

电容式高过载加速度敏感结构研究

张 鹏¹ 赵宏建² 王健行¹ 揣荣岩¹

ZHANG Peng ZHAO Hongjian WANG Jianxing CHUAI Rongyan

摘 要

为满足小量程电容式加速度传感器在汽车电子中高过载的要求, 文章设计了量程为 $\pm 2\text{ g}$ 三轴电容式加速度敏感芯片, 该芯片可将水平敏感轴(X 、 Y)和垂直敏感轴(Z)的结构集成在 SOI 晶片上。通过仿真分析对敏感结构进行了优化, 得到芯片的结构及尺寸, 设计的三轴加速度敏感芯片水平轴向电容灵敏度为 0.5 pF/g , 垂直轴向电容灵敏度为 1.44 pF/g , 交叉灵敏度均小于 0.5% , $2\,000\text{ g}$ 加速度加载时结构最大应力远小于硅材料极限应力, 可实现高过载。

关键词

小量程; 汽车电子; 电容式加速度敏感芯片; 三质量块; 三轴; 高过载

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.023

0 引言

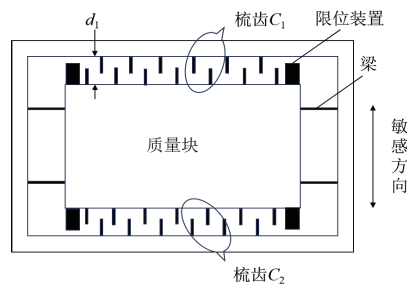
随着 MEMS 技术、集成电路技术和半导体加工技术的发展, MEMS 加速度传感器凭借体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等优势, 逐渐取代了传统的机械结构, 占据了加速度传感器市场^[1]。其中随着无人驾驶技术的成熟以及新能源汽车的快速发展, MEMS 加速度传感器在汽车电子市场中有更多的应用, 典型的应用有汽车安全气囊、无人驾驶技术、ABS 防抱死刹车系统、电子稳定系统等^[2-4]。

目前三轴加速度传感器中单质量块加速度传感器结构研究最为广泛, 但是该类型的传感器加工工艺比较复杂, 交叉耦合较大且灵敏度有限^[5]。双质量块三轴加速度传感器同样加工工艺复杂、交叉耦合大结构稳定性差、应用范围有限并容易出现加工时的误差, 因此相关研究较少^[6]。三质量块三轴加速度传感器虽然相对单质量块结构面积较大, 但加工简单且交叉耦合较小^[7]。因此本设计选用三质量块三轴加速度传感器结构, 设计 3 个单方向轴结构并集成在同一块 SOI 晶片上。

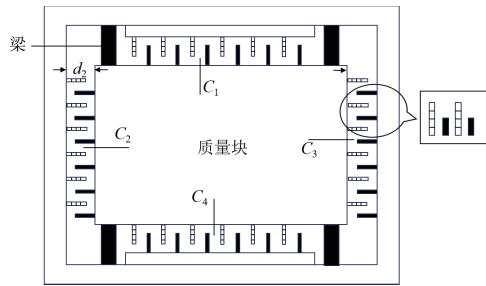
1 敏感结构与原理

设计的结构由 3 个质量块组成, 分别检测 X 、 Y 、 Z 轴 3 个方向的加速度, X 、 Y 轴结构相同如图 1 (a) 所示, Z 轴如图 1 (b) 所示。水平轴结构选用变面积式检测结构, 主体结构由质量块、支撑梁以及梳齿组成, 质量块通过对称的四根支撑梁固定在外部框架上, 质量块上的可动梳齿和固定在外部框架上的梳齿形成检测电容。当检测方向有加速度时, 质

量块产生位移, 质量块两侧梳齿检测电容 C_1 和 C_2 的梳齿正对面积发生改变, 一侧电容变大, 另一侧变小, 形成差分电容, 最终通过电容 C_1 与 C_2 的差值变化量实现对加速度的测量。在加速度作用下, 梳齿发生位移产生的阻尼为滑膜阻尼, 相对压膜阻尼空气阻尼更小。



(a) 水平轴结构示意图



(b) 垂直轴结构示意图

图 1 敏感结构示意图

为提高过载能力, 在质量块两侧设计了 4 个长度大于梳齿的限位装置, 通过调节限位装置的尺寸, 可使限位装置在加速度过大时对梳齿结构进行限位保护, 提高过载能力。

垂直轴结构同样采用变面积式检测结构, 主体结构为质量块、支撑梁以及梳齿。质量块由 4 根对称的支撑梁固定在外部框架上, 固定在质量块四周的可动梳齿与外部框架上的

1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 辽宁沈阳 110870

2. 中国人民解放军 93156 部队 辽宁沈阳 110000

固定梳齿形成不等高梳齿结构。左侧和上侧梳齿为电容 C_1 ，右侧和下侧梳齿为电容 C_2 。当敏感方向检测到加速度时，质量块产生位移，电容 C_1 变小(或变大)，电容 C_2 变大(或变小)，最终通过电容 C_1 与 C_2 的差值变化量实现对加速度的测量，可实现对加速度的大小和方向的检测。垂直轴剖面图如图 2 所示，由上下盖板以及敏感结构组成。当加速度过大质量块位移较大时，上下盖板起到限位作用，通过调整上下盖板与质量块的间距能够限制质量块的位移，提高过载能力。

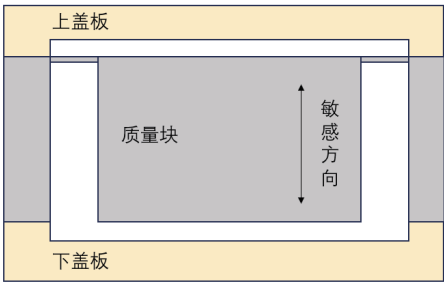


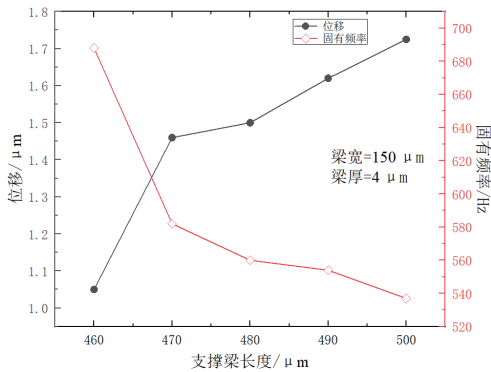
图 2 垂直轴剖面图

2 支撑梁选择及参数确定

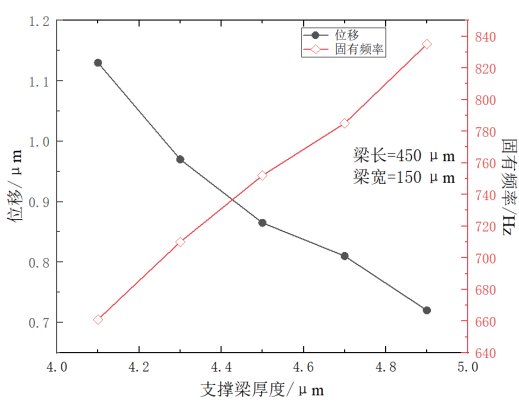
2.1 水平轴结构支撑梁参数的确定

在 MEMS 加速度传感器设计中，支撑梁的选择及尺寸是结构的关键，支撑梁尺寸直接影响加速度传感器的灵敏度、固有频率、交叉灵敏度等，因此需重点分析质量块及梳齿位移与支撑梁尺寸的关系^[8]。

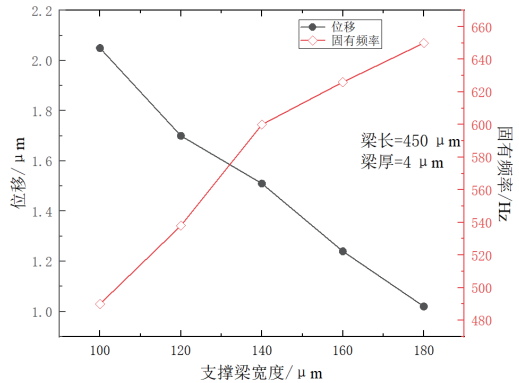
根据初步仿真，将质量块尺寸设定为长 3 000 μm 、宽 1 500 μm 、厚 500 μm 。梳齿长 300 μm 、宽 150 μm 、厚 4.5 μm 。水平轴支撑梁尺寸与梳齿位移及固有频率的关系如图 3 所示。由图 3 分析可知，位移与固有频率的变化总是相互制约的。当支撑梁长度增大时，质量块与梳齿位移随之增加，同时固有频率随着支撑梁长度的增大而减小。当支撑梁厚度增大时，质量块与梳齿位移随之减小，同时固有频率随支撑梁厚度的增大而增大。当支撑梁的宽度增大时，质量块与梳齿位移随之减小，而固有频率随之增加。即支撑梁尺寸对灵敏度和固有频率的影响是相反的。



(a) 梁长的影响



(b) 梁厚的影响



(c) 梁宽的影响

图 3 支撑梁尺寸对位移及固有频率的影响

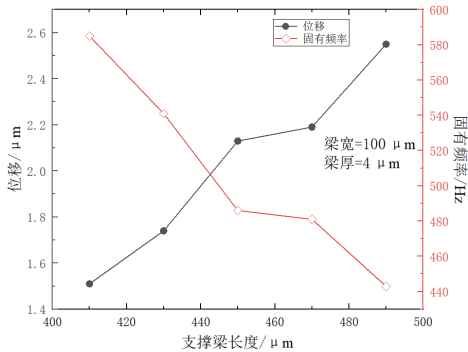
根据仿真分析，综合考虑加速度传感器各项性能，确定结构具体参数。水平轴向结构参数如表 1 所示。

表 1 水平轴向结构参数

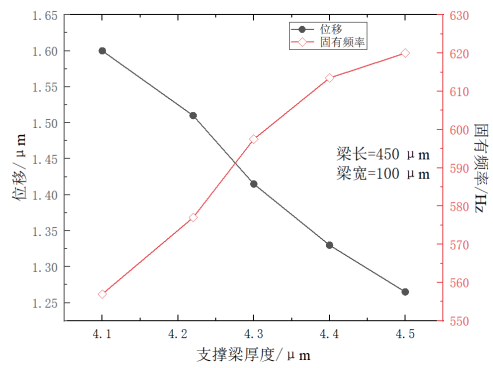
	长度	宽度	厚度
质量块	3 000	1 500	500
梁	400	150	4.5
梳齿	300	150	4.5

2.2 垂直轴结构支撑梁参数的确定

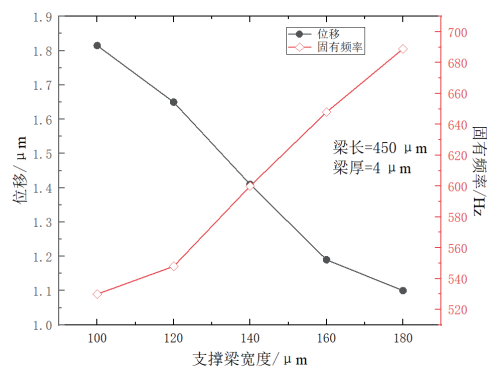
与水平轴结构的分析相同，垂直轴结构同样重点分析支撑梁尺寸与梳齿位移及固有频率的关系。图 4 为垂直轴结构支撑梁尺寸对位移与固有频率的影响。



(a) 梁长的影响



(b) 梁厚的影响



(c) 梁宽的影响

图4 支撑梁尺寸对位移及固有频率的影响

根据初步仿真，将质量块尺寸设定为长 $3\ 000\ \mu\text{m}$ 、宽 $1\ 500\ \mu\text{m}$ 、厚 $500\ \mu\text{m}$ ；高梳齿长 $350\ \mu\text{m}$ 、宽 $150\ \mu\text{m}$ 、厚 $4.5\ \mu\text{m}$ ，矮梳齿长 $300\ \mu\text{m}$ 、宽 $150\ \mu\text{m}$ 、厚 $4.5\ \mu\text{m}$ 。由图4分析可知，随着支撑梁宽度和厚度的增加，质量块及梳齿位移减小，固有频率增大；随着支撑梁长度的增加，质量块及梳齿位移增大，固有频率减小。

根据前面分析支撑梁对灵敏度和固有频率的影响，确定的垂直轴向结构参数如表2所示。

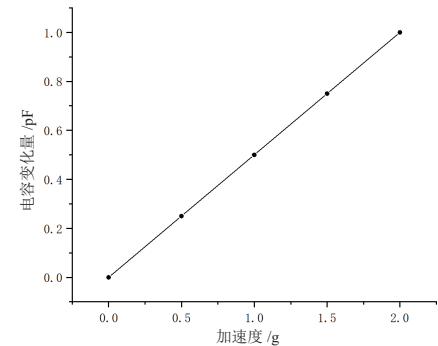
表2 水平轴向结构参数

	单位: μm		
	长度	宽度	厚度
质量块	3 000	1 500	500
梁	400	150	4
高梳齿	300	150	4.5
矮梳齿	300	100	4.5

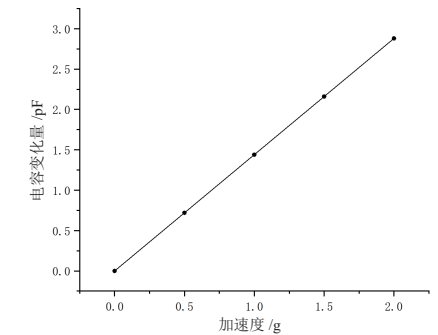
3 结构性能仿真分析

3.1 输出特性

通过对上述确定尺寸后的敏感芯片进行仿真分析，得到水平轴向结构和垂直轴向结构的输出特性曲线如图5所示。性能参数如表3~4所示。



(a) 水平轴输出特性



(b) 垂直轴输出特性

图5 结构输出特性

表3 水平轴结构性能参数

	量程/ g	电容灵敏度/ $(\text{pF}\cdot\text{g}^{-1})$	交叉耦合系数/%
X	± 2	0.5	0.21
Z			0.36

表4 垂直轴结构性能参数

	量程/ g	电容灵敏度/ $(\text{pF}\cdot\text{g}^{-1})$	交叉耦合系数/%
X	± 2	1.44	0.33
Y			0.49

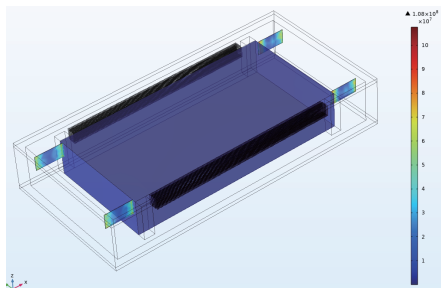
由表3~4可知，优化后的结构在水平轴向和垂直轴向有较高的灵敏度，且交叉耦合均小于 0.5% ，有较好的性能，且结构大小符合传感器在汽车电子中设计要求。

3.2 过载分析

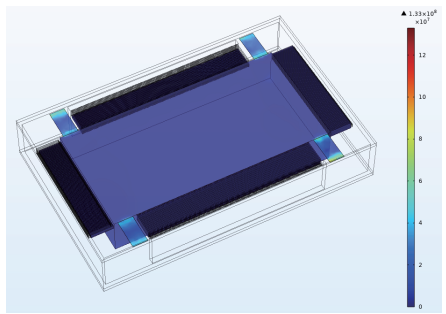
针对汽车电子领域对加速度传感器的应用需求，要求小量程传感器在突发情况下有较大的抗过载能力，因此敏感结构需要可以承受 $2\ 000\ g$ 加速度的过载。由于硅材料极限应力为 $1.7\ \text{GPa}$ ，因此，应确保敏感结构在 $2\ 000\ g$ 加速度的加载时产生应力的最大值小于 $1.7\ \text{GPa}$ 。

水平轴向结构梳齿长度为 $300\ \mu\text{m}$ ，将限位装置长度设置为 $315\ \mu\text{m}$ ，宽度设置为 $150\ \mu\text{m}$ ，当梳齿位移超过 $15\ \mu\text{m}$ 时限位装置接触外部框架，对梳齿进行限位保护。垂直轴向质量块与上下盖板的限位间距设置为 $15\ \mu\text{m}$ ，当加速度过大，质量块位移超出 $15\ \mu\text{m}$ 时，上下盖板进行限位保护，提高过

载能力。敏感结构加载 2 000 g 时应力分布的仿真结果如图 6 所示, 水平轴方向结构最大应力产生在支撑梁的根部位置, 最大应力为 108 MPa, 远小于硅材料断裂的极限应力 1.7 GPa。垂直轴方向结构最大应力同样产生在支撑梁根部, 最大应力为 133 MPa, 远小于 1.7 GPa。因此, 本设计的加速度敏感芯片符合抗过载要求。



(a) 水平轴向结构应力分布图



(b) 垂直轴向结构应力分布图

图 6 加速度 2 000 g 下的应力图

3.3 模态分析

对水平轴向敏感结构进行模态分析, 得到的前六阶固有频率如表 5 所示。由表 5 可知, 第一阶频率为敏感芯片的主模态, 其余为杂项模态, 杂项模态频率远大于主模态频率的 1.5 倍, 能避免杂项模态对主模态产生影响^[9]。

表 5 水平轴前六阶模态分析

模态阶数	1	2	3	4	5	6
频率 /Hz	887.87	21 262	30 968	40 771	44 619	61 738

对垂直轴向结构进行模态分析, 得到的前六阶固有频率如表 6 所示。第一阶频率为垂直轴方向的主模态, 其余为杂项模态, 杂项模态频率大于主模态的 1.5 倍, 能避免对主模态的干扰。

表 6 垂直轴前六阶模态分析

模态阶数	1	2	3	4	5	6
频率 /Hz	717.55	1 075.4	1 291.2	21 566	63 265	63 423

4 结语

本文设计了一款量程为 ± 2 g 的三质量块三轴加速度敏感芯片。3 个单轴加速度敏感芯片采用 SOI 加工工艺, 并集成

在一块晶片上。通过仿真分析及优化得到了加速度敏感结构及尺寸。在结构中加入限位装置进行过载保护, 提高过载能力。结构在 2 000 g 过载加速度下最大应力远小于硅材料极限应力, 具有较好的抗过载能力。结构在具有高灵敏度的同时降低了其他轴向的交叉耦合, 3 个轴向的交叉灵敏度均小于 0.5%。结构固有频率符合加速度传感器在汽车电子中的应用要求, 杂项模态均大于主模态的 1.5 倍, 保证了结构的稳定性。具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 虎勇, 李绍荣, 郭威, 等. ± 16 g 三质量块三轴 MEMS 电容式加速度计的设计[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(3): 444-450.
- [2] 蒋婷. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [3] 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.
- [4] ZHAO Y, WANG J C, 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 许高斌, 韩成成, 陈兴. Z 轴完全差分电容式加速度传感器设计分析[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(12): 796-801.
- [8] 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, 244: 324-333.
- [9] HUANG W B, KWON S-R, ZHANG S J, et al. A trapezoidal flexoelectric accelerometer[J]. Journal of intelligent material systems & structures, 2013, 25(3): 271-277.

【作者简介】

张鹏(1999—), 男, 山西平遥人, 硕士研究生, 研究方向: 微机电系统及制备工艺。

赵宏建(1987—), 男, 辽宁辽阳人, 硕士, 研究方向: IC 设计。

王健行(1997—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 研究方向: 微机电系统及制备工艺。

揣荣岩(1963—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 研究方向: 微机电系统及制备工艺。

(收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-10-15)