

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311852

三维等灵敏度低耦合弹性机构的设计和优化*

雷英俊^{1,2}, 许桢英¹, 李瑞君²

(1. 江苏大学机械工程学院 镇江 212013; 2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要: 振动对仪器和机床的精度都有较大影响, 对其进行准确检测和分析, 是实现振动有效控制的前提。本研究提出了一种高灵敏度和低耦合三维弹性机构及其参数优化方法。介绍了三维弹性机构的构型, 并通过理论建模、参数优化和仿真分析完成了三维弹性机构的设计和优化, 最后将该弹性机构与高灵敏度、低耦合传感系统相结合, 研制了高性能三维低频加速度计系统, 并实测了加速度计系统的性能参数。根据实验结果, 使用该弹性机构的三维加速度计的灵敏度优于 $2.0 \text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$, 耦合误差低于 1.5%, 以及频率响应范围为 1~13 Hz, 符合设计要求。因此, 本研究所提出的三维弹性机构具有三维等灵敏度和低耦合的特点, 可以广泛应用于各种三维加速度计。

关键词: 三维加速度计; 弹性机构; 参数优化; 等灵敏度; 低耦合

中图分类号: TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Design and optimization of 3D iso-sensitive, low-coupling elastic mechanisms

Lei Yingjun^{1,2}, Xu Zhenying¹, Li Ruijun²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Vibration has a great impact on the accuracy of both instruments and machine tools, and its accurate detection and analysis is a prerequisite for effective vibration control. In this study, a high sensitivity and low coupling 3D elastic mechanism, and its parameter optimization method are proposed. The configuration of the 3D elastic mechanism is introduced, and the design of the 3D elastic mechanism is completed through theoretical modeling, parameter optimization, and simulation analysis. Finally, the elastic mechanism is combined with a high-sensitivity and low-coupling sensing system to develop a 3D low-frequency accelerometer system with high performance, and the performance of the accelerometer are tested through experiments. According to the experimental results, the sensitivity of the 3D accelerometer using this elastic mechanism is better than $2.0 \text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$, the coupling error is lower than 1.5%, as well as the frequency response range is 1~13 Hz, which is in accordance with the design requirements. Therefore, the 3D elastic mechanism proposed in this study is characterized by 3D equal sensitivity and low coupling, and can be widely used in various 3D accelerometers.

Keywords: 3D accelerometer; elastic mechanism; parameter optimization; iso-sensitive; low coupling

0 引言

振动测量在惯性导航^[1]、结构健康监测^[2-3]、地震和海啸监测^[4-5]、工业设备故障诊断^[6-7]、微重力测量^[8]和精密仪器精度保障^[9]等重要工程领域发挥重要作用。对振动进行准确检测和分析, 是实现振动有效控制的前

提^[10]。振动测量多采用相对测量方式, 即使用加速度计直接放置于被测物表面, 以实现振动加速度准确测量。由于振动方向未知, 需要加速度计具有三维感测能力, 为此学者们开发了一系列三维加速度计。

三维加速度计按其传感原理可分为电学和光学三维加速度计两类。首先是压电式、电容式和压阻式等电学三维加速度计。Xie 等^[11]和李开富等^[12]设计了一种基

收稿日期: 2023-08-29 Received Date: 2023-08-29

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175506)项目资助

于垂直梳状电极的电容式三维加速度计。Szermer 等^[13]和 Ganji 等^[14]也进行了类似的研究。这些研究实现了三维加速度计的单片集成。不过,它们也存在三轴频率响应特性不一致、电压灵敏度低(为 $\text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$)和耦合误差大等问题^[15]。Amarasinghe 等^[16]设计了压阻三维加速度计,基于4个质量块和十字横梁结构,加速度测量范围为 $\pm 100 \text{ m/s}^2$, X 、 Y 和 Z 轴灵敏度分别为 0.11、0.11 和 0.09 $\text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 。Sim 等^[17]设计了一种结构类似的三维加速度计,有6个质量块,整体呈对称的正六边形,该类型三维加速度计也存在灵敏度低和耦合误差大的问题^[18]。

通过使用光学传感技术,可以显著提高三维加速度计的灵敏度。Li 等^[19]设计了一种基于单个地震块和双层簧片结构的光栅干涉三维加速度计,分辨率达到 $2 \text{ ng}/\text{Hz}^{1/2}$,但其未介绍加速度计的耦合特性和频率响应范围。Abozyd 等^[20]开发了一种基于单质量块、对称蛇形弹簧和光学投影传感技术的三维光学加速度计,分辨率达到 0.56 mm/s^2 。然而,其 X 、 Y 轴的机械灵敏度远高于 Z 轴。光线布拉格光栅(FBG)在也被广泛应用于加速度计传感系统^[21],Zhou 等^[22]基于七芯光纤 FBG 制作了三维光学加速度计,其工作频率范围为 $10\sim 220 \text{ Hz}$,但该研究未提及加速度计的耦合误差特性。Jiang 等^[23-24]使用6根 FBG 在空间中固定了1个立方体质量块,在该结构中 FBG 既是弹性元件又是传感元件,其灵敏度为 $6.8 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$,频率响应范围为 $0\sim 500 \text{ Hz}$ 。虽然该三维加速度计系统在三维结构上完全对称,但由于重力的作用, Z 轴刚度和谐振频率低于 X 、 Y 轴。因此,三维灵敏度和频率响应特性仍不一致。Wang 等^[25-26]基于两对柔性铰链和1个圆柱形质量块设计了三维 FBG 加速度计的弹性机构。加速度计在 X 、 Y 和 Z 轴的谐振频率分别为 550、480 和 1 210 Hz,三维频率响应特性和灵敏度差异显著。

综上,现有的三维加速度计在三维灵敏度和频率响应一致性方面存在缺陷,难以准确检测和辨识三维振动的幅值和方向。为了提高三维加速度计的检测精度和降低耦合误差,本研究提出了基于正方形簧片和4质量块对称式结构的三维等灵敏度、低耦合弹性机构,及其参数优化方法。首先通过理论分析确定了三维弹性机构的构型;然后通过理论建模、参数优化和仿真分析完成了三维弹性机构的设计和优化;最后将该弹性机构与高灵敏度、低耦合传感系统相结合,研制了高性能三维低频加速度计系统,并通过实验测试了加速度计系统的性能参数。

1 加速度计的结构和参数优化设计要求

加速度计本质上是将加速度产生的惯性力转化为可测量物理量的装置,其通过感应内部质量块位置的变化

来实现加速度测量。如图1所示,三维加速度计的关键结构包括两部分:三维弹性机构和三维传感系统, Z 轴位移传感器用于测量弹性机构 Z 向相对位移实现 Z 向振动测量,而二维角度传感器则用于测量弹性机构 X 、 Y 向相对角度实现 X 和 Y 向振动测量。三维弹性机构的性能直接决定了加速度计的灵敏度、耦合误差和频率响应范围。因此,需对其进行优化设计。

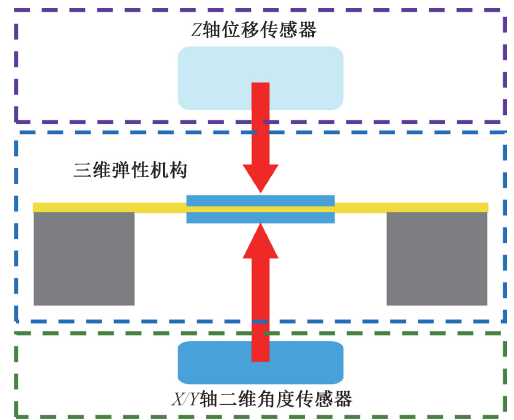


图1 三维加速度计的结构

Fig. 1 Structural of the 3D accelerometer

三维加速度计设计的要点是其弹性机构的设计,其弹性机构为的二阶机械系统,机构的灵敏度随频率变化。加速度计内质量块的位移 z 与激励加速度 a 之间的关系为:

$$\omega_n^2 z = a \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_b}{\omega_n}\right)^2} \quad (1)$$

式中: ω_n 为加速度计的谐振频率, ω_b 为激励振动频率。令:

$$H = 1 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_b}{\omega_n}\right)^2} \quad (2)$$

由式(2)可知,当 $\omega_n \gg \omega_b$, 振幅比 $H \approx 1$, $\omega_n^2 z \approx a$ 时,加速度计具有良好的线性特性。

以频率响应范围为 10 Hz 的低频加速度计为例,其频率响应范围上限设定为 10 Hz ,即 $\omega_b = 2\pi \times 10 \text{ rad/s}$;由弹性元件选用铍青铜簧片,其材料阻尼比 $\zeta = 0.002$ ^[27];将 ω_b 和 ζ 代入加速度计输出振幅比计算式(2),可以得到低频加速度计弹性机构的振幅比 H 和 $\omega_n = 2\pi f_n$ 之间的关系,如图2所示。当低频加速度计弹性机构谐振频率 $\leq 50 \text{ Hz}$ 时,其在 10 Hz 以内的最大动态误差约为 2% ,而当谐振频率 $> 50 \text{ Hz}$ 时,振幅比 H 的导数趋于 0.09% 。因此,继续提高低频加速度计弹性机构的谐振频率很难大幅降低加速度计的动态误差,且会显著降低弹性机构的灵敏度,影响低频加速度计的性能,故频率响应范围为 10 Hz 的低频加速度计的谐振频率的设计值取 50 Hz 。

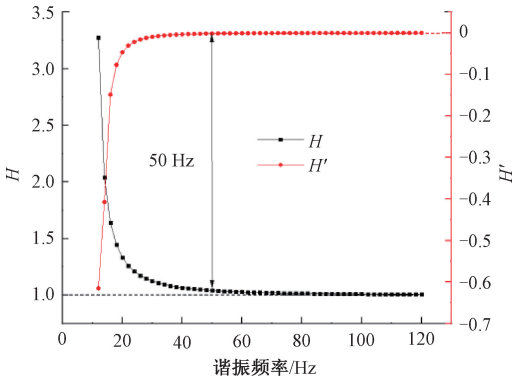


图 2 加速度计的输出振幅比和谐振频率之间的关系
Fig. 2 Relationship between the output amplitude ratio and resonant frequency of accelerometer

除了谐振频率之外,三维加速度计的弹性机构需对于 X、Y 和 Z 3 个方向的振动具有相同的灵敏度,且弹性机构的三维运动需要相互解耦,以降低三维加速度计的耦合误差。

2 三维弹性机构的设计和优化

2.1 结构设计

在此前的研究中,本研究团队开发了如图 3(a)所示基于簧片和单质量块结构的弹性机构^[28]。该弹性机构可以实现 X 轴转动、Y 轴转动和 Z 轴平动,理论上可以实现三维振动传感。由于弹性机构的转动惯量与其 X 或 Y 轴的灵敏度直接相关,因此,对单质量块弹性机构进行分析,其转动惯量为:

$$I_s = mh^2/4 \quad (3)$$

式中: m 为质量块重量, h 为质量块重心相对于旋转轴的距离。由式(3)可知,质量块重心与旋转轴距离越小转动惯量也就越小,转动刚度也就越大,弹性机构的灵敏度越小。因此,基于单质量块和中心对称式簧片的弹性机构绕 X 或 Y 轴的转动惯量较小,故使用该机构的三维加速度计 X 和 Y 轴的灵敏度较低,影响了三维加速度计整体性能。

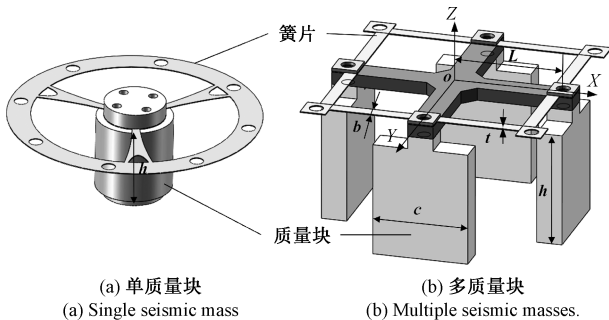


图 3 弹性机构

Fig. 3 3D vibration sensing mechanism

为了解决单质量块弹性机构 X 和 Y 轴灵敏度较低的问题,本研究提出了基于正方形簧片和 4 质量块对称式结构的三维等灵敏度、低耦合弹性机构,如图 3(b)所示,其通过将集中在中间安装的单个质量块分散到簧片四周安装,以提升机构绕 X 和 Y 轴转动惯量,该机构的转动惯量为:

$$I_M = m(L^2 + h^2/4) \quad (4)$$

式中: L 为质量块到弹性机构中心的距离。对比式(3)和(4)可以看出,通过使用 4 个质量块,可以显著提高弹性机构绕 X 和 Y 轴转动惯量,进而降低机构 X 和 Y 轴的转动刚度和谐振频率,实现两轴灵敏度提高。

2.2 理论建模

为了优化三维弹性机构的结构参数,对其进行理论建模。如图 4(a)和(b)所示分别为三维弹性机构的 Z 向和 X 向运动示意图。

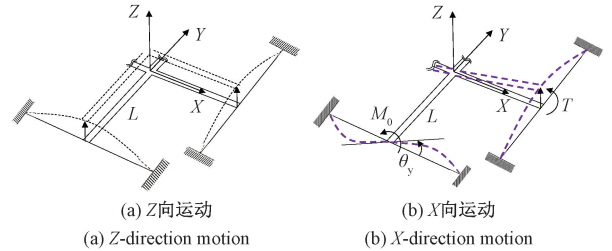


图 4 三维弹性机构运动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 3D elastic mechanism motion

如图 4(a)所示,当 Z 向加速度作用于三维弹性机构时,4 根筒支梁受到中间集中荷载的作用,整根梁向上弯曲变形。承受中间集中荷载的单根筒支梁的刚度为:

$$K'_z = \frac{2Ebt^3}{L^3} \quad (5)$$

其中, L 是梁长度的一半, b 是梁的宽度, t 是梁的厚度, E 是梁材料的弹性模量。由于 4 根筒支梁是并联的,故三维弹性机构在 Z 方向上的刚度为:

$$K_z = 4 \times K'_z = \frac{8Ebt^3}{L^3} \quad (6)$$

如图 4(b)所示,当三维弹性机构受到水平加速度作用时,其 4 根弹性梁会产生弯曲和扭转变形。因此,机构的水平刚度包括两部分:弯曲刚度和扭转刚度。筒支梁在中心扭矩 M_0 的作用下发生弯曲,因此梁的变形角 θ_y 为:

$$\theta_y = \frac{6M_0L}{Ebt^3} \quad (7)$$

因此,梁的弯曲刚度为:

$$K'_{\theta M} = \frac{Ebt^3}{6L} \quad (8)$$

考虑到4根弹性梁中2根发生弯曲变形,且二者之间为并联关系,因此,该机构在水平方向上的弯曲刚度 $K_{\theta M}$ 为:

$$K_{\theta M} = 2 \times K'_{\theta M} = \frac{Ebt^3}{3L} \quad (9)$$

简支梁在中间扭矩 T 的作用下发生扭转,其扭转刚度为:

$$K'_{\theta T} = \frac{2Gbt^3}{L} \quad (10)$$

其中, G 表示梁的剪切模量。由于4根梁中有两根发生扭转变形,且二者之间为并联关系,因此该机构在水平方向上的扭转刚度 $K_{\theta T}$ 为:

$$K_{\theta T} = 2 \times K'_{\theta T} = \frac{4Gbt^3}{L} \quad (11)$$

经过上述刚度推导,可以得到三维弹性机构的运动方程如下:

$$\begin{cases} Z \text{ 轴方向: } m\ddot{\delta}_z(t) + K_z[\delta_z(t)] = 0 \\ X \text{ 轴方向: } I_A\ddot{\theta}_x(t) + (K_zL^2 + K_{\theta M} + K_{\theta T})\theta_x(t) = 0 \\ Y \text{ 轴方向: } I_A\ddot{\theta}_y(t) + (K_zL^2 + K_{\theta M} + K_{\theta T})\theta_y(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, m 为4个质量块的总质量, I_A 为机构的转动惯量。由于三维振动传感机构在 X/Y 轴上旋转,两个质量块到旋转轴的垂直距离 D_1 为:

$$D_1 = \sqrt{L^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} \quad (13)$$

其中, h 为质量块的高度。另外两个质量块到旋转轴的垂直距离是方形地震块高度 h 的 $1/2$ 。因此,三维弹性机构的绕 X/Y 轴转动的转动惯量为:

$$I_A = \frac{m}{12}(6L^2 + 4h^2 + c^2) \quad (14)$$

式中: c 表示地震块长度。因此,三维弹性机构的三维共振频率为:

$$\begin{cases} f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}} \\ f_x = f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_zL^2 + K_{\theta M} + K_{\theta T}}{I_A}} \end{cases} \quad (15)$$

2.3 参数优化

根据第1节分析结果可知,三维低频加速计的三维谐振频率均应设计为50 Hz。此外,为了保证簧片的加工精度,选用化学蚀刻法进行加工,而蚀刻加工过程中簧片会变薄,使弹性机构的谐振频率低于设计值。因此,三维弹性机构谐振频率的设计值设定为60 Hz,通过优化机构中的簧片和质量块的结构参数,确保该机构具有良好的低频响应特性。簧片和质量块结构参数

优化的限制条件如下:

1) 三维弹性机构的谐振频率。机构的 X 、 Y 和 Z 三轴谐振频率必须大致相等,以确保机构在不同激励方向频率响应特性的一致性。

$$59 \text{ Hz} \leq f_z = f_x = f_y \leq 61 \text{ Hz} \quad (16)$$

2) 簧片的约束参数。根据前期的技术经验可知,当簧片的厚度大于0.2 mm,宽度小于0.5 mm时,加工精度难以保证,且成功率较低。此外,由于实验室现有的加工设备在加工直径超过40 mm的簧片时,难以保证簧片的平整度。因此,簧片的结构参数必须满足:

$$\begin{cases} L \leq 20 \text{ mm} \\ b \geq 0.5 \text{ mm} \\ t \leq 0.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (17)$$

3) 质量块的约束参数。由于簧片的宽度小于40 mm,以及为了减小三维弹性机构的高度,将质量块的高度限制为20 mm。因此,质量块的结构参数必须满足:

$$\begin{cases} h \leq 20 \text{ mm} \\ c \leq 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (18)$$

质量块和十字梁使用6061铝合金制作。为了简化参数优化过程,将质量块的形状设计为长方体,宽度为4 mm。因此,三维弹性机构的设计中需要优化簧片的半长 L 、宽度 b 和厚度 t ,以及质量块的长度 c 和高度 h 等5个结构参数。基于多参数优化软件完成了弹性机构优化,优化后的参数如表1所示。

表1 三维弹性机构的结构参数

Table 1 Structural parameters of the 3D elastic mechanism

参数	L	b	t	h	c
值/mm	17	2	0.15	18	15

2.4 仿真分析

为了验证三维弹性机构参数优化设计的正确性,通过有限元仿真对其频率响应特性和耦合特性进行分析验证。将表1中三维弹性机构的参数代入式(6)、(9)和(11)中计算三维弹性机构的刚度,然后在将刚度值代入式(15)中,即可得到弹性机构的三维谐振频率,如表2所示。此外,还基于有限元分析法对机构进行了建模,以验证参数优化的效果。根据三维弹性机构的工作条件,固定其4个角,其前三阶模态振型和频率分别如图5和表2所示。有限元分析得到的谐振频率比理论计算得到的值相近。此外,从三维弹性机构的三维模态可以看出,该机构在 X 、 Y 和 Z 轴方向上的运动相互解耦,可以有效抑制加速度计的耦合误差。

除了频率特性和耦合特性之外,还通过有限元谐响应分析方法,分析和验证三维弹性机构在1~10 Hz频率范围内的响应特性。仿真分析过程中,在机构 X 、 Y 和 Z 轴方向分别施加1~10 Hz频率范围和加速度值为

表 2 三维弹性机构的谐振频率

Table 2 Resonant frequency of the 3D elastic mechanism

振型	X	Y	Z
理论建模/Hz	60.3	60.3	60.3
有限元分析/Hz	58.1	58.9	59.9
偏差/%	3.6	2.3	2.3

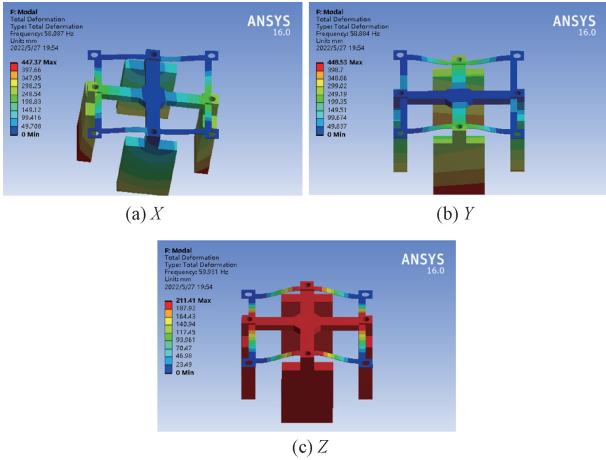


图 5 三维弹性机构的前三阶模态

Fig. 5 First-third-order mode of the 3D elastic mechanism

100 mm/s² 的简谐振动激励,每隔 1 Hz 记录一次机构变形情况,结果如表 3 所示。三维弹性机构在受到 X 轴方向加速度激励时,机构绕 Y 轴旋转运动,旋转角度平均值为 0.028 μrad,标准偏差为 2.8×10⁻⁴ μrad;机构在受到 Y

表 3 三维弹性机构的频率响应特性

Table 3 Frequency response characteristics of 3D elastic mechanism

频率/Hz	X 方向激励	Y 方向激励	Z 方向激励
	$\theta_y/\mu\text{rad}$	$\theta_x/\mu\text{rad}$	δ_z/nm
1	0.027 2	0.026 5	432.7
2	0.027 3	0.026 5	432.9
3	0.027 3	0.026 6	433.2
4	0.027 4	0.026 6	433.8
5	0.027 4	0.026 7	434.4
6	0.027 5	0.026 8	435.3
7	0.027 6	0.026 9	436.3
8	0.027 8	0.027 0	437.4
9	0.027 9	0.027 1	438.7
10	0.028 1	0.027 3	440.2
均值	0.027 5	0.026 7	435.5
标准差	0.000 28	0.000 26	2.6

轴方向加速度激励时,机构绕 X 轴旋转,旋转角度平均值为 0.027 μrad,标准偏差为 2.6×10⁻⁴ μrad;机构在受到 Z 轴方向加速度激励时,机构沿 Z 轴上下移动,平均位移为 435.5 nm,标准偏差为 2.6 nm。因此,本研究所设计的三维弹性机构理论上在 1~10 Hz 频率范围内具有良好的频率响应特性,可以在该频率范围内实现三维低频微振动传感。

3 三维加速度计的设计和性能测试

3.1 三维加速度计全系统设计

加速度计的性能受到弹性机构和传感系统两部分的影响。本研究将所提出的三维弹性机构与高灵敏度传感系统相结合研制了高精度、低耦合的三维加速度计系统。该加速度计系统采用基于 DVD 读取头改进而来的高灵敏度、低耦合二维角度传感器^[29-30]作为 X、Y 轴传感器,其感测原理如图 6 所示,当固定于弹性机构上的反射镜由于外界横向振动激励产生角度变化时,根据四象限光电探测器的输出信号即可得到相应的激励加速度值:

$$a_x = K_x [(V_A + V_B) - (V_C + V_D)] \quad (19)$$

$$a_y = K_y [(V_A + V_D) - (V_B + V_C)] \quad (20)$$

式中: a_x 和 a_y 为被测加速度, V_A 、 V_B 、 V_C 和 V_D 为 QPD 的输出电压信号, K_x 和 K_y 为三维加速度计的 X 和 Y 轴标定参数。当 Z 向振动激励加速度计时,反射镜上下移动,此时四象限光电探测器上的光点位置不发生变化,二维角度传感器的输出信号理论上不发生变化,因此使用该二维角度传感器作为三维加速度计的 X、Y 轴传感器,可以有效提高其 X、Y 轴灵敏度,并降低耦合误差。

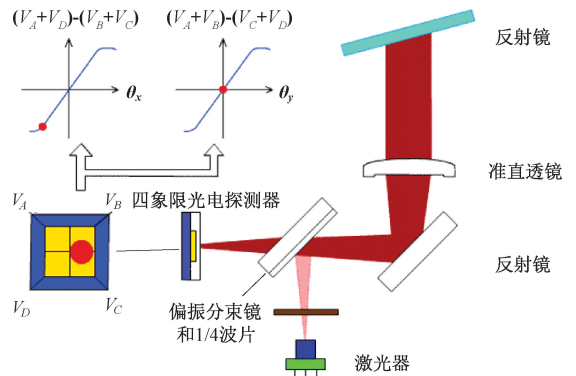


图 6 二维角度传感器的传感原理

Fig. 6 Sensing principle of a two-dimensional angle sensor

三维加速度计的 Z 轴传感器则选用体积小、灵敏度高的高分辨率力电涡流位移传感器(型号:E401,见行科技公司),其灵敏度为 9 μm/V,位移测量范围为 100 μm,分辨率为 0.5 nm(0.1~100 Hz),测量频率带宽为 0.1~

10 kHz,具有良好的精度和动态响应特性,且该电涡流传感器对于被测对象微小角度变化不敏感。使用该电涡流位移传感器测量三维弹性机构在Z向振动激励下的相对位移,即可得到激励加速度值。通过使用高灵敏度低耦合的二维角度传感器和电涡流位移传感器相结合,可以使加速度计实现三维振动的分别测量,在有效提高其灵敏度的同时,也可以降低其耦合误差。基于已完成设计的三维弹性机构、二维角度传感器和电涡流位移传感器,完成了三维加速度计的全系统设计,如图7所示。

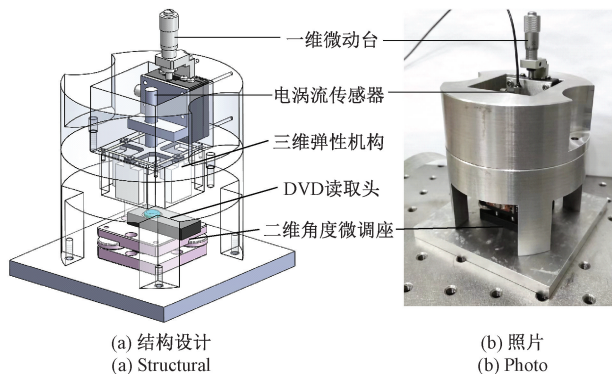


图7 三维低频加速度计的结构设计

Fig. 7 Structural design of the 3D accelerometer

3.2 实验

为了验证三维弹性机构参数优化设计的正确性,还通过实验的方法测试三维低频加速度计的灵敏度、耦合误差和频率相应范围。根据ISO 16063-21:2003 振动校准方法^[31],使用自研三维振动台系统^[32-33]作为振源,参考传感器选用高分辨力电涡流传感器(型号:E401,见行科技公司),根据如图8所示的实验装置示意图搭建了实验设备,对三维低频加速度计的实际性能进行了测试。

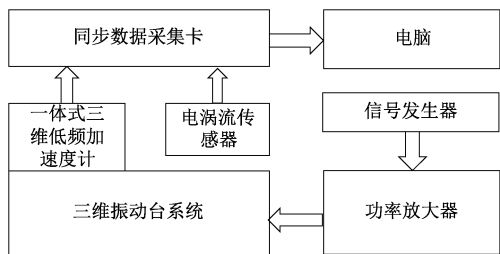


图8 三维低频加速度计性能参数测试实验装置

Fig. 8 Photos of the 3D low-frequency accelerometer performance parameter test experimental setup

1) 灵敏度测试

由加速度计的设计频率响应范围为1~10 Hz,故其灵敏度测试的激励振动频率选用5 Hz,然后分别使用图7所示实验装置标定加速度计的X、Y和Z轴灵敏度。在实验中,分别在加速度计的X、Y和Z轴方向施加单向简谐振动激励,然后同时记录参考传感器和加

速度计的输出电压信号,根据输出信号计算加速度计的各轴灵敏度和耦合误差的大小。实验结果如图9所示,三维低频加速度计X、Y和Z轴的灵敏度分别为2.57、2.58和2.15 V/(m·s⁻²),以及耦合误差优于1.5%,因此基于本研究所提出弹性机构的三维加速度计具有高灵敏度和低耦合的特点。

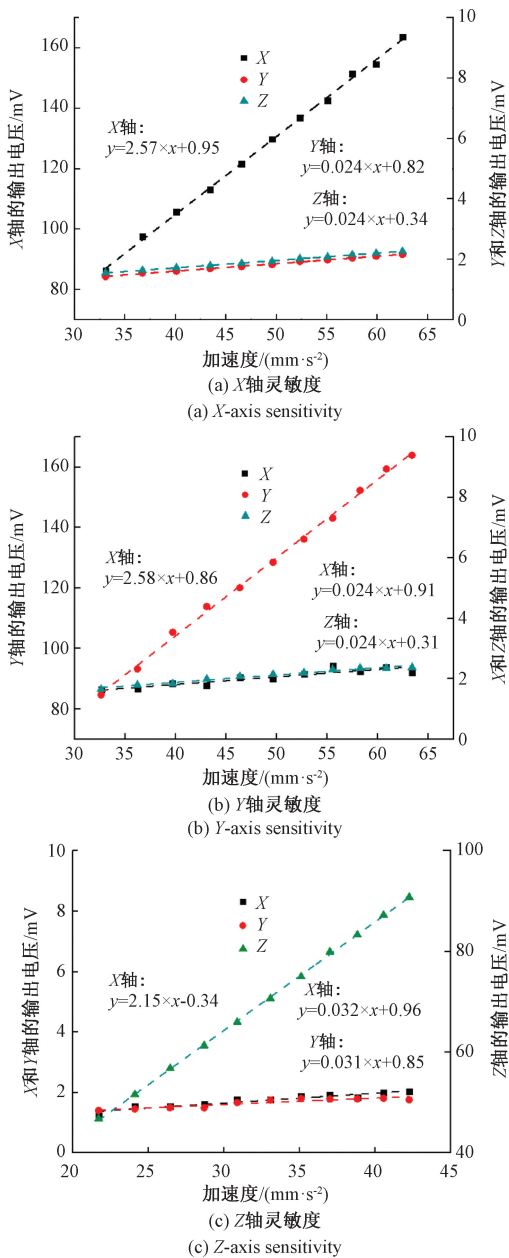


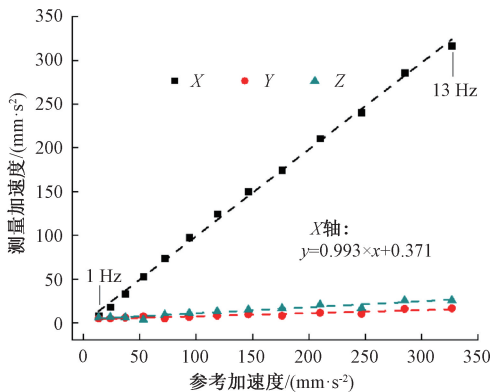
图9 三维加速度计的灵敏度

Fig. 9 Sensitivity of 3D accelerometer

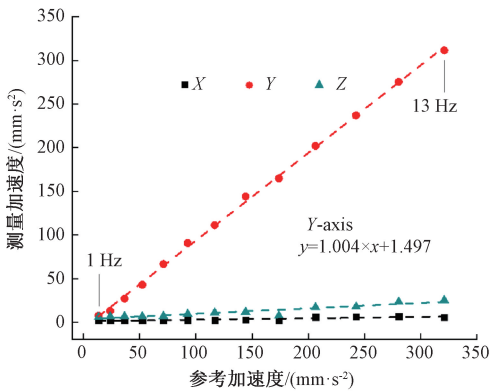
2) 频率响应范围测试

使用如图8所示实验装置标定三维低频加速度计的频率响应范围。与灵敏度标定实验类似,在实验中,分别在加速度计的X、Y和Z轴方向施加振幅固定(X、Y轴:

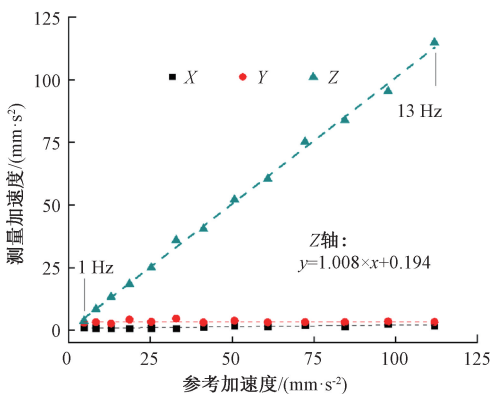
48 μm , Z 轴: 17 μm) 和频率连续 (1 ~ 13 Hz, 间隔为 1 Hz) 的单向简谐振动激励, 然后同时记录参考传感器和加速度计的输出信号, 并将加速度计的输出电压信号转换为加速度值, 然后使用一元线性回归分析的方法, 对参考加速度和测量加速度进行拟合。实验结果如图 10 所示, 本研究三维低频加速度计在 1 ~ 13 Hz 频率范围内的测量加速度值与参考加速度值近似, 在该频率范围内具有良好的响应特性, 与设计值吻合。故本研究所应用的理论建模和参数优化方法具有较高的可靠性。



(a) X-axis frequency response range



(b) Y-axis frequency response range



(c) Z-axis frequency response range

图 10 三维低频加速度计的频率响应范围

Fig. 10 Frequency response range of 3D low-frequency accelerometer

4 结 论

本研究提出了一种高灵敏度和低耦合三维弹性机构, 及其理论设计和参数优化方法。首先通过理论分析确定了三维弹性机构的构型; 然后根据理论建模、参数优化和仿真分析完成了三维弹性机构的设计和优化; 最后将该弹性机构与高灵敏度、低耦合传感系统相结合, 研制了高性能三维低频加速度计系统, 并通过实验测试了加速度计系统的性能参数。根据实验结果, 该三维加速度计的灵敏度优于 $2.0 \text{ V}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$, 耦合误差低于 1.5%, 以及频率响应范围为 1 ~ 13 Hz。该三维弹性机构具有三维等灵敏度和低耦合的特点, 可以通过设定不同的约束条件, 将该弹性机构的测量范围拓展到超低频和中高频, 以适应更广泛的应用场景。

参考文献

- [1] EL-SHEIMY N, YOUSSEF A. Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art and future trends[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-21.
- [2] ANTUNES P, LIMA H, ALBERTO N, et al. Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(11): 1347-1354.
- [3] GUO T, SHAO L, TAM H Y, et al. Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling[J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 20651-20660.
- [4] SLADEN A, RIVET D, AMPUERO J, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-8.
- [5] JOUSSET P, REINSCH T, RYBERG T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-11.
- [6] IGBA J, ALEMZADEH K, DURUGBO C, et al. Performance assessment of wind turbine gearboxes using in-service data: Current approaches and future trends[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 144-159.
- [7] TENG W, DING X, TANG S, et al. Vibration analysis for fault detection of wind turbine drivetrains—A comprehensive investigation[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1686.
- [8] 韩冬, 孙伟, 陈龙, 等. 随钻姿态测量重力加速度自适应

- 应提取算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 17-25.
- HAN D, SUN W, CHEN L, et al. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 17-25.
- [9] LEI Y, LI R, ZHANG L, et al. Optical accelerometers for detecting low-frequency micro-vibrations[J]. Applied Sciences, 2022, 12(8): 3994.
- [10] LU Q, WANG Y, WANG X, et al. Review of micromachined optical accelerometers: From mg to sub- μg [J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(3): 03200045.
- [11] XIE J, AGARWAL R, LIU Y, et al. A three-axis SOI accelerometer sensing with both in-plane and vertical comb electrodes[J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(3): 325-332.
- [12] 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.
- LI K F, JIANG T, GUO X W, et al. Design of three mass block mems triaxial cap-acitive accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 193-201.
- [13] SZERMER M, ZAJAC P, AMROZIK P, et al. A capacitive 3-axis MEMS accelerometer for medipost: A portable system dedicated to monitoring imbalance disorders[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3564.
- [14] GANJI B, HEMMATI K. A new design and optimization of a three-axis MEMS capacitive accelerometer with high dynamic range and sensitivity[J]. Informacije MIDEM, 2020, 50(1): 55-66.
- [15] MOHAMMED Z, ELFADEL I, RASRAS M. Monolithic multi degree of freedom (MDOF) capacitive MEMS accelerometers[J]. Micromachines, 2018, 9(11): 602.
- [16] AMARASINGHE R, DAO D, TORIYAMA T, et al. Simulation, fabrication and characterization of a three-axis piezoresistive accelerometer[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(6): 1691.
- [17] SIM J, KIM D, BAE Y, et al. Six-beam piezoresistive accelerometer with self-cancelling cross-axis sensitivity[J]. Electronics Letters, 1998, 34(5): 497-499.
- [18] TAKAO H, MATSUMOTO Y, ISHIDA M. A monolithically integrated three-axis accelerometer using CMOS compatible stress-sensitive differential amplifiers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(1): 109-116.
- [19] LI C, YANG B, ZHENG X, et al. 2 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ -resolution optomechanical accelerometer employing a three-dimensional MEMS interferometer[J]. Optics Letters, 2022, 47(7): 1883-1886.
- [20] ABOZYD S, TORAYA A, GABER N. Design and modeling of fiber-free optical MEMS accelerometer enabling 3D measurements[J]. Micromachines, 2022, 13(3): 343.
- [21] 李剑芝, 申博豪, 张婉洁, 等. 基于转动支承梁式的光纤光栅低频加速度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 74-82.
- LI J ZH, SHEN B H, ZHANG W J, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on rotating beam for low-frequency vibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 74-82.
- [22] ZHOU R, CHEN F, LI S, et al. Three-dimensional vector accelerometer using a multicore fiber inscribed with three FBGs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(10): 3244-3250.
- [23] JIANG Q, YANG M. Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull-push mechanism[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(11): 115105.
- [24] JIANG Q, YANG M. A high sensitivity vector accelerometer based on tri-axial fiber Bragg grating[J]. Optica Applicata, 2012, 42(4): 901-912.
- [25] WANG H, YAN B, LIANG L. A 3D FBG accelerometer based on two pairs of flexible hinges[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21586-21593.
- [26] WANG H, LIANG L, ZHOU X, et al. New fiber Bragg grating three-dimensional accelerometer based on composite flexure hinges[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4715.
- [27] CHENG Z, JIANG W, LEI Y, et al. Uncertainty evaluation for dynamic identification of a micro contact probe based on the signal transmission chain analysis method[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(12): 125007.
- [28] LI R, LEI Y, CHANG Z, et al. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2910.
- [29] CHU C, CHIU C. Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads[J]. Measurement Science and Technology,

2007, 18(7): 1831.

- [30] LI R, FAN K, HUANG Q, et al. Design of a large-scanning-range contact probe for nano-coordinate measurement machines[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 081503.
- [31] VELDMAN C. ISO 16063; A comprehensive set of vibration and shock calibration standards[C]. *Proceedings of the XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development*, 2006: 1-5.
- [32] LI R, LEI Y, ZHANG L, et al. High-precision and low-cost vibration generator for low-frequency calibration system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(3): 034008.
- [33] LEI Y, LI R, JIANG W, et al. Development of a high-precision two-dimensional coplanar micro-vibration generator [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 105004.

作者简介



雷英俊, 2016 年于合肥工业大学获得学士学位, 2019 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2023 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为江苏大学讲师, 主要研究方向为微纳测试技术及系统。

E-mail: 1000006633@ujs. edu. cn

Lei Yingjun received his B. Sc. degree in 2016 from Hefei University of Technology, received his M. Sc. degree in 2019 from Hefei University of Technology, received his Ph. D. degree in 2023 from Hefei University of Technology. Now he is lecturer in Jiangsu University. His main research interests include micro-nano test technology and system.



许桢英, 1999 年于合肥工业大学获得学士学位, 2004 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为江苏大学教授、博士生导师, 主要研究方向为声、光无损检测理论与技术。

E-mail: xuzhenying@ujs. edu. cn

Xu Zhenying received her B. Sc. degree in 1999 from Hefei University of Technology, received her Ph. D. degree in 2004 from Hefei University of Technology. Now she is professor and doctoral supervisor in Jiangsu University. Her main research interests are in the theory and technology of acoustic and optical nondestructive testing.



李瑞君(通信作者), 2001 年于合肥工业大学获得学士学位, 2005 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2013 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统及精密控制技术与系统。

E-mail: rj-li@hfut. edu. cn

Li Ruijun (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2001 from Hefei University of Technology, received his M. Sc. degree in 2005 from Hefei University of Technology, received his Ph. D. degree in 2013 from Hefei University of Technology. Now he is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology, his main research direction is micro-nano measurement technology and system, optoelectronic detection technology and system and precision control technology and system.