

一种基于双端固定梁的高灵敏度光纤加速度传感器

任仲杰 王海林* 朱日宏 薛燕 李珊珊 徐珩

南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094

摘要 光纤加速度传感器凭借其优势,近年来受到越来越多的关注。在梁式传感器的基础上,提出了一种基于双端固定梁的光纤传感器,其利用细小数值孔径单模光纤盘贴在梁上,形成传感光纤。分析了单模光纤最小的弯曲半径,从而可以在不带来弯曲损耗的前提下,尽可能多地盘贴光纤于梁臂上,提高其灵敏度。同时因为其双端固定的结构,极大地降低了其横向灵敏度,有利于制作三维传感器。理论上分析了该结构的传感器的共振频率,同时对其灵敏度进行了分析。设计了传感器测试装置,实验验证了传感器的响应线性,并对传感器的共振频率进行了标定。提出的传感器固有频率在360 Hz,在100 Hz处灵敏度高达3300 rad/g,可以有效地用于低频加速度的检测。

关键词 传感器; 双端固定梁; 高数值孔径单模光纤; 高灵敏度; 低频加速度

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020601

A Fiber Optic Accelerometer with High Sensitivity Based on Two-End Fixed Beam

Ren Zhongjie Wang Hailin Zhu Rihong Xue Yan Li Shanshan Xu Hang

Institute of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Fiber optic accelerometer receives more and more attention in recent years due to its advantages. A fiber optic accelerometer based on two-end fixed beam is presented, which is on the basis of the beam sensors. A kind of small-diameter single-mode optical fiber with high numerical aperture is wrapped on the beam as the sensing fiber. The minimum bending radius of the single-mode is analyzed, thereby more fiber can be affixed to the beam arm without any bending loss and the sensitivity is enhanced. The transverse sensitivity is greatly reduced due to the double-ended fixed structure which is convenient for the production of three-dimensional sensor. The nature frequency of the sensor and the sensitivity are analyzed theoretically. The linearity of the sensor response is analyzed by experiments. The sensor presented has the natural frequency around 360 Hz, and its sensitivity up to 3300 rad / g at 100 Hz. It can be used to detect low-frequency acceleration effectively.

Key words sensors; double-end fixed beam; single-mode optical fiber with high numerical aperture; high sensitivity; low frequency acceleration

OCIS codes 060.2370; 060.2430; 280.4750; 120.5050

1 引言

光纤传感器是20世纪70年代中期发展起来的技术,目前航空航天中的制导系统,石油勘探地震的检波系统,急需具有抗干扰能力强、灵敏度极高、测量动态范围大的高性能加速度传感器。基于光调制机理的光纤加速度传感器可满足上述需求。近十几年来的研究与应用表明,光纤加速度传感器的许多性能参数都远优于传统振动传感器,表现出良好的应用前景,越来越受到重视,其中干涉型光纤加速度传感器还具备动态范围大、灵敏度高的特点,成为目前光纤传感的研究热点之一^[1-6]。

光纤加速度传感器通常结构为一个质量-弹簧系统^[7]。“光纤”被固定在“弹簧”上,比如埋在顺变材料中^[2]、固定在弹性梁表面等。若“光纤”为光纤光栅^[3],则加速度的出现使得“弹簧”变化,使得光纤光栅反射的中心

收稿日期: 2015-06-14; 收到修改稿日期: 2015-07-13; 网络出版日期: 2016-01-08

作者简介: 任仲杰(1991—),男,博士研究生,主要从事光纤传感以及相位解调方面的研究。E-mail: 1150219892@qq.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学精密检测方面的研究。E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

*通信联系人: hailin@njust.edu.cn

波长发生变化,从而检测加速度信息,若“光纤”为普通的光传输光纤,则“弹簧”变化引起该光纤与另一个固定的参考光纤的相对长度发生变化,从而引起光纤光相位发生变化,检测加速度信息。后者根据测量光纤与参考光纤之间的结构关系,可把干涉型光纤加速度传感器分为迈克尔孙型、马赫—曾德尔型等。

低频信号对于地震波有着重要的意义,在地震预防、地质勘探和新能源开发等方面都有广泛的应用。低频、甚低频信号检测将是今后光纤传感器发展的重要方向,同时探测低频信号是目前研究的一大热点与难题,1998年,Todd等^[8]首次提出梁式加速度传感器,其具有结构简单、成本低廉和灵敏度高等优点。本文提出了一种基于双端固定梁结构的光纤迈克尔孙型加速度传感器。在用聚碳酸酯(PC)板或者碳纤维板材料制成的悬梁上下表面分别固定光纤,形成光纤迈克尔孙干涉仪的两个臂。振动使得带有质量块的固定梁上表面压缩,下表面伸长,且盘在梁表面的两根光纤可以很长(每根可以达到几十米),这使得传感器具有非常高的灵敏度。双端固定,传感器对其他方向的振动不灵敏,这有利于形成三维结构^[9]。由于梁的材料、几何尺寸可以任意选择,方便选择所需共振频率。且其因具有高灵敏度、高分辨率、低失真度等优点,可用于石油探测、地震波检测方面。

2 传感器的基本原理和结构

光纤迈克尔孙型加速度传感器的原理如图1(a)所示(LD:激光二极管,PIN:相移开关),1550 nm波长的半导体激光从光纤进入3 db耦合器,经耦合器分成相等强度两束分别进入干涉仪两臂,经法拉第旋光反射镜反射,最终被光电检测器接收,由于两臂光纤很长,且光纤非保偏,进入光电检测器的光强受光偏振方向的影响会发生变化,对测量产生不利的影响,法拉第旋光反射镜的使用可有效解决这一问题。传感器的基本结构如图1(b)所示,干涉仪两光纤臂分别盘贴在弹性板的上下表面,上下对称的质重块,固定在弹性板中心。弹性板两端固定在基座上,形成双端固定梁结构。

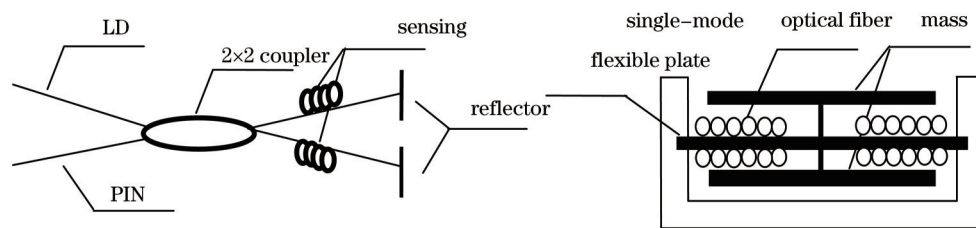


图1 传感器原理和结构图。(a)传感器的简单原理;(b)传感器的基本结构

Fig.1 Principle and structure of sensor. (a) Simple principle of sensor; (b) basic structure of sensor

由弹性力学知识可知,梁的形变正比于传感单元质量块振动的加速度,而梁的形变又会改变传感光纤长度和折射率的相对变化,从而改变其相位。该结构为推挽式传感结构,干涉仪两臂中的光相位改变量大小相等符号相反,和传统的一路传感一路参考的光纤干涉结构相比,可以有效提高其灵敏度。同时,由于干涉仪的两臂处于相同的噪声环境中,可以大大降低噪声水平^[9]。

为了分析传感光纤在振动信号下的响应,将传感器简化为简单的双端固定梁模型,如图2所示,其中 x , y 表示振动方向。

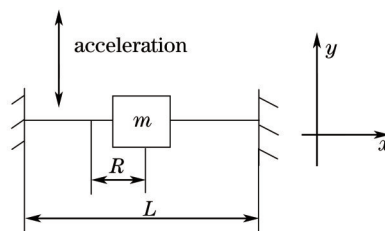


图2 双端固定梁

Fig.2 Two-end fixed beam

由弹性力学知识可知^[10-12],该模型属于弹簧—质量系统,梁的等效刚度为

$$K = \frac{8EBh^3}{L^3}, \quad (1)$$

式中 B 为梁的宽度, h 为梁厚度, L 为梁的长度, E 为由 PC 板胶水以及细径光纤组成的等效梁的弹性模量, 固有角频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} = 2 \sqrt{\frac{2EBh^3}{mL^3}}, \quad (2)$$

固有频率为

$$f_0 = \omega_0/2\pi = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2EBh^3}{mL^3}}. \quad (3)$$

令 $\frac{1}{\pi} \sqrt{2} = A$, 有

$$f_0 = A \sqrt{\frac{EBh^3}{mL^3}}. \quad (4)$$

由(4)式可知, 系统的共振频率与梁的长、宽、厚度以及材料有关, 同时, 与质量块的质量有关。调整这些参数, 能够得到合适的共振频率。

当系统受到 y 方向加速度 a 时, 质量为 m 的质量块将受到惯性力的作用, 惯性力的大小为

$$F = ma. \quad (5)$$

根据材料力学可知, 距离中心长度为 R 的挠度^[13]为

$$\omega(R) = \omega_0 \left(1 - 3\frac{R}{L} + \frac{4R^3}{L^3} \right), \quad (6)$$

$$\omega_0 = \frac{mL^3}{4EBh^3} a. \quad (7)$$

双端固定梁传感器梁表面应变和挠度之间的关系为

$$\varepsilon(R) = \frac{\Delta R}{R} = \frac{h}{2} \frac{d^2 \omega}{dR^2}. \quad (8)$$

将(5)式代入(7)式中, 得

$$\varepsilon(R) = \frac{12\omega_0 H}{L^3} R = \frac{3ma}{EBh^2} R. \quad (9)$$

令 $\frac{3m}{EBh^2} = C$, 有

$$\varepsilon(R) = CRa. \quad (10)$$

对于传感光纤来说, 传感光纤上某一点的轴向应变就对应于该位置长度方向上的形变量, 运用积分计算, 得到传感光纤总的长度改变量

$$\Delta L = \int \varepsilon(R) dl, \quad (11)$$

从而得到传感光纤的相位变化量

$$\Delta \varphi = C_1 \Delta L, \quad (12)$$

式中 C_1 为光纤传播常数, 光纤折射率和自由空间的波数有关, 对于给定光纤, 它是一个常量。

同时由(10)式可得, 弹性梁的灵敏度为

$$S(R) = \frac{\varepsilon(R)}{a} = \frac{3m}{EBh^2} R. \quad (13)$$

由(4)式和(13)式可以看出, 该传感结构的共振频率和灵敏度之间相互矛盾, 所以实际应用中, 可以根据实际探测的频率范围选择合适的参数, 满足频率探测的同时, 尽可能获得更高的灵敏度。

3 传感光纤盘贴

单模光纤密集有序地单层或者多层盘贴在弹性板上下表面, 如图3所示。

如图3所示, 梁的长度为 L , 盘贴最小直径为 D_1 , 盘贴最大直径为 D_2 。理论上讲, 盘贴的光纤总长度越长, 其灵敏度越高。设光纤距离梁中心距离为 R , 光纤的盘贴直径为 d , 光纤紧密盘贴。

根据图3, 结合(12)式得, 传感光纤总的改变量为

$$\Delta L = Ca \left\{ 4(D_2 - D_1) \int_0^{L_1/2} R dR + 2 \int_{D_1}^{D_2} \left[\frac{\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2}{2} + dL_1/2 \right] dd \right\} = Ca \left[\frac{\pi}{12} (D_2^3 - D_1^3) + \frac{L_1}{2} (D_2^2 - D_1^2) + \frac{L_1^2}{2} (D_2 - D_1) \right], \quad (14)$$

代入(12)式得

$$\Delta \varphi = C_1 Ca \left[\frac{\pi}{12} (D_2^3 - D_1^3) + \frac{L_1}{2} (D_2^2 - D_1^2) + \frac{L_1^2}{2} (D_2 - D_1) \right]. \quad (15)$$

由(15)式可知,当各参数保持不变,即传感器的几何特性和材料都确定时, $C_1 C \left[\frac{\pi}{12} (D_2^3 - D_1^3) + \frac{L_1}{2} (D_2^2 - D_1^2) + \frac{L_1^2}{2} (D_2 - D_1) \right]$ 为定值,被测加速度与光纤信号的相位变化量将会有固定的线性关系。通过实验可对传感器的灵敏度进行标定,后可用于实际光纤传感应用。

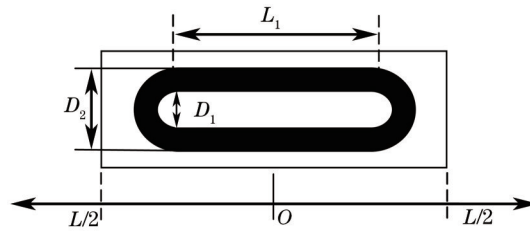


图3 传感光纤布局(黑色部分为光纤)

Fig.3 Layout of sensing fiber (black part is optical fiber)

采用高数值孔径细径单模光纤作为传感光纤,是因为其可获得相对更高的灵敏度,相对于普通光纤有更小的弯曲半径,同时由于其可允许很小的弯曲半径,使传感器可以做得很小。光纤弯曲半径过小仍会引起能量损耗。具体以长飞公司生产的RC 1550 80-21/165型光纤为例,为了验证该光纤的最小盘贴直径 D_1 ,利用激光光源对光纤的弯曲损耗进行了实验,实验结果如表1。

表1 能量输出随光纤弯曲直径的变化情况

Table 1 Output energy with change in fiber bending diameter

Bending diameter D_1 /mm	11	10	9	8	7	6	5
Output energy / μ W	714.4	714.4	714.4	714.4	714.4	714.3	705.5

如表1所示,当光纤没有弯曲时,能量输出为714.4 μ W。

直径大于7 mm时,不会有损耗,大于6 mm时,损耗很小,直径等于5 mm时损耗比较明显。

为了确保盘贴光纤没有损耗,选择最小盘贴直径为8 mm,同时根据弹性板的长宽确定最大盘贴半径,从而尽可能获得更大的灵敏度。

4 加速度传感器的实验测试

根据以上分析,该结构的传感器在理论上是可行的。通过实验验证该结构传感器的可行性,实验测试原理图如图4所示,采用的激光光源是自制的超低相位噪音激光光源系统(LP-NLS),传感器部分放在标准振动台上,通过相位调制结合解调算法解调出振动信息。为了电路解调需要,使用非平衡迈克耳孙干涉仪,由

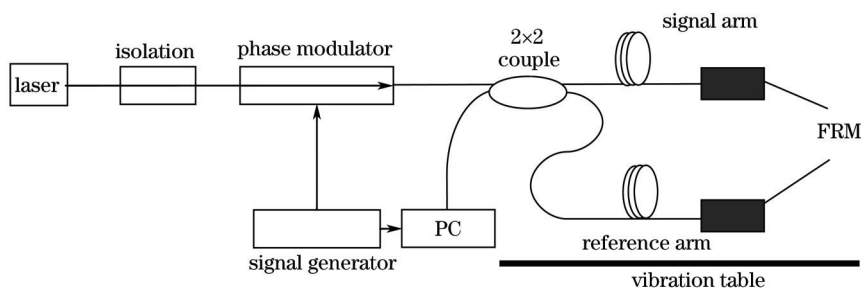


图4 光纤加速度传感器测试原理图

Fig.4 Schematic of test principle of fiber accelerometer

第2节可知,干涉仪两臂由传感光纤组成,控制两臂长度差为2.8 m。将自制的传感器固定在振动源上,并利用标准的压电式传感器作为对比,验证自制传感器的可行性。

4.1 迈克耳孙型光纤传感器原理

当没有振动和调制时,从2×2耦合器输出的光信号为

$$I = I_1 + I_2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\delta), \quad (16)$$

式中 I_1, I_2 为相干光光强, $\Delta\delta$ 为相位差,是由两干涉臂不平衡造成的,具体表达式为

$$\Delta\delta = \frac{2n(L_1 - L_2)}{C}, \quad (17)$$

L_1 和 L_2 分别表示干涉仪的两臂长, n 为介质折射率, C 为光在真空中的传播速度,当振动台产生加速度为 a 的正弦振动时,光纤产生相位幅值为 $\Delta\varphi$ 的正弦振动,设振动频率为 ω 。代入(16)式,可得

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\delta + \Delta\varphi \cos(\omega t)], \quad (18)$$

然后利用图4所示方法,利用相位调制,结合解调算法,解出振动相位变化信息。

4.2 加速度传感器响应的线性度分析

由振动源给出不同的加速度,采用4种不同质量的传感器结构进行测量,测得的50 Hz下传感器线性度如图5所示。

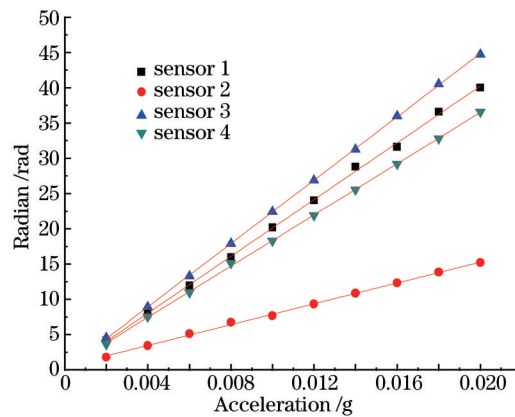


图5 四种不同质量块的传感器的线性度

Fig.5 Linearity of sensors with different mass

由图5可知,四种不同质量块的传感器拟合结果都在0.998以上,证明提出的这种结构的加速度传感器拥有良好的线性度。

同时,通过实验验证了其横向的灵敏度小于纵向灵敏度的1%,有利于制作成三维传感器。

4.3 加速度传感器的频率响应

控制加速度0.01 g不变,改变振动信号的频率,测得的加速度传感器的频率响应如图6所示。

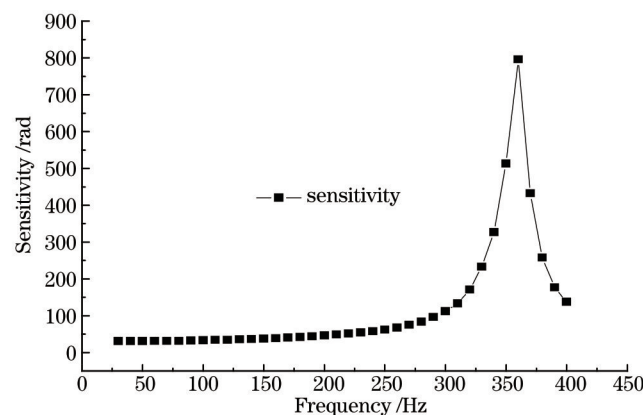


图6 传感器的响应曲线

Fig.6 Sensitivity of sensor as a function of frequency

由图6可知,该传感器的共振频率在360 Hz左右,在100 Hz处灵敏度达到3300 rad/g,适合探测100 Hz以下的低频信号。由(4)式和(9)式可知,增加质量块的质量、减少梁的厚度和宽度会增加传感器的灵敏度,但同时会降低其共振频率。同时制作出了共振频率在130 Hz左右,在100 Hz处灵敏度达到6000 rad/g以上的传感器,适用于对50 Hz以下的低频加速度信号的测量。针对不同使用需求,可以采用测试标定来选择合适的传感器参数,进而不断地优化传感器的设计。

5 结 论

提出了一种基于双端固定梁的高灵敏度光纤传感器,利用高数值孔径的细径单模光纤作为传感光纤,理论分析了光纤传感器的固有频率与灵敏度,分析了光纤的最小弯曲半径,并通过实验验证了其良好的线性度与高灵敏度,实验结果表明,传感器共振频率在360 Hz左右,在100 Hz处的灵敏度达到3300 rad/g,适合低频信号的检测。

参 考 文 献

- 1 Fuxiang Qin, Honggang Li, Wande Fan, *et al.*. Experimental study on vibration frequency response of micro-bend optic-fiber sensor[J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(7): 556-559.
- 2 Lv Wenlei, Pang Meng, Wang Liwei, *et al.*. Study on optic fiber gradient hydrophone based on composite structures of compliantly variable cylinder and diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 340-346.
吕文磊, 庞 盟, 王利威, 等. 基于顺变柱体和膜片复合结构的压差式光纤矢量水听器研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 340-346.
- 3 Li Lan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu, *et al.*. A temperature independent fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(11): 1618-1620.
李 岚, 董新永, 赵春柳, 等. 一种对温度不敏感的光纤布拉格光栅加速度计[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(11): 1618-1620.
- 4 Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1177-1182.
马 宾, 徐 健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1177-1182.
- 5 Ding Guilan, Liu Zhenfu, Cui Yuming, *et al.*. An all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 340-343.
丁桂兰, 刘振富, 崔宇明, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器[J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 340-343.
- 6 Yan Zhigang, Ding Guilan, Chen Caihe, *et al.*. Three-component all-fiber acceleration seismometer and digital processing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 23(12): 1413-1417.
严志刚, 丁桂兰, 陈才和, 等. 三分量全光纤加速度检波器及数字处理系统[J]. *光学学报*, 2003, 23(12): 1413-1417.
- 7 Lopez-Higuera J M, Morante M A, Cobo A. Simple low frequency optical fiber accelerometer with large rotating machine monitoring applications[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(7): 1120-1130.
- 8 Todd M D, Johnson G A, Althouse B A, *et al.*. Flexural beam-based fiber Bragg rating accelerometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1605-1607.
- 9 Mcdearmon G F. Theoretical analysis of a push-pull fiber-optic hydrophone[J]. *Journal Lightwave Technol*, 1987, 5(5): 647-652.
- 10 Theoretical Mechanics Department of Harbin Institute of Technology. *Theoretical Mechanics*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1987: 137-138.
哈尔滨工业大学理论力学教研室. *理论力学*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987: 137-138.
- 11 Zhao Jiujiang. *Mechanics of Materials*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1987: 137-138.
赵九江. *材料力学*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987: 137-138.
- 12 Wang Wei, Hao Yan. The design and analysis of the piezoresistive accelerometer with clamped-clamped beam structure [J]. *Sensor Technology*, 2003, 22(10): 30-32.
王 伟, 郝 雁. 压阻式加速度计双端固支梁结构的设计与分析[J]. *传感器技术*, 2003, 22(10): 30-32.
- 13 Zeng Nan. *Research on the Key Technology of Fiber Optic Accelerometers*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
曾 楠. *光纤加速度传感器若干关键技术研究*[D]. 北京: 清华大学, 2005.

栏目编辑: 刘丰瑞