DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311999

基于光纤光栅的紧凑型高频振动传感器的设计与应用*

蒋宇飞,陶传义,李梦影,王靖霆,陈 悦

(重庆理工大学理学院 重庆 400054)

摘 要:设计了一种六边形的紧凑型光纤光栅振动传感器,其结构包括弹性体、质量块、光纤光栅和外壳。首先对六边形弹性体 结构进行理论分析和仿真,通过设计发夹弯结构改变灵敏度和频率测量范围,使设计的光纤光栅振动传感器能够满足不同机械 设备的振动监测需求。在激振台上测试了传感器的性能,并在真空泵振动监测中应用。实验结果表明,设计的光纤光栅振动传 感器具有良好的响应,普通六边形弹性体结构传感器的1阶固有频率高达1481 Hz,在100 Hz 振动时的灵敏度为4.93 pm/g;含 发夹弯的六边形弹性体结构传感器的1阶固有频率为185 Hz,在100 Hz 振动时的灵敏度为105.73 pm/g,两种传感器的横向干 扰均小于 5%,具有很好的抗横向干扰能力。

Design and application of compact high-frequency vibration sensor based on fiber Bragg grating

Jiang Yufei, Tao Chuanyi, Li Mengying, Wang Jingting, Chen Yue

(School of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: A vibration sensor based on hexagonal and compact fiber Bragg grating is designed, which consists of elastomer, mass block, fiber Bragg grating (FBG) and shell. Firstly, the hexagonal elastomer structure is analyzed and simulated theoretically. The measurement ranges of sensitivity and frequency are changed by designing hairpin turns structure, so that the designed FBG sensor can meet the vibration monitoring requirements of different mechanical equipment. The performance of sensor is tested with the vibration exciter and the application in vacuum pump vibration monitoring is also demonstrated. The experimental results show that the designed FBG vibration sensor possesses good responses. The first-order natural frequency of conventional hexagonal elastomer FBG sensor is as high as 1 481 Hz, and the sensitivity is 4.93 pm/g at the vibration frequency of 100 Hz. For comparison, the first-order natural frequency is 100 Hz. The transverse interference of both sensors is less than 5%, which possesses a good ability to resist lateral interference. **Keywords**; fiber optic sensor; accelerometer; fiber Bragg grating; vibration measurement; condition monitoring

0 引 言

机械振动在自然界中无处不在,许多物体在受到外 力或者能量时就会产生振动,人在走路时对地面的冲击 也会让地面产生振动,这样的振动看起来无关紧要,但对 于一些柴油发动机等机械设备而言,从它们的振动信号 中可以了解到设备的实时状态,以保证设备的正常运行。 比如火车在运行时也会产生振动,这样的振动不仅对乘 坐舒适性造成影响,还可能对内部设备的稳定性和寿命 产生重大影响,因此对这些机械设备进行状态监测是有 必要的。现在大多使用的都是压电式传感器,与其相比, 光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器具有天 然的优势,其不带电^[1],不受电磁干扰^[2]、抗腐蚀性^[3]、灵 敏度高^[4],且 FBG 传感器可以间接测量许多物理量,包 括压力^[5]、应变^[6]、振动^[7]、温度^[8]等,因此,基于 FBG 的 振动传感器在机械振动监测领域具有广阔的应用前景。

收稿日期:2023-10-09 Received Date: 2023-10-09

^{*}基金项目:国家自然科学基金(51874064)项目资助

在 FBG 振动传感器的结构设计中多为悬臂梁式、膜 片式和铰链式,悬臂梁式传感器的优点是表面应变均匀 且结构简单,但抗横向干扰能力较差;膜片式传感器具有 高灵敏度和宽频响范围等优点,但封装较为复杂:铰链式 传感器的优点是灵敏度高,且可用于多维振动信号检测, 但抗横向干扰能力较差^[9]。近年来,基于 FBG 的振动传 感器层出不穷,比如 Guo 等^[10]设计了一种 3D 打印的六 边形式加速度计,应用两个 FBG,其中一个感受应力,另 一个用于温度补偿,灵敏度高达421.4 pm/g,加速度响应 非常线性,固有频率为124.9 Hz,并进行了实际应用。魏 莉等^[11]提出一种弹性膜片与菱形结构结合的 FBG 振动 传感器,且采用差动式结构,即安装两个参数相同的 FBG 在菱形的对角线上,稍微错开使两个 FBG 不会相互影 响,在测量振动信号时两个 FBG 产生相同的轴向形变, 但一个拉伸,另一个收缩,这样不仅将灵敏度提高到两倍 还能进行温度补偿,固有频率为681.4 Hz,灵敏度与频率 呈线性关系。樊伟等[12]设计一种膜片式悬臂梁结构,在 圆形膜片上等间隔切割出4根等强度悬臂梁.4根悬臂 梁共同支撑1个质量块,该结构具有很强的抗横向干扰 能力,横向灵敏度仅为工作方向的2.16%,并且灵敏度 大,为452.6 pm/g,固有频率为48 Hz,适合用于低频测 量。刘文敏等[13]设计一种铰链式低频振动传感器,在铰 链的上下各粘贴一个 FBG,即采用差动式结构提高灵敏 度并作温度补偿,这款传感器的灵敏度高达1496 pm/g, 固有频率为 36 Hz,非常适合进行高精度测量。这些振动 传感器大多数因为封装体积较大、稳定性不足等原因不 利于实际应用。

本文设计了一种紧凑的六边形光纤光栅振动传感器,利用六边形弹性体将质量块的惯性力传递到光纤上, 使 FBG 发生轴向形变,并通过仿真分析改变六条边所在 平面上的结构来改变传感器的灵敏度和固有频率,以满 足对不同机械设备的状态监测需求。相比于大多数 FBG 振动传感器而言该传感器结构简单,体积小,易于安装, 结构更坚固,具有实际应用价值。

1 振动传感器设计

1.1 结构设计与工作原理

振动传感器结构如图 1 所示,整体结构是由不锈钢 加工成六边形的形状,惯性质量块使用的是密度较大的 钨块或铅块,外壳采用的是铝合金材质,六边形弹性体的 上底面用于固定质量块,下底面用于固定传感器与工作 界面。光纤采用两点式固定方式,将光纤固定在六边形 内部两个横板上,让 FBG 悬空,这样的固定方式不仅牢 固,还能有效避免啁啾现象^[14]。六边形弹性体的其余 4 个面将质量块受到 z 方向的惯性力转换为对 FBG 的轴 向力,当FBG 振动传感器在z 轴方向上振动时,FBG 产生 形变,中心波长发生改变,实现对振动信号的测量。



Fig. 1 Internal structure of FBG sensor

1.2 传感器理论分析

六边形弹性体与光纤共同平衡质量块的重力,由于 六边形弹性体近似为中心对称结构,所以只用进行局部 分析。传感器的应力分析表明:

$$Mg = K_f \Delta D + Kz \tag{1}$$

式中:K_f为光纤刚度;ΔD为静止时光纤拉伸量;K为六边 形弹性体刚度;z为静止时六边形弹性体在垂直方向的形 变量。六边形弹性体的工作方式类似于4个悬臂梁,所 以六边形弹性体刚度为^[15]:

$$K = 4 \times \frac{bh^{3}E}{4l^{3}} = \frac{bh^{3}E}{l^{3}}$$
(2)
光纤刚度为^[16]:
EA.

 $K_f = \frac{2f^2 f_f}{x} \tag{3}$

式中:E 为弹性体弹性模量;b 为悬臂梁宽度;h 为每个悬 臂梁的厚度;l 为悬臂梁的长度;E_f 为光纤杨氏模量;A_f 为光纤横截面积;x 表示光栅长度;H 为六边形弹性体高 度的 1/2。

传感器的等效刚度为:

$$K_{neff} = \frac{Mg}{z} \tag{4}$$

传感器的固有频率:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{neff}}{M}}$$
(5)

当给传感器施加大小为 *a* 的加速度时,对传感器的 受力分析如图 2 所示,其中 α 为静止时安装质量块前后 悬臂梁旋转的角度,β 为安装质量块后,有无加速度悬臂 梁变化的角度。

根据三角形的内角和为 π 可以计算得出 $\angle A = \theta - \alpha - \beta/2$,所以此时光纤轴向形变量为:

$$\Delta D_1 = \Delta z \tan A \tag{6}$$

其中, $\Delta z = Ma/K_{neff}$,由于 α 和 β 远小于 θ ,所以可忽略,因此得到光纤的应变:

$$e = \frac{\Delta D_1}{L_f} = \frac{Ma \tan\theta}{K_{neff}L_f}$$
(7)

根据 FBG 振动传感器灵敏度的定义公式,可得光



Fig. 2 Force analysis of sensor

纤光栅振动传感器在主振动 z 方向的灵敏度计算公 式为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} = \frac{\lambda_1 (1 - P_e) M \tan\theta}{K_{neff} L_f}$$
(8)

式中: L_f 为光纤的封装长度; λ_1 为光栅的初始中心波长; P。为光纤的有效弹光系数。

仿真研究 1.3

为了进一步研究传感器的性能,在此借助有限元仿 真软件对其进行研究。研究发现,传感器的结构参数影 响其灵敏度和固有频率,于是对六边形弹性体的厚度、高 度、角度以及质量块的质量进行数值模拟分析,结果如 图 3 所示。可以看出,当六边形弹性体厚度减小、角度减 小、高度增大、质量块质量增大时传感器的灵敏度增大, 而固有频率随之减小。根据数值模拟分析,并结合传感 器的实际使用环境,选定传感器参数如表1所示。通过 仿真得出在静止状态下传感器在 z 轴方向的形变量如 图 4(a) 所示, 形变量为 71.2 nm, 代入到固有频率计算公 式中得到固有频率为1619 Hz。传感器受到加速度为1g $(1g = 9.8 \text{ m/s}^2)$ 的振动信号时在 z 轴方向的形变量如 图 4(b) 所示,相比于静止状态时变化了 70.8 nm,代入到 灵敏度的计算公式中得到灵敏度为 9.63 pm/g。







Fig. 4 The deformation of the sensor in the Z-axis

为了满足对不同机械设备的状态监测,对传感器的 结构进行调整来改变频率测量范围以及灵敏度大小,由 于传感器的工作原理是使用4条边将质量块受到的惯性 力传递至光纤上,于是对传感器的4条边所在的面进行 结构调整,调整后的结构如图5所示,在每一个面上减去 几个矩形来减小整体结构的刚度,留下5个发夹弯的结 构,用 a 表示发夹弯拐弯处的宽度,b 表示缝隙的宽度, 不同的a、b 值对传感器的灵敏度有所影响,于是借助

表 1 FBG 振动传感器的参数 Table 1 Parameters of FBG vibration sensor

10010 1	rundens of rbo	vibrution sensor
参数	描述	值
D	六边形弹性体宽度	30 mm
b	悬臂梁宽度	18 mm
h	悬臂梁厚度	0.5 mm
heta	夹角	$\pi/6$
x	FBG 有效长度	10 mm
λ_1	FBG 中心波长	1 550 nm
M	质量块质量	15 g
Ε	六边形弹性体弹性模量	205 GPa
E_f	光纤杨氏模量	72 GPa
A_f	光纤截面积	$1.227 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
P_{e}	有效弹光系数	0. 22



图 5 调整后结构的三维图 Fig. 5 The 3D diagram of the adjusted structure

仿真软件探究灵敏度最大时 a、b 的值。

在仿真软件中建立好模型,对 a、b 做参数化扫描,当 传感器受到加速度为 1g 的振动时,将得到的光纤轴向拉 伸数据绘制成等线图如图 6 所示,由 FBG 中心波长漂移 量与 a、b 的关系可以看出,传感器在受到振动时,a 和 b 共同影响着 FBG 的中心波长漂移量,当 a = 1.5 mm, b = 0.5 mm 时,中心波长移动最大,此时能够实现传感器灵 敏度最大。



2 实验研究

FBG 传感器的测试实验装置如图 7(a) 所示, 在传感器性能测试中, 使用信号发生器输出一定频率和振幅的正弦信号到功率放大器中, 功率放大器将信号放大输出到激振台, 使得激振台可以产生相应频率和加速度的振动, 光纤光栅解调器(GTR FBG INTERROGATOR, 采样率为 19.2 kHz, 波长解调范围 1 515~1 585 nm) 用于信号解调并将解调后的数据传输至电脑端进行实时查看。使用标准压电式振动传感器(CT1010LC) 校准 FBG 振动传感器, 灵敏度为 100.43 mV/g, 频率测量范围为 1~10 kHz。

2.1 传感器封装

传感器与质量块的连接方式采用螺纹固定,将 FBG 固定在六边形弹性体中间的横板上,为了保证传感器的高性能,封装时对 FBG 施加预应力是关键。固定好 FBG 的一端后,在尾纤处悬挂一个 30 g 的质量块用于拉伸光 纤使其具有预应力,然后固定 FBG 的另一端,并保证光 栅处在六边形弹性体的中间。传感器的尺寸和质量如 图 7(b)和(c)所示,主体体积仅有 14 cm³,质量 38.9 g。



(a) **实验系统** (a) Experimental system





(c) 传感器质量 (c) Sensor weight



2.2 传感器的灵敏度测试

首先测试传感器对振动信号的响应度,设置信号发 生器的频率为100 Hz,固定信号幅值,FBG 振动传感器采 集到的 100 Hz 振动信号及其快速傅里叶变换如图 8 所示,可以看出 FBG 传感器的响应度良好,接近正弦波。



实验过程使用控制变量法,控制激振台的振动频率一定,改变激振台的加速度从1~5g,步长为0.5g,通过拟合得到 FBG 波长漂移量与加速度的关系图如图 9(a)所示,斜率即为传感器的灵敏度,可以看出振动频率越大传感器的灵敏度越大,传感器在 100 Hz 时的灵敏度为4.93 pm/g,在1 kHz 时的灵敏度为9.02 pm/g。不同频率下的线性度均大于 98.8%,灵敏度均大于 4.93 pm/g。



使用同样的测试方法对含发夹弯结构传感器进行灵 敏度测试,得到的结果如图 9(b)所示,传感器在 20 Hz 时的灵敏度为 72.96 pm/g,在 100 Hz 时的灵敏度为 105.73 pm/g,灵敏度随频率的增大而增大,不同频率下 灵敏度的线性度均大于 98.93%,由此可见设计的 FBG 振动传感器在 100 Hz 的振动信号下,灵敏度可在 4.93~ 105.73 pm/g进行调整。

2.3 传感器的固有频率测试

当外界振动信号频率和传感器固有频率一致时,传 感器的振动能量最大,通过对传感器采集的数据做快速 傅里叶变换(FFT)得到能量最大时的频率就是传感器的 固有频率。先使用信号发生器输出扫频信号,设置起始 值为30 Hz,终止值为2 kHz,扫频时间10 s,将传感器采 集的信号进行快速傅里叶变换得到结果如图10(a)所 示,图像峰值所在的频率即为传感器的固有频率 1481 Hz。再来测试含发夹弯结构传感器,设置起始值 为20 Hz,终止值为500 Hz,扫频时间为10 s,将收集到的 信号数据进行快速傅里叶变换得到结果如图10(b)所 示,峰值所在的频率为185 Hz。



为了验证扫频测试的准确性,对传感器的固有频率 做离散点测试,首先测试普通六边形结构传感器,控制激 振台的振动加速度为 1g 不变,改变振动频率从 100 Hz 开始,步长为 100 Hz,当频率接近固有频率时步长减小至 1 Hz,这样来计算不同频率下传感器的灵敏度,得到的结 果如图 11(a)所示,固有频率为1 481 Hz,和扫频测试的 结果一致。





Fig. 11 Amplitude-frequency characteristics

再对含发夹弯结构传感器进行测试,控制振动加速度 为 1g,改变振动频率从 20 Hz 开始,步长为 20 Hz,当频率 接近固有频率时步长减小至 1 Hz,得到的频率与灵敏度关 系如图 11(b)所示,此时的固有频率为 183 Hz,离散测量结 果与扫频结果一致。在固定光纤时给光纤施加了预应力 使 FBG 中心波长向长波方向移动约 400 pm,且使用的 FBG 解调器的解调精度为 2 pm,所以当振动信号频率为 100 Hz 时,结构调整前后传感器能检测到最大加速度值分 别约±80g 和±3g,测量分辨率分别为 0.4g 和 0.02g。

2.4 抗横向干扰测试

本文设计的是一维振动传感器,除了灵敏度和固有 频率外,抗横向干扰能力也是一个重要指标。将普通六 边形结构传感器和含发夹弯结构传感器旋转 90°固定在 激振台上,设置振动频率为 40 Hz,振动加速度为 1g,得 到传感器在主向和横向响应度如图 12 所示,图 12(a)为 普通六边形结构传感器,图 12(b)为含发夹弯结构传感 器,两种传感器的横向干扰均小于主振动方向的 5%,说 明设计的 FBG 振动传感器具有良好的抗横向干扰能力。

2.5 温度特性

FBG 不仅对应力敏感,还对温度敏感,所以当 FBG 传感器工作在环境温度变化的情况下,需要对其进行温度补偿。在本文设计的传感器中,FBG 所处的环境是一样的,因此只需要测量其中一个传感器的温度灵敏度即可,将传感器放入恒温箱中进行加热,从 25℃缓慢加热至 60℃,并实时记录 FBG 的波长变化和恒温箱的温度变



化,得到的结果如图 13 所示,可以看出,设计的 FBG 振 动传感器的温度灵敏度为 5.1 pm/℃,线性度为 0.998。 从实验结果可以推断,在 60℃的环境温度范围内,FBG 与弹性体之间的应变耦合保持不变,也就是说,材料的弹 性模量在此过程中没有发生变化,这就意味着传感器的 灵敏度保持不变。



将设计的传感器和其他文献中的传感器作对比,如 表2所示,本文设计的传感器尺寸小、质量轻,可测量加 速度范围大,通过开孔的设置,以及开孔结构的控制,进 而可以对弹性体刚度进行改变,实现对性能参数的调节 控制,满足对不同情况的测量需求。

2.6 实际应用

为了验证设计的 FBG 振动传感器的性能,进行了真 空泵运行时的振动测试。分别将标准压电式振动传感器 和设计的两种传感器安装在真空泵上(图 14),当真空泵 工作时,3 个传感器测得的数据及其快速傅里叶变换如 图 15 所示,标准压电传感器、普通六边形结构传感器和 含发夹弯结构传感器的数据表示为图 15(a)~(c),且左 边是原始数据,右边是对数据作快速傅里叶变换,可以看 出,在 100 Hz 附近能量最高。由于快速傅里叶变换只能 计算出一段时间内的信号包含哪些频率,而小波变换 表 2

振动传感器性能参数比较

第44卷

Table 2 Performance parameters comparison of the vibration sensor								
传感器	灵敏度/(pm·g ⁻¹)	固有频率/Hz	频率范围/Hz	抗横向干扰/%	质量/克	尺寸/mm	加速度范围/g	
设计1(普通六边形)	9. 02	1 481	<1 000	4.90	38.9	20×20×35	±80	
设计2(含发夹弯式)	136.37	185	<120	2.70	37.8	20×20×35	±3	
HBK FS65ACC	59.00	430	<50	0.10	338.0	Φ53×73	±10	
文献[17]	120. 50	237	<80	5.00	>60.0	>36×16×2	-	
文献[18]	55.60	46	<28	5.62	-	-	-	
文献[19]	106.70	612	20~250	4.90	-	>46×15×35.9	-	



图 14 3个传感器在真空泵上的安装位置 Fig. 14 The installation positions of the three sensors on the vacuum pump





可以计算出频率随时间的变化,因此对测得的数据进行 小波变换,得到的结果如图 16 所示,发现随着时间的推 移,3 组数据的振动能量均在 100 Hz 附近最大,说明真空 泵在垂直方向的工作频率基本恒定在 100 Hz。通过实际 应用,也验证了设计的 FBG 振动传感器的应用可行性和 准确性。



Fig. 16 The vibration signal of vacuum pump is transformed with wavelet

3 结 论

本文提出一种灵敏度及频率测量范围可调的高稳定 性高精度紧凑型光纤光栅振动传感器,借助仿真软件辅 助研究,改进内部结构使传感器达到灵敏度可调的目的。 使用振动台对其进行测试,得到调整前传感器的固有频 率高达1 481 Hz,在振动频率为 100 Hz 时的灵敏度为 4.93 pm/g,加速度测量范围在 80g 以内。调整后传感器 在振动频率为 100 Hz 时的灵敏度为 105.73 pm/g,加速 度测量范围为 3g,固有频率为 185 Hz,因此根据不同机 械设备的监测需求,可以调整传感器的结构达到合适的

259

灵敏度及固有频率。两个传感器的横向干扰均小于 5%, 具有较强的抗横向干扰能力。所设计的传感器在光纤的 固定方面对比其他同类传感器做出了优化,使传感器更 加稳定和可靠。同时进行了实际应用,用标准压电振动 传感器进行标定,结果表明设计的传感器具有高准确性。 此光纤振动传感器在机械设备状态监测领域具有很好的 应用价值。

参考文献

- UMESH K T, THAN S S, VIPENDER N, et al. Design and development of a field deployable packaged fiber Bragg grating-based accelerometer [J]. Optical Engineering, 2019, 58(1):014014.
- [2] 王雅纯,张小栋,陆竹风,等.用于假手指尖的光纤 光栅触觉力传感器研究[J].仪器仪表学报,2021, 42(9):124-130.

WANG Y CH, ZHANG X D, LU ZH F, et al. Research on the tactile force sensor of prosthetic hand finger based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 124-130.

[3] 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.

YE T, LIANG D K, ZENG J, et al. Study on optical fiber grating vibration sensor based on bow sensitive characteristic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1):139-145.

- [4] MOHD M K, NISHTHA P, RAVI D, et al. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation[J]. Sensors and Actuators A, 2014, 205: 79-85.
- [5] 张硕, 江毅. 一种光纤高温压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2018(1): 10-12,70.
 ZHANG S, JIANG Y. Optical fiber high-temperature pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 10-12,70.
- [6] NOR S K, MOHHD F H, MUHAMMAD R R, et al. A modal-based approach for modelling the cantilever FBG accelerometer with the presence of tip mass and its sensitivity analysis[J]. Optik, 2022, 271: 170209.
- [7] WANG Y, DAI Y T, MUMTAZ F, et al. A combined tri-dimensional fiber Bragg grating accelerometer for multi-directional measurements [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 79: 103360.
- [8] 刘正勇, LIN H, 刘繄, 等. 特种微结构光纤振动传感

器及其铁路监测应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58 (8): 63-70.

LIU ZH Y, LIN H, LIU F, et al. Special microstructured optical fiber based vibration sensor and its application in railway monitoring [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 63-70.

- [9] 贾振安,党硕,禹大宽,等.光纤光栅振动传感器结构设计研究[J].红外,2022,43(9):20-27.
 JIA ZH AN, DANG SH, YU D K, et al. Research on structure design of fiber grating vibration sensor [J].
 Infrared, 2022, 43(9): 20-27.
- [10] GUO T, ZHANG T, LI Y, et al. Highly sensitive FBG seismometer with a 3D-printed hexagonal configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4588-4595.
- [11] 魏莉,余玲玲,姜达州,等. 基于膜片与菱形结构的 光纤布拉格光栅加速度传感器[J].中国激光,2019, 46(9):0910003.
 WEI L, YU L L, JIANG D ZH, et al. Fiber bragg grating accelerometer based on diaphragm and diamond

structure[J]. Chinese Journal of Laser, 2019, 46(9): 0910003.

[12] 樊伟, 冯德全, 乔学光, 等. 基于膜片式悬臂梁的低频光纤光栅加速度计[J]. 光子学报, 2022, 51(10): 1006004.

FAN W, FENG D Q, QIAO X G, et al. Low-frequency fiber bragg grating accelerometer based on diaphragm-type cantilever beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10): 1006004.

- [13] 刘文敏,戴玉堂,魏禹,等. 基于双光纤光栅的高灵 敏度低频加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9):911-918.
 LIU W M, DAI Y T, WEI Y, et al. High sensitivity and low-frequency acceleration sensor based on double fiber bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021, 32(9):911-918.
- [14] 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 lowfrequency vibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 74-82.

- [15] HE Z X, ZAHNG Z Y, LI L, et al. A novel fiber bragg grating vibration sensor with double equal-strength cantilever beams [J]. Optoelectronics Letter, 2021, 17(6): 321-327.
- [16] PAN J J, WANG L Y, HOU W, et al. Design and investigation of a high-sensitivity tilt sensor based on FBG [J]. Photonic Sensors, 2023, 13(2): 230228.
- [17] 魏莉,刘壮,刘恒春,等.基于"士"字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J].光学学报,2019,39(11):1106004.
 WEIL,LIUZH,LIUHCH, et al. Fiber bragg grating

vibration sensor based on sensitive structure for "±"-shaped beam[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106004.

- [18] FAN X Y, GE L, GE C, et al. A dual oblique wingbased low-frequency FBG accelerometer [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 81: 103526.
- [19] 李辉栋,代佳和,高宏,等.基于双杠杆放大的中高频 FBG 加速度传感器研究[J].光电子激光,2022, 33(7):680-685.

LI H D, DAI J H, GAO H, et al. Research on medium and high frequency FBG acceleration sensing based on double-lever amplification[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2022, 33(7): 680-685.

作者简介



蒋宇飞,2022年于重庆理工大学获得学 士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主 要研究方向为光纤传感技术。

E-mail:1540714386@ qq. com

Jiang Yufei received his B. Sc. degree in 2022 from Chongqing University of Technology. Now he is a M. Sc. candidate at Chongqing University of Technology. His main research interests is optical fiber sensing technology.



陶传义(通信作者),2005年于重庆大 学获得学士学位,2007年于重庆大学获得硕 士学位,2011年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授、硕士生导师,主要 研究方向为光纤传感系统与智能结构。

E-mail:taochuanyi@cqut.edu.cn

Tao Chuanyi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2005, M. Sc. degree from Chongqing University in 2007, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2011. Now he is a professor and a M. Sc. advisor at Chongqing University of Technology. His main research interests include optical fiber sensing systems and smart structures.