

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2104128

三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计

李开富¹ 蒋 婷² 郭小伟² 李绍荣² 章龙管¹ 张 兴¹ 牟 松¹
(1. 中铁工程服务有限公司 成都 610000; 2. 电子科技大学 成都 610000)

摘 要:为解决电容式加速度计灵敏度低,交叉灵敏度高等问题,设计了一种新的三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计,该三质量块加速度计能够测量 X 、 Y 、 Z 三个正交轴的外加加速度,单独的横向(X 、 Y 轴)和垂直轴(Z 轴)加速度计集成在同一 SOI 晶片上,并键合在玻璃基板上,实现了低交叉灵敏度和高机械灵敏度。分析并建立加速度计结构的数学模型,并通过 COMSOL 仿真分析,优化获得了加速度计的结构和尺寸,设计出的该三质量块加速度计的垂直轴方向的位移灵敏度为 $1.536\ 69\ \mu\text{m/g}$,水平轴方向的位移灵敏度为 $6.78\ \mu\text{m/g}$,交叉灵敏度均小于 1%。
关键词:三质量块;三轴电容式加速度计;高机械灵敏度;低交叉灵敏度;SOI
中图分类号: TN03;TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.30

Design of three mass block mems triaxial cap-active accelerometer

Li Kaifu¹ Jiang Ting² Guo Xiaowei² Li Shaorong² Zhang Longguan¹ Zhang Xing¹ Mu Song¹
(1. Company Profile of China Railway Engineering Services Co., Ltd., Chengdu 610000, China;
2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610000, China)

Abstract:To solve the capacitive accelerometer sensitivity low, cross sensitivity higher performance problems, we design a new quality of three pieces of three axis MEMS capacitive accelerometer, the quality of three piece of accelerometer to measure the X , Y , Z three orthogonal axes and acceleration, separate horizontal (X , Y axis) and vertical axis (Z axis) accelerometer integrated on the same SOI wafer, Low cross sensitivity and high displacement sensitivity are achieved by parallel bonding on the glass substrate. The mathematical model of the accelerometer structure was analyzed and established, and the structure and size of the accelerometer were optimized through COMSOL simulation analysis. The displacement sensitivity of the three mass blocks accelerometer in the vertical axis direction was $1.536\ 69\ \mu\text{m/g}$, and the displacement sensitivity in the horizontal axis was $6.78\ \mu\text{m/g}$, and the cross sensitivity was all less than 1%.
Keywords:three mass block; triaxial capacitive accelerometer; high displacement sensitivity; low cross sensitivity; SOI

0 引 言

微机电系统(MEMS)加速度计是 MEMS 领域最早开始研究的传感器之一。经过多年的发展, MEMS 加速度计的设计和加工技术已经日趋成熟。目前, MEMS 加速度计应用相当广泛,具有微型化、集成化、智能化、成本低、高性能、易于大批量生产的优点^[1],应用范围涵盖智能手机、个人计算机、游戏机,汽车产业以及军事国防等^[2]。按敏感机理不同, MEMS 加速度计可以分为电容式、压阻式、压电式等;相对于其他方式,电容式三轴加速

度计的优点是结构简单、灵敏度较高、功耗小、温度漂移小,因而设计中广泛采用。

目前,三轴电容式 MEMS 加速度计的集成方式主要分为单质量块、双质量块和三质量块 3 种。单质量块,即在同一敏感质量上刻蚀检测 3 个轴向加速度的结构;双质量块,即在两个敏感质量块分别刻蚀一个双轴加速度计和一个单轴加速度计;三质量块,即 3 个单轴加速度计正交排布在 3 个敏感质量块来实现三个轴向加速度的检测。

2012 年,李晓莹等^[3]设计的双质量块三轴加速度计通过内电极和内质量块构成 Z 轴的参考电容,降低了

检测电路的复杂性,但面临着量程小,结构尺寸大,应用范围有局限的问题。2012~2015 年,Nonomura 等^[4]和陈立国等^[5-6]设计的单质量块三轴加速度计,解决了 Z 轴灵敏度不均的问题,实现了 Z 轴加速度的差分测量,但其机械灵敏度为 6~8 nm/g,并且结构的制作工艺复杂。2016 年,Aydemir 等^[7]设计出三质量块的三轴电容式 MEMS 加速计,其量程为 $\pm 4g$,结构尺寸较小,但面临着结构稳定性差,且交叉灵敏度较大的问题。2021 年,Keshavarzi 等^[8]基于表面的单轴电容式全差分 MEMS 加速度计提出了双质量检验的微加工方法,结构尺寸很小,易于集成化,但其机械灵敏度仅能达到 29.8 nm/g。

针对目前出现的三轴加速度计主要面临交叉灵敏度高,灵敏度低等问题^[9-15],本文设计一种新型的三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计,横向轴采用梳齿式检测结构,通过对弹性梁和梳齿进行仿真分析,优化结构性能,设计出了低交叉灵敏度,高灵敏度的三质量块加速度计,并进行 SOI 体硅微加工技术进行加工,精度较高,技术成熟、且环境适应性强,有利于大批量生产,在一定程度上降低了设计成本。

1 加速度计理论分析

1.1 力学模型

加速度计的工作原理一般都基于机械振动,其力学模型是一个质量块—弹簧—阻尼系统^[16-17],如图 1 所示。由图 1 可以看出,加速度计主要元件是一个由弹簧支撑的质量块,质量块通常与阻尼器连接在一起,阻尼器提供必要的阻尼效应,弹簧和阻尼器都连接在外壳的框架上。当框架加速或减速运动时,质量块就会产生相对于框架的位移,使得弹簧发生变形。和其他传感器一样,加速度计的工作机理是通过将难以直接测量的加速度转化成其它容易测量的量而间接得到的,现有的加速度计^[18]要么是直接检测质量块相对于框架发生的位移,要么是间接的检测弹簧的变形量,最后通过一系列的换算得到被测物体的加速度。

微加速度计的尺寸比普通的加速度计要小很多,其可用的空间非常有限,因此微加速度计的元件配置也会有较大的变化,如通常将器件周围的空气作为阻尼器来产生阻尼效应。微加速度计的力学模型也是一个质量块—弹簧—阻尼系统,微加速度计中的弹簧是折叠梁,阻尼器即为气体阻尼。

该力学模型的二阶力学微分方程为^[19]:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + D \frac{dx(t)}{dt} + k_m x(t) = ma \quad (1)$$

在零初始条件下进行拉氏变换,得到:

$$(ms^2 + Ds + k_m)X(s) = mA(s) \quad (2)$$

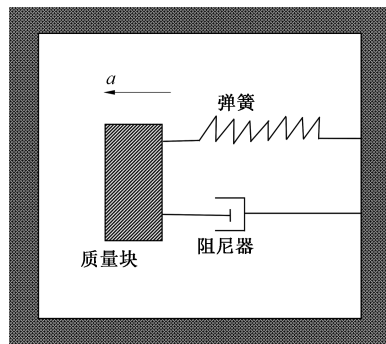


图 1 加速度计的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of accelerometer

变形得到:

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

其中, $\omega_n = \sqrt{\frac{k_m}{m}}$ 为无阻尼谐振频率, $\zeta = \frac{D}{2\sqrt{k_m m}}$ 为

阻尼比, $Q = \frac{\sqrt{k_m m}}{D} = \frac{m\omega_n}{D}$ 为品质因数。

当外界加速度趋于稳定时,其敏感质量块相对于微加速度计框架的位移也趋于稳定,稳定位移值为:

$$\Delta d = \frac{ma}{k_m} = \frac{a}{\omega_n^2} \quad (4)$$

因此,可以将加速度转换为位移进行测量,而电容式加速度计则是将位移的改变转换为电容的改变,从而采用差分电容检测检测出个方向的加速度值。梳齿电容分别为:

$$C_{x1} = N \left(\frac{\varepsilon A}{d_0 - \Delta d} + \frac{\varepsilon A}{d_1 + \Delta d} \right) \quad (5)$$

$$C_{x2} = N \left(\frac{\varepsilon A}{d_0 + \Delta d} + \frac{\varepsilon A}{d_1 - \Delta d} \right) \quad (6)$$

因此检测电容变化量为:

$$\Delta C_x = C_{x1} - C_{x2} = 2 N \varepsilon A \Delta d \left(\frac{1}{d_0^2} - \frac{1}{d_1^2} \right) \quad (7)$$

式中: A 为梳齿电容两极板的正对面积; N 为梳齿对数; d_0 为活动梳齿与固定梳齿较窄一侧的距离; d_1 为活动梳齿与固定梳齿较宽一侧的距离。

1.2 工作原理

本文设计的三质量块单片集成三轴加速度计如图 2 所示,分为水平(X 、 Y 轴)和垂直(Z 轴)两个方向。单独的水平和垂直轴加速度计集成在同一 SOI 晶片上,并键合在玻璃基板上。水平方向如图 3、4 所示,垂直方向如图 5 所示。

水平加速度计结构如图 3 所示,水平加速度计由敏感质量块、折叠式弹簧和固定梳齿组成,敏感质量块上的

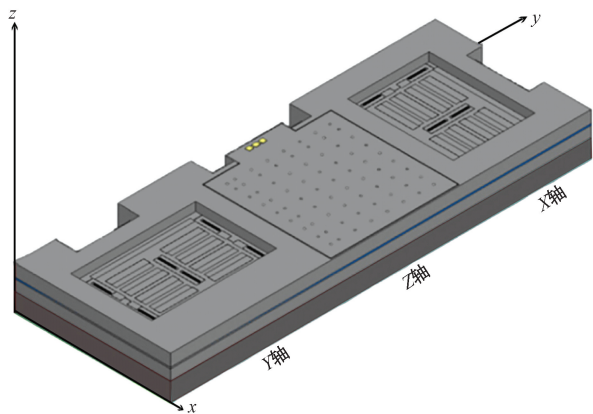


图 2 三质量块加速度计结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three mass block accelerometer structure

若干对活动梳齿都与旁边的固定梳齿相对应,悬臂梁的两端被锚固定住,而敏感质量块和活动梳齿都是悬空的。敏感质量块上的每个活动梳齿与相邻的两固定梳齿的距离不相等如图 4 所示。

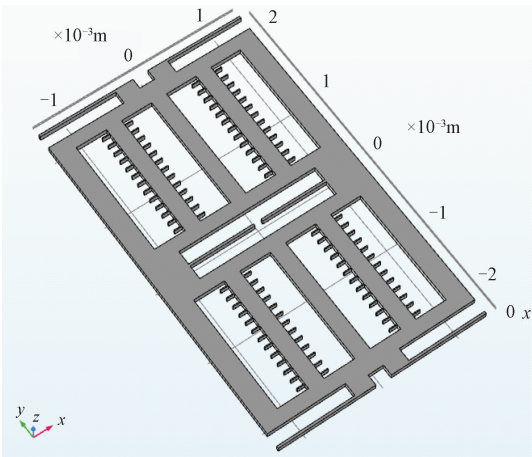


图 3 水平轴方向结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of horizontal axis structure

检测梳齿与相邻的活动梳齿形成一对差分检测电容,加力梳齿与相邻的活动梳齿形成一对差分加力电容。当没有外界加速度时一对差分检测电容相等,检测电路输出为零;当有外界加速度时,敏感质量块受到惯性力而将发生位移,两极板间距发生变化,其中一个电容变小而另一个电容变大,通过电路检测差分电容值大小的变化,并转化成输出电压变化,最后通过换算可以得到外界的加速度。

垂直轴方向结构如图 5 所示,由 4 个斜置梁和一个方形质量块组成,质量块与衬底形成电容,垂直轴加速度计的质量块定义在 SOI 的两个固定电极之间,形成变极距加速度计结构,当动极板移动后,两个电容值成差动变化,即其中一个电容值增大,一个电容值减小,可以消除

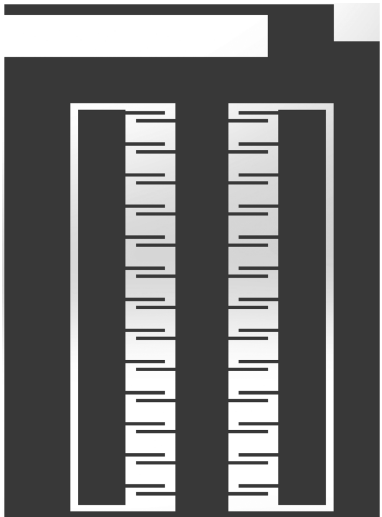


图 4 水平轴方向梳齿细节图

Fig. 4 Detailed details of horizontal axis

外界因素造成的测量误差,使灵敏度提升一倍,非线性度减小。同时为了减少结构的阻尼,故在质量块上每 $10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$ 的表面刻蚀半径为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的阻尼孔。其设计主要包括悬臂梁选择和质量块尺寸确定。

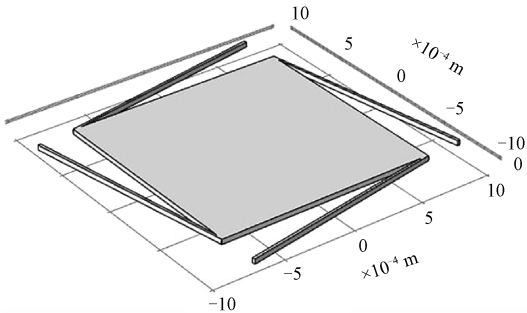


图 5 垂直轴加速度计结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vertical axis accelerometer structure

2 结构设计及仿真分析

2.1 弹性梁的选择

弹性梁在结构设计中是十分关键的部分,其参数与表头的分辨率、量程、横向灵敏度等指标有着密切的关系,成为结构设计的关键。

梁形状的选取可分为如下几类^[20]:悬臂梁、固定梁、折叠梁、鱼钩形、蛇形梁、斜置梁以及 U 型梁等,其结构特点如表 1 所示。在梁的结构参数相同的情况下,折叠梁、悬臂梁、鱼钩梁等结构的刚度均较小;鱼钩梁,蛇形梁及斜置梁的前两阶模态频率相差较小甚至相同,易引起相邻模态的耦合振动,故它们一般不适用于梳齿式单轴加速度计;悬臂梁刚度较小,且结构简单易加工,故本文水平加速度计采用悬臂梁,垂直加速度计采用斜置梁。

表 1 各弹性梁的结构特点

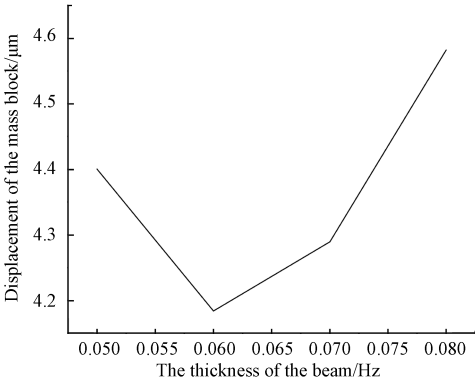
Table 1	Structural characteristics of each elastic beam				
类型	刚度	交叉耦合	应力	特点	
悬臂梁	小	小	有	刚度小	
折叠梁	较小	较小	有	综合性能好	
鱼钩梁	小	大	有	刚度较小	
蛇形梁	小	大	有	梁软,振幅大	
斜置梁	较大	大	无	频率比不受加工误差影响	
U 形梁	较小	较小	有	频率易调整	

2.2 水平加速度计结构仿真设计

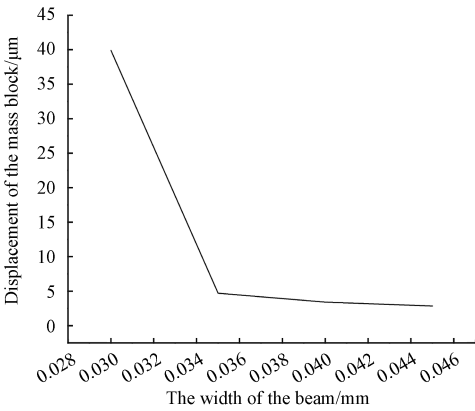
在设计 MEMS 加速度计中,弹性梁的选取及尺寸的确定是结构的关键,弹性梁的性能直接影响加速度计的灵敏度、刚度、稳定性等,因此需要重点分析弹性梁尺寸变化对敏感质量块位移的影响,以保证加速度计的灵敏度及稳定性等。重点讨论弹性梁的长度,宽度以及厚度对敏感质量块位移的影响,由于 X、Y 轴加速度计结构完全相同,因此仅对 Y 轴加速度计进行仿真分析,通过 COMSOL 仿真得到以下变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出,敏感质量块最大位移,随梁厚尺寸的增加先减小后增加,随梁宽尺寸的增加而减小,随梁长尺寸的增加先增加后减小再增加。根据以上规律对梁的尺寸进行优化,在保证敏感质量块位移不能过大造成结构损坏,影响测量精度,同时也需要保证较高的灵敏度。

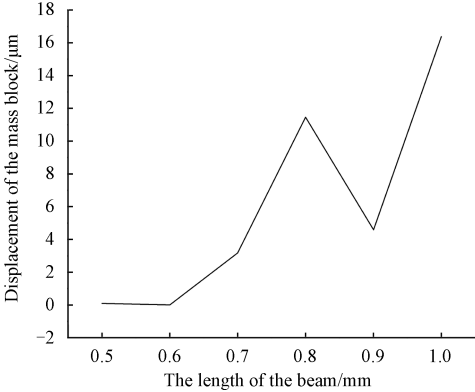
三质量块三轴加速度计本身为弹簧_质量块_阻尼系统^[21],当外界施加加速度时,质量块将会发生受迫振动,如果外界激励频率与系统的固有频率相等或相近时,系统将会发生共振,就会使结构遭到破坏,所以应该避免这种共振现象的发生。同时,谐振频率的高低也决定了输入测量信号的带宽,因此需要通过有限元软件 COMSOL



(a) 梁厚对质量块最大位移的影响
(a) Influence of beam thickness on maximum displacement of mass block



(b) 梁宽对质量块最大位移的影响
(b) Influence of beam width on maximum displacement of mass block



(c) 梁长对质量块最大位移的影响
(c) Influence of beam length on maximum displacement of mass block

图 6 弹性梁厚,梁宽及梁长与敏感质量块最大位移的关系

Fig.6 Relationship between thickness, width and length of elastic beam and maximum displacement of sensitive mass block

进行模态分析,微加速度计所采用的材料为晶向<100>的单晶硅,其弹性模量为 130 Gpa,泊松比为 0.28,密度为 2.33×10^{-12} g/ μm 。讨论弹性梁尺寸对谐振频率的影

响如图 7 所示,并确定结构的固有频率和振型。

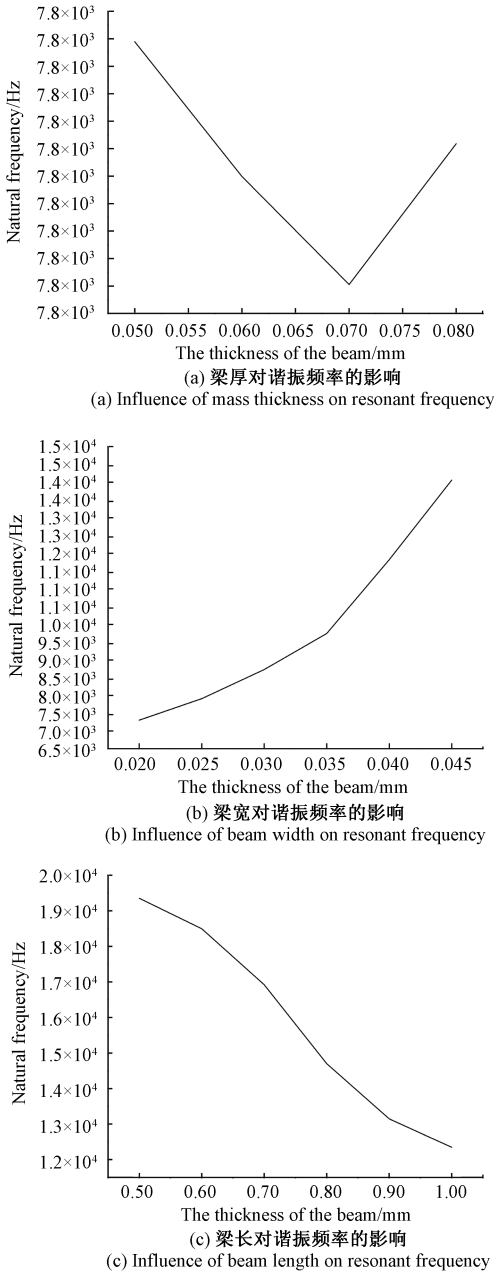


图 7 谐振频率与梁长,梁宽及梁厚的关系

Fig. 7 Relationship between resonant frequency and beam length, beam width and beam thickness

由图 7 可以得出,微加速度计的谐振频率随梁厚的增加先减小后增加,随着梁宽的增大而增大,随着梁长的增大而减小。

根据以上影响规律,在设计该加速度计结构时,既要保证加速度计的灵敏度,又要保证足够大的输入测量信号带宽,同时要确保结构的稳定性,因此确定加速度计的结构尺寸需要综合考虑进行优化设计。根据分析,结合

工艺条件,本文选取水平加速度计的尺寸为:悬臂梁长度为 $1\,000\,\mu\text{m}$,梁宽为 $30\,\mu\text{m}$,梁的厚度为 $75\,\mu\text{m}$,梳齿长度为 $100\,\mu\text{m}$,梳齿宽度为 $12\,\mu\text{m}$,定齿间距为 $118\,\mu\text{m}$,动齿与定齿较小间距为 $30\,\mu\text{m}$,质量块长度为 $2\,700\,\mu\text{m}$,质量块宽度为 $4\,200\,\mu\text{m}$,质量块和梳齿厚度为 $75\,\mu\text{m}$ 。

为了保证加速度计的测量精度和结构的稳定性,可以通过有限元软件 COMSOL 进行模态分析。模态分析可以得到结构的固有频率和振型,它们是微机械结构设计中非常重要的参数,通过模态分析,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的动力分析。通过仿真,结构的前四阶谐振频率及振型如表 2 所示。

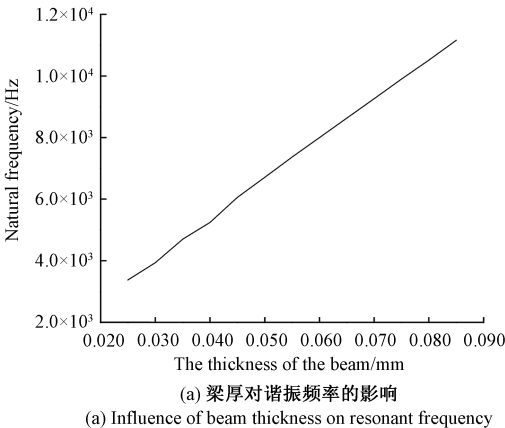
表 2 Y 轴加速度计前 4 阶模态谐振频率表
Table 2 Table of the first four modes resonant frequencies of the Y axis accelerometer

模态	振型	频率/Hz
1st	沿 Y 轴平移	7 796.4
2nd	绕 Y 轴旋转	14 996
3nd	沿 Z 轴平移	17 140
4th	绕 X 轴旋转	22 474

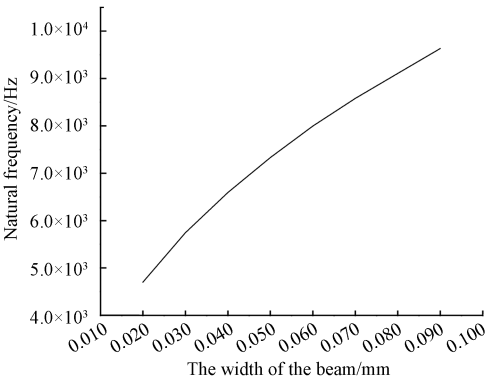
由表 2 此可以看出,加速度计的前四阶模态依次为沿 Y 轴平移、沿 Y 轴旋转、沿 Z 轴平移、向 X 轴旋转。表 2 的第 1 阶模态为加速度计的主模态,其他为杂项模态,其中杂项模态的频率大于主模态的 1.5 倍,这样能在一定程度上避免杂项模态对主模态的干扰,就此模态分析结果来看,说明所设计结构的交叉干扰比较小,符合设计要求。

2.3 垂直加速度计结构仿真设计

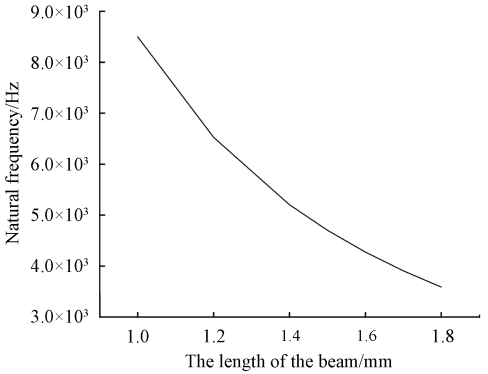
垂直加速度计采用斜置梁,与水平轴加速度计分析类似,垂直加速度计的梁长,梁及质量块厚度,梁宽,斜置梁角度对谐振频率的影响如图 8 所示,对质量块最大位移的影响如图 9 所示。



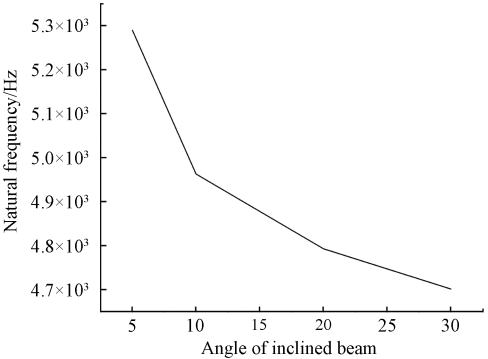
(a) 梁厚对谐振频率的影响
(a) Influence of beam thickness on resonant frequency



(b) Influence of beam width on resonant frequency



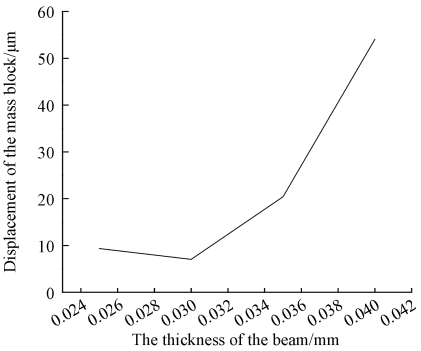
(c) Influence of beam length on resonant frequency



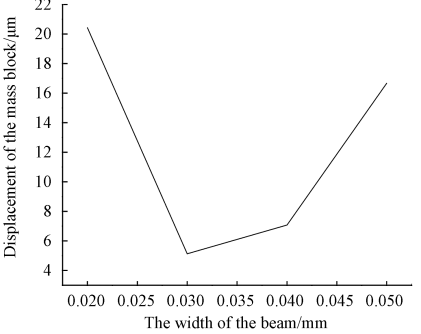
(d) Influence of the inclined beam angle on the resonant frequency

图 8 谐振频率与梁长,梁宽,梁厚及梁角度的关系
Fig. 8 Relationship between resonant frequency and beam length, beam width, beam thickness and beam Angle

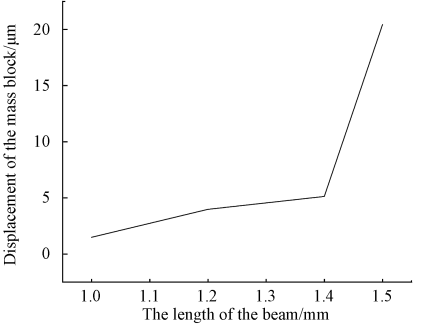
由图 8 可以得出,梁及质量块厚度增加,谐振频率增加;随梁宽增加,谐振频率增加;随梁长增加,谐振频率降低;角度增加,谐振频率降低。



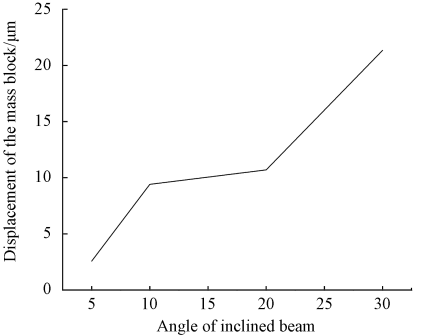
(a) Influence of beam and mass thickness on the maximum displacement of mass block



(b) Influence of beam width on maximum displacement of mass block



(c) Influence of beam length on maximum displacement of mass block



(d) Influence of beam Angle on maximum displacement of mass block

图 9 质量块最大位移与梁长,梁宽,梁厚及梁角度的关系
Fig. 9 Relationship between maximum displacement of mass block and beam length, beam width, beam thickness and beam angle

由图 9 可以得出,梁及质量块厚度增加,质量块最大位移先减小后增加;随梁宽增加,质量块最大位移先减小后增加;随梁长增加,质量块最大位移增加;角度增加,质量块最大位移增加。

根据加速度计结构尺寸对性能的影响对结构进行优化分析确定垂直加速度计的尺寸。质量块长宽均为 $1\,500\,\mu\text{m}$,质量块厚度为 $75\,\mu\text{m}$,4 个斜置梁的长度为 $1\,500\,\mu\text{m}$,宽为 $20\,\mu\text{m}$,厚度为 $35\,\mu\text{m}$,梁角度为 30° ,为了减小阻尼,质量块上刻蚀了半径为 $4\,\mu\text{m}$ 的阻尼孔。

对垂直加速度计进行模态分析,得到结构的固有频率和振型,以确保足够的工作带宽,避免由于共振引起的结构断裂,同时使检测方向的振动模式与其他模式尽量大的分离。模态分析结果如表 3 所示。

表 3 垂直加速度计模态分析结果

Table 3 Modal analysis results of vertical accelerometer		
模态	运动状态	频率/Hz
一阶	沿 Z 轴平移	17 955
二阶	绕 Y 轴旋转	34 881
三阶	绕 X 轴旋转	34 919
四阶	沿 X+Y 轴平移	166 840

由表 3 可以看出,加速度计的前四阶模态依次为沿 Z 轴平移、沿 X 轴旋转、沿 Y 轴旋转、向 Z 轴凸起。表 3 中的第一阶模态为加速度计的主模态,其他为杂项模态,其中杂项模态的频率大于主模态的 1.5 倍,这样能在一定程度上避免杂项模态对主模态的干扰,就此模态分析结果来看,说明所设计结构的交叉干扰比较小,符合设计要求。

3 性能测试仿真

3.1 极限过载仿真与分析

三轴电容式加速度计的应用广泛,会出现处于高过载环境的情况,因此,需要对结构进行极限过载仿真分析,以确保结构具有较强的抗过载能力。利用 COMSOL 进行仿真分析,对加速度计施加 $2\,000\text{ g}$ 的载荷时的应力如图 10 和 11 所示,X、Y 方向最大应力为 164.075 MPa ,Z 方向最大应力为 $30.382\,5\text{ MPa}$,均远小于硅材料的极限强度,最大应力发生在悬臂梁的根部位置。因此,设计的该电容式加速度计具有很强的抗过载能力,符合设计要求。

3.2 结构的性能仿真

通过 COMSOL 仿真优化得到了最终的三轴加速度计的尺寸,从而确定出水平轴加速度计和垂直轴加速度计的各项性能参数如表 4 和 5 所示。

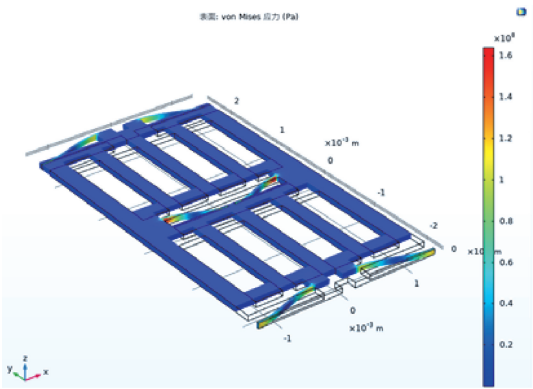


图 10 水平加速度计 $2\,000\text{ g}$ 载荷的应力图
Fig. 10 Stress diagram of $2\,000\text{ g}$ load of horizontal accelerometer

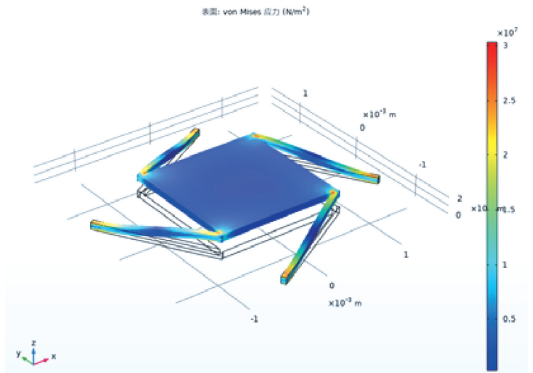


图 11 垂直加速度计 $2\,000\text{ g}$ 载荷的应力图
Fig. 11 Stress diagram of the $2\,000\text{ g}$ load of the vertical accelerometer

表 4 Y 轴加速度计性能参数

Table 4 Y-axis accelerometer performance parameters		
	X	Z
质量/ μg		746
面积/ m^2		4.295×10^{-6}
量程/ g		± 4
位移灵敏度/ $(\mu\text{m}\cdot\text{g}^{-1})$		6.78
交叉灵敏度/%	0.002 875	0.099 29

表 5 垂直轴加速度计性能参数

Table 5 Performance parameters of vertical axis accelerometer		
	X	Y
质量/ μg		480
面积/ m^2		2.75×10^{-6}
量程/ g		± 4
位移灵敏度/ $(\mu\text{m}\cdot\text{g}^{-1})$		1.536 69
交叉灵敏度/%	0.536 5	0.628 27

由表 4、5 可以看出,优化后的水平加速度计和垂直

加速度计的灵敏度都有很大提升,并且本文设计的三质量块加速度计交叉灵敏度均小于 1%,且水平轴方向的交叉灵敏度均小于 0.1%,通过模态分析可知,杂阶模态大于主阶模态的谐振频率的 1.5 倍,确保了所设计结构的稳定性,同时三质量块加速度计的整体结构大小也尽可能地实现了微型化,达到了较好的性能,能够很好地满足设计需求。

4 结 论

本文设计了一种三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计,通过理论建模和仿真分析对结构性能参数进行优化设计。通过 COMSOL 仿真优化后得到的水平轴方向的位移灵敏度为 $6.78 \mu\text{m/g}$,垂直轴方向的位移灵敏度为 $1.536\ 69 \mu\text{m/g}$,量程为 $\pm 4g$,并在保证良好位移灵敏度的情况下,降低了其他方向的交叉灵敏度,三质量块加速度三轴的交叉灵敏度均小于 1%,在一定程度上减小了其他方向位移对测试方向的影响;结构的杂阶模态大于主阶模态的谐振频率的 1.5 倍,确保了所设计结构的稳定性;通过极限过载仿真分析确定在水平轴方向和垂直轴方向施加 2 000 g 的载荷时,结构的最大应力均远小于硅材料的极限强度,具有较好的抗冲击能力;保证了足够的工作带宽^[22-23],拓宽了应用范围,同时 3 个单轴加速度计采用 SOI 体微加工工艺,结构简单易于制作加工,有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 常健,李荣冰,刘建业,等. MEMS 航姿系统振动环境适应性研究[J]. 电子测量技术,2015,38(9):93-97.
CHANG J, LI R B, LIU J Y, et al. The research of vibration environmental adaptability of MEMS AHRS [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (9): 93-97.
- [2] 曹慧亮,李宏生,申冲,等. 基于偶极子补偿法的硅微机械陀螺仪带宽拓展[J]. 仪器仪表学报,2015,36(11):2427-2434.
CAO H L, LI H SH, SHEN CH, et al. Lion MEMS gyroscope bandwidth expanding based on bipole compensation technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11):2427-3434.
- [3] 李晓莹,李慧敏,常洪龙,等. 一种基于双质量块的三轴微加速度计:, CN102323449B[P]. 2012.
LI X Y, LI H M, CHANG H L, et al. A three-axis microaccelerometer based on double-mass blocks: CN102323449B[P]. 2012.
- [4] 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.
- [5] 陈立国,袁飞,陈涛,等. 基于单一敏感质量的三轴电容加速度计的设计[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(5):932-937.
CHEN L G, YUAN F, CHEN T, et al. Design of three-axis capacitance accelerometer based on single sensitive mass [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35 (5): 932-937.
- [6] 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 CH, CHEN F, et al. Technology research of integrated triaxial accelerometer based on (111) Silicon monolithic [J]. Micro/Nanoelectronics Technology, 2015, 52(6): 390-395.
- [7] 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: 324-33.
- [8] KESHAVERZI M, YAVAND HASANI J. Design and optimization of fully differential capacitive MEMS accelerometer based on surface micromachining [J]. Microsyst Technol, 2019, 25: 1369-1377.
- [9] KAVITHA S, JOSEPH DANIEL R, SUMANG-ALA K. Design and analysis of MEMS comb drive capacitive accelerometer for SHM and seismic applications. measurement [J]. Journal of the International Measurement Confederation, 2016, 93: 327-39.
- [10] AYDEMIR A. A three axis capacitive MEMS accelerometer on a single substrate[D]. Turkey: Middle East Technical University, 2013.
- [11] SHAEFFER D K. MEMS inertial sensors: A tutorial overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(4): 100-109.
- [12] HE J B, ZHOU W, YU H J, et al. Structural designing of a MEMS capacitive accelerometer for low temperature coefficient and high linearity [J]. Sensors (Basel, Switzerland) 2018, 18(2): 643.
- [13] WANG J CH, MA X. Optimization and analysis of micro capacitive comb accelerometer [C]. 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2015: 1193-197.
- [14] RIAZ K, IQBAL A, MIAN M U, et al. Active gap reduction in comb drive of three axes capacitive micro accelerometer for enhancing sense capacitance and sensitivity[J]. Microsyst Technol, 2015, 21: 1301-1312.
- [15] 宋萌,常洪龙,杜松杰,等. 一种低噪声 MEMS 加速度计设计与制作[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9): 88-

- 90,93.
SONG M, CHANG H L, DU S J, et al. Design and fabrication of a low noise MEMS accelerometer [J]. Transducer and Microsystem, 2014, 33(9): 88-90, 93.
- [16] 宋文平. 基于 SOI 的三轴电容式微加速度计的设计、仿真与工艺研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017.
SONG W P. Design, simulation and technology of triaxial capacitive micro accelerometer based on SOI [D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2017.
- [17] 赵文静. 基于 SOI 技术的 MEMS 惯性加速度计的设计与优化[D]. 成都:电子科技大学, 2010.
ZHAO W J. The design and optimization of the MEMS inertial accelerometer based on SOI technology [D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2010.
- [18] 牛正一. 单片集成三轴微加速度计关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
NIU ZH Y. Research on key technologies of single tablets integrated triaxial microaccelerometer [D]. Changsha: University of Defense Science and Technology, 2010.
- [19] 王守明, 汪祖民. 一种新型三轴电容式加速度计的设计分析[J]. 电子科技, 2010, 23(3): 86-89.
WANG SH M, WANG Z M. Design analysis of a new three-axial capacitive accelerometer [J]. Electronics, 2010, 23 (3): 86-89.
- [20] 马淑敏. 微加速度传感器的结构特性与仿真研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
MA SH M. Structural characteristics and simulation study of microacceleration sensors [D]. Chengdu: University of Electronic Technology, 2013.
- [21] 张程浩, 狄杰建, 刘昊, 等. 全差分三轴 MEMS 电容加速度计的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(3): 25-29.
ZHANG CH H, DI J J, LIU H, et al. Design of the full differential triaxial MEMS capacitance accelerometer[J]. Instrument Technology and Sensor, 2017 (3): 25-29.
- [22] 梅崧, 胡启方, 邢朝洋, 等. MEMS 加速度计温度漂移仿真分析[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(3): 375-380.
MEI W, HU Q F, XING CH Y, et al. Simulation analysis of temperature drift of MEMS accelerometer[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2018, 26(3): 375-380.
- [23] 许高斌, 余智, 徐礼建, 等. 复杂环境电容式微加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 154-159.
XU G B, YU ZH, XU L J, et al. Reliability analysis of the complex environmental capacitive microacceleration sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (8): 154-159.

作者简介



李开富, 1991 年于华东交通大学获得学士学位, 2002 年于西南交通大学获得硕士学位, 现任职中铁工程服务有限公司, 高级工程师, 主要研究方向为工程机械的设计与制造。

E-mail: LKF87@126.com

Li Kaifu received B. Sc. degree from East China Jiaotong University in 1991 and M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2002. He is now working in China Railway Engineering Service Co., Ltd. as a senior engineer. His main research interests include the design and manufacture of construction machinery.



蒋婷, 2019 年于西安理工大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 加速度传感器。

E-mail: 1937251271@qq.com

Jiang Ting received B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2019. She is now a M. Sc. candidate at University of Electronic Science and Technology. Her main research interest includes MEMS acceleration sensor.



李绍荣 (通信作者), 1986 年于成都电讯工程学院 (现电子科技大学) 获得工学学士学位, 现为电子科技大学研究员, 主要研究方向为微系统及微结构、光电测控。

E-mail: lsrx@126.com

Li Shaorong (Corresponding author) received B. Sc. degree in engineering from Chengdu Institute of Telecommunications Engineering (now University of Electronic Science and Technology of China) in 1986. He is now a research fellow at University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include microsystems and microstructures, and optoelectronic measurement and control.