

光纤布拉格光栅加速度传感器研究进展

郭永兴 张东生 周祖德 熊丽 朱方东

(光纤传感技术国家工程实验室, 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘要 基于光纤光栅原理的加速度传感器是近年来土木、机电和航空航天等领域研究的热点。简要介绍了基于光纤布拉格光栅(FBG)的加速度传感器的基本工作原理及力学模型,重点阐述了国内外基于光纤光栅的不同结构原理的加速度传感器最新研究进展。按工作频率范围的高低,先后介绍了用于低频和高频测量的加速度传感器的开发研究现状,并介绍了用于多维加速度方向测量的光纤光栅传感器的发展现状,最后对光纤光栅加速度传感器的发展作进一步展望。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;加速度传感器;振动;多维测量;传感器

中图分类号 TN253; TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060001

Research Progress in Fiber-Bragg-Grating Accelerometer

Guo Yongxing Zhang Dongsheng Zhou Zhude Xiong Li Zhu Fangdong

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract Fiber Bragg grating (FBG)-based accelerometer has been a research focus in the fields such as civil, electromechanical and aerospace. The principle and mechanical model of FBG-based accelerometer are introduced briefly. The latest development of FBG accelerometers with different structures and principles is emphasized. According to different operating frequency ranges, the present situation of the development of FBG accelerometer with low and high resonant frequencies is expounded respectively. Particularly, this paper illustrates the accelerometer capable of acceleration measurement in multiple dimensions simultaneously. And the further outlook of FBG accelerometer is prospected.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; accelerometer; vibration; multi-dimensional measurement; sensor

OCIS codes 060.2280; 060.2340; 060.2370

1 引言

光纤传感器因其抗电磁干扰、体积小、重量轻以及信号可远距离传输等优势而得到研究人员的重视,广泛应用在铁路、桥梁、大坝、航空航天和船舶等重要领域^[1,2]。光纤光栅传感技术是光纤传感的重要组成部分,具备波长编码等显著优势。近年来对光纤光栅传感领域的研究不断升温,伴随着工程振动测试技术的发展及需求,光纤光栅振动加速度传感器的研究发展尤为迅速^[3~9]。梁式结构因其简单且性能稳定等特点,成为光纤光栅加速度传感器常用的弹性元件,国内外学者根据悬臂梁的基本结构设计了多种形式的加速度传感器。同时由于悬臂梁自身的结构特点,该结构的振动传感器谐振频率与灵敏度相互制约严重,将该结构类的传感器限制在低频工作范围内。采用沿光纤轴向振动的弹性体结构,传感器可将弹性体的振动位移转化为光栅的应变,提高了传感器灵敏度,使光纤光栅传感器的响应频率达到几千赫兹的高频领域。同时,各国的研究人员还通过悬臂梁结构的增敏以及采用特种光纤光栅等方法来提高传感器的灵敏度和响应频率。而随着实际振动测试需求的增长,可实现多维测量的光纤光栅加速度传感器也不断得到研究开发。

本文从光纤光栅加速度传感器工作频带的高低、不同的结构形式和多维方向测量等方面阐述了该领域

收稿日期: 2013-02-26; 收到修改稿日期: 2013-03-08; 网络出版日期: 2013-05-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041203)资助课题。

作者简介: 郭永兴(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: gyxing2000@163.com

导师简介: 张东生(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: zhangdsem@sina.com

的最新研究成果,并介绍了本实验室在振动加速度传感器研究方面所做的工作,展望了光纤光栅加速度传感器的发展前景。

2 光纤光栅加速度传感器的基本原理与力学模型

光纤光栅直接测量的物理量是温度和应变,光纤光栅振动加速度传感器是利用光栅的波长调制原理,即利用外界的微扰振动引起的位移或应变变化来改变光栅的栅距,再转化为对应的波长变化,通过检测波长的变化信息来反映外界的振动或者加速度信息。传感器的原理框图如图 1 所示。

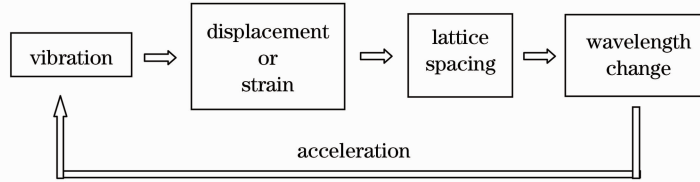


图 1 光纤光栅加速度传感器的测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of FBG accelerometer

光纤布拉格光栅(FBG)加速度传感器常用的信号检测方法主要分两种,即光强度探测型和波长调制型。强度检测方法主要有边缘滤波、匹配滤波等,强度检测具备灵敏度和检测频率较高的优点,但检测效果容易受光源强度以及温度波动的影响,且不具备串接复用的优点。波长编码调制是光纤光栅的技术优势,采用反射波长信息作为输出信号,不受光强波动影响,且不同波长的光纤光栅可以串连复用,用于波长检测的光纤光栅解调技术也日趋成熟,因此波长解调是目前光纤光栅传感器主要的信号检测方法。

一般光纤光栅加速度传感器是由惯性质量块、弹性元件和阻尼器组成的一个单自由度的二阶系统^[10],如图 2 所示。系统在外界振动的强迫力 $f(t)$ 的作用下,运动方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t), \quad (1)$$

式中 m 为惯性敏感质量, c 为阻尼系数, k 为弹性元件刚度, x 为质量块的位移。

图 3(a)和(b)分别给出了该系统在不同阻尼比值情况下的幅频特性和相频特性曲线,其中 ω 为系统的振动频率, ω_0 为系统的固有频率, $H(\omega)$ 为系统的响应幅值, θ 为系统的响应相位。

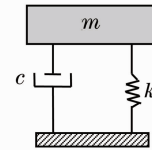


图 2 光纤光栅加速度传感器的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of FBG accelerometer

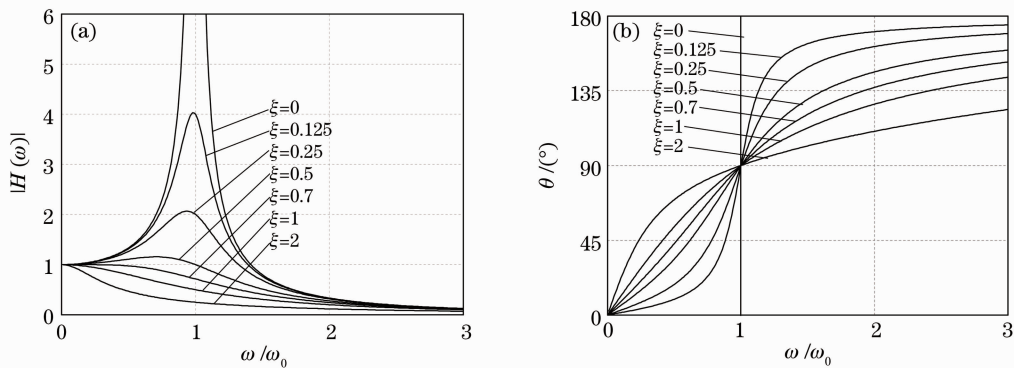


图 3 系统在不同阻尼比 ξ 时的(a)幅频特性和(b)相频特性曲线

Fig. 3 (a) Amplitude-frequency and (b) phase-frequency characteristics of the system at different damping ratios ξ

幅频特性和加速度特性是加速度传感器两个最重要、最基本的参数,由幅频特性曲线可以直观地看出该传感器的工作、共振及衰减频带,由加速度特性曲线可得出其加速度线性测量范围、测量重复性等。图 4(a)和(b)分别为振动传感器的幅频特性曲线及加速度特性曲线示意图。

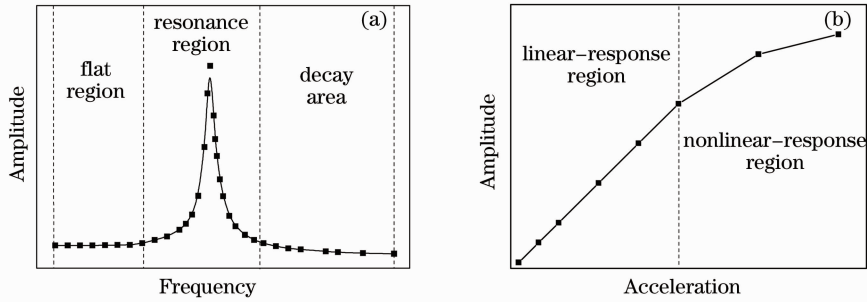


图 4 加速度传感器的(a)幅频特性和(b)加速度特性曲线

Fig. 4 (a) Amplitude-frequency and (b) acceleration characteristic curves of accelerometer

3 光纤光栅低频测量加速度传感器结构分类及研究进展

低频振动响应的光纤光栅加速度传感器主要应用于大型土木工程、矿山工程和地震监测等结构振动频率较低(一般在几百赫兹以内)的领域,如胡军等^[11,12]通过测量大型斜拉桥的拉索及桥身的振动来实时监测桥梁拉索力等结构健康状态,曾楠等^[13,14]通过检测垂直地震波进行油藏和地震波的探测,并取得良好工程效果。国内外关于低频光纤光栅加速度传感器的研究报道很多,其中以梁式结构最为常见,下面从不同的传感器结构设计做出阐述。

3.1 基于梁结构的低频振动传感器

3.1.1 光纤光栅粘贴封装于梁表面

悬臂梁具有结构简单且性能稳定等特点,成为低频振动类光纤光栅传感器的经典弹性元件^[15]。等强度悬臂梁的振动弯曲,可以认为是纯弯曲,梁表面产生的应变是均匀分布的。使用胶黏剂将光纤光栅粘贴于等强度梁表面,振动弯曲过程中光纤光栅各部分受到的拉伸或压缩应力相同,可避免光栅因局部受力不均匀而发生的啁啾现象。图 5 给出了基于悬臂梁结构的光纤光栅加速度传感器原理图。国内外学者根据悬臂梁的基本原理设计了多种形式的加速度传感器。清华大学 Shi 等^[16,17]采用了一种等强度悬臂梁结构的传感装置消除矩形悬臂梁结构容易令光栅产生啁啾的缺点,完成了对加速度信号的测量。2006 年刘波等^[18]同样采用等强度梁完成了一种低频振动传感器的设计及性能测试。2007 年张东生等^[19]采用双悬臂梁结构,研制了一种基于匹配滤波解调的振动传感器,通过悬臂梁对匹配光栅静态工作点进行精确调整,使传感器集振动传感和动态波长解调于一体,并具有温度补偿功能。2008 年,王广龙等^[20]提出了一种差动式 FBG 加速度计,如图 6 所示,采用主梁与微梁结合的差动结构,用高弹性刚度的主悬臂梁支撑质量块,极低弹性刚度的微梁来感受应力,微梁对称地位于主悬臂梁的两边,位置经过优化,可取得最大灵敏度。2009 年姜明顺等^[21]通过对悬臂梁结构施加电磁阻尼并采用匹配滤波技术,提高了传感器的灵敏度以及信号检测的稳定性。

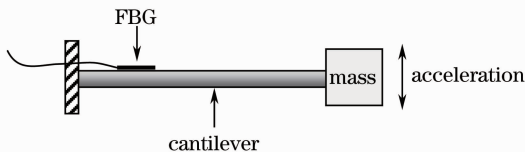


图 5 悬臂梁结构光纤光栅加速度传感器原理图
Fig. 5 Configuration of FBG accelerometer based on cantilever

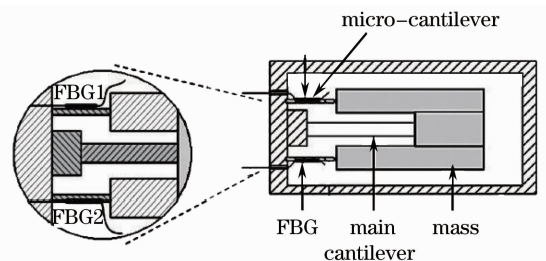


图 6 差动式光纤光栅加速度传感器结构图
Fig. 6 Configuration of differential FBG accelerometer

由于悬臂梁自身的结构特性,该结构的振动加速度传感器谐振频率与灵敏度相互制约严重,为此,许多学者在悬臂梁结构的加速度传感器增敏方面做了相关研究。2011 年,西北大学的王善鲤等^[22]设计研制了一种特殊三角支架结构的悬臂梁振动传感器,如图 7(a)所示,该三角架式支撑结构显著提高了传感器的灵敏

度,但同时也使传感器的固有频率有所降低。2012年,叶婷等^[23]根据航空结构振动监测控制的需求,设计了一种基于弓形梁的增敏结构的振动传感器,如图7(b)所示,该传感器的测量精度达到0.002 g。同年印度学者Basumallick等^[24]通过在普通悬臂梁表面上增加一聚酰亚胺层,再将光纤光栅粘贴于聚酰亚胺层上,如图7(c)所示,在不降低传感器谐振频率的情况下,使传感器的灵敏度提高了一倍,取得了较好的增敏效果。

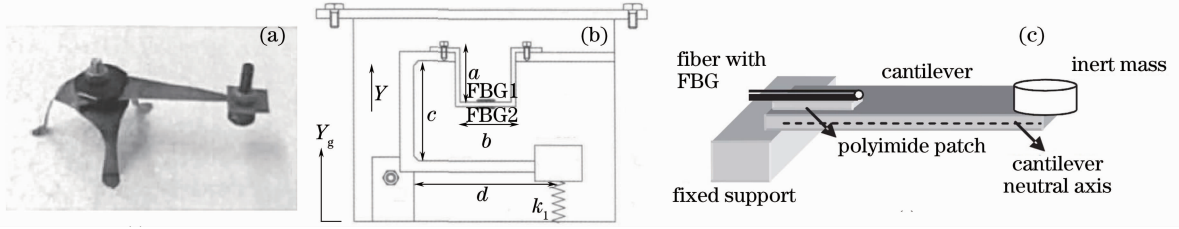


图7 悬臂梁式加速度传感器增敏结构。(a)三角支架式结构;(b)弓形梁结构;(c)聚酰亚胺层

Fig. 7 Different sensitization structures for cantilever-based accelerometer. (a) Triangle support;

(b) bow-beam structure; (c) using a polyimide patch

3.1.2 FBG 直接作为弹性元件

2000年,Willsch等^[25]阐述了一种竖向FBG振动传感器的原理和一种水平方向振动的振动传感器,分别如图8(a)和(b)所示。2个光纤光栅自身作为弹性元件,质量块通过L型梁和光纤光栅固定在框架内。质量块在外界竖直方向振动激励下上下摆动,带动弹性梁左右摆动,从而使光纤光栅产生波长交替变化。由于光纤光栅直接作为弹性元件,该结构的振动传感器具备很高的灵敏度,但由于传感器工作时光栅处于频繁的拉伸压缩状态,光栅易断。2007年,同济大学的孙汝蛟等^[26]提出了一种用于土木工程振动监测的低频加速度计,2012年,Dai等^[27]设计了一种加弹簧阻尼的加速度传感器,并将其应用于空气压缩机曲柄、连杆和汽缸的振动结构状态实时监测,如图8(c)所示。

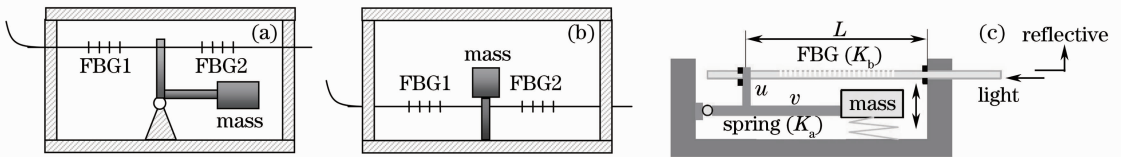


图8 光纤光栅直接作为弹性元件的加速度传感器结构图。(a)竖向振动传感;(b)水平振动传感;(c)加弹簧阻尼

Fig. 8 Different structures of accelerometer using FBG as the elastic element. (a) For vertical vibration sensing;

(b) for horizontal vibration sensing; (c) using a spring damping

3.2 其他弹性结构体形式

图9给出的是两种基于波纹管结构的光纤光栅振动传感器结构^[28~30]。该结构的传感器将光纤光栅固定于预压缩的波纹管内,传感器的性能主要由波纹管及质量块的特性来决定,质量块可以固定于圆形内壳中,使传感器具备良好的抗横向干扰能力。张敬花等^[31~32]提出一种弯曲伸张的弹性敏感结构,如图10(a)所示,并基于该结构设计了一种用于低频测量的加速度传感器。Liu等^[33]基于平膜片结构设计了一种加速度传感器,如图10(b)所示。

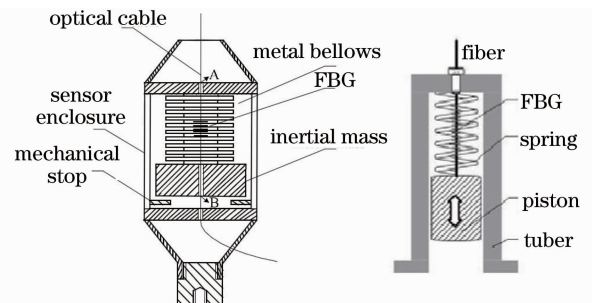


图9 基于波纹管结构的光纤光栅加速度传感器

Fig. 9 Bellows-based FBG accelerometer

4 光纤光栅高频加速度传感器

高频光纤光栅加速度传感器的测量频率应达千赫兹以上。基于梁式结构的低频振动传感器的频率响应和灵敏度等指标无法满足机电、航空航天等领域高频振动测试的要求,国内外有关高频响应的光纤光栅加速度传感器的研究报道也相对较少。低频响应的光纤光栅加速度传感器的响应频率的调节一般都可通过改变

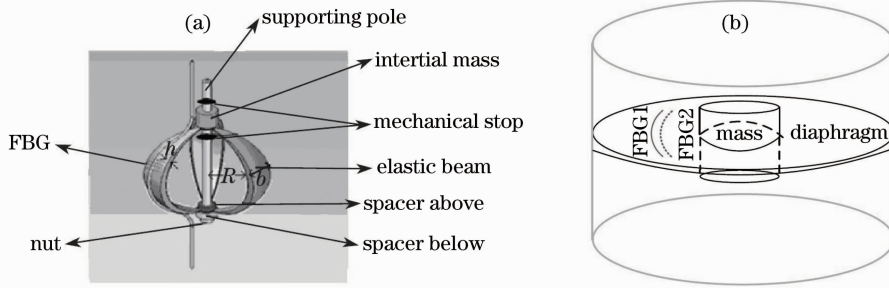


图 10 基于(a)弯曲伸张结构和(b)平膜片结构的弹性体

Fig. 10 Elastic structures based on (a) flex tension and (b) diaphragm

弹性结构中质量块质量的大小来实现,获得不同的低频工作频带较为容易,而需测量频率达到上千赫兹的高频范围时,传统的低频梁式结构会因响应频率和输出灵敏度的严重制约而无法实现。目前高频响应的振动传感器一般是通过增加光纤光栅的弹性结构系数且沿光栅的轴向振动,或者通过采用更高应变响应系数的特种光纤光栅来实现的。

Meyer^[34]采用四根弹簧作为弹性元件,将光纤光栅传感器的测量频率范围拓展至高频区域,但是,这种结构仍然将力直接作用于光纤光栅上,容易折断,且4个弹簧不易调整至受力均衡状态。2009年,本实验室张东生等^[35]将串接有两个光栅的光纤封装至不锈钢管内,沿竖直方向振动的质量块带动上下两段钢管分别产生互为反向的应变,两个光栅的波长随着振动做互为反向漂移的周期改变。由于钢管具有较大的弹性系数,使传感器的谐振频率达到了3232 Hz。采用比普通石英光纤光栅具备更高应变灵敏度的微结构聚合物光纤光栅,著名的振动测试仪器制造商B&K公司的研究人员设计了一种谐振频率可达3.1 kHz,灵敏度达20 pm/g的高频加速度传感器^[36,37]如图11所示,为高频振动加速度传感器的研究带来最新的高水平成果。

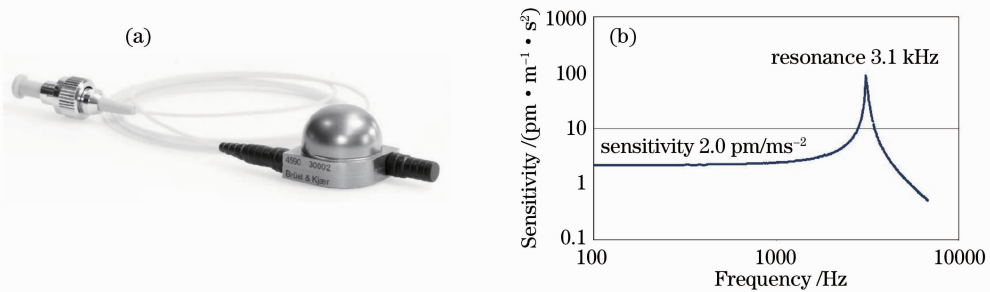


图 11 (a) B&K 公司开发的加速度传感器及其(b)测试结果曲线

Fig. 11 (a) Photo of accelerometer of B&K and (b) its test results

本实验室设计了一种全金属化封装的高频加速度传感器^[38]。结合磁控溅射和电镀技术先对普通光纤光栅进行金属镀膜,将金属镀膜后的光纤光栅作为传感器弹性元件,提高了弹性系数又避免了对裸光栅的直接拉伸。采用锡焊的方法完成镀铜光纤光栅与质量块和传感器基体的固定。在封装工艺过程中完全用金属实现光纤光栅的封装,避免了使用环氧胶黏剂封装带来的胶水老化、蠕变等问题。图12为该金属封装传感器的结构示意图和照片。该传感器谐振频率可达2800 Hz。

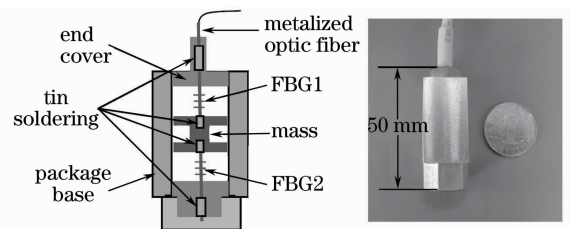


图 12 金属化封装光纤光栅加速度传感器

Fig. 12 Metal-packaged fiber Bragg grating accelerometer

5 多维方向测量光纤光栅加速度传感器

在一些特殊的应用场合,如航空航天、机器人和汽车碰撞等领域需要测量多维的振动或加速度信息,国内外关于光纤光栅加速度传感器的研究报道多集中在用于单一方向测量的传感结构体上,而光纤光栅多维

加速度/振动传感器的研究报道较少。

Morikawa 等^[39,40]通过在质量块三维方向上打孔(如图 13 所示),将三对光纤光栅穿过圆孔并用胶黏剂固定,实现三维加速度测量。Fender 等^[41]利用一根多模光纤上的 4 个周向 90°分布的光栅感测两个方向的加速度,具备二维测量能力及温度补偿功能,该传感器制作精密,谐振频率可达 3 kHz,但多模光栅以及传感器自身的制备过程较为复杂。美国 MOI 公司推出了一种三分量加速度传感器,将 3 个 os7100 型一维加速度传感器在三维方向上组合而成,图 14 给出了该传感器的照片。

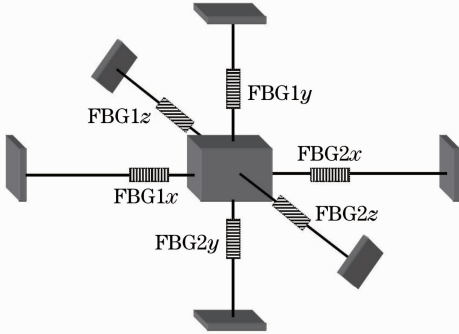


图 13 光纤光栅三维加速度传感器结构图

Fig. 13 Three-dimensional FBG-based accelerometer

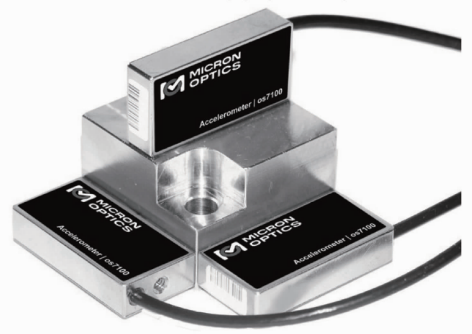


图 14 美国 MOI 公司推出的三分量加速度传感器

Fig. 14 Three-axis accelerometer of Micron Optics

国内关于多维光纤光栅型加速度传感器的研究也大多采用组合式结构,即将多个单维传感器组合后,整体具备多维测量功能。如曾楠等^[13]通过使用 3 个单方向传感单元分别测量各个方向的加速度,提出了一种用于油藏监测的三分量加速度传感器,由 3 个单方向测量传感器叠加而成。刘波等^[42]提出的“光纤光栅三维加速度/振动传感器”,同样是将 3 个分别粘贴有光纤光栅的悬臂梁固定在 3 个互相垂直的平面上,进行三维加速度测量。蒋奇等^[43]提出的“三分量光纤光栅振动传感器”,将 3 个光纤光栅固定于 3 个相互垂直的橡胶块上,外界加速度通过一椎体作用于橡胶块上,使光纤光栅波长发生变化。

本实验室提出了一种基于“钢管-质量块”弹性结构体的光纤光栅加速度传感器^[44],如图 15 所示,4 个光纤光栅按相应规则粘贴于钢管表面,通过两两组合的光栅对的波长变化量的差值感测弹性结构体不同方向的振动加速度,实现二维测量及温度补偿,该传感器具备一体化结构和良好的抗干扰能力。

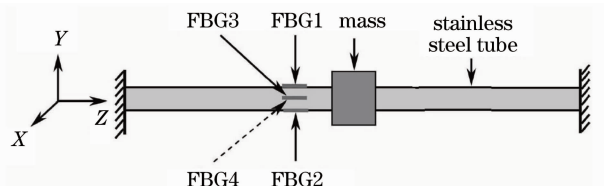


图 15 二维加速度光纤光栅传感器结构

Fig. 15 Configuration of two-dimensional FBG accelerometer

6 结束语

伴随着光纤光栅技术的蓬勃发展,国内外对于光纤光栅加速度传感器的研究不断升温,相继研究开发了不同结构、不同应用场合和新型传感材料等类型的加速度传感器。阐述了光纤光栅加速度传感器的基本原理、分类及目前国内外的研究现状。光纤光栅加速度传感器技术正处在由实验研究逐步走向实际产品应用的阶段,目前光纤光栅加速度传感器的两个主要技术指标即灵敏度和谐振频率仍无法满足很多领域的应用,如目前报道的最高谐振频率也不过几千赫兹,与传统的压电原理的加速度传感器谐振频率达几十万赫兹相比仍有很大差距。更多新的光纤光栅技术、特征弹性材料技术应得到进一步研究应用。国内外许多著名光纤传感企业已加入振动加速度传感器的研究当中,例如专业生产光纤光栅解调器的美国 Micron Optics 公司也在开发研究传感产品,且其加速度传感器已推向市场,丹麦 B&K 公司、巴西 Gavea Sensors 公司等也在研究开发光纤光栅型加速度传感器。光纤光栅加速度传感器的技术优势得到了更多的重视。伴随着航空航天、结构工程和大型机械故障诊断测试等行业的发展需求,振动加速度传感器必将迎来更大发展,光纤光栅加速度传感器的研究方兴未艾。

参 考 文 献

- 1 Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(4): 420~430
姜德生, 何 伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 420~430
- 2 Gu Zhengtian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1317~1326
顾铮天, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1317~1326
- 3 Yang Guang, Huang Junbin, Gu Hongcan *et al.*. Research progress of fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, **31**(7): 76~80
杨 光, 黄俊斌, 顾洪灿 等. 光纤 Bragg 光栅加速度传感器研究进展[J]. *舰船电子工程*, 2011, **31**(7): 76~80
- 4 Antunes Paulo, Travanca Rui, Varum Humberto *et al.*. Dynamic monitoring and numerical modeling of communication towers with FBG based accelerometers[J]. *J. Constructional Steel Research*, 2012, **74**: 58~62
- 5 Xu Dongsheng, Yin Jianhua, Cao Zhenzhong *et al.*. A new flexible FBG sensing beam for measure dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test[J]. *Measurement*, 2013, **46**(1): 200~209
- 6 Zhang Dongsheng, Li Wei, Guo Dan *et al.*. Real-time monitor system of bridge-cable force based on FBG vibration sensors and its application[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2007, **20**(12): 2720~2723
张东生, 李 微, 郭 丹 等. 基于光纤光栅振动传感器的桥梁索力实时监测[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(12): 2720~2723
- 7 M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1605~1607
- 8 P. Klokoc, I. Lujo, M. Bosiljevac *et al.*. Optical sensor system for vibration measurement[C]. *International Symposium Electronics in Marine*, 2008, **2**: 625~628
- 9 Yinian Zhu, Ping Shum, Chao Lu *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating accelerometer[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2003, **10**(15): 1437~1439
- 10 Hou Guozhang, Zhao Xuezheng. *Testing and Sensing Technology*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998. 56~100
侯国章, 赵学曾. *测试与传感技术*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 56~100
- 11 Hu Jun. *Structural Health Monitoring System Study and Application of Jingyue Bridge*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012
胡 军. *荆岳大桥结构健康监测系统研究及应用*[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012
- 12 Chen Biao. *Study and Application about Bridge Safe Monitoring Technology Based on Internet of Things and Optical Fiber Sensing Principle*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011
陈 彪. *面向物联网和光纤传感技术的桥梁安全监测技术研究与应用*[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011
- 13 Zeng Nan, Shi Chunzheng, Zhang Min *et al.*. A 3-component fiber optic accelerometer for well logging [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 901~905
曾 楠, 施纯峥, 张 敏 等. 一种可用于油藏监测的 3 分量光纤加速度传感器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(8): 901~905
- 14 Zuyuan He, Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga *et al.*. Development of nano-strain-resolution fiber optic quasi-static strain sensors for geophysical applications[C]. *SPIE*, 2012, **8421**: 84210T
- 15 Zhang Hunrun, Fu Jinxin, Lü Quan. *The Sensor Technology Summa*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2007. 216~218
张洪润, 傅瑾新, 吕 泉. *传感器技术大全*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007. 216~218
- 16 C. Z. Shi, N. Zeng, H. L. Ho *et al.*. Cantilever optical vibrometer by use of fiber Bragg grating[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3179~3181
- 17 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
- 18 Liu Bo, Niu Wencheng, Yang Yifei *et al.*. A novel fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(1): 42~44
刘 波, 牛文成, 杨亦飞 等. 新型光纤光栅加速度传感器的设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(1): 42~44
- 19 Zhang Dongsheng, Guo Dan, Luo Pei *et al.*. Research on fiber grating vibration based on matching filtering demodulation [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2007, **20**(2): 311~313
张东生, 郭 丹, 罗 裴 等. 基于匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(2): 311~313
- 20 Wang Guanglong, Feng Lishuang, Liu Huilan *et al.*. Study of novel accelerometer based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2008, **21**(3): 450~453
王广龙, 冯丽爽, 刘惠兰 等. 基于 FBG 的新型加速度计研究[J]. *传感技术学报*, 2008, **21**(3): 450~453
- 21 Jiang Mingshun, Sui Qingmei, Feng Dejun. Research and realization of novel FBG vibration sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, **6**(6): 1~3

- 姜明顺, 隋青美, 冯德军. 新型 FBG 振动传感器的研究与实现[J]. 仪器技术与传感器, 2009, **6**(6): 1~3
- 22 Wang Shanli, Xiang Guanghua, Hu Manli *et al.*. Design of a novel FBG vibration sensor[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(4): 515~519
- 王善鲤, 向光华, 忽满利 等. 一种新型光纤 Bragg 光栅振动传感器的设计[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(4): 515~519
- 23 Ye Ting, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Study on optical fiber grating vibration sensor based on bow beam sensitive characteristic[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2012, **33**(1): 139~145
- 叶 婷, 梁大开, 曾 捷 等. 基于弓形梁增敏结构的 FBG 振动传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(1): 139~145
- 24 N. Basumallick, I. Chatterjee, P. Biswas *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A*, 2012, **173**(1): 108~115
- 25 M. Willsch, P. Krammer, N. M. Theunc *et al.*. Highly sensitive micro mechanical fiber Bragg grating acceleration sensor combined with a new multiplexable interrogation principle[C]. *SPIE*, 2000, **4074**: 46~53
- 26 Sun Rujiao, Sun Limin, Sun Zhi *et al.*. Design research of fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 63~67
- 孙汝蛟, 孙利民, 孙 智 等. 一种新型光纤布喇格光栅振动传感器研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 63~67
- 27 Yutang Dai, Gang Xu, Xiaodong Niu *et al.*. Condition monitoring of reciprocating compressor using FBG-based sensors in petrochemical industry[C]. *SPIE*, 2012, **8421**: 8421AM
- 28 Zhang Jinghua, Qiao Xueguang, Feng Zhouyao *et al.*. A compact metal bellows-based fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring[C]. 2011 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2011
- 29 Wang Yongjie, Wang Rui, Li Fang *et al.*. A new fiber Bragg grating based accelerometer[C]. *SPIE*, 2009, **7133**: 71334K
- 30 Jinghua Zhang, Xueguang Qiao, Manli Hu *et al.*. Proposal of metal bellow-based fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090606
- 31 Jinghua Zhang, Xueguang Qiao, Manli Hu *et al.*. Flexensional fiber Bragg grating-based accelerometer for low frequency vibration measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090607
- 32 Zhang Jinghua, Qiao Xueguang, Feng Zhongyao *et al.*. Fiber-optical grating sensing based on flexensional member[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(5): 054215
- 张敬花, 乔学光, 冯忠耀 等. 基于弯曲伸张结构的光纤光栅传感研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(5): 054215
- 33 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Janlin *et al.*. Novel fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, **12**(10): 3000~3004
- 34 A. Douglas Meyer. Fiber Optic Accelerometer[P]. US Patent 7,137,299, 2006-11-21
- 35 Zhang Dongsheng, Yao Kaifang, Luo Pei *et al.*. Novel fiber Bragg grating accelerometer with high resonant frequency[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(7): 1400~1403
- 张东生, 姚开方, 罗 裴 等. 一种新型的光纤光栅高频加速度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(7): 1400~1403
- 36 S. Andresen, F. K. Nielsen, T. R. Licht *et al.*. Fiber Bragg grating vibration transducer based on novel mechanical sensing element for monitoring applications[C]. *SPIE*, 2011, **7753**: 77537M
- 37 A. Stefani, W. Yuan, S. Andresen *et al.*. High sensitivity polymer optical fiber Bragg grating based accelerometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(9): 763~765
- 38 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Meng Hui *et al.*. Metal packaged fiber Bragg grating accelerometer[C]. *SPIE*, 2012, **8421**: 84213V
- 39 S. R. K. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi *et al.*. Triaxial Bragg grating accelerometer[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, **1**: 95~98
- 40 Ousama M. Abushagur, Mustafa A. G. Abushagur, Karthik Narayanan. Novel three-axes fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Optomechanics*, 2005, **5877**: 1~4
- 41 Amanda Fender, Willian N. MacPherson, Robert R. J. Maier *et al.*. Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1292~1298
- 42 Liu Bo, Liu Shuyang, Sun Hua *et al.*. Fiber Bragg grating triaxial acceleration/vibration sensor[P]. Chinese Patent, CN101210937, 2008-7-2
- 刘 波, 刘舒扬, 孙 华 等. 光纤光栅三维加速度/振动传感器[P]. 中国专利, CN101210937, 2008-7-2
- 43 Jiang Qi, Jiang Han, Sui Qingmei *et al.*. Three-component fiber Bragg grating vibration sensor[P]. Chinese Patent, CN201043915, 2008-4-2
- 蒋 奇, 蒋 罕, 隋青美 等. 三分量光纤光栅振动传感器[P]. 中国专利, CN201043915, 2008-4-2
- 44 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Li Jieyan *et al.*. Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(12): 1214001
- 郭永兴, 张东生, 李杰燕 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(12): 1214001