先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022051202

基于柔性铰链的 FBG 三维加速度传感器

严超凡，戴玉堂*，杨雨微，罗开彦

（武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心，武汉 430070）

摘　要： 针对振动测量中三维振动信号测量需要，基于柔性铰链设计了一种光纤光栅（FBG）三维加速度传感器。构建了传感器拾振机构的振动模型，介绍了传感器的结构模型和测量原理，推导了传感器谐振频率和灵敏度理论公式，建立了拾振机构的数学模型，并用 MATLAB 对传感器拾振机构关键尺寸参数进行优化设计。根据优化后尺寸制作了传感器，通过振动实验对其进行性能测试。实验结果表明：该传感器在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的谐振频率分别为 673，667 和 1 376 Hz，工作频率区间分别为 0～220 Hz，0～220 Hz 和 0～450 Hz，灵敏度分别为 72.3，70.2 和 83.1 pm/g。所设计的传感器具有较好的横向抗干扰能力，能够满足三维振动信号测量的要求。

关键词： 光纤光栅；三维加速度传感器；柔性铰链；振动测量

中图分类号： TN253；TP212.14　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0697－07

FBG Three-Dimensional Acceleration Sensor Based on Flexible Hinge

YAN Chaofan，DAI Yutang，YANG Yuwei，LUO Kaiyan

（National Engin. Research Center of Fiber Optic Sensing Technol. and Networks，Wuhan University of Technol.，Wuhan 430070，CHN）

Abstract： To meet the needs of three-dimensional vibration signal measurement in vibration measurement，a fiber Bragg grating three-dimensional acceleration sensor was designed based on flexible hinge. The vibration model of the pickup mechanism of the sensor was constructed，the structural model and measurement principle of the sensor were introduced，the theoretical formulas for the resonant frequency and sensitivity of the sensor were deduced，the mathematical model of the pickup mechanism was established，and the key dimension parameters of the pickup mechanism of the sensor were optimized and designed by MATLAB. The sensor was fabricated according to the optimized dimension，and its performance was tested by vibration experiments. The experimental results show that the resonant frequencies of the sensor in the X-axis，Y-axis and Z-axis directions are 673，667 and 1 376 Hz，respectively，the operating frequency ranges are 0～220 Hz，0～220 Hz and 0～450 Hz，respectively，and the sensitivities are 72.3，70.2 and 83.1 pm/g，respectively. The designed sensor has good lateral anti-interference degree and can meet the requirements of three-dimensional vibration signal measurement.

Key words： fiber Bragg grating；three dimensional acceleration sensor；flexible hinge；vibration measurement

0　引言

光纤光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）具有耐腐蚀、抗电磁干扰、能远距离传输信号、可分布式测量[1-3]等优点，广泛应用于机械、石化、地震监测、土木工程、油气勘探、隧道、桥梁、航空航天[4-10]等领域。

光纤光栅加速度传感器是将外界物理参数的变化转变为光在传播过程中特性参数的变化，实现对被测物理量的间接测量。研究者们对 FBG 三维加

收稿日期：2022－05－12.

基金项目：国家自然科学基金项目(51975442).

* **通信作者：**戴玉堂　**E-mail：** daiyt68@163.com

速度传感器研究较多，目前已经取得了进展。赵彦涛等[11]将六根中心波长不同的光栅与一个正方体质量块结合，设计了一款三维加速度传感器。郭永兴等[12]采用十字梁结构的弹性体设计了一体式光纤光栅三维加速度传感器，该传感器可以实现测量三维加速度，但是其灵敏度偏低；Wang Hui[13]等采用柔性铰链和圆柱体薄壁块设计了一款三维加速度传感器，但是其 Z 轴方向灵敏度只有 27.9 pm/g。

本文设计了一种基于柔性铰链的三维 FBG 加速度传感器，利用柔性铰链转动副的特性，可实现振动-角位移-光信息转换，从而实现振动测量。该传感器具有体积小、结构紧凑等优点，在一定的工作频率范围内可满足同时监测三个方向振动的需求。

1 传感器结构设计

1.1 结构模型及测量原理

光纤光栅加速度传感器的工作原理是以拾振机构为中间载体，通过光纤光栅将外界的振动信息转化为光信号变化，再通过 FBG 解调仪将该光信号变化进行解调处理，最终得到所需要的振动信息。如图 1 所示，FBG 三维加速度传感器主要由上盖板、壳体、下盖板(底座)、拾振机构、光纤光栅、螺钉等组成。考虑到传感器制作过程中光纤光栅的预拉伸量需要均匀一致，因此采用组合式结构。其中，X 轴和 Y 轴拾振机构采用圆形铰链，Z 轴拾振机构采用对称式直圆形铰链。通过螺钉，将三个拾振结构与底座固定连接，形成一体结构。传感器在感知外界的震动后，通过柔性铰链将振动信号传递给拾振结构，使其围绕铰链的回转中心作往复摆动，粘贴于光纤固定槽内的光纤光栅会随着这种往复摆动产生轴向应力变化，从而实现了振动信号转变为光栅中心波长的漂移量。

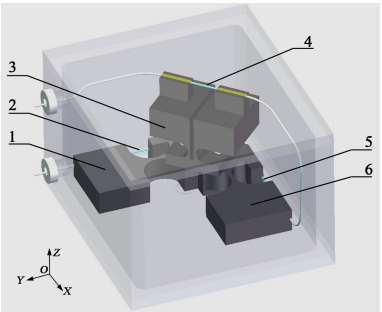


图 1 传感器结构示意图。1. X 轴拾振结构；3. Z 轴拾振结构；6. Y 轴拾振结构；2，4，5. FBG

1.2 传感器响应机理分析

传感器 X 轴和 Y 轴方向为对称结构，因此选取 X 轴方向拾振机构进行理论分析。图 2 为传感器 X 轴拾振机构结构示意图，拾振块的质量为 m_1，光纤的刚度系数为 k_f。在传感器制作时需要对光纤光栅进行预拉伸处理，当传感器处于静态时，忽略其对拾振块偏转的影响，此时拾振块偏转角为零。当给拾振机构敏感方向施加一个加速度时，在外界作用力下，拾振块会围绕铰链的最薄弱处转动，一般会将铰链的最薄弱处设定为回转中心，此时偏转角非常微小。假设给 X 轴拾振机构的敏感方向的加速度为 $a(t)=A\sin(\omega t)$。则系统的力矩平衡方程为

$$J\ddot{\beta}+\left[K_{Z1}+k_f\left(\frac{h_1}{2}\right)^2\right]\beta=m_1x_1A\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中，J 为 X 轴拾振块对回转中心的转动惯量，β 为 t 时刻拾振块转动的角度，K_{Z1} 为 X 轴铰链转动刚度，h_1 为 X 轴拾振块高度，x_1 为 X 轴拾振块的质心到回动中心的距离，其值为 $\frac{1}{2}l_1+r_1$，A 为加速度在敏感方向上的振幅，ω 为外界激励的角频率。

光纤的刚度系数 k_f 为

$$k_f=\frac{A_fE_f}{l_f} \tag{2}$$

式中，A_f 为光纤端面横截面积，E_f 为光纤的杨氏模量，l_f 为光栅悬空长度。

铰链的转动刚度[14]为

$$K_{Z1}=\frac{Eb_1r_1^2}{12u} \tag{3}$$

其中，

$$u=\frac{2s^3(6s^2+4s+1)}{(2s+1)(4s+1)^2}+\frac{12s^4(2s+1)}{(4s+1)^{5/2}}\tan^{-1}\sqrt{4s+1} \tag{4}$$

式中，E 为铰链材料的杨氏模量，b_1 为 X 轴拾振机构的铰链宽度，r_1 为铰链的圆弧半径，e_1 为铰链最薄处厚度，$s=r_1/e_1$。

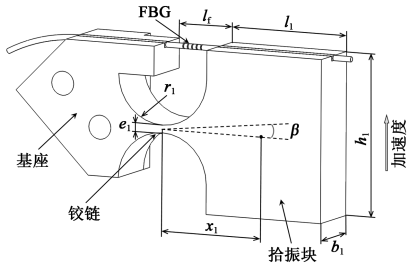


图 2 传感器 X 轴拾振机构示意图

由式(1)可得到传感器 X 轴方向的谐振频率为

$$F_1=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{Z1}+k_f(h_1/2)^2}{J}} \tag{5}$$

在 t 时刻质量块的转动角度为

$$\beta=\frac{m_1x_1A\sin(\omega t)}{K_{Z1}+k_f(h_1/2)^2-J\omega^2} \tag{6}$$

假定拾振机构在振动过程中外界温度保持不变，此时可不考虑温度对 FBG 中心波长的影响。由于在实际振动过程中偏转角 β 变化很小，因此光栅中心波长最大漂移量可表示为

$$\Delta\lambda=\lambda(1-P_e)\cdot\frac{h_1}{2l_f}\cdot\frac{mx_1A}{K_{Z1}+k_f(h_1/2)^2-J\omega^2} \tag{7}$$

式中，λ 为 FBG 未发生形变时的中心波长，P_e 为光纤的有效弹光系数。

则传感器 X 轴方向灵敏度为

$$S_1=\frac{\Delta\lambda}{A}=\lambda(1-P_e)\cdot\frac{m_1x_1h_1}{2l_f[K_{Z1}+k_f(h_1/2)^2-J\omega^2]} \tag{8}$$

图 3 为传感器 Z 轴拾振机构结构示意图，该拾振机构为对称结构，单侧拾振块的质量为 m_2。假设 Z 轴拾振机构的敏感方向的加速度为 $a(t)=A\sin(\omega t)$，则系统的力矩平衡方程为

$$J\ddot{\theta}+[K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2]\theta=m_2x_2A\sin(\omega t) \tag{9}$$

式中，θ 为 t 时刻 Z 轴拾振块转动的角度，K_{Z2} 为 Z 轴拾振机构铰链刚度，H 为拾振块底面到顶面的距离，r_2 为 Z 轴拾振机构铰链圆弧半径，x_2 为拾振块质心到回转中心的距离，其值为 $\frac{l_2-e_2}{2}$。

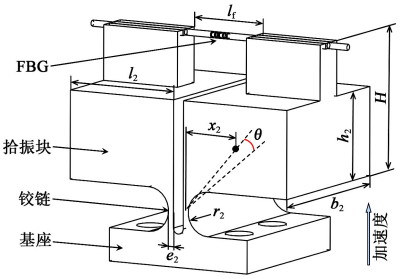


图 3　传感器 Z 轴拾振机构示意图

铰链的转动刚度[15]为

$$K_{Z2}=\frac{Eb_2r_2^2}{12v} \tag{10}$$

其中，

$$v=\frac{p^3(3p^2+4p+2)}{(p+1)(2p+1)^2}+\frac{6p^4(p+1)}{(2p+1)^{5/2}}\tan^{-1}\sqrt{2p+1} \tag{11}$$

式中，b_2 为 Z 轴拾振机构的铰链宽度，e_2 为铰链最薄处厚度，$p=r_2/e_2$。

由式(9)可得到传感器 Z 轴方向的谐振频率为

$$F_2=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2}{J}} \tag{12}$$

在 t 时刻，Z 轴拾振机构单侧拾振块的转动角度为

$$\theta=\frac{m_2x_2A\sin(\omega t)}{K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2-J\omega^2} \tag{13}$$

由于 Z 轴拾振机构为对称结构，且在实际振动过程中 θ 偏转很小，光栅中心波长最大漂移量为

$$\Delta\lambda=(1-P_e)\lambda\cdot\frac{2(H+r_2)}{l_f}\cdot\frac{m_2x_2A}{K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2-J\omega^2} \tag{14}$$

则传感器 Z 轴方向灵敏度为

$$S_2=\frac{\Delta\lambda}{A}=2(1-P_e)\lambda\cdot\frac{m_2x_2(H+r_2)}{l_f[K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2-J\omega^2]} \tag{15}$$

2　传感器参数优化

对于光纤光栅加速度传感器，谐振频率和灵敏度是其关键的性能指标，但两者之间彼此制约，在设计时无法同时兼顾，因此需要综合考虑传感器相关尺寸参数，进行优化处理。

如图 2 所示，对于传感器 X 轴拾振结构，其主要参数为 b_1，h_1，l_1，e_1，r_1，l_f。常见的优化方法是在确定传感器谐振频率的条件下优化其相关结构尺寸参数。根据传感器响应机理，其谐振频率和静态灵敏度可由振动分析计算。以灵敏度求解式为目标函数，将传感器 X 轴拾振机构的谐振频率和相关尺寸参数设定为约束条件，构建优化模型如下：

$$\begin{aligned}&\mathrm{Max}\ S(x)=(1-P_e)\lambda\frac{m_1x_1h_1}{2l_f[K_{Z1}+k_f(h_1/2)^2]}\\&\text{s.t.}\begin{cases}F_1=f_1\\l_f\leqslant 2r_1\\\dfrac{e_1}{r_2}\leqslant 1\\\boldsymbol{X}_1\leqslant\boldsymbol{X}\leqslant\boldsymbol{X}_2\end{cases}\end{aligned} \tag{16}$$

根据理论公式计算结果，将 X 轴拾振机构的谐振频率 f_1 设定为 650 Hz，式中 $\boldsymbol{X}=[b_1\ \ h_1\ \ l_1\ \ e_1\ \ r_1\ \ l_f]$ 为传感器 X 轴拾振机构的尺寸参数，$\boldsymbol{X}_1$ 和 $\boldsymbol{X}_2$ 为尺寸参数的限制条件，目标函数 $S(x)$ 为传感器 X 轴方向灵敏度函数，目标是求取 X 轴方向灵敏度最大值。$S(x)$ 是非线性约束函数，除上述约束条件外，拾振机构的加工、传感器的制作及封装等也会对 $S(x)$ 的优化产生影响。因此，对 X 轴拾振机构尺寸参数的优化处理是一个非线性规划问题[16]。通过 MATLAB 构建优化程序，对 $S(x)$ 进行计算，求得最优化结果。优化后的尺寸参数如表 1 所示，X 轴拾振机构的理论谐振频率为 706.38 Hz，理论灵敏度为 65.81 pm/g。

表 1 传感器 X 轴方向尺寸优化结果

尺寸参数	加工尺寸/mm	传感器性能指标
b_1	6	$S=706.38$ Hz $F_1=65.81$ pm/g
h_1	17	
l_1	13	
r_1	5	
e_1	0.8	
l_f	6	

如图 3 所示，对于传感器 Z 轴拾振机构，其主要参数为 b_2，h_2，H，l_2，e_2，r_2，l_f，建立优化模型如下：

$$\mathrm{Max}\ S(y)=2(1-P_e)\lambda\cdot\frac{m_2x_2(H+r_2)}{l_f[K_{Z2}+k_f(H+r_2)^2]}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}F_2=f_2\\ h_2<H\\ \dfrac{e_2}{r_2}\leqslant 1\\ \boldsymbol{Y}_1\leqslant\boldsymbol{Y}\leqslant\boldsymbol{Y}_2\end{cases}\tag{17}$$

根据理论公式计算结果，将 Z 轴拾振机构的谐振频率 f_2 设定为 1 300 Hz，式中 $\boldsymbol{Y}=[b_2\ \ h_2\ \ H\ \ l_2\ \ e_2\ \ r_2\ \ l_f]$ 为传感器 Z 轴拾振机构的尺寸参数，$\boldsymbol{Y}_1$ 和 $\boldsymbol{Y}_2$ 为尺寸参数的限制条件，目标函数 $S(y)$ 为传感器 Z 轴方向灵敏度函数，目标是求取传感器 Z 轴方向灵敏度最大值。优化后的尺寸参数如表 2 所示，Z 轴拾振机构的理论谐振频率为 1 413.7 Hz，理论灵敏度为 75.23 pm/g。

表 2 传感器 Z 轴方向尺寸优化结果

尺寸参数	加工尺寸/mm	传感器性能指标
b_2	15	$S=1\,413.7$ Hz $F_2=75.23$ pm/g
h_2	8	
H	13	
l_2	10.5	
r_2	2	
e_2	0.5	
l_f	7	

3 实验及结果分析

根据参数优化的结果将传感器制作成样品，如图 4 所示，拾振结构采用 SUS304 不锈钢，封装盒采用 5052 铝合金。

为了确定传感器的关键参数和性能指标，将传感器分别按照 X 轴、Y 轴和 Z 轴的方向分次固定在激振台上。本实验所使用的振动激励系统为丹麦 B&K 公司的振动实验平台，扫描频率范围为 5～1 000 kHz；传感器信号采集系统为光纤光栅高速解调仪，波长解调范围为 1 500～1 605 nm。振动测试实验装置如图 5 所示。

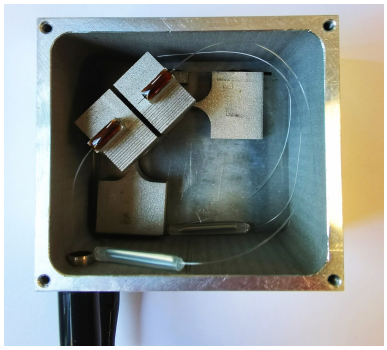


图 4 三维加速度传感器实物图

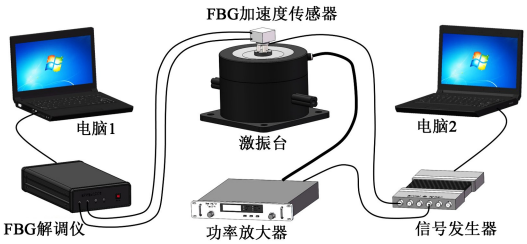


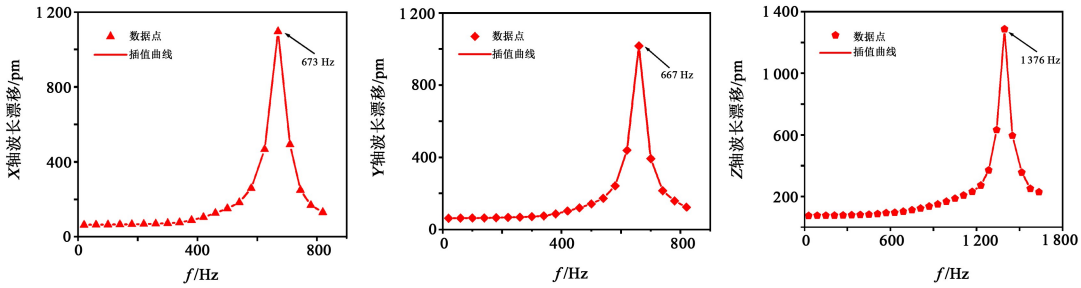
图 5 实验测试装置

3.1 幅频响应实验

进行幅频响应实验的目的是获得传感器的谐振频率和工作频率区间，实验方法是对其进行扫频。

在幅频测试实验中，将传感器分别按 X 轴、Y 轴和 Z 轴的方向分次固定在激振台上，激振台的加速度设定为 1 g(9.8 m/s^2)的正弦激励，X 轴方向和 Y 轴方向振动信号频率范围设定为 20～820 Hz，按步长 40 Hz 依次递增。Z 轴方向振动信号频率范围设定为 30～1 650 Hz，按步长 60 Hz 依次递增。随

着激振台频率的不断增大，FBG 的波长漂移量会先在一定范围内以微小幅度增加，继而再大幅增加，当波长漂移量出现最大值时，即可确定为传感器的谐振频率。图 6 分别为传感器 X 轴、Y 轴和 Z 轴的幅频特性曲线。实验结果表明，传感器 X 轴的谐振频率约为 673 Hz，Y 轴的谐振频率约为 667 Hz，Z 轴的谐振频率约为 1 376 Hz。其中，X 轴和 Y 轴的平坦区间为 0～220 Hz，Z 轴的平坦区间为 0～450 Hz，因此，可确定传感器 X 轴和 Y 轴的工作频率为 0～220 Hz，Z 轴的工作频率为 0～450 Hz。

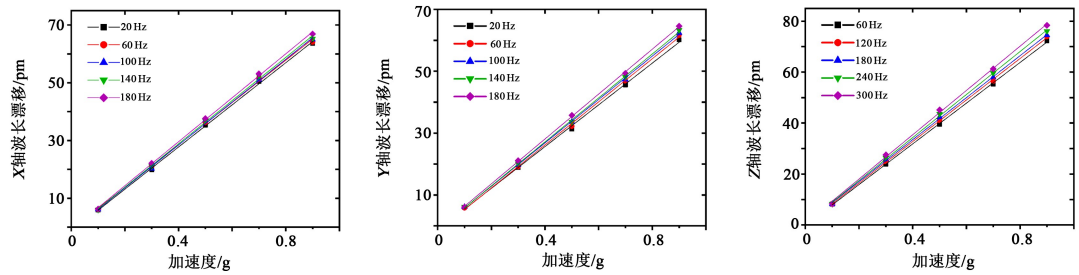


（a）　X 轴幅频特性曲线　　（b）　Y 轴幅频特性曲线　　（c）　Z 轴幅频特性曲线

图 6　传感器的幅频特性曲线

3.2　灵敏度线性实验

灵敏度线性实验是为了确定加速度传感器在工作频率范围内所测量的加速度与光纤光栅波长漂移量的对应关系。对于 X 轴方向和 Y 轴方向，分别选取频率为 20，60，100，140 和 180 Hz 的正弦激励，并在每一组频率下施加 0.1～0.9 g 步长为 0.2 g 的加速度。对于 Z 轴方向，分别选取频率为 60，140，220 和 300 Hz 的正弦激励，并在每一组频率下施加 0.1～0.9 g 步长为 0.2 g 的加速度。如图 7 所示，传感器分别在三个方向上的工作频率范围内，FBG 的波长漂移量与所施加的加速度表现出良好的线性相关性，传感器在 X 轴方向的灵敏度约为 72.3 pm/g，Y 轴方向的灵敏度约为 70.2 pm/g，Z 轴灵敏度分别约为 83.1 pm/g。

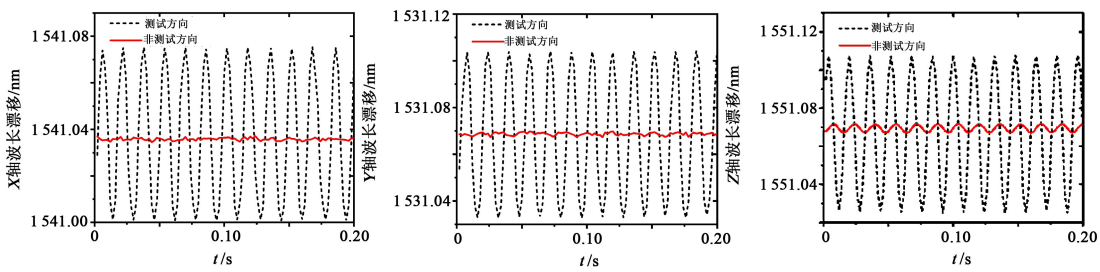


（a）　X 轴灵敏度标定曲线　　（b）　Y 轴灵敏度标定曲线　　（c）　Z 轴灵敏度标定曲线

图 7　传感器灵敏度标定曲线

3.3　横向抗干扰实验

横向抗干扰实验是为了检测加速度传感器在非测量方向上的振动对其性能的影响。在实验中，将传感器分别按 X 轴、Y 轴和 Z 轴翻转 90°固定在激振台上，对其施加 60 Hz 和 0.5 g 的正弦激励。图 8 为传感器在 X 轴、Y 轴和 Z 轴敏感方向与非敏感方向上的振幅曲线。实验结果表明，传感器在三个方向的横向抗干扰度分别为 5.06%，4.98%和 5.75%，



（a）　X 轴横向抗干扰特性　　（b）　Y 轴横向抗干扰特性　　（c）　Z 轴横向抗干扰特性

图 8　传感器横向抗干扰特性

传感器具有良好的横向抗干扰能力。

3.4 实验误差分析

通过分析理论计算值与实验测试数据,传感器的各项性能指标均满足设计要求,但是其谐振频率和灵敏度存在一定的误差。造成误差的原因主要有以下两点:第一,由于理论公式不精确造成的误差,在振动系统的力矩平衡计算中将拾振结构简化为围绕铰链最薄弱处转动,而实际的回转中心为铰链的薄弱区域,并非准确围绕铰链回转中心转动,并且在计算时忽略了光纤固定槽的深度,从而导致转动半径不精确;第二,由于加工制作造成的误差,由于铰链结构比较薄弱,拾振结构加工精度不高、光纤光栅预拉伸和粘贴固定都会影响实验测试结果。同时,在实验测试过程中也会造成误差,由于本实验使用的振动实验平台生产较早且使用频繁,在信号发生器的激励输入值与激振台实际振动输出值出现了一定的偏差,造成实际测试结果不精确。

4 结论

本文基于柔性铰链设计了一种 FBG 三维加速度传感器,传感器整体封装尺寸为 58 mm×52 mm×38 mm,实现了 FBG 三维加速度传感器小型化。推导了传感器的谐振频率和灵敏度的理论公式,根据灵敏度计算公式和实际的加工制作要求建立了传感器尺寸参数模型,并通过 MATLAB 构建优化程序,对关键尺寸参数进行优化。实验测试结果表明,该传感器在 X 轴的谐振频率约为 673 Hz,工作频率为 0～220 Hz,灵敏度约为 72.3 pm/g;Y 轴的谐振频率约为 667 Hz,工作频率为 0～220 Hz,灵敏度约为 70.2 pm/g;Z 轴的谐振频率约为 1 376 Hz,工作频率为 0～450 Hz,灵敏度约为 83.1 pm/g。传感器在三个方向上的横向抗干扰度分别为 5.06%,4.98% 和 5.75%,该传感器能够实现三个方向振动同时监测。

参考文献:

[1] 白 龙,杨华勇,罗 洪,等. 基于光纤布拉格光栅加速度传感器的研究进展[J]. 半导体光电,2012,33(6):767-771.
Bai Long, Yang Huayong, Luo Hong, et al. Research progress of fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(6): 767-771.

[2] 潘金辉,李仁辉,翟 爽,等. 基于光纤光栅 OPPC 的城区箱变监控系统的研究[J]. 电子质量,2017(5):99-105.
Pan Jinhui, Li Renhui, Zhai Shuang, et al. Application of fiber Bragg grating monitoring instrument in long-distance transmission engineering of long tunnel[J]. Electronics Quality, 2017(5): 99-105.

[3] 李宏业,饶斌裕,赵晓帆,等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(11):111420.
Li Hongye, Rao Binyu, Zhao Xiaofan, et al. Development of fiber gratings inscribed by femtosecond laster[J]. Laster & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111420.

[4] 张永芳,王 霞,邢志国,等. 面向机械装备健康监测的振动传感器研究现状[J]. 材料导报,2020,34(13):125-134.
Zhang Yongfang, Wang Xia, Xing Zhiguo, et al. Reserch on vibration sensors for health monitoring of mechanical equipment[J]. Materials Review, 2020, 34(13): 125-134.

[5] 牛晓东,袁合青,胡华东,等. 基于光纤传感的石化机械振动监测系统开发[J]. 化工自动化及仪表,2012,39(7):88-90.
Niu Xiaodong, Yuan Heqing, Hu Huadong, et al. Development of petrochemical mechanical vibration monitoring system based on optical fiber sensing[J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2012, 39(7): 88-90.

[6] Habel W R, Krebber K. Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(3): 268-280.

[7] 沈 洋,孙利民. 高灵敏度温度自补偿型光纤光栅加速度传感器设计[J]. 结构工程师,2009,25(2):141-146.
Shen Yang, Sun Limin. Design of FBG-based accelerometer with high sensitivity and temperature self-compensation[J]. Structural Engineers, 2009, 25(2): 141-146.

[8] 余玲玲. 油气勘探中光纤光栅加速度传感器的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
Yu Lingling. Study on fiber Bragg grating acceleration sensor in oil and gas exploration[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[9] 吴静红,叶少敏,张继清,等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(21):210603.
Wu Jinghong, Ye Shaomin, Zhang Jiqing, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong highspeed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. Laster & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210603.

[10] 闫 洁,李 伟,姜明顺,等. 基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J]. 中国激光,2020,47(11):1106006.
Yan Jie, Li Wei, Jiang Mingshun, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(11): 1106006.

[11] 赵彦涛,李志全. 基于 Bragg 光纤光栅的三维加速度传感器的研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(z1):299-301.
Zhao Yantao, Li Zhiquan. Study on triaxial accelerometer based on FBG[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2006, 27(z1): 299-301.

[12] 郭永兴，陈　敏，熊　丽，等. 一体式光纤光栅三维加速度传感器[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(21)：2106007.
Guo Yongxing，Chen Min，Xiong Li，et al. Integrated fiber grating three-dimensional acceleration sensor[J]. Laster & Optoelectronics Progress，2021，58(21)：2106007.

[13] Wang Hui，Yan Bing，Liang Lei. A 3D FBG accelerometer based on two pairs of flexible hinges[J]. IEEE Sensors J.，2021，21(19)：21586-21593.

[14] 吴鹰飞，周兆英. 柔性铰链转动刚度计算公式推导[J]. 仪器仪表学报，2004，25(1)：125-128，137.
Wu Yingfei，Zhou Zhaoying. Deduction of design equation of flexure hinge[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2004，25(1)：125-128，137.

[15] 吴鹰飞，周兆英. 单边直圆柔性铰链转动刚度的精确计算公式[J]. 测试技术学报，2002，16(z1)：149-153.
Wu Yingfei，Zhou Zhaoying. Exact design equation of half right circular flexure hinge[J]. J. of Test and Measurement Technol.，2002，16(z1)：149-153.

[16] 唐　冲. 基于 MATLAB 的非线性规划问题的求解[J]. 计算机与数字工程，2013，41(7)：1100-1102.
Tang Chong. Nonlinear programming problem solution based on MATLAB[J]. Computer and Digital Engineering，2013，41(7)：1100-1102.

作者简介：

严超凡(1990—)，男，湖北省天门市人，硕士研究生，研究方向为光纤传感技术；

戴玉堂(1965—)，男，湖北省孝感市人，博士，教授，博士生导师，研究方向为光纤传感及设备安全监测，超快激光微制造。