

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.06

高灵敏度低频光学加速度计的设计

李瑞君*, 雷英俊, 范光照

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 在结构健康监测、地震监测和航空航天等领域, 需要准确测量频率低于 10 Hz 和振幅小于 1 mm 的低频微振动, 对应的加速度在 $\text{mg} \sim \mu\text{g}$ 量级。现有商用加速度计的灵敏度多低于 0.5 V/g, 无法满足要求, 故开展了高灵敏度低频光学加速度计的研究。基于加速度计的测量原理, 通过理论建模确定了低频加速度计设计相关的技术要求, 采用簧片和柔性铰链作为弹性元件, 搭配使用单质量块和多质量块, 构建了一维、二维和三维弹性机构; 基于像散、激光三角法和激光自准直等高精度光学传感原理, 设计了高灵敏度的光学传感系统; 最终完成了一维、二维和三维低频光学加速度计的设计, 并通过实验验证了所设计加速度计的性能, 其灵敏度均优于 9 V/g, 分辨力均优于 1 mg, 可以用于低频微振动的测量。

关键词: 光学加速度计; 低频; 高灵敏度

中图分类号: TB96; TH824⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)02-0044-13

Design of high-sensitivity low-frequency optical accelerometer

LI Ruijun*, LEI Yingjun, FAN Kuangchao

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the fields of structural health monitoring, seismic monitoring, and aerospace, low-frequency micro-vibrations with frequencies below 10 Hz and amplitude less than 1 mm need to be measured accurately. The acceleration values of low-frequency micro-vibrations are on the order of $\text{mg} \sim \mu\text{g}$, while the sensitivity of existing commercial accelerometers is mostly below 0.5 V/g, which can no longer meet the requirements. In this paper, high-sensitivity low-frequency optical accelerometers is carried out. Based on the sensing principle of accelerometers, the technical requirements related to the design of low-frequency accelerometers are determined through theoretical modeling, and one-dimensional (1D), two-dimensional (2D), and three-dimensional (3D) elastic mechanisms are constructed by using leaf springs and flexible hinges as elastic elements with single and multiple seismic masses; based on high-precision optical sensing principles such as the principle of image dispersion, laser triangulation, and laser auto-collimation, a high-sensitivity optical sensing system is designed. 1D, 2D and 3D low-frequency optical accelerometers have been designed and their performance has been verified by experiments, with sensitivity better than 9 V/g and resolution better than 1 mg, which can be used for low-frequency micro-vibration measurements.

Key words: optical accelerometer; low frequency; high sensitivity

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52175506)

引用格式: 李瑞君, 雷英俊, 范光照. 高灵敏度低频光学加速度计的设计[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 44-56.

Citation: LI R J, LEI Y J, FAN K C. Design of high-sensitivity low-frequency optical accelerometer[J]. Metrology & measurement technology, 2023, 43(2):44-56.



0 引言

低频微振动特性的研究在精密检测、精密加工、设备故障诊断和地质勘探等领域具有重要意义。此类振动的频率低于10 Hz,且加速度幅值微小,因此,低频加速度计必须具有高灵敏度和高分辨力等特性^[1-2]。但目前满足这些要求的商用低频加速度计系统较少且价格昂贵。

近年来,随着光学传感技术的发展,光学加速度计的研究受到了广泛关注,根据调制方法的不同可将光学加速度计分为光路径调制型、光强度调制型、光相位调制型和光波长调制型四类^[3]。

光路径调制型加速度计的传感光路随被测加速度变化而变化,具有结构简单、成本低的特点。Armstrong等人^[4]于1992年提出了基于改进DVD读取头的光路径调制角度测量系统,具有结构紧凑、精度高的特点。其后,Fan等人^[5-7]基于改进DVD读取头激光测量系统设计了一系列的高灵敏度光学加速度计,实现了1~10 Hz低频响应范围和20 V/g的高灵敏度。此类光学加速度计的灵敏度和分辨力与光路结构和光电探测器性能直接相关。为了提高加速度计的灵敏度和测量范围,需拓宽光学杠杆的范围,并使用高灵敏度和大感光面的光电探测器^[8],增加了加速度计的尺寸和成本。

光强度调制型加速度计的输出光强随被测加速度变化而变化,同样具有结构简单、成本低的优点。Kalenik等人^[9-10]于1998年提出了基于悬臂式光纤的对射光强度调制型加速度计, Lee等人^[11]改进了设计,使用对称式弹性结构代替悬臂光纤来提高加速度计的稳定性。为了进一步提高加速度计的灵敏度, Krishnamoorthy等人^[12]将该光栅应用于光强度调制型加速度计的设计,其灵敏度达到590 V/g;而Hammond^[13]和Tang等人^[14]则通过使用极低共振频率(2.3 Hz)的弹性机构和高灵敏度的光电探测器提高加速度计的灵敏度和分辨力,使其分辨力达到了50 ng。光强度调制型加速度计可以通过简单的结构实现极高的性能,但是由于其对入射光源和外界环境波动的敏感性较高,使用场景受限。

光相位调制型加速度计的输出光相位随被测

加速度变化而变化。根据干涉原理的不同,光相位调制传感系统分为:迈克尔逊干涉(MSI)、马赫-曾德尔干涉(MZI)和法布里-珀罗干涉(FPI)三种。1995年, Pechstedt等人^[15]提出了基于MSI的光学加速度计,将探测光纤缠绕在弹性圆筒,弹性圆筒内置质量块,当存在外部振动激励时,质量块会拉伸或压缩弹性圆筒,引起光纤内光波的相位产生变化。Chen等人通过使用弹性梁^[16]和弹性膜片^[17]代替弹性圆筒,提高了加速度计的低频(≥ 5 Hz)性能。MZI与MSI相比, MZI在光路上取消了参考端、简化了光路,也被应用于光学加速度计的设计。基于MZI加速度计与MSI结构类似,均通过将测量光纤缠绕于弹性元件上,通过测量弹性元件的运动状态实现振动检测^[18-19]。FPI相对于MZI则进一步简化了光路结构,近年来广泛应用于光学加速度计的研发^[20-23]。光相位调制型加速度计均采用光纤作为光的传播途径,具有灵敏度高、结构紧凑、抗干扰等优点,其理论分辨力可达到ng量级,但加工和装配精度与其性能直接相关。

光波长调制型加速度计的输出光波长随被测加速度变化而变化,主要通过光纤布拉格光栅(FBG)实现。FBG的研究开始于1978年^[24-25], Berkoff等人^[26]于1996年设计了第一种FBG加速度计,将FBG安装于弹性材料中,当振动作用于弹性材料时,产生压缩或拉伸,会引起FBG输出光波长变化。除了将FBG安装于弹性材料,还可以将FBG固定在弹性梁上实现振动测量^[27], FBG加速度计具有结构简单、布置方便的优点。近年来,为了提高FBG加速度计的性能,学者们从改进FBG传感结构和加速度计机械结构两个角度进行了研究。Guo等人^[28-29]采用倾斜FBG制作了双锥加速度计,其反射光功率与加速度成正比,通过检测反射光强即可完成加速度检测。Basumallick等人^[30-31]通过在悬臂梁上添加聚合物材料贴片以提高FBG加速度计的灵敏度,这种聚合物材料贴片增加了悬臂梁中轴与FBG轴线之间的距离,提高了加速度计的灵敏度。FBG加速度计具有抗电磁干扰、低损耗和良好的扩展性,但其输出信号可以被温度调制,对环境温度的敏感性较高,使

用时需要进行温度补偿。

本文对世界上现有的光学加速度计系统进行了简要综述。在过去的二十年里,合肥工业大学范光照教授和李瑞君教授的研究团队也对光学加速度计进行了深入研究,在下面的章节中将进行更详细的介绍,包括低频加速度计的传感原理、机械系统、光学系统和综合设计。

1 低频加速度计的传感原理

加速度计的传感原理如图1所示,由牛顿第二定律可得,作用于质量块 m 上的力可以表示为

$$ma = -k(x_m - x_b) - c(\dot{x}_m - \dot{x}_b) \quad (1)$$

式中: x_m 为质量块的位移; x_b 为激励振动的振幅; a 为激励振动的加速度; k 为弹簧的弹性系数; c 为加速度计的阻尼系数。

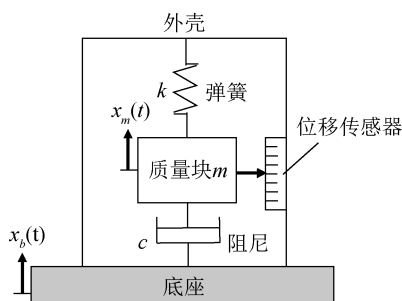


图1 加速度计的传感原理

Fig.1 Principle of accelerometer

质量块和底座之间的相对位移 z 可以表示为

$$z(t) = x_m(t) - x_b(t) \quad (2)$$

假设激励振动为简谐振动,则有

$$x_b(t) = X_b \cdot \cos(\omega_b t) \quad (3)$$

式中: ω_b 为振动的频率。

将 $x_b(t)$ 和 $z(t)$ 带入式(1),得到

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega_b^2 X_b \cos \omega_b t \quad (4)$$

求解式(3),可得

$$z(t) = \frac{\omega_b^2 X_b \cos(\omega_b t - \varphi)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega_b)^2}} \quad (5)$$

式中: ω_n 为加速度计的谐振频率, $\omega_n = (\frac{k}{m})^{1/2}$; ξ 为加速度计的阻尼比, $\xi = \frac{c}{2m\omega_n}$; 加速度计的输出相位特性 φ 可表示为

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{2\xi \left(\frac{\omega_b}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega_b}{\omega_n} \right)^2} \right] \quad (6)$$

此外,由激励振动的加速度为

$$\ddot{x}_b(t) = -\omega_b^2 X_b \cos(\omega_b t) \quad (7)$$

式(4)可以改写为

$$\omega_n^2 z(t) = \frac{\omega_b^2 X_b \cos(\omega_b t - \varphi)}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_b}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\xi\omega_b}{\omega_n}\right)^2}} \quad (8)$$

令

$$H\left(\frac{\omega_b}{\omega_n}\right) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_b}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\xi\omega_b}{\omega_n}\right)^2}} \quad (9)$$

当 $\omega_b \ll \omega_n$ 时,则 $H\left(\frac{\omega_b}{\omega_n}\right) \approx 1$, $\varphi \approx 0$,则有

$$\ddot{x}_b \approx -\omega_n^2 z(t) \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,加速度计的机械灵敏度可以近似为其谐振频率平方的倒数。因此谐振频率越高、相同加速度下质量块的相对位移越小、机械灵敏度越低,故低频加速度计需要有一个较低的谐振频率。

2 加速度计振动传感机构设计

由传感原理可知,振动传感机构的性能直接决定加速度计的灵敏度和分辨力等指标。加速度计的线性频响范围约为其谐振频率的20%,因此,对于检测振动频率范围为0~10 Hz的低频加速度计,其共振频率应为50 Hz左右。根据测量维度可将加速度计分为一维、二维和三维。

2.1 一维振动传感机构设计

图2所示的悬臂梁结构是一种结构简单的一维振动传感机构,悬臂梁一端固定在加速度计的底座,另一端为自由端,固定质量块。悬臂梁的自由端受到集中载荷的作用,其结构可视为“弹簧-质量块”结构的二阶系统,其一阶谐振频率计算式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (11)$$

式中: k 为悬臂梁的弹性系数; M 为系统的等效质量。

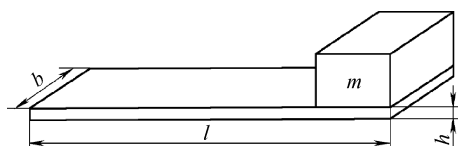


图2 悬臂式一维振动传感机构
Fig.2 Cantilevered 1D vibration sensing mechanism

悬臂式一维振动传感机构的谐振频率与其结构参数的表达式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{35Ebh^3}{(33\rho bhl + 140m)l^3}} \quad (12)$$

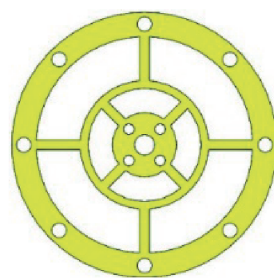
式中： l 、 b 、 h 分别为簧片的长、宽、厚； m 为质量块质量。

由式(11)可知，系统的固有频率与弹性模量 E 、配重质量 m 和悬臂梁的尺寸有关。通过仿真优化，最终确定簧片的尺寸为长300 mm、宽3 mm、厚0.3 mm，簧片的制作材料为65 Mn的弹簧钢，配重质量为2.5 g，其一阶谐振频率为49.32 Hz，可以满足0~10 Hz低频振动的检测需求。

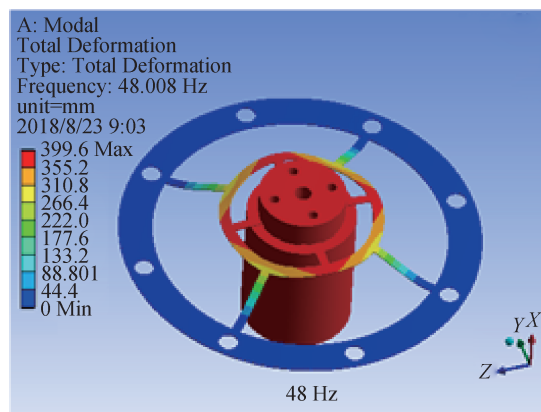
悬臂式一维振动传感机构仅单端固定，当其受到 Z 向振动激励时，质量块会带着悬臂式簧片在敏感方向上摆动，该摆动包括在敏感方向的位移和以固定端为中心的角度偏转，会影响加速度计的检测精度。因此，提出了一种基于中心对称式簧片的改进方案，新的振动传感机构由多个悬臂呈中心对称式分布，其对固有频率的影响效果可等效为多个悬臂的共同作用，如图3(a)所示。对称式一维振动传感机构经过有限元分析软件的仿真和优化，最终获得对称式弹簧片合适的结构参数中配重质量块为6.25 g，簧片的材料为铍青铜，其外径为33 mm，内径为16 mm，厚度为0.1 mm。对称式一维振动传感机构模态仿真结果如图3(b)所示，其一阶谐振频率为48 Hz，可以满足0~10 Hz低频振动的检测需求。

2.2 二维振动传感机构设计

为了检测水平向二维振动，振动传感机构需具有水平向二维自由度，在 Z 方向保持较高的刚度，以降低耦合误差。提出了一种基于二维切口式柔性铰链的二维振动传感机构，如图4所示。该铰链相比普通的圆弧式二维铰链降低了耦合，并提高了 Z 轴的刚度。通过建模分析和有限元仿真，确定了二维振动传感机构的结构参数。柔性



(a) 对称式簧片
(a) Symmetrical leaf-spring



(b) 有限元仿真
(b) Finite element simulation

图3 对称式一维振动传感机构
Fig.3 Symmetrical 1D vibration sensing mechanism

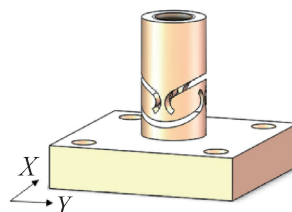


图4 二维切口式柔性铰链
Fig.4 2D notched flexible hinge

铰链的材料选取铍青铜，切口宽度为0.5 mm，中心连接处的厚度为0.35 mm；质量块选用直径为25 mm，高度为15 mm的不锈钢圆柱体。其有限元仿真结果如图5所示，二维振动传感机构在 X 和 Y 方向的谐振频率分别为47.9 Hz和47.4 Hz，可以满足1~10 Hz的二维振动传感。该机构在 X 、 Y 两个方向上均具有较高的灵敏度，且其二维运动相互解耦，可以降低二维加速度计的耦合误差。

2.3 三维振动传感机构设计

单质量块的簧片式一维振动传感机构对于水平向的振动不敏感，而以柔性铰链作为弹性机构的二维振动传感机构则对于竖直向振动不敏感，

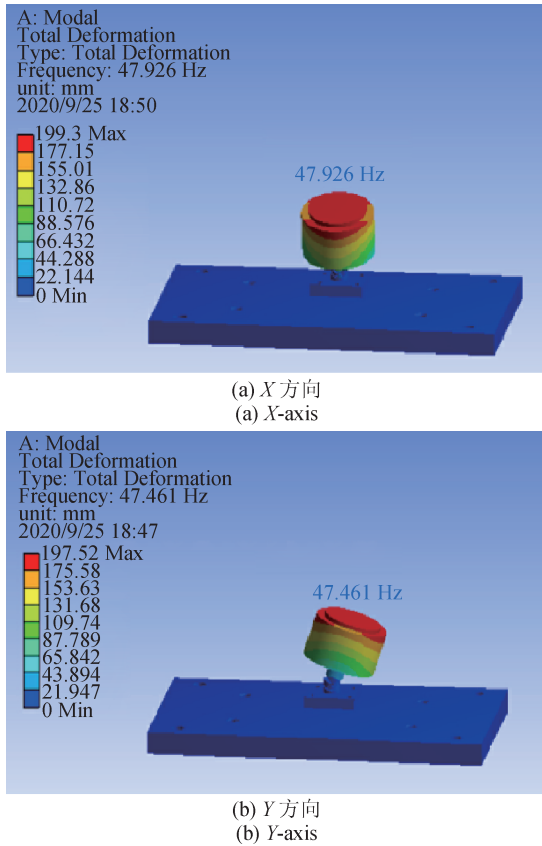


图5 二维振动传感机构的有限元仿真
Fig.5 Finite element simulation of 2D vibration sensing mechanism

这两种机构均难以实现三维振动传感。因此,本文提出了一种基于四质量块和正方形簧片的三维振动传感机构,如图6所示,4个质量块分别固定于正方形簧片4条边的中点处,并通过十字形的悬浮片将4个质量块连为一个整体。

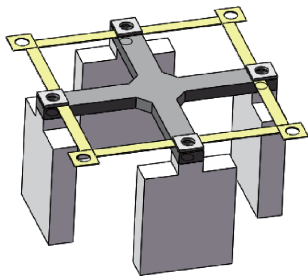


图6 三维振动传感机构
Fig.6 3D vibration sensing mechanism

四质量块显著提高了振动传感机构绕X和Y轴的转动惯量,进而提高了三维加速度计在水平方向的灵敏度。该机构在三维方向的运动方程为

$$\begin{cases} z\text{方向: } m\ddot{z}(t) + K_z[\delta_z(t)] = 0 \\ x\text{方向: } I_A\ddot{\theta}_x(t) + (K_{\theta M} + K_{\theta T})\theta_x(t) = 0 \\ y\text{方向: } I_A\ddot{\theta}_y(t) + (K_{\theta M} + K_{\theta T})\theta_y(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: m 为振动传感机构的等效质量; I_A 为绕X或Y轴的转动惯量; $K_{\theta M}$ 为弯曲刚度; $K_{\theta T}$ 为扭转刚度; K_z 为Z向弹性系数; θ_x 为绕X轴的转角; θ_y 为绕Y轴的转角; δ_z 为Z轴位移。对其进行求解可以得到三维振动传感机构在X、Y和Z方向的谐振频率为

$$\begin{aligned} f_x = f_y &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\theta M} + K_{\theta T}}{I_A}} \\ f_z &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}} \end{aligned} \quad (14)$$

通过建模分析和有限元仿真,确定了三维振动传感机构的结构参数。正方形簧片的材料选用铍青铜,其单边长度为34 mm,宽度为2 mm,厚度为0.15 mm。质量块选用长为15 mm,宽为4 mm,高为18 mm的长方体。有限元仿真结果如图7所示,三维振动传感机构在X、Y和Z方向的谐振频率分别为58.1、58.9和59.9 Hz,可以实现三维低频振动的测量。该机构在X、Y和Z三个方向上均具有较高的灵敏度,且其三维运动相互解耦,可以降低三维加速度计的耦合误差。

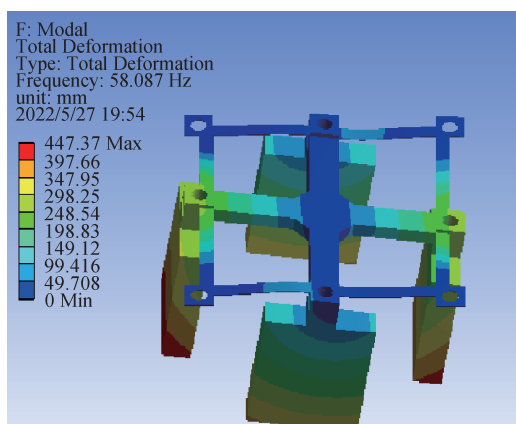
3 加速度计光学测量系统设计

振动传感机构的相对运动包括一维位移和二维角度两种,为了满足这两种运动的精密测量,设计了一系列的光学测量系统。

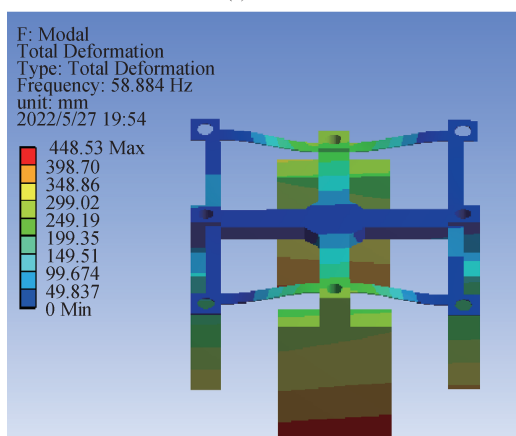
3.1 一维位移测量系统

微位移传感器由DVD读头改造而来,基于像散原理实现位移测量,其结构如图8所示,包括激光二极管、偏振分光镜、1/4波片、透镜和四象限光电探测器。如图9所示,当被测反射镜的位置变化时,光电探测器上的光斑的形状发生变化,进而使光电探测器的输出电信号发生变化。该方法具有分辨力高(1 nm)、精度高等优点,标定后可用于纳米级测量。

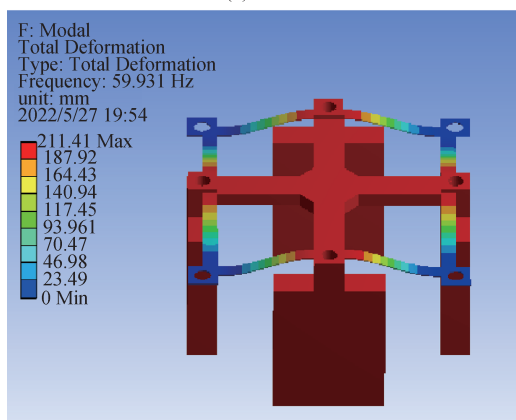
基于像散原理的微位移传感器存在量程较小(4 μm)和难以调节的问题,因此,提出了基于激光三角法的微位移传感器,其原理如图10所示,当被测反射镜的位置改变 Δh 时,光电探测器上的



(a) X方向
(a) X-axis



(b) Y方向
(b) Y-axis



(c) Z方向
(c) Z-axis

图7 三维振动传感机构的有限元仿真

Fig.7 Finite element simulation of 3D vibration sensing mechanism

光斑位置也会改变 Δl 。 Δh 和 Δl 的关系为

$$\Delta l = \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \quad (15)$$

式中: α 为入射激光与被测反射镜之间的夹角, 因此激光三角法可以将位移放大 $1/\sin \alpha$ 倍, 通过调节

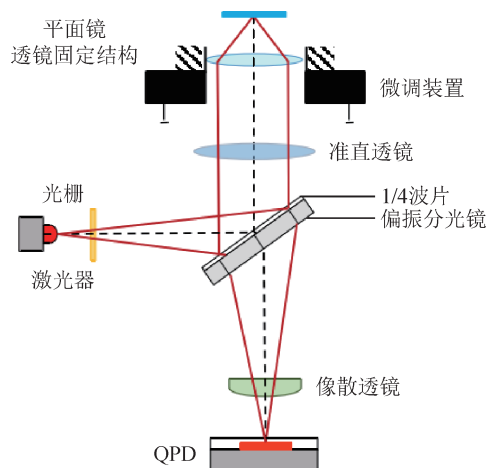
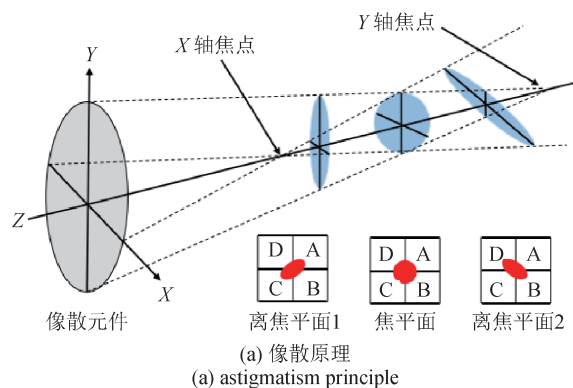
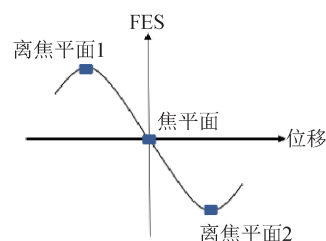


图8 基于像散原理的微位移传感器

Fig.8 Micro-displacement sensor based on astigmatism principle



(a) 像散原理
(a) astigmatism principle



(b) 聚焦误差信号
(b) focusing error signal

图9 传感原理

Fig.9 Sensing principle

α 的大小可以提高加速度计的灵敏度。随着技术的发展, 光电探测器的分辨力已达到亚微米量级, 搭配位移放大光路可以实现 10 nm 的微位移测量。

3.2 二维角度测量系统

为了实现二维角度的高精度测量, 提出了一种基于 DVD 读取头改装而来的二维角度传感器, 其原理如图 11 所示。将 DVD 头原有的音圈电机和聚焦透镜拆除, 由激光器出射的准直光束经偏振分光镜、1/4 波片和准直透镜后被反射镜反射, 反射光通过 1/4 波片和偏振分束棱镜后聚焦于光电探

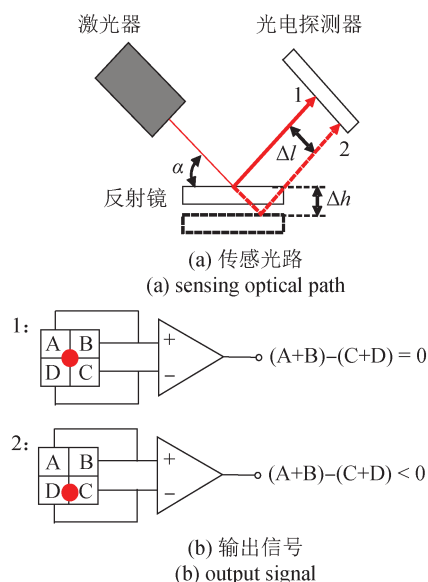


图10 激光三角法传感原理

Fig.10 Laser triangulation sensing principle

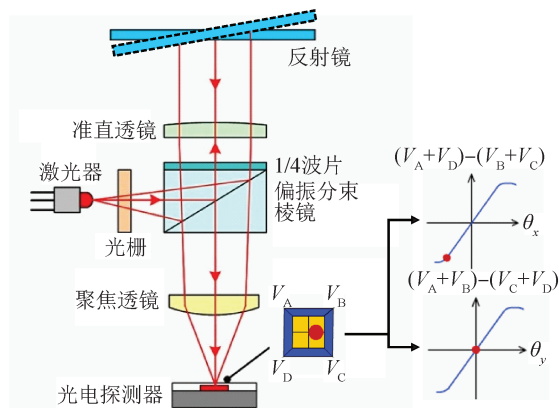


图11 基于DVD读取头的二维角度传感器

Fig.11 2D angle sensor based on DVD pickup head

测器上。入射到光电探测器上的光点的位置随被测镜的二维角度运动发生改变，二维角度可通过式(16)计算。

$$\begin{cases} \theta_x = K_x[(V_A + V_B) - (V_C + V_D)] \\ \theta_y = K_y[(V_A + V_C) - (V_B + V_D)] \end{cases} \quad (16)$$

式中： V_A ， V_B ， V_C 和 V_D 分别为光电探测器各象限的输出电压值； K_x ， K_y 分别为传感器的标定参数。

基于DVD读取头的二维角度传感器结构紧凑，但是其任何光学组件都无法调节，整体量程较小。根据该原理，通过使用分立式光学元件和大感光面的光电探测器，提出了一种改进型二维光学角度传感器，其结构如图12所示。

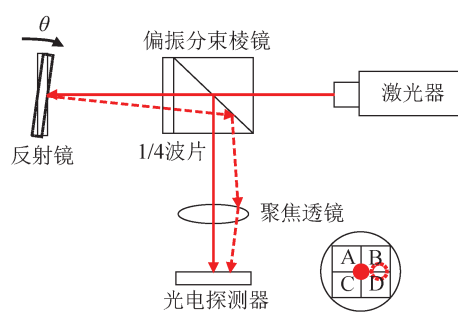


图12 改进型二维角度传感器

Fig.12 Improved two-dimensional angle sensor

4 各种光学加速度计的设计

基于高灵敏度的振动传感机构和光学测量系统，设计并制作了一系列的低频光学加速度计，包括一维、二维和三维，可以适应不同的应用场景。

4.1 一维光学加速度计

基于DVD读取头的悬臂式光学加速度计^[32]，加速度计结构示意图如图13所示，由基座、簧片（自由端固定质量块和反射镜）、改装的DVD读取头、二维微调座和透镜支架等组成。如图14所示，通过标定测试，该加速度计的频率响应范围为3~10 Hz，灵敏度为9.26 V/g。具有分辨力高、低频率、结构简单和成本低廉等特点，但也存在着稳定性较差和调节困难的问题。基于DVD读取头的悬臂式光学加速度计比光强度调制光纤悬臂加速度计^[33-34]的结构复杂，但其在灵敏度（较0.475 V/g）和分辨力性能方面领先，是低频微振动检测应用相关的高性能传感器。

为了提升悬臂式光学加速度计的性能，提出了基于DVD读取头的对称式加速度计^[35-36]，其结

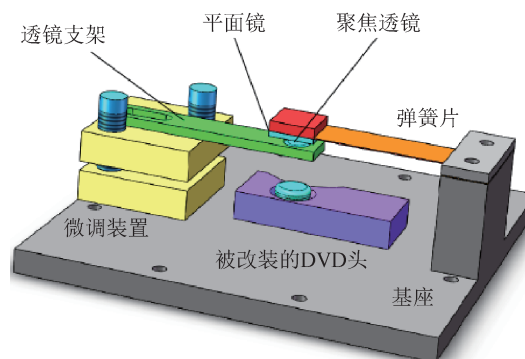
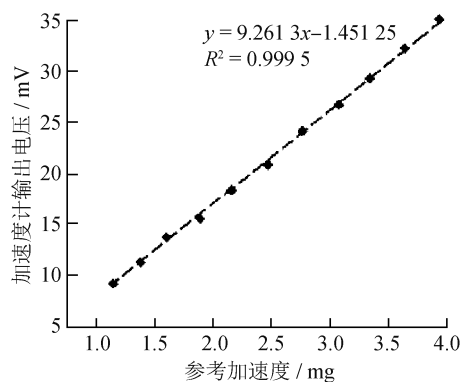
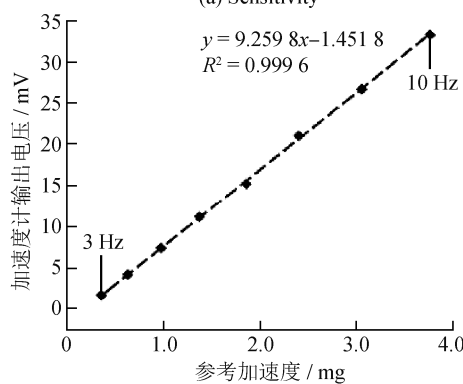


图13 悬臂式光学加速度计

Fig.13 Cantilevered optical accelerometer



(a) 灵敏度
(a) Sensitivity



(b) 低频响应范围
(b) Low frequency response range

图14 悬臂式光学加速度计的灵敏度和频率响应范围

Fig.14 Sensitivity and frequency response range of cantilevered optical accelerometer

构如图15所示,其振动传感机构采用对称式弹簧片作为弹性元件。鉴于微位移传感器的测量范围只有4 μm ,需要微调装置调节聚焦透镜的位置以达到聚焦状态。提出了一种基于精密螺纹副进行二次加工的一维位移微调装置,保留了螺杆外部的精密螺纹,将中心打通孔形成一个中空精密螺纹副,将聚焦透镜嵌入在中空螺杆中,利用中空精密螺纹副实现精密微调,具有结构紧凑、调节方便和成本低廉的优点。如图16所示,通过标定

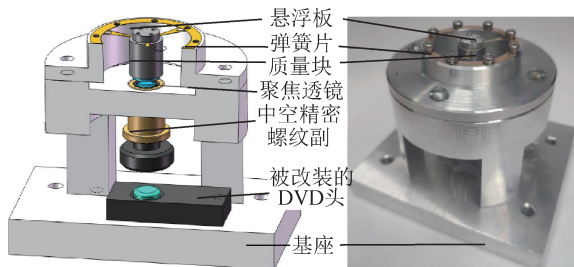
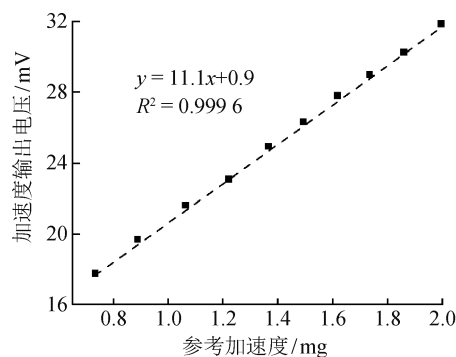
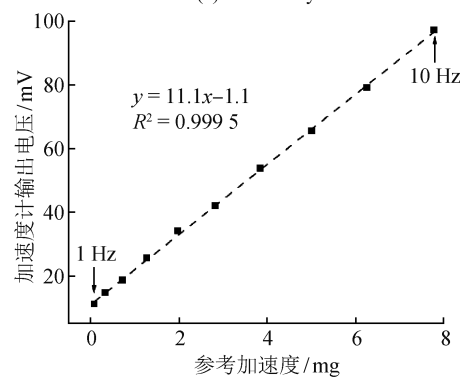


图15 对称式光学加速度计

Fig.15 Symmetrical optical accelerometer



(a) 灵敏度
(a) Sensitivity



(b) 低频响应范围
(b) Low frequency response range

图16 对称式光学加速度计的灵敏度和频率响应范围

Fig.16 Sensitivity and frequency response range of symmetrical optical accelerometer

测试,该加速度计的频率响应范围为1~10 Hz,灵敏度为11.1 V/g。

基于DVD读取头的光学加速度计存在着测量范围较小的问题,因而提出了基于激光三角法测量原理的光学加速度计^[37],其结构如图17所示,整体光路采用自下而上的传播路径。该加速度中入射光路与被测反射镜的夹角为45°,故位移放大倍数为 $\sqrt{2}$ 倍。如图18所示,通过标定测试,该加速度计的灵敏度为17.4 V/g,频率响应范围为0.4

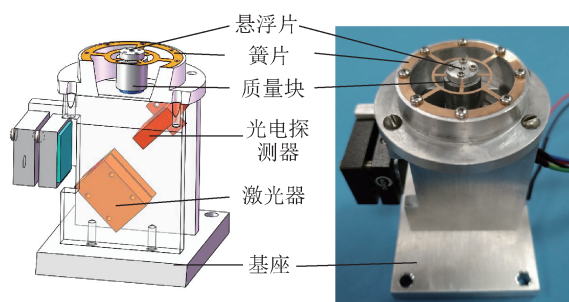
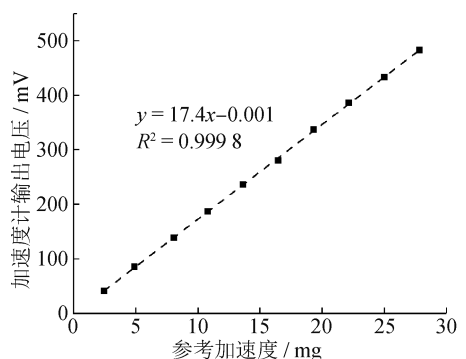
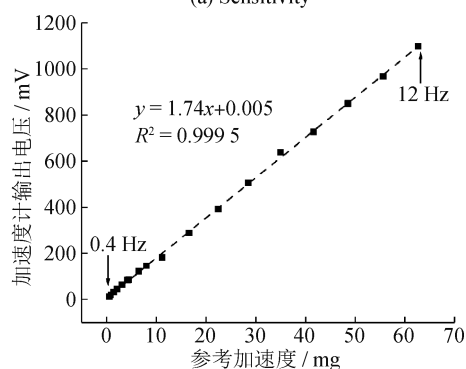


图17 基于激光三角法的对称式光学加速度计

Fig.17 Symmetrical optical accelerometer based on laser triangulation



(a) 灵敏度
(a) Sensitivity



(b) 低频响应范围
(b) Low frequency response range

图18 基于激光三角法的光学加速度计的灵敏度和频率响应范围

Fig.18 Sensitivity and frequency response range of optical accelerometer based on laser triangulation

~12 Hz。对称式簧片结构的光学加速度计的结构优越性也得到其他课题组的重视，樊伟等开发了基于对称式簧片的FBG光学加速度计^[38]，该加速度计将传感系统FBG粘附与簧片上，整体结构较为简单，但是对信号处理系统要求较高。

4.2 二维光学加速度计

基于二维柔性铰链的振动传感机构和二维光学角度传感器，提出了基于DVD读取头的二维光学加速度计^[39]，其结构如图19所示。该加速度计

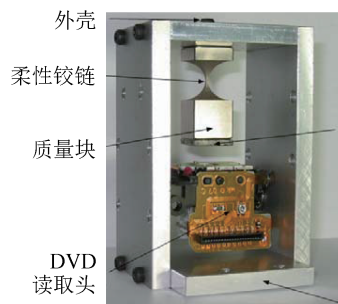
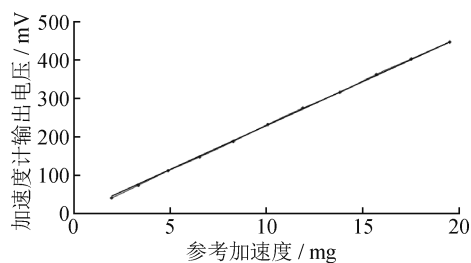


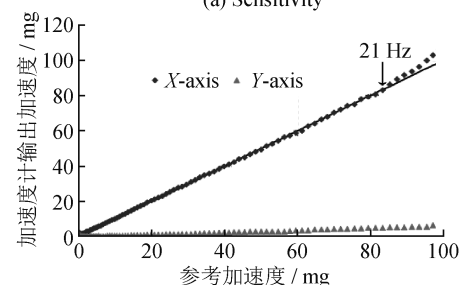
图19 基于DVD读取头的2D光学加速度计

Fig.19 2D optical accelerometer based on DVD pickup head

采用圆弧形的二维柔性铰链作为弹性部件，将二维柔性铰链悬吊于加速度计外壳的顶部，并在柔性铰链的下端固定质量块，DVD读取头安装于加速度计的底座上，整体光路采用自下而上的传播路径。该加速度计使用的柔性铰链最细的部位宽度低于0.5 mm，加工成本较高。通过标定测试，结果如图20所示，该加速度计的灵敏度为22 V/g，频率响应范围为0.5 ~ 23 Hz。



(a) 灵敏度
(a) Sensitivity



(b) 低频响应范围
(b) Low frequency response range

图20 基于DVD读取头的2D光学加速度计的灵敏度和频率响应范围

Fig.20 Sensitivity and frequency response range of 2D optical accelerometer based on DVD pickup head

基于DVD读取头改装的二维角度传感器的测量范围较小，而圆弧形柔性铰链也存在着稳定性较差和易损坏的缺点。因此，提出了基于改进型二维角度传感器和二维切口式柔性铰链的二维光学加速度计^[40]，其传感原理如图21所示，基于激

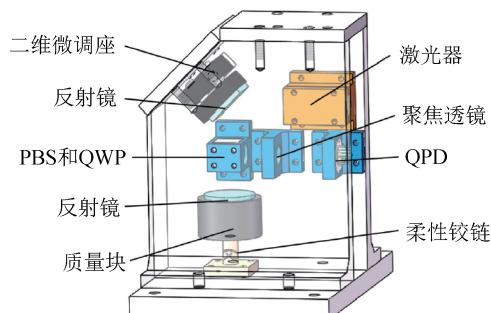


图21 基于激光自准直的2D光学加速度计

Fig.21 2D optical accelerometer based on laser self-collimation

光自准直原理实现,整体光路采用自上而下的方式。如图22所示,该加速度计的灵敏度为25 V/g,频率响应范围为0.8~10 Hz,耦合误差优于1.3%。

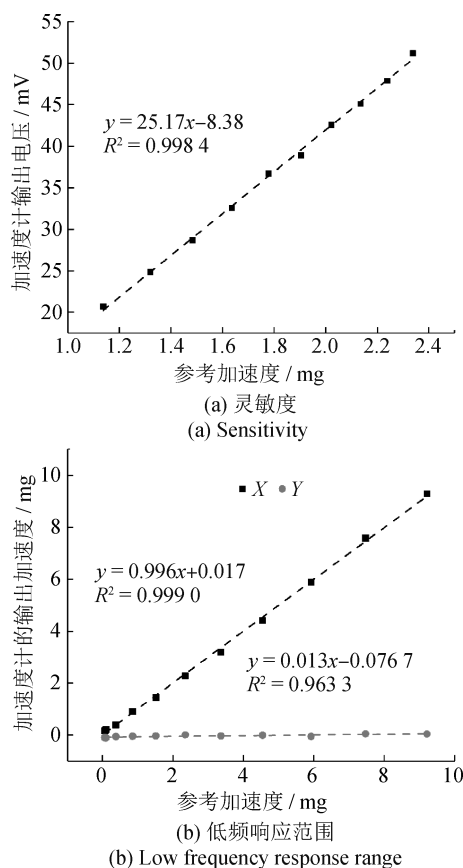


图22 基于激光自准直的2D光学加速度计的灵敏度和频率响应范围

Fig.22 Sensitivity and frequency response range of 2D optical accelerometer based on laser self-collimation

4.3 三维光学加速度计

除了以上介绍的一维和二维加速度计,还提出了具有低耦合特点的三维光学加速度计,该加速度计使用了Z轴位移传感器和X/Y轴二维角度传感器来实现三维加速度检测。由于基于DVD读取头的微位移传感器体积较大,使用高灵敏度电涡流传感器实现Z轴相对位移的测量,其测量范围为100 μm ,分辨力为0.5 nm;基于激光自准直原理的二维角度传感器则用于测量三维振动传感机构X/Y轴相对角度变化。如图23所示,三维加速度计的Z轴位移传感器和X/Y轴角度传感器分别向上和向下布置,高灵敏度电涡流传感器位于顶部,二维角度传感器位于底部。通过标定测试,结果如图24所示,该加速度计的灵敏度为25 V/g,频率

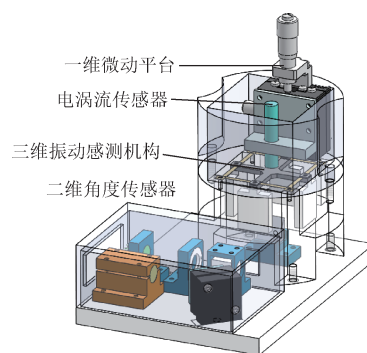


图23 三维光学加速度计

Fig.23 3D optical accelerometer

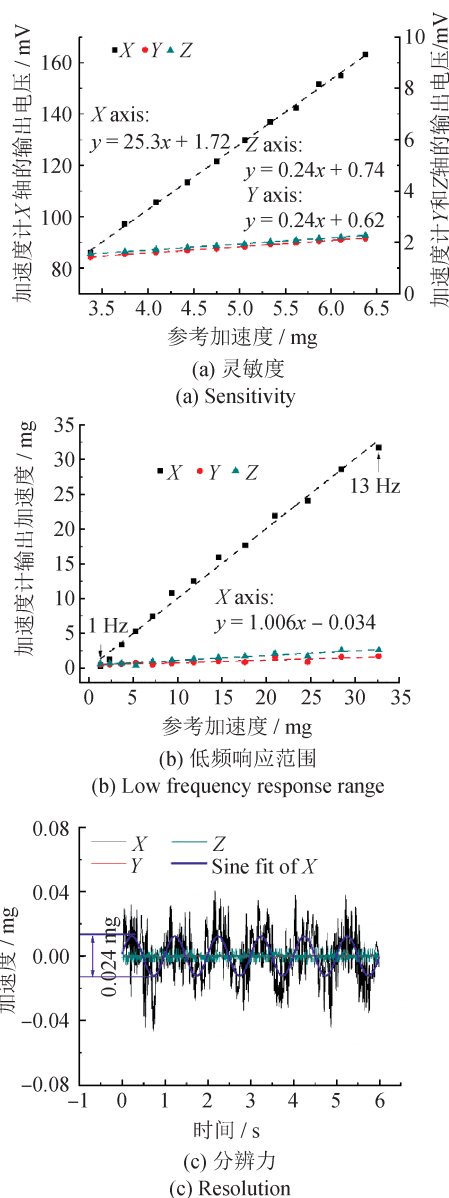


图24 三维光学加速度计的灵敏度、频率响应范围和分辨力

Fig.24 Sensitivity, frequency response range and resolution of 3D optical accelerometer

响应范围为1~13 Hz, 分辨力优于0.03 mg, 耦合误差优于1%。

5 总结与展望

为满足结构健康检测、地震监测和精密测量与加工等领域对于低频微振动测量技术的需求, 文章围绕研制工作频率低于10 Hz和分辨力优于1 mg的高灵敏度低频加速度计系统开展工作。通过对加速度计弹性机构和光学传感系统的设计和优化, 研制了一维、二维和三维低频光学加速度计, 并通过实验验证了这些加速度计的性能, 其灵敏度均优于9 V/g, 分辨力均优于1 mg, 可以用于低频微振动的测量。

本文研制的高灵敏度低频加速度计达到了预期目标, 取得了阶段性的成果。针对目前的研究成果, 在今后的高灵敏度低频加速度计研制中, 还应注意以下两点:

1) 突破传统机加工技术的限制, 将新技术和新材料应用于加速度计系统。

传统机械加工方式存在微小尺寸难以加工、加工精度较低、以及加工过程中的应力会引起零件变形等缺点。在设计低频加速度计时, 需要通过增加零件尺寸、增加零件安装冗余度以及在设计中使用微调座的方法来克服。如果能在加速度计的设计中部分使用MEMS器件加工和装配技术(例如使用MEMS技术加工三维弹性机构), 则可以显著缩小加速度计体积、提高加速度计的集成度、减小加速度计调整的工作量。

2) 进一步研究高灵敏度传感方法, 实现加速度计性能的再次突破。

本研究中使用基于几何光学原理的光学传感技术, 通过理论建模和参数优化, 实现了加速度计性能的提升, 但几何光学存在着一定的极限性, 难以进一步提高加速度计的性能。近年来, 基于波动光学原理和基于光子晶体技术等新兴光学传感技术发展迅猛, 有望用来进一步提升加速度计的性能。

参考文献

[1] GOYAL D, PABLA B. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health

monitoring: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(4): 585-594.

[2] OU J, LI H. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(3): 219-231.

[3] LEI Y J, LI R J, ZHANG L S, et al. Optical accelerometers for detecting low-frequency micro-vibrations[J]. Applied Sciences, 2022, 12(8): 3994.

[4] ARMSTRONG T R, FITZGERALD M P. An autocollimator based on the laser head of a compact disc player[J]. Measurement Science and Technology, 1992, 3(11): 1072.

[5] CHU C L, LIN C H. Development of an optical accelerometer with a DVD pick-up head[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(12): 2498.

[6] LIU Y C, FAN K C, CHU C L, et al. Development of an optical accelerometer for low-frequency vibration using the voice coil on a DVD pickup head[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(8): 084012.

[7] CHU C L, LIN C H, FAN K C. Two-dimensional optical accelerometer based on commercial DVD pick-up head[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 18(1): 265.

[8] FENG X Y, XU P, LI R J, et al. Development of a high-resolution touch trigger probe based on an optical lever for measuring micro components[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 6466-6475.

[9] KALENIK J, PAJAK R. A cantilever optical-fiber accelerometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 68: 350-355.

[10] BARBOSA F R, BORIN F, ARAKAKI A, et al. A novel optical accelerometer[C]// SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005. IEEE, 2005: 1-4.

[11] LEE S J, CHO D W. Development of a micro-opto-mechanical accelerometer based on intensity modulation[J]. Microsystem Technologies, 2004, 10(2): 147-154.

[12] KRISHNAMOORTHY U, OLSSON III R H, BOGART G R, et al. In-plane MEMS-based nano-g accelerometer with sub-wavelength optical resonant sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 145: 283-290.

[13] MIDDLEMISS R P, SAMARELLI A, PAUL D J, et al. Measurement of the earth tides with a MEMS gravimeter[J]. Nature, 2016, 531(7596): 614-617.

- [14] TANG S, LIU H, YAN S, et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2019, 5: 45.
- [15] PECHSTEDT R D, JACKSON D A. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(16): 3009–3017.
- [16] CHEN C, DING G, ZHANG D, et al. Michelson fiber-optic accelerometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(9): 3123–3126.
- [17] CHEN C, ZHANG D, DING G, et al. Broadband Michelson fiber-optic accelerometer[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(4): 628–630.
- [18] RIVERA H L, GARCÍA-SOUTO J A, SANZ J. Measurements of mechanical vibrations at magnetic cores of power transformers with fiber-optic interferometric intrinsic sensor[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(5): 788–797.
- [19] ZENG N, SHI C Z, ZHANG M, et al. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging[J]. *Optics Communications*, 2004, 234(1–6): 153–162.
- [20] LIU B, ZHONG Z, LIN J, et al. Extrinsic Fabry-Pérot cantilever accelerometer based on micromachined 45° angled fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2196–2203.
- [21] LIN Q, CHEN L, LI S, et al. A high-resolution fiber optic accelerometer based on intracavity phase-generated carrier (PGC) modulation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 22(1): 015303.
- [22] GUZMÁN CERVANTES F, KUMANCHIK L, PRATT J, et al. High sensitivity optomechanical reference accelerometer over 10 kHz[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(22): 221111.
- [23] DAVIES E, GEORGE D S, GOWER M C, et al. MEMS Fabry-Pérot optical accelerometer employing mechanical amplification via a V-beam structure[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 215: 22–29.
- [24] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647–649.
- [25] KAWASAKI B S, HILL K O, JOHNSON D C, et al. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(2): 66–68.
- [26] BERKOFF T A, KERSEY A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1677–1679.
- [27] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B A, et al. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1605–1607.
- [28] 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.
- [29] HUANG Y, GUO T, LU C, et al. VCSEL-based tilted fiber grating vibration sensing system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1235–1237.
- [30] BASUMALLICK N, CHATTERJEE I, BISWAS P, et al. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1): 108–115.
- [31] BASUMALLICK N, BISWAS P, DASGUPTA K, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194: 31–39.
- [32] 李瑞君, 常振鑫, 雷英俊, 等. 基于DVD光学读取头的悬臂式低频加速度计[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2): 10–17.
- LI R J, CHANG Z X, LEI Y J, et al. Low-frequency accelerometer based on DVD pick-up head and cantilever[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2): 10–17. (in Chinese)
- [33] WU M, HONG L, LI Y. A Novel Optical Accelerometer Based on Slant-Ended Fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11673–11681.
- [34] 吴明泽, 洪连进. 基于强度解调的低成本光纤悬臂式加速度计[J]. *压电与声光*, 2022, 44(3): 377–380.
- WU M Z, HONG L J. Low-cost fiber cantilever accelerometer based on intensity demodulation[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(3): 377–380. (in Chinese)
- [35] LI R J, CHANG Z X, LEI Y J, et al. A low-frequency micro accelerometer based on three-lobed leaf spring and a focus probe[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1–12.
- [36] CHENG Z Y, LIU L Y, LEI Y J, et al. Modeling and im-

- provement of a low-frequency micro-accelerometer [J].
Review of Scientific Instruments, 2021, 92(2): 025002.
- [37] 樊伟, 冯德全, 乔学光. 基于膜片式悬臂梁的低频光纤光栅加速度计(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10): 173-182.
- FAN W, FENG D Q, QIAO X G. Low-frequency fiber bragg grating accelerometer based on diaphragm-type cantilever beam (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10): 173-182. (in Chinese)
- [38] LI R J, LEI Y J, CHANG Z X, et al. Development of a high-sensitivity optical accelerometer for low-frequency vibration measurement[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2910.
- [39] CHU C L, LIN C H, FAN K C. Two-dimensional optical accelerometer based on commercial DVD pick-up head [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 18(1): 265.
- [40] LEI Y J, LI R J, CHEN R X, et al. A high-precision two-dimensional micro-accelerometer for low-frequency and micro-vibrations [J]. Precision Engineering, 2021, 67: 419-427.
- [41] 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.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 李瑞君, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳米测量技术和光电检测技术等。