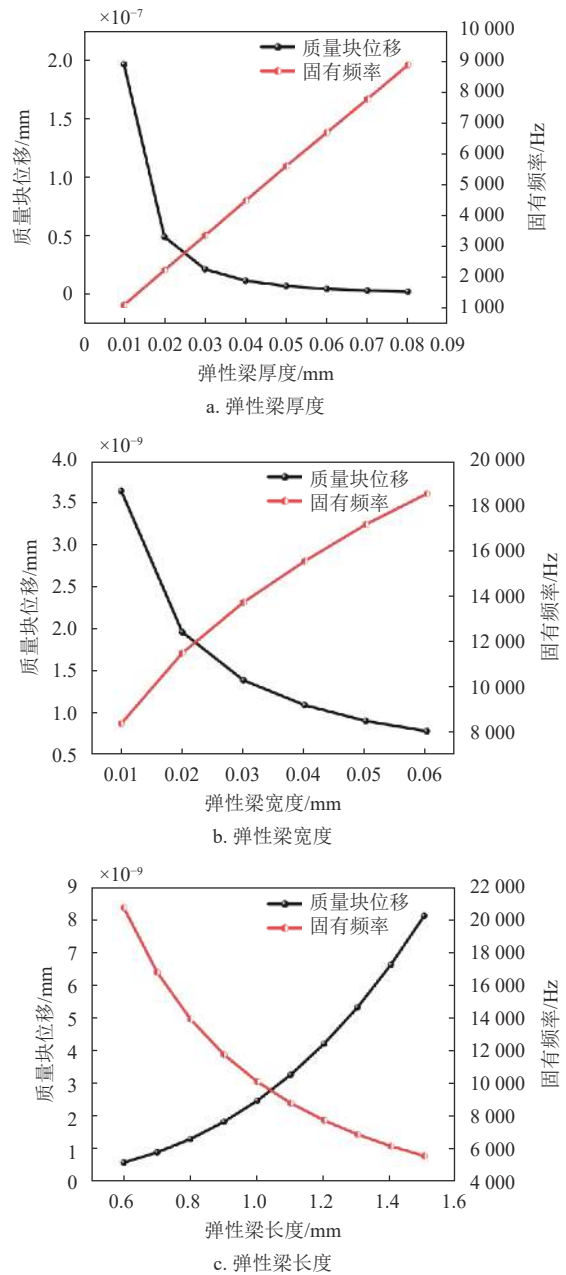


图 3 平行斜置梁结构尺寸对质量块位移及固有频率的影响

2.3 三质量块三轴加速度计的具体结构参数

对加速度计的各项性能参数(机械灵敏度、尺寸大小、工作带宽等)进行综合考虑调整参数得到最佳综合性能, 以确定结构的具体参数。水平轴方向(X,Y轴)的结构如图 1a 所示, 质量块采用方形框架, 有 4 个区域的梳齿固定检测电极以及可动梳齿检测电极, 同时使用 3 对一字梁, 其中上下两对, 质量块的中心处也设置了 1 对, 根据前面分析的各项尺寸对加速度计的位移灵敏度及频率的影响

可以最终得出水平轴方向结构的具体参数, 其中一字梁的参数如表 1 所示。

表 1 Y 轴向检测结构一字梁尺寸参数

一字梁结构	尺寸
上下梁长度/mm	1
上下梁宽度/mm	0.03
上下梁数	4
中间梁长度/mm	0.85
中间梁宽度/mm	0.03
中间梁数	2
梁厚/mm	0.06

根据前面对加速度计位移灵敏度等性能的分析, 确定质量块及梳齿的尺寸参数如表 2 所示。

表 2 Y 轴向检测结构质量块及梳齿尺寸参数 / μm

敏感质量块与梳齿结构	尺寸
质量块外框架长度	2 700
质量块外框架宽度	4 200
质量块外框架厚度	60
中心框架长度	1 800
中心框架宽度	400
中心框架厚度	60
梳齿长度	200
梳齿宽度	10
梳齿厚度	60
固定梳齿与活动梳齿重合长度	150
固定梳齿与活动梳齿大间距	9
固定梳齿与活动梳齿小间距	2

通过对斜置梁的尺寸、角度以及质量块大小尺寸的分析, 综合考虑后得到了 Z 轴检测方向的具体参数值如表 3 所示, 由此确定结构的整体尺寸为 $7.2\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 。

表 3 Z 轴向检测结构质量块及弹性梁尺寸参数 / μm

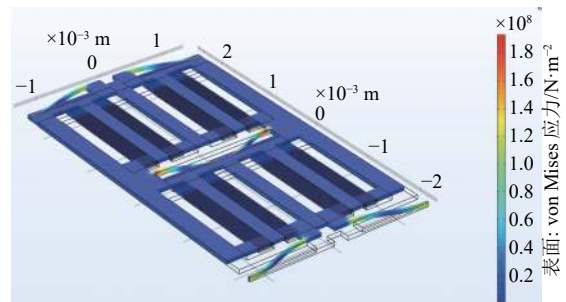
Z 轴敏感质量块及平行斜置梁结构	尺寸
平行斜置梁梁长	1 700
平行斜置梁梁宽	10
平行斜置梁梁厚	60
外框架长度	4 000
外框架宽度	4 000
外框架厚度	60
质量块长宽	1 500
极板间距	20
质量块厚度	60

3 三质量块三轴加速度计结构的静力学仿真分析

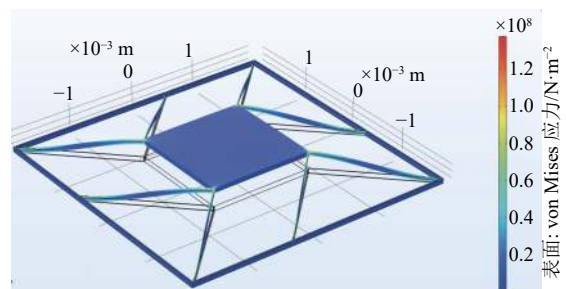
3.1 三质量块三轴加速度计的极限过载仿真分析

本文设计的电容加速度计需要适应工业平台稳定及飞行器等需求, 所以需要具有较大的抗过载能力。要求结构能承受 $2\ 000\text{ g}$ 的过载冲击加速度, 同时硅材料的极限应力值为 1.7 GPa 。对结构进行极限过载仿真分析以确保其具有较强的抗过载能力。

加速度计的应力分析如图 4 所示, X,Y 方向最大应力为 193 MPa , Z 方向最大应力为 138 MPa , 均远小于硅材料的极限应力值 1.7 GPa , 水平轴方向最大应力发生在结构中间的一字梁的根部位置, 垂直轴方向发生在斜置梁根部。因此, 设计的该电容式加速度计符合设计要求。



a. 水平轴向结构应力



b. 垂直轴向结构应力

图 4 $2\ 000\text{ g}$ 载荷下的应力图

3.2 三质量块三轴加速度计的位移分析

对于梳齿间距的设置, 在加速度计满量程的情况下, 梳齿的位移在固定梳齿与活动梳齿最小间距的 $1/20 \sim 1/4$ 时能够使加速度计的性能最佳。因为本文设计的加速度计的量程为 $-16 \sim +16\text{ g}$, 故在对加速度计输入 1 g 的加速度时, 结构的位移需要在固定梳齿与活动梳齿最小间距的 $1/320 \sim 1/64$ 。由于本文设计的加速度计的固定梳齿与活动梳齿的最小间距为 $2\ \mu\text{m}$, 因此 X,Y 轴方向的位移取值范围

为 3.125~15.625 nm, 固定梳齿与活动梳齿的大间距为 9 μm 。

对于水平轴检测结构的质量为 976 μg , 垂直轴检测结构的质量为 5 516 μg , 通过弹性系数式 (1) 求解出对应轴向的弹性系数, 并计算出结构的初始电容值, 为了提升接口电路的灵敏度, 需保证结构的初始电容值大于 0.1 pF。具体计算如下:

$$y = \frac{ma}{k} = \frac{a}{\omega^2} \quad (1)$$

式中, a 表示加速度; y 表示敏感质量块的位移量; m 表示敏感质量块的质量; k 表示系统的弹性系数; ω 表示系统的无阻尼谐振角频率。

对水平轴检测结构的灵敏方向输入 1 g 的加速度, 其结构的位移如图 5 所示, 梳齿的位移为 4.36 nm, 即机械灵敏度为 4.36 nm/g, 水平轴向的弹性系数分别为 2 238 N/m, 初始电容为 5.17 pF, 灵敏度为 45.21 fF/g。

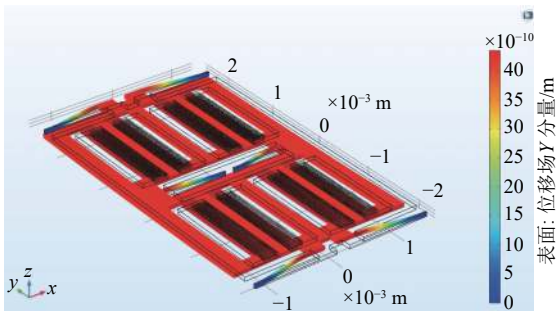


图 5 Y 轴检测方向结构位移图

对垂直轴检测结构的灵敏方向输入 1 g 的加速度, 其结构的位移如图 6 所示, 质量块的位移为 4.23 nm, 即机械灵敏度为 4.23 nm/g, 弹性梁的弹性系数为 1 303 N/m, 初始电容为 9.95 pF, 灵敏度为 41.63 fF/g。

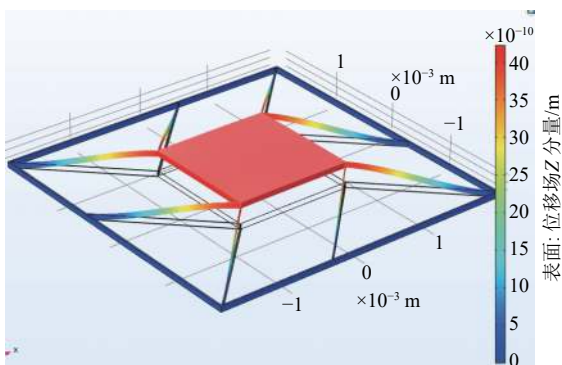


图 6 Z 轴检测方向结构位移图

4 三质量块三轴加速度计结构的动力学仿真分析

4.1 模态分析

对三质量块三轴加速度计结构的水平轴方向检测结构进行模态分析, 得到结构的前 6 阶的固有频率如表 4 所示。由表 4 可知, 二阶固有频率为一阶固有频率的 1.5 倍, 因此能够保证结构的稳定性。

表 4 水平轴结构前 6 阶模态分析结果

模态阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	7 654	11 281	12 796	16 520	27 744	30 047

对三质量块三轴加速度计结构的垂直轴方向检测结构进行模态分析, 得到结构的前 6 阶的固有频率如表 5 所示。由表 5 可知, 二阶频率大于一阶频率的 2 倍, 故极好地实现了模态分离, 保证了结构的稳定性。同时, 可以看出垂直轴检测结构的各阶模态对应的固有频率。

表 5 垂直轴结构前 6 阶模态分析结果

模态阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	7 786	21 194	21 247	31 507	31 512	31 614

4.2 谐响应分析

为了保证加速度计有较好的性能, 需要使得各个轴向的检测结构只在该敏感方向响应大, 避免除敏感方向以外的响应对结构造成影响^[15]。

对 Y 轴检测方向结构输入 1 g 的正弦信号规律的载荷, 得到在主阶频率周围的位移响应, 结果如图 7 所示。由图可知, 对于水平轴向检测结构的固有频率为 7 654 Hz, 与模态分析得出的结果一致。对 Y 轴检测方向输入 1 g 的加速度, 可以计算出 Y 轴检测结构对应的 X 轴和 Z 轴的交叉灵敏度分别为 0.000 8% 和 0.045 3%, 交叉灵敏度均小于 0.05%, 具有良好的结构特性。

对 Z 轴检测方向结构输入 1 g 正弦信号规律的载荷, 得到在主阶频率周围的位移响应, 结果如图 8 所示。由图可知, 垂直轴向检测结构的固有频率为 7 786 Hz, 与模态分析得出的结果一致。对 Z 轴检测方向输入 1 g 的加速度时, 可以计算出 Z 轴检测结构对应的 Y 轴和 X 轴的交叉灵敏度分别为 0.201 0% 和 0.240 6%。交叉灵敏度均小于 0.3%, 具有良好的结构特性。

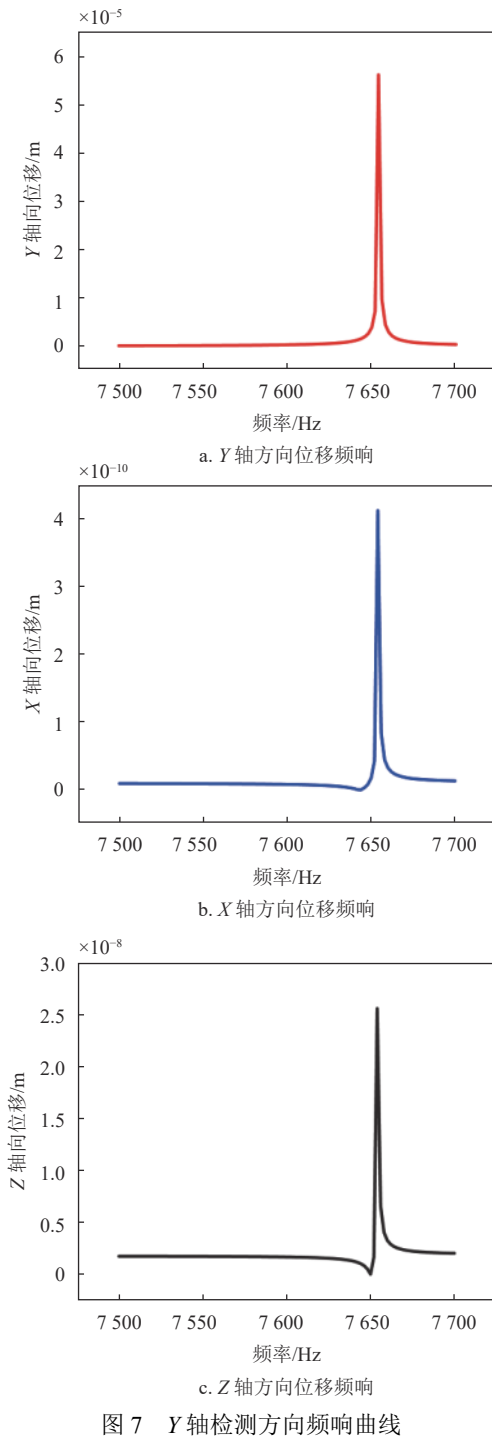


图7 Y轴检测方向频响曲线

将设计的 $\pm 16\text{ g}$ 三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计与现有的国内外报道的相关三质量块三轴电容式加速度计的性能进行对比, 其 X轴、Y轴及 Z轴的非线性度对比如表 6 所示, 轴间串扰数据对比如表 7 所示。可以看出本文设计的加速度计在非线性和轴间串扰这两个性能参数上有很大幅度的降低, X轴, Y轴和 Z轴的灵敏度分别为 45.21 fF/g , 45.21 fF/g 和 41.63 fF/g , 水平轴和垂直轴检测方向的灵敏度相近, 能实现三轴向加速度的稳定

检测, 且量程为 $\pm 16\text{ g}$, 能够满足大多数领域的需求。

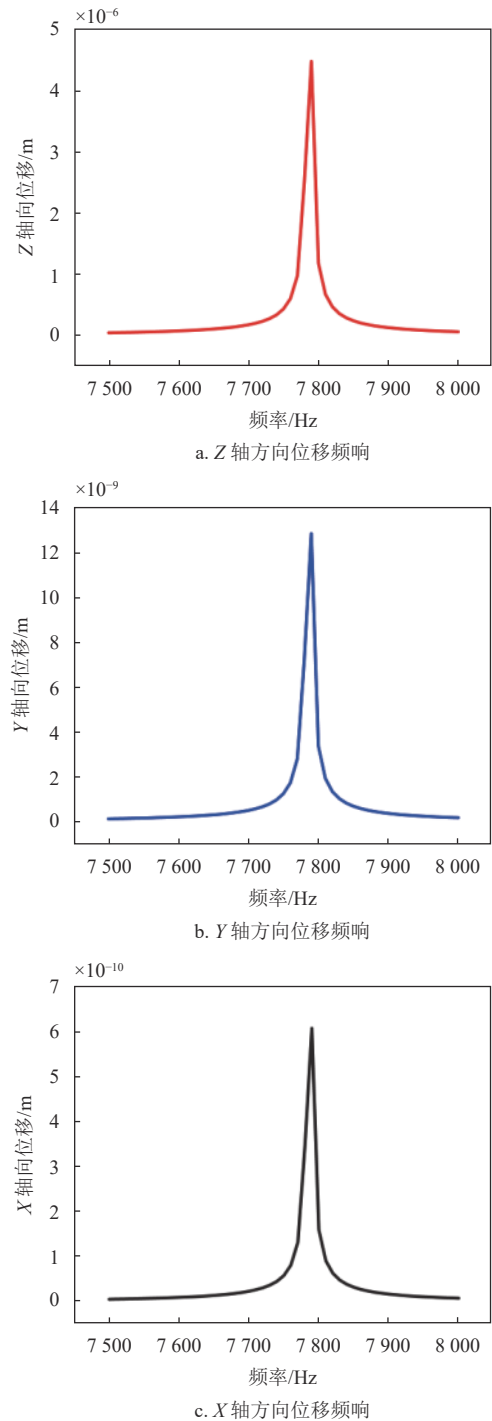


图8 Z轴检测方向频响曲线

表6 X轴、Y轴及Z轴的非线性度对比

各种加速度计	X轴非线性 性度/%	Y轴非线性 性度/%	Z轴非线性 性度/%
three axes capacitive MEMS accelerometer ^[16]	1.120 0	0.960 0	1.600 0
三轴硅微加速度计 ^[17]	0.260 0	0.280 0	1.300 0
本文	0.213 4	0.213 4	0.000 1

表 7 轴间串扰数据对比

各种加速度计	轴间串扰	轴间串扰	轴间串扰	轴间串扰
	/%(y/x)	/%(z/x)	/%(x/y)	/%(z/y)
three axes capacitive MEMS accelerometer ^[16]	1.400 0	3.200 0	2.300 0	5.000 0
三轴硅微加速度计 ^[17]	0.920 0	0.630 0	0.890 0	0.620 0
本文	0.240 6	0.201 0	0.000 8	0.045 3

5 结束语

本文设计了量程 ± 16 g 的三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计, 通过加速度计结构的静力学分析, 得到结构输入的加速度与位移的关系, 对结构的应变和抗过载能力分析, 由此确定设计的加速度计的机械灵敏度和交叉灵敏度。对加速度计结构的动力学分析、谐响应分析和模态分析, 得到结构的固有频率以及频响曲线。最终确定加速度计的结构尺寸为 $7.2 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 与国内外相关的三质量块三轴电容式加速度计的性能进行对比, 本文设计的 ± 16 g 三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计结构在性能上有了极大的改善, 显著降低了非线性度及轴间串扰。

致谢: 本文工作得到雅砻江官地水力发电厂基于 MEMS 智能传感器的水工边坡风险实时监测试验研究科研项目的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 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.
XU G B, HUA X, DU L Y, et al. Design of new piezoresistive accelerometer with high g value[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(10): 42-46.
- [2] KAND K, IGA Y, MATSUOKA J, et al. A tri-axial accelerometer with structure-based voltage operation by using series-connected piezoelectric elements[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 5: 894-897.
- [3] AVIONNE C, RASHID T, CHOWDHUEY V, et al. Second-Order compensated bandgap reference with convex correction[J]. *Electronic Letters*, 2005, 41(5): 276-277.
- [4] PINTO D, MERCIER D, KHARRAT C, et al. A small and high sensitivity resonant accelerometer[J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1(1): 536-539.
- [5] TSAI M H, LIU Y C, SUN C M, et al. A CMOS-MEMS accelerometer with tri-axis sensing electrodes arrays[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 5: 1083-1086.
- [6] 邹旭东, 熊兴崑, 汪政, 等. 一种高灵敏度低噪声硅微谐振

- 式加速度计[J]. *中国惯性技术学报*, 2021, 29(3): 281-287.
ZOU X D, XIONG X Y, WANG Z, et al. A micromachined silicon resonant accelerometers with high sensitivity and low noisy[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(3): 281-287.
- [7] SHAEFFER D K. MEMS inertial sensors: A tutorial overview[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, DOI: 10.1109/MCOM.2013.6495768.
 - [8] 马国民. 一种 MEMS 压电加速度计的三维有限元模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
MA G M. Three-dimensional finite element simulation of a MEMS piezoelectric accelerometer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
 - [9] 卞玉氏, 胡英杰, 李博, 等. MEMS 惯性传感器现状与发展趋势[J]. *计测技术*, 2019, 39(4): 50-56.
BIAN Y M, HU Y J, LI B, et al. Research status and development trend of MEMS inertial sensor[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2019, 39(4): 50-56.
 - [10] KESHAVARZI M, HASANI J Y. Design and optimization of fully differential capacitive MEMS accelerometer based on surface micromachining[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(4): 1369-1377.
 - [11] CHIU Y, HUANG T C, HONG H C. A three-axis single-proof-mass CMOS-MEMS piezoresistive accelerometer with frequency output[J]. *Sensors and Materials*, 2014, 26(2): 95-108.
 - [12] HE J, ZHOU W, YU H, et al. Structural designing of a mems capacitive accelerometer for low temperature coefficient and high linearity[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 640-643.
 - [13] HUANG W, KWON S R, ZHANG S, et al. A trapezoidal flexoelectric accelerometer[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2014, 25(3): 271-277.
 - [14] 王兴华. 单片三轴微加速度计关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
WANG X H. Research on key technologies of monolithic three-axis micro-accelerometer[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2011.
 - [15] NONOMURA Y, OMURA Y, FUNABASHI H, et al. Chip-Level warp control of SOI 3-axis accelerometer with the zig-zag-shaped Z-electrode[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 47: 546-549.
 - [16] AYDEMIR A, TERZIOGLU Y, AKIN T. A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2016, 4(7): 324-333.
 - [17] 赵忆, 王家畴, 陈方, 等. 基于 (111) 硅单片集成三轴加速度计的工艺研究[J]. *微纳电子技术*, 2015, 52(6): 390-395.
ZHAO Y, WANG J H, CHEN F, et al. Study on monolithic technique of 3-axis accelerometers based on (111) silicon wafer[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(6): 390-395.

编辑 叶 芳