

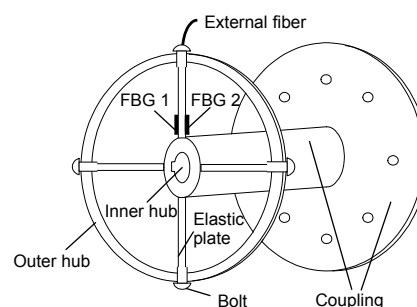


## 可调量程的轮辐式光纤光栅 扭矩传感器

张燕君<sup>1,2</sup>, 张亦男<sup>1</sup>, 付兴虎<sup>1,2\*</sup>, 王会敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004



**摘要:** 设计了一种以轮辐结构作为弹性元件的可调量程的光纤布拉格光栅扭矩传感器。在弹性板与轴向平行的上下表面对称粘贴两个中心波长不同的光纤布拉格光栅, 分别作为传感元件和参考元件。通过对扭矩值与两者反射中心波长差值的标定, 可以排除环境温度的影响, 实现温度自补偿的功能。采用卡口连接的方式将弹性板与内轮毂、外轮毂进行连接, 并用螺栓固定, 通过更换弹性板可以调整传感器的量程。经仿真分析和扭矩传感实验证明, 量程为 80 Nm 时, 扭矩传感器的平均应变灵敏度为 27.1 pm/Nm, 相关系数为 0.997, 重复性误差为 3.23% FS, 迟滞误差为 1.03% FS。

**关键词:** 轮辐结构; 光纤光栅; 扭矩; 可调量程

中图分类号: TN253; TP212

文献标志码: A

## Fiber Bragg grating torque sensor with the adjustable range spoke structure

Yanjun Zhang<sup>1,2</sup>, Yinan Zhang<sup>1</sup>, Xinghu Fu<sup>1,2\*</sup> and Huimin Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; <sup>2</sup>The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

**Abstract:** Using the spoke structure as the elastic element, an adjustable range fiber grating torque sensor is designed. Two fiber Bragg gratings with different central wavelengths are symmetrically bonded on the upper and lower surfaces of the elastic plate parallel to the axial direction, respectively, as sensing elements and reference elements. By calibrating the relationship between the torque values and the central wavelength difference between the two reflecting elements, the influence of ambient temperature can be eliminated, and the self compensation function of temperature can be realized. The elastic plate is connected with the inner wheel hub and the outer wheel hub by a bayonet, and is fixed by bolts, and the structure is easy to be disassembled so the range of the sensor can be adjusted by replacing the elastic plate. The dimension of spoke structure is optimized by using the finite element simulation software. The finite element simulation and experimental results show that the strain of the elastic element has a linear relationship with the central wavelength difference of two fiber gratings. When the range is 80 Nm, the average sensitivity of the sensor is 27.1 pm/Nm, the correlation coefficient is 0.997, the repeat ability error is 3.23% FS, and the hysteresis error is 1.03% FS.

**Keywords:** spoke structure; fiber Bragg grating; torque; adjustable range

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.005

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(8): 791–797

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-06-30

\*E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

## 1 引言

机械设备的扭矩参数,可以反映旋转动力机械系统性能,为被测零件提供科学数据<sup>[1]</sup>。迄今为止研究人员设计了多种扭矩传感器,例如电阻应变片式扭矩传感器<sup>[2]</sup>,灵敏度高,量程范围大,但其触头易磨损,且噪声严重;磁弹性型扭矩传感器<sup>[3]</sup>,抗干扰性强,响应速度快,但激磁电流存在不稳定性,且转轴材料的磁性和磁弹性会对测试的灵敏度和精度产生影响。与电类、磁类扭矩传感器相比<sup>[4]</sup>,光纤光栅传感器具备耐高温、抗辐射、安全可靠等优势<sup>[5,6]</sup>,尤其是在复杂电磁场等极端环境下,能实现对扭矩的测量<sup>[7]</sup>。

本文将光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为应变敏感元件,将两个 FBG 对称地封装在弹性板与轴向平行的上下表面,当外轮毂受到扭力作用时,两个 FBG 分别感受到拉力和压力的作用,FBG 的中心波长向不同的方向漂移,将两个 FBG 的中心波长做差,可以排除环境温度的影响,实现温度自补偿的功能<sup>[8,9]</sup>。弹性板与内轮毂、外轮毂之间采用卡口连接方式,便于拆装。本文在条形弹性板的基础上,设计了新型双凹槽结构的弹性板,可以在不改变扭矩传感器整体结构的情况下,通过更换不同结构的弹性板来调整传感器的量程。这种传感器可以同时监测两种不同量程的扭矩弹簧,避免资源和资金的浪费且扩展了传感器量程应用范围,具有结构简单、量程切换便捷、方便携带等特点<sup>[10]</sup>,为实现不同场合扭矩的测量提供了监测手段。

## 2 扭矩传感器的设计

### 2.1 传感器的结构

传感器的结构示意图如图 1(a),主要由内轮毂(inner hub)、外轮毂(outer hub),四个弹性板(elastic

plate)、FBG、联轴器(coupling)等组成。相邻的弹性板间的夹角为 90°,弹性板与内轮毂、外轮毂之间采用卡口连接的方式,并用螺栓固定,这种便于拆装的设计,可以在不改变扭矩传感器整体结构的情况下,通过更换结构不同的弹性板来调整传感器的量程;内轮毂与联轴器相连,在使用过程中不需要外接联轴器。将一根光纤上不同中心波长的 FBG1 和 FBG2 对称地封装在弹性板与轮辐轴向平行的上、下表面。封装过程中在 FBG 两侧施加微小的可调节的预应力<sup>[11]</sup>,可以有效防止光纤光栅随胶体固化过程中的收缩而收缩,避免光纤光栅反射谱的啁啾现象和波形的非线性失真。

当内轮毂固定,对外轮毂施加一定量的扭矩  $M$  时,弹性板受力变形使 FBG 发生弹性应变(如图 1(b)所示)。即:

$$M = f(\Delta\lambda_B), \quad (1)$$

式中:  $M$  为施加在外轮毂的扭矩(Nm),  $\Delta\lambda_B$  为 FBG 的中心波长变化量(nm)。

当外界温度或弹性板发生形变的时候,能够得到 FBG 的中心波长变化量与温度变化量  $\Delta T$  和应变  $\varepsilon$  的函数关系式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \varepsilon, \quad (2)$$

式中:  $K_T$  和  $K_\varepsilon$  分别表示 FBG 的温度和应变灵敏度系数,  $\Delta T$  和  $\varepsilon$  分别表示光栅所处环境的温度变化量和应变,  $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长(nm)。  $K_T$  与光纤的热光系数和热膨胀系数有关,  $K_\varepsilon$  与光纤的弹光系数有关,且  $K_\varepsilon = 1 - P$ ,  $P$  为光纤光栅的弹光系数。由于两个 FBG 在同一根光纤上,所以两个 FBG 的  $K_T$  和  $K_\varepsilon$  相同<sup>[12]</sup>,且其所在环境的温度也相同,受应力方向相反,即  $\Delta T_1 = \Delta T_2$ ,  $\varepsilon = -\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ 。将 FBG1 与 FBG2 的各参量分别带入式(2),得到 FBG1 和 FBG2 的中心波长变化量的差与应变  $\varepsilon$  的关系式为

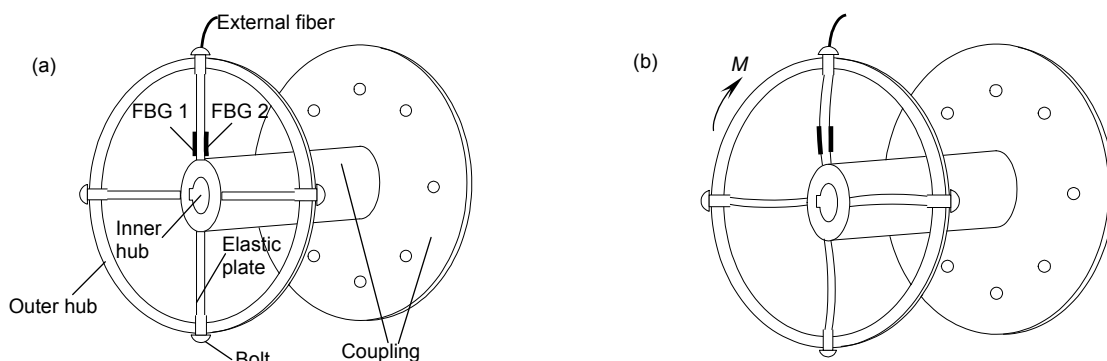


图 1 传感器受力情况。(a) 未受作用力。(b) 受扭矩  $M$  作用。

Fig. 1 Force condition of sensor. (a) Without force. (b) Affected by torque  $M$ .

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = 2(1-p)\varepsilon, \quad (3)$$

式中： $\Delta\lambda_{B1}$ 与 $\Delta\lambda_{B2}$ 分别表示两个FBG的中心波长变化量。由上式可得，将两个FBG的波长变化关系式相减，可以抵消由环境温度改变导致的FBG中心波长漂移，当两个FBG的初始中心波长相近时，可以认为其中心波长漂移量的差仅与弹性板的形变有关，并且两者成线性关系。

## 2.2 辐的结构分析与优化设计

以其中的一根弹性板作为分析对象。设外轮毂受到一定量的扭矩 $M$ ，弹性板的受力状况可转化为如图2所示的悬臂梁，某横截面所处位置与内轮毂外沿的距离用 $x$ 表示，对 $x$ 处截面进行受力分析，根据力矩平衡原理<sup>[13,14]</sup>可得：

$$M(x) + (x + \frac{D_1}{2})F_s = M, \quad (4)$$

式中 $D_1$ 为内轮毂的外直径，如图3所示。

内轮毂和外轮毂的工艺加工需要选取较大刚度的材料，在 $A$ 处(如图2)的转角为0，即 $\alpha_A = 0$ 。根据材料力学中的莫尔定理<sup>[15]</sup>，如果在 $A$ 处施加一单位力矩 $M_0(x)$ ，可得：

$$\alpha_A = \int_0^L \frac{M(x)M_0(x)}{EI} dx = \frac{1}{EI} [ML - (\frac{L^2}{2} + \frac{D_1}{2}L)F_s], \quad (5)$$

式中： $L$ 表示弹性板的长度。如图3所示， $L$ 可以用内轮毂外直径 $D_1$ 和外轮毂内直径 $D_2$ 表示为

$$L = \frac{D_2 - D_1}{2}. \quad (6)$$

将 $\alpha_A = 0$ 代入式(5)可得：

$$F_s = \frac{2M}{L + D_1}, \quad (7)$$

$$M(x) = 1 - \frac{2x + D_1}{L + D_1}, \quad (8)$$

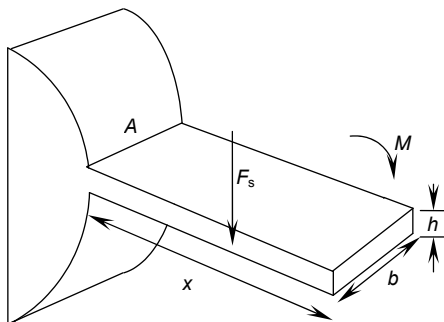


图2 弹性板某截面受力示意图。

Fig. 2 One cross-section of elastic plate.

对应的应力 $\sigma$ 和应变 $\varepsilon$ 表示为

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} (1 - \frac{2x + D_1}{L + D_1}), \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{6M}{Ebh^2} (1 - \frac{2x + D_1}{L + D_1}), \quad (10)$$

式中： $b$ 为弹性板的轴向宽度， $h$ 为弹性板的径向厚度。

经上文中的理论推导公式计算可得，当内轮毂的距离 $x$ 由0增大到 $L/2$ 时，弹性板的弹性应变和应力强度值将由最大值开始减小，当 $x$ 为 $L/2$ 时，应变和应力强度值为0。因此需将FBG封装到内轮毂的距离为0到 $L/2$ 的范围内，并应尽可能地接近内轮毂，但为了避免FBG在实际封装过程中弯折过大，封装位置应与内轮毂外沿有一合适距离，这就涉及到了对弹性板长度 $L$ 的选择问题，增大 $L$ 值便于对FBG进行封装，但过大的 $L$ 值，不便于传感器的运输以及安装使用，所以应对弹性板的长度 $L$ 进行适当的调整。此外，还可以通过调整弹性板的轴向宽 $b$ 和径向厚度 $h$ 实现提高传感器结构的应变灵敏度的目的。

弹性板需要同时具有较高的强度以及较小的刚度，本文选用了有良好的韧性、抗腐蚀性能的铝合金(7050-T7651)作为弹性板材料。创新地设计了双凹槽弹性板结构，四根弹性板在轮辐结构中的受力情况及结构尺寸是相同的，其结构示意图如图4所示。图中 $d_1$ 、 $d_2$ 表示两个凹槽的宽度， $t$ 表示弹性板的最小轴向宽度， $b$ 表示轴向宽度， $h$ 表示径向厚度。

当受到扭力 $M$ 作用时，可以得到弹性板沿 $y$ 轴的线位移 $\Delta y$ 计算公式为

$$\Delta y = \frac{9\pi(d_1 + d_2)^{1/2}}{2Eht^{5/2}} \cdot [(d_1 + d_2)(b - t) - \frac{1}{4}(b - t)^2 M]^{1/2}. \quad (11)$$

由式(11)可知，在受到相同扭力 $M$ 时，可以通过

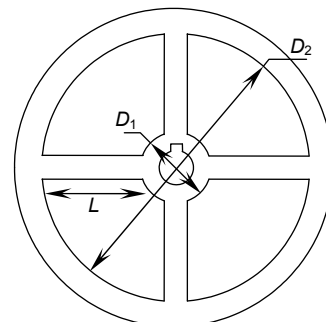


图3 轮辐尺寸示意图。

Fig. 3 Diagram of spoke size.

增大切削宽度  $d_1$ 、 $d_2$  或者减小材料的弹性模量  $E$ 、径向厚度  $h$ 、最小轴向宽度  $t$  来增大线位移  $\Delta y$ , 进一步增大弹性应变变量, 实现提高应变灵敏度的目标, 并且回型槽结构能够避免应力集中的现象发生。

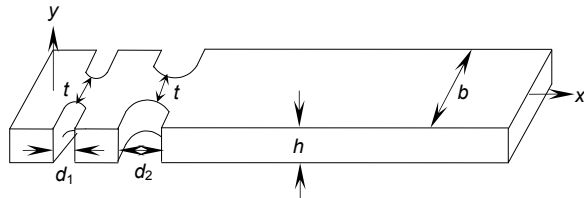


图 4 双回型槽弹性板结构示意图。

Fig. 4 Schematic diagram of double return groove elastic plate.

### 2.3 轮辐结构的仿真分析

首先对弹性板的轴向宽  $b$  和径向厚  $h$  进行调整, 对原始轮辐结构的力学特性进行有限元仿真, 设弹性板长度为 60 mm, 对外轮毂施加相同的扭力, 经仿真分析, 结果如表 1 所示。

表 1 的不同轮辐尺寸的有限元分析结果进一步验证了可以通过调整弹性板的轴向宽  $b$  和径向厚  $h$ , 实现提高弹性板的最大应变变量的目标。

对原始轮辐结构和新型轮辐结构分别进行有限元仿真, 仿真结果如图 5(a) 和 5(b)。仿真结果说明, 给

外轮毂施加相同的扭矩时, 新型轮辐结构较原始轮辐结构的最大弹性应变变量及应力强度提高近两倍。进一步说明可以在不改变轮辐整体结构的情况下, 通过更换弹性板来调整传感器的量程。

对轮辐结构的尺寸进行调整并对其力学特性进行有限元仿真分析, 根据仿真分析的结果最终选定两种轮辐结构的尺寸及仿真结果如表 2 所示。

### 3 实验与结果

此扭矩传感系统的实验装置结构示意图如图 6 所示, 主要由底座(base)、联轴器式轮辐(coupling type spoke)、滑轮及支撑座(pulley and support seat)、钢丝绳(a wire rope)、弹簧测力计(spring dynamometer)、砝码(farmer)组成。滑轮及支撑座的作用主要是改变钢丝绳的缠绕方向; 在绳的两端通过弹簧测力计悬挂等质量的重物, 两端的重物经过钢丝绳给外轮毂施加了一个旋转扭力, 进而使弹性板受到弯矩, 产生应变。

实验中选用长度为 10 mm~15 mm 的 FBG 作为传感元件, 带宽小于 0.25 nm。实验中选择台式 ASE 宽带光源作为整个传感系统的光源, 其输出功率为 16 dBm, 光谱范围为 1520 nm~1610 nm。选择型号为 AQ6375 的光谱仪观察 FBG 反射谱的中心波长变化。

表 1 不同轮辐尺寸有限元分析结果。

Table 1 The finite element analysis results of different spoke size.

Number	Inside hub outer diameter/mm	Outer hub inner diameter/mm	Radial thickness /mm	Axial width/mm	Stress intensity /MPa	Maximum strain/ $\mu\epsilon$
1	50	170	4	13	297	1934
2	50	170	4	15	266	1734
3	50	170	6	13	147	960
4	50	170	6	15	128	832

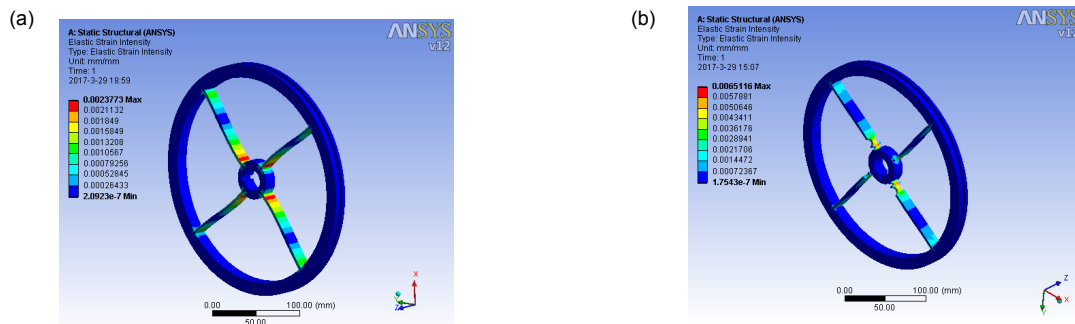


图 5 仿真效果图。(a) 原始轮辐仿真图。(b) 新型轮辐的仿真图。

Fig. 5 Simulation results map. (a) Simulation results map of original spoke. (b) Simulation results map of new spoke.

实验过程中，使用等质量的砝码，采用添加或减少系统两端悬挂的砝码数来获取梯度变化的扭矩，在正行程测试中逐渐增大扭矩梯度，到达最大量程后逐

渐减小扭矩梯度进行反行程测量。利用光谱仪得到 FBG 中心波长值，获得扭矩与中心波长差之间的关系。分别取量程为 160 Nm 和 80 Nm 的三组正、反行

表 2 轮辐结构有限元分析结果.

Table 2 Finite element analysis results of spoke structure.

Parameter	Double grooved spoke	Original spoke
Inside hub outer diameter/mm	45	45
Outer hub inner diameter/mm	235	235
Radial thickness/mm	4	4
Axial width/mm	15	15
Minimum axial width/mm	7.5	15
Stress intensity/MPa	1001	365
Maximum strain/ $\mu\epsilon$	6511	2377

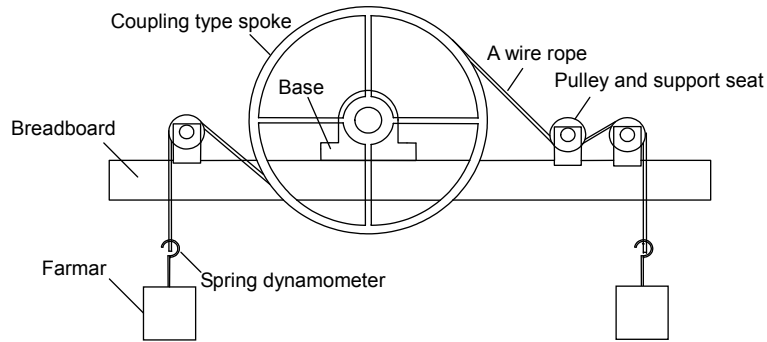


图 6 实验装置结构示意图.

Fig. 6 Structure diagram of the experimental apparatus.

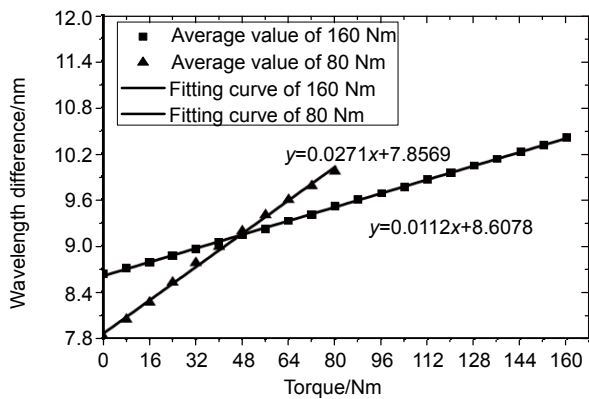


图 7 光纤光栅中心波长变化的拟合曲线.

Fig. 7 Fitting curve of fiber grating center wavelength.

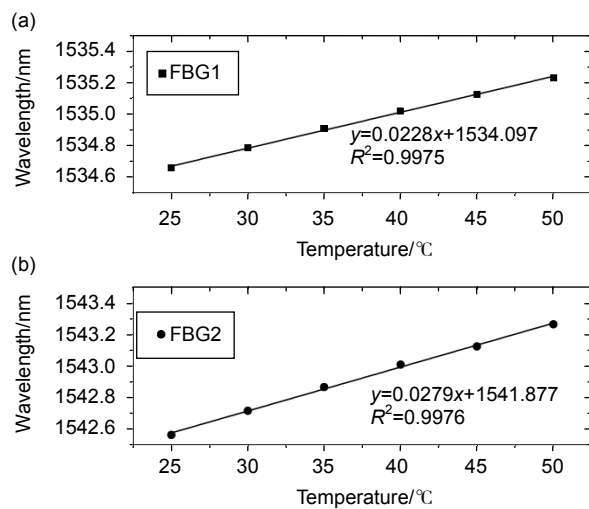


图 8 光纤光栅的温度特性曲线图.

Fig. 8 Wavelength and temperature relation curves of two FBGs.



程数据的算数平均值,用最小二乘法拟合曲线,扭矩值与两个光纤光栅中心波长差值的关系如图7所示。实验表明,初始位置两个FBG的波长差为定值,当扭矩改变时,两个FBG受力方向相反,波长差随着扭矩值的增加而上升。根据所得方程的斜率可知,传感器量程为160 Nm时,其平均灵敏度为11.2 pm/Nm,相关系数 $R^2$ 为0.999。当量程降为80 Nm时,传感器的应变灵敏度为27.1 pm/Nm,提高了一倍左右。

为了对温度灵敏度系数进行标定,对传感器进行了温度实验。将扭矩传感器放入温控试验箱中,在

25 °C~50 °C范围内,以递增的形式改变温控箱的温度,每增加5 °C对两个FBG的中心波长进行一次监测记录,光纤光栅的温度特性曲线如图8所示。

由图8可知,两个FBG的温度系数分别为22.8 pm/°C和27.9 pm/°C,可以看出在使用单光栅进行传感器实验时,温度变化对扭矩测量的结果影响很大。利用参考光栅法进行温度补偿,以中心波长差作为测量参数时,扭矩传感器的温度系数为5.1 pm/°C。表明参考光栅法起到了温度补偿的作用,降低了温度变化对扭矩测量造成的影响,但是温度补偿没有达到理想效

表3 相同行程中各扭矩梯度的标准偏差。

Table 3 Standard deviation of each torque gradient in the same stroke.

Torque/Nm	Standard deviation of	Standard deviation of reverse
	positive stroke/nm	stroke/nm
0	0.0005	0.0005
8	0.0235	0.0058
16	0.0126	0.0047
24	0.0120	0.0026
32	0.0120	0.0037
40	0.0120	0.0042
48	0.0162	0.0042
56	0.0141	0.0110
64	0.0094	0.0099
72	0.0251	0.0115
80	0.0251	0.0251

表4 正、反行程平均校准点及偏差值。

Table 4 The average calibration points and deviation values.

Torque/Nm	Positive stroke average	Reverse stroke average	Positive and reverse deviation/nm
	calibration point/nm	calibration point/nm	
0	7.821	7.819	0.002
8	8.031	8.053	0.022
16	8.261	8.267	0.006
24	8.520	8.526	0.006
32	8.779	8.777	0.002
40	8.990	8.988	0.002
48	9.187	9.193	0.006
56	9.397	9.406	0.009
64	9.607	9.591	0.016
72	9.788	9.791	0.003
80	9.966	9.966	0

果,主要原因是FBG封装过程中粘合剂厚度和覆盖面积不同,使得两个FBG温度系数存在差别。

选择量程为80 Nm的新型轮辐结构的实验数据,对其测量误差进行分析。实验中,将不同扭矩梯度处的波长差作为输出量,将三组实验中不同行程的输出量作为样本数据,采用均方根法计算两个行程中不同扭矩处的标准偏差,计算结果参见表3。根据重复性误差计算公式可得传感器的重复性误差 $\epsilon_R=3.23\%$  FS。将不同扭矩梯度处的波长差作为输出量,将三组行程方向不同的输出量取平均得到正、反行程的平均校准点,两个行程平均校准点之差的绝对值作为该位置的偏差值,参见表4。根据迟滞性重复误差计算公式可得传感器的迟滞误差 $\gamma_H=1.03\%$  FS。

## 4 结论

本文设计了一种具有温度补偿功能的可调量程光纤光栅扭矩传感器。采用参考光栅法排除温度影响,实现温度的自补偿;利用卡口的连接方式,通过更换弹性板来调整传感器的量程,可以同时监测两种不同量程的扭力弹簧;自带联轴器的结构使传感器结构更加完整,安装方便;经仿真分析和传感实验验证表明,扭矩传感器的量程为80 Nm时,其平均灵敏度为27.1 pm/Nm,相关系数为0.997,重复性误差 $\epsilon_R=3.23\%$  FS,迟滞误差 $\gamma_H=1.03\%$  FS,具备较高的实用性和通用性。

## 基金项目

国家自然科学基金(11673040,61675176);河北省自然科学基金(F2014203125);燕山大学“新锐工程”人才支持计划项目资助。

## 参考文献

- Song Chunhua, Xu Guangwei. Development and research overview on torque sensor[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2012, **40**(11): 58–60.  
宋春华, 徐光卫. 扭矩传感器的发展研究综述[J]. *微特电机*, 2012, **40**(11): 58–60.
- Hu Defu. Design of the strain torque sensor[J]. *Ship Engineering*, 2001, **33**(4): 96–99.  
胡德福. 应变式扭矩传感器的设计技术[J]. *船舶工程*, 2001, **33**(4): 96–99.
- Zhang Caini, Wang Xiangzhao. Optical methods for measuring small angles[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2002, **13**(4): 416–419.  
张彩妮, 王向朝. 微角度的光学测量[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 416–419.
- Vasudevan M, Arumugam R, Paramasivam S. Real time implementation of viable torque and flux controllers and torque ripple minimization algorithm for induction motor drive[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**(11–12): 1359–1371.
- Li Yingjun, Zhang Jun, Jia Zhenyuan, et al. Research on force-sensing element's spatial arrangement of piezoelectric six-component force/torque sensor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, **23**(8): 2687–2698.
- Zhang Yanjun, Wang Guangyu, Fu Xinghu. Multiple wavelength demodulation method of long period fiber grating and fiber Bragg grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(8): 13–17.  
张燕君, 王光宇, 付兴虎. 长周期光纤光栅-布拉格光纤光栅多波长解调[J]. *光电工程*, 2016, **43**(8): 13–17.
- Guo Wei, Li Xinliang, Song Hao. Analysis of strain transfer of fiber grating sensors adhered to the structure surface[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, **31**(4): 1–4.  
郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. *计测技术*, 2011, **31**(4): 1–4.
- Mai Mingren, Chen Weiping, Qu Shengguan, et al. Investigation on side pressure's test mode of metal powder during compaction[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2009, **13**(2): 15–18.  
麦明仁, 陈维平, 屈盛官, 等. 金属粉末压制过程侧压应力直接测试系统的研究[J]. *现代制造工程*, 2009, **13**(2): 15–18.
- Zhang Yanjun, Tian Yongsheng, Fu Xinghu, et al. The adjustable range draw-wire type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 626–632.  
张燕君, 田永胜, 付兴虎, 等. 可调量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 626–632.
- Dias G L, Magalhães R R, Ferreira D D, et al. The use of a robotic arm for displacement measurements in a cantilever beam[J]. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2016, **6**(3): 45–57.
- Fan Xing, Zhao Meirong, Huang Yinguo, et al. A double crescent-shaped spoke type torque sensor based on fiber bragg grating[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2014, **36**(3): 231–235.  
樊星, 赵美蓉, 黄银国, 等. 一种基于光纤光栅的双月牙弧轮辐式扭矩传感器[J]. *世界科技研究与发展*, 2014, **36**(3): 231–235.
- Li Jun, Wu Jin, Gao Junqi. Study of an optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(1): 283–286.  
李俊, 吴瑾, 高俊启. 一种监测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(1): 283–286.
- Wen Changjin, Li Yulong. Prestress capillary encapsulating device of fiber Bragg grating[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, **38**(6): 12–15.  
温昌金, 李玉龙. 一种光纤光栅施加预应力的管式封装装置[J]. *光通信技术*, 2014, **38**(6): 12–15.
- Li Haixing, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al. Design of compliance factor experiment setup for single-axis flexure hinge[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1552–1559.  
李海星, 丁亚林, 惠守文, 等. 单轴柔性铰链刚度系数试验装置的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1552–1559.
- Liu Qinpeng, Jia Zhen'an, Fu Haiwei, et al. Double cantilever beams accelerometer using short fiber Bragg grating for eliminating chirp[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(17): 6611–6616.