

文章编号: 0258-7025(2002)09-0808-05

# 新型双向可调光纤扭转传感器的设计与实现

张伟刚<sup>1</sup>, 袁树忠<sup>1</sup>, 许兆文<sup>1</sup>, 黄勇林<sup>1</sup>, 曾 剑<sup>1</sup>, 开桂云<sup>1</sup>, 董孝义<sup>1</sup>, 杨建江<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南开大学现代光学研究所, 天津 300071; <sup>2</sup>天津大学建筑工程学院土木系, 天津 300072)

**摘要** 提出一种新型多模光纤扭转传感器的基本原理和传感结构, 推导了扭角传感的理论公式, 该传感器的扭角与多模光纤的功率损耗呈线性关系。在  $\pm 40^\circ$  扭角范围内, 技术上实现了灵敏度为 0.375 dB/deg. 的双向对称线性扭转传感, 在双向非对称线性扭转传感中, 获得了 0.592 dB/deg. 的灵敏度。

**关键词** 多模光纤 扭转传感器 扭角 双向调谐

中图分类号 TN 253; TP 212.14 文献标识码 A

## Design and Realization on Novel Fiber Torsional Angle Sensor with Bidirectional Tuning

ZHANG Wei-gang<sup>1</sup>, YUAN Shu-zhong<sup>1</sup>, XU Zhao-wen<sup>1</sup>, HUANG Yong-lin<sup>1</sup>,  
ZENG Jian<sup>1</sup>, KAI Gui-yun<sup>1</sup>, DONG Xiao-yi<sup>1</sup>, YANG Jian-jiang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071  
<sup>2</sup>Civil Department of Architecture Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** The basic principle and the sensing structure of a novel torsion sensor are proposed in this paper. The theoretical formulas of torsional angle sensing are derived and the torsional angle of this sensor is linear to the power loss of the multi-mode fiber. In the range of the torsional angle between  $-40^\circ$  and  $+40^\circ$ , the torsion sensing has been realized technologically with the sensitivities 0.375 dB/degree for the symmetrically bidirectional linear torsion sensing and 0.592 dB/degree for the bidirectional unsymmetrical linear torsion sensing.

**Key words** multi-mode fiber, torsion sensor, torsional angle, bidirectional tuning

## 1 引言

近年来, 由于工程仪器及仪表测试的需求不断增长, 有关扭转传感器的研制与开发日益受到重视并得到了迅速发展<sup>[1]</sup>。就传感结构而言, 已报道的扭转传感器可分为机械式、电磁式、体光栅式和光纤式等多种结构。机械式传感结构基于轴向应变片传感, 其机械加工要求高, 成本开销大; 电磁式传感结构基于电磁离合器式测功机, 其体积较大, 且易受电磁场干扰; 体光栅式传感器受机械加工精度、材料与器件特性的非线性制约, 其应用受到限制<sup>[2]</sup>。近年

来, 利用光纤及光纤光栅体积小、柔性强、抗电磁干扰等优良特性进行光纤式传感器的研究与设计引起了人们的广泛兴趣<sup>[3~5]</sup>。光纤式传感器利用光纤干涉仪、谐振腔或弯曲损耗等方式并配以适时跟踪控制系统, 可进行分布式、长距离、多参数传感, 在复合材料(如 Smart)的结构、形变等探测方面具有重要的应用价值, 是一种新颖的无损检测技术<sup>[6~8]</sup>。因此, 在光纤传感领域探索新方法、开发新技术是一个很有实际意义的课题。本文将多模光纤缠绕在弹性圆棒的表面, 两端用特种胶刚性粘贴, 设计并实现了一种新型的多模光纤扭转传感器, 推导了有关扭转传

收稿日期 2001-06-26; 收到修改稿日期 2001-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 69977006)资助项目、国家博士点基金项目、天津市科技攻关项目(编号: 003104011)和天津市建委专项合同项目。

作者简介: 张伟刚(1959—), 男, 黑龙江省伊春市人, 南开大学现代光学研究所教授, 博士, 主要从事光纤光栅传感器与光纤通信系统的技术研究。E-mail: weigangzh20@eyou.com

感的理论公式。理论和实验均证明,在扭应变较小的条件下,该传感器的扭角与多模光纤的功率损耗呈线性关系。在 $\pm 40^\circ$ 扭角范围内,技术上实现了灵敏度为 $0.375 \text{ dB/deg.}$ 的扭转传感,实验结果与理论预计值符合得很好。

## 2 结构与原理

称均质、对称、各向同性、可在扭转应力作用下绕轴线转动的弹性梁为扭梁。由于圆形横截面几何形状的极对称性,在一定的扭角范围内,若因扭转引起的纵向、横向及弯曲形变很微小,可认为其横截面仍然保持为平面,仅有扭转形变。这时,扭梁的扭转可作为纯扭转问题处理<sup>[4]</sup>。多模光纤扭转传感器的结构如图 1(a)所示,其扭应变分析如图 1(b)所示。

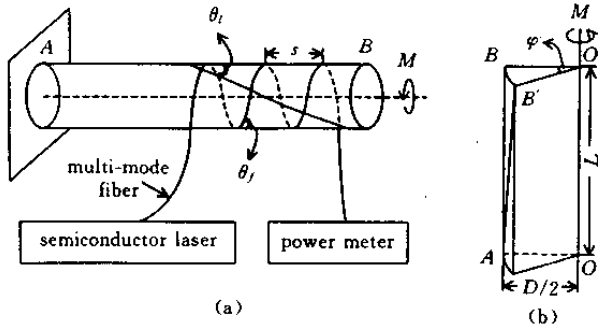


图 1 多模光纤扭转传感结构示意图

Fig.1 Structural schematic of multi-mode fiber torsion sensing

将长度为 $L$ ,直径为 $D$ 的均质圆形扭梁一端固定于 $A$ 处,另一端自由。长度为 $l$ ,直径为 $d$ ( $d \ll D$ )的细金属丝沿扭梁轴 $OO'$ 呈 $\theta_f$ 角用特种胶刚性粘贴在靠近自由端处;多模光纤(MMF)则以一定的预应力沿扭梁轴 $OO'$ 呈 $\theta_f$ 角等螺距 $s$ 与金属丝反向缠绕,光纤环的两端用特种胶刚性粘贴,其两端分别与光源和探测器相接。该扭转传感主要基于光纤微弯原理:当扭梁自由端 $B$ 受扭矩 $M$ 作用时, $A$ 端不动, $B$ 点移动到 $B'$ 点,扭梁的扭角为 $\varphi$ ,于是,扭梁因各处产生扭应变使 MMF 与金属丝接触处产生微弯。扭矩 $M$ 不同,MMF 的微弯曲率脉冲峰值、宽度变化不同(增大或减小),由此造成 MMF 的光功率损耗(微弯损耗)亦不同。若建立光损耗与扭角的变化关系,则通过测量 MMF 的微弯损耗即可获取待测物体的扭转或其他参量信息。这里细金属丝的作用是使 MMF 产生微弯。

忽略扭梁重量及细金属丝对扭梁力学性质的影

响。根据弹性力学知识,在扭应变 $\gamma$ 比较小的条件下,MMF 应变 $\epsilon$ 可近似表示为

$$\epsilon = \frac{DM \sin \theta_f}{4GI_p} \quad (1)$$

式中扭矩 $M = GI_p \varphi / L$ , $G$ 和 $I_p$ 分别为扭梁的剪切模量和横截面的极惯性矩,于是(1)式变为

$$\epsilon = \frac{D \sin \theta_f}{4L} \varphi \quad D \ll L \quad (2)$$

(2)式反映了 $\epsilon$ 与 $\varphi$ 呈准线性关系。由于 $\epsilon$ 与 $I_p$ 无关,故等长、外直径相同的实心扭梁与空心扭梁具有相同的应变灵敏度。并且,在梁长远大于直径的条件下,等直径的圆形梁可视为等应变梁。

当缠绕在扭梁上的 MMF 受扭矩作用产生微弯时,将引起 MMF 的几何和物理性能的变化,这样便导致传输模之间的转移,即模式间的交换或模式功率耦合。于是,MMF 中的部分纤芯导模转化为包层泄漏模,从而产生微弯损耗。假设光纤在扭转过程中的微弯曲率脉冲形状为高斯型<sup>[9]</sup>,若以 $\xi$ 表示沿光纤轴向坐标,则曲率函数可表示为

$$C(\xi) = \sum_{n=1}^N C_n(\xi) \quad (3)$$

$$C_n(\xi) = A_n \exp \left[ -\frac{2^2(\xi - \xi_n)^2}{W_n^2} \right] \quad (4)$$

其中 $C_n(\xi)$ 表示光纤第 $n$ 个微弯, $N$ 为缠在扭梁上的光纤总微弯数, $A_n$ , $\xi_n$ 分别为曲率脉冲峰值及峰值位置, $W_n$ 是曲率值降为峰值的 $1/e$ 处的脉冲宽度。

对于光纤折射率分布参数 $\alpha = 2$ 的梯度形光纤,其微弯损耗可以表示为<sup>[10]</sup>

$$I = \frac{3.9}{\Delta} J(\delta\beta) \quad (5)$$

式中 $\Delta$ 为纤芯与包层的相对折射率差, $\delta\beta$ 为两模式传输常数之差, $J(\delta\beta)$ 为微弯曲率脉冲函数的功率谱密度。假设 MMF 中相邻微弯间隔大于曲率脉冲宽度,则 $J(\delta\beta)$ 可表示为

$$J(\delta\beta) \approx \frac{\pi}{4} N(\sqrt{A^2}) \bar{W}^2 \exp[-(\delta\beta)^2 \bar{W}^2 / 8] \quad (6)$$

式中 $\sqrt{A^2}$ 为曲率脉冲的均方根, $\bar{W}$ 为平均曲率脉冲宽度(相关长度),合并(5)(6)式,并利用关系式 $\delta\beta = -\sqrt{2\Delta}/r_f$ ,得到高斯型曲率脉冲对应的微弯损耗为

$$I_G = \frac{3.06}{\Delta} N A^2 \bar{W}^2 \exp \left[ -\frac{\Delta}{4r_f^2} \bar{W}^2 \right] \quad (7)$$

其中 $r_f$ 为光纤芯的半径。

由(7)式可知,对给定的光纤微弯传感器,参数

$r_f, \Delta, D, L, d, \theta_l, \theta_f$  和  $s$  是确定的, 于是, 其微弯损耗  $I_C$  直接依赖于光纤曲率脉冲的均方根  $\sqrt{A^2}$  和平均曲率脉冲宽度  $\bar{W}$ 。由于  $d \ll D$ , 故缠绕在金属丝处的 MMF 曲率 ( $2/d$ ) 远远大于其余缠绕在扭梁表面上的 MMF 曲率 ( $2/D$ )。由此可见, 扭梁上金属丝处的 MMF 曲率的变化, 是导致  $I_C$  变化的主要原因。从统计平均的角度而言, 在扭梁扭应变  $\gamma$  不大的条件下  $\sqrt{A^2}$  的变化微小,  $\bar{W}$  的变化对  $I_C$  大小的影响要强于  $\sqrt{A^2}$ 。于是, 可以假设  $\bar{W}$  与光纤微应变  $\epsilon$  成比例, 即

$$\bar{W} = \bar{W}_0 + (-1)^i \kappa \epsilon \quad (8)$$

式中  $\kappa$  为比例因子。符号  $i = 0$  对应正向扭转 (使 MMF 缠紧),  $i = 1$  对应反向扭转 (使 MMF 放松)。  $N \approx L \cos \theta_l / s$ 。由于  $\sqrt{A^2}$  与  $2/d$  的量值是相当的, 故可假设  $\sqrt{A^2} \approx 2/d$ 。令  $I_{C0}$  为扭角  $\varphi = 0^\circ$  时的初始微弯损耗, 合并 (2) (7) 和 (8) 式得相对微弯损耗

$$\delta I_C = -I_{C0} + K_1 [\bar{W}_0 + (-1)^i K_2 \varphi] \times \exp\{-K_3 [\bar{W}_0 + (-1)^i K_2 \varphi]\} \quad (9)$$

$I_{C0}$  的大小与扭梁的直径  $D$ , 金属丝的直径  $d$  及粘帖角度  $\theta_l$ , 光纤缠绕时的预应力及螺距  $s$  等有关。(9) 式是利用光纤微弯损耗进行扭转传感的基本原理。式中三个因子分别为  $K_1 = (12.24 L \cos \theta_l) / (d^2 s \Delta)$ ,  $K_2 = (\kappa D \sin \theta_f) / (4L)$ ,  $K_3 = \Delta / 4r_f^2$ 。

由 (9) 式得到扭角传感灵敏度的表达式为

$$\mathcal{S}(\varphi) = (-1)^i 2K_1 K_2 \bar{W} \times [\exp(-K_3 \bar{W}^2) - 1 - K_3 \bar{W}^2] \quad (10)$$

式中  $\bar{W} = \bar{W}_0 + (-1)^i K_2 \varphi$ 。对本文设计的扭转传感器,  $K_1 \sim 10^4$  dB/mm<sup>2</sup>,  $K_2 \sim 10^{-4}$  mm,  $\bar{W}_0 \sim 10^{-2}$  mm,  $K_3 \sim 10^1$ /mm<sup>2</sup>,  $\exp(-K_3 \bar{W}^2) \cdot (1 - K_3 \bar{W}^2) \sim 10^0$ 。在扭应变比较小的条件下,  $\bar{W} \sim 10^{-1}$  mm,  $\mathcal{S}(\varphi) \sim 10^{-1}$  dB/deg.。(10) 式表明,  $\mathcal{S}(\varphi)$  具有一定的  $\varphi$  之对称性。 $\bar{W}$  与  $s, d$  有关, 而  $\mathcal{S}(\varphi)$  又受  $\bar{W}$  的制约, 且与  $\sin \theta_f \cdot \cos \theta_l$  成比例。令  $S_+(\varphi)$  和  $S_-(\varphi)$  分别代表正向与反向扭转的灵敏度。当  $s, d$  一定,  $\theta_l = \theta_f \approx 45^\circ$  时,  $\mathcal{S}(\varphi)$  具有最佳的对称性, 即  $S_+(\varphi) = S_-(\varphi)$ 。而当  $\theta_l \neq \theta_f$  时,  $S_+(\varphi) \neq S_-(\varphi)$ ,  $\mathcal{S}(\varphi)$  的对称性变差, 其具体实例将在下节分项阐述。

基于双向传感及灵敏度对称的考虑, 本文选取  $\theta_l \approx \theta_f = 45^\circ$ , 并由相关参数  $L = 100$  mm,  $D = 20$  mm,  $d = 0.35$  mm,  $\Delta = 0.01$ ,  $s = 10$  mm,  $r_f = 0.025$  mm,  $\kappa = 0.12$  mm,  $W_0 = 0.01$  mm, 计算得到  $K_1 = 3.$

$997 \times 10^4$  dB/mm<sup>2</sup>,  $K_2 = (\pi/180) \times 6.0 \times 10^{-3}$  mm,  $K_3 = 4.0$ /mm<sup>2</sup>。图 2 为  $-40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$  时  $\delta I_C$  与  $\varphi$  的理论关系曲线。其中, 虚线和实线分别对应于  $\varphi < 0$  及  $\varphi \geq 0$  的扭转情况。由图 2 可见, 在扭应变较小时 (相对应的扭角亦不很大), 微弯损耗与扭角近似呈线性关系。在  $-40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$  范围内, 对图 2 中的虚线和实线进行拟合, 得到二直线的斜率为  $\pm 0.389$ , 其线性拟合度大于 0.998, 即  $\mathcal{S}(\varphi)$  的理论值为 0.389 dB/deg.。这一性质对扭转传感器的设计非常重要, 只要优化各种参数设计并精工制作, 在一定扭角范围内, 开发新型、灵敏度较高、具有一定的线性度要求并能用于实际测量的光纤扭转传感器是可能的。

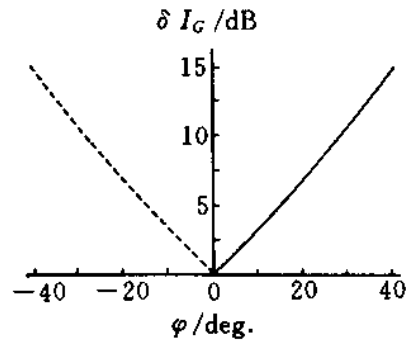


图 2 当  $-40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$  时微弯损耗  $\delta I_C$  与扭角  $\varphi$  的理论关系曲线

Fig.2 Theoretical relation between relative power loss of micro-bend  $\delta I_C$  and torsional angle  $\varphi$  when  $-40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$

### 3 实验结果及分析

本实验使用的 MMF 为 6 号梯度型多模光纤, 光纤环距扭梁自由端 20 mm。光源为 AV38124 型半导体调制激光器, 中心波长为 1550 nm。探测器为 AV2495 型光功率计, 可测波长范围为 800 ~ 1600 nm, 分辨率为 0.01 dB。为保证较高的信噪比、较宽的传感范围及减小测量误差, 实验中 MMF 的初始损耗  $I_{C0}$  控制在 15 ~ 25 dB 之间, 并采用相对微弯曲损耗  $\delta I_C$  进行测量。每次测量前, 先使激光器预热一段时间以使其输出稳定; 实验中首先将光功率计探测波长调到与激光器波长相匹配位置。其次, 将扭梁沿正、反方向轻旋几度“预热”, 以使扭应变传递均匀。然后, 对读数调零, 扭转测量按照使扭角沿正向从小到大, 再从大逐步减小回到自由状态的方式进行; 反向扭转测量亦然。注意, 每次改变扭角时, 应使测量系统尽量处于平衡状态。实验中环境温度稳

定,测量装置运行良好,测量的数据可靠、有效。在下面的实验数据图中,散点为实验数据,实线为拟合直线。

根据实验测量及数据分析,我们发现:

1) MMF 一般以粘接在靠近自由端附近且与金属丝的缠绕方向相反为宜。若 MMF 的缠绕圈数一定,则扭转传感的灵敏度随螺距  $s$  的增加而变大。这是由于 MMF 缠绕的预应力一定时,螺距较大者对应的平均曲率脉冲宽度  $\bar{w}$  相对较大。图 3 给出了同一金属丝三种不同螺距 ( $s = 15\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm}$  和  $5\text{ mm}$ ) 的  $\delta I_C$  与  $\varphi$  的对比图。其中  $d = 0.35\text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$ 。

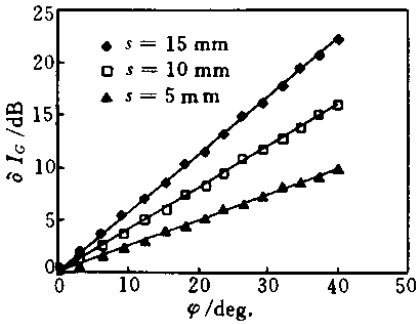


图 3 同一金属丝取不同螺距  $s$  的相对微弯损耗  $\delta I_C$  与扭角  $\varphi$  的实验对比曲线。其中  $d = 0.35\text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$

Fig.3 Contrast experimental curves between relative power loss of micro-bend  $\delta I_C$  and torsional angle  $\varphi$  for the same thin wire. Here,  $d = 0.35\text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$

2) 扭梁上粘贴直径较大的金属丝,其传感的灵敏度则较大,这是由于金属丝直径较大,因扭矩而引起该处的平均曲率脉冲宽度  $\bar{w}$  相对较大,因而导致了传感灵敏度的增大。图 4 给出了三种不同直径 ( $d = 0.5\text{ mm}$ ,  $0.35\text{ mm}$  和  $0.15\text{ mm}$ ) 的金属丝  $\delta I_C$  与  $\varphi$  的对比图。其中,  $s = 10\text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$ 。

3) 当斜向角  $0^\circ < \theta_l < 45^\circ < \theta_f < 90^\circ$  时,正向扭转的灵敏度大于反向扭转的灵敏度;反之,则反向扭转的灵敏度大于正向扭转的灵敏度。当  $\theta_l \approx \theta_f = 45^\circ$  时,正、反扭转双向传感的灵敏度基本一致。当  $\theta_l = 0^\circ$  时,正向扭转的灵敏度达到最大,而反向扭转的灵敏度则达到最小,且反向扭转传感效果不理想。图 5 给出了同一金属丝  $\theta_l$  与  $\theta_f$  三组典型值 ( $\theta_l = 20^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  与  $\theta_f = 70^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ ) 的  $\delta I_C$  与  $\varphi$  的对比图。其中  $s = 10\text{ mm}$ ,  $d = 0.35\text{ mm}$ 。

4) 采用线性方法描述扭转传感实验规律,存在一个最大允许扭转应变(许用扭应变)  $\gamma_m$ ,并由  $\gamma = DM/2GI_p$  决定。在扭梁机构确定的前提下,存在相

对应的许用扭角  $\varphi_m$ 。在  $\gamma_m$  范围内,若选择直径较小、梁长较长的扭梁,则  $\varphi_m$  的取值范围相对较宽。本文设计的扭转传感器,在非对称双向扭转传感中,正向扭转线性传感范围  $\varphi_m$  超过  $60^\circ$ ;在对称双向扭转传感中,双向扭转线性传感范围  $\varphi_m = \pm 40^\circ$ 。图 3 ~ 5 中的实线为  $\delta I_C$  与  $\varphi$  实验数据的拟合直线,其线性拟合度均大于 0.997,这与图 2 的理论值趋势是一致的。当  $\theta_f = \theta_l \approx 45^\circ$  时,实验数据拟合方程为  $\delta I_C = \pm 0.375\varphi$ ,拟合度达到 0.998,与图 2 的理论值符合得很好。因此,通过优化扭转传感机构参数设计并精工制作,在一定扭角范围内,可以实现扭转的线性传感。

此外,经对等长、外直径相同的实心与空心扭梁进行的扭转传感对比实验发现,二者角位移灵敏度在实验误差范围内是一致的。并且,当扭角  $\varphi > \varphi_m$  且小于  $90^\circ$  时,  $\delta I_C$  与  $\varphi$  的实验曲线与(9)式相符合,这与文中第 2 节中的理论分析相一致。从线性度的角度考虑,当  $|\varphi| \leq 40^\circ$  时,线性度很好,实验结果与理论值很符合,其误差  $< 3.6\%$ ;当  $40^\circ < |\varphi| \leq 90^\circ$  时,线性度变差,误差  $\sim 6\%$ ;当  $|\varphi| > 90^\circ$  时,线性偏离度随  $\varphi$  的增大而迅速增大,但其变化规律仍基本遵循(9)式。在大角度扭转时,其误差随  $\varphi$  的增大而增大,且由于正向扭转使 MMF 缠紧,反向扭转使 MMF 放松,故使后者的误差比前者要大些。产生误差的主要原因有:MMF 的缠绕螺距不完全均匀;扭梁在扭转过程中会产生微小形变;外界自然光对光功率计的影响,尤其信号光很弱时(小于  $-75\text{ dB}$ ),功率计读数严重失真。通过选择较高功率的激光器、宽范围的光探测器及精密加工传感装置等措施,可望增大扭转传感范围。

光纤式传感器是传感器家族中的新贵,它秉承了光纤的诸多优点,对其开发与应用是传感器研发技术上的一个新飞跃。光纤式传感器可埋植于结构体的内部或粘贴在表面,易与光纤网络集成,适宜于高辐射、强电磁场、易腐蚀等高危环境及特殊场点的测量与监控。目前,光纤式扭转传感器的类型主要有光纤干涉型、光纤光栅型和多模光纤缠绕型等,它们各有特点,适用于不同的需求。光纤干涉型扭转传感器基于光的干涉原理,适用于动态扭转测量(如角速率),精度很高,分辨率可达  $1.0\text{ deg./h}^{[3]}$ 。光纤光栅型传感器和多模光纤缠绕型扭转传感器基于耦合模理论和光纤微弯原理,适用于静态或准静态扭转测量(如扭角、扭矩、扭应变及剪切模量等);其测量范围较宽并可双向传感,可达  $-45^\circ$  和  $+45^\circ$ ;灵敏度和精度也很高,前者可达  $0.0867\text{ nm/deg.}$  及

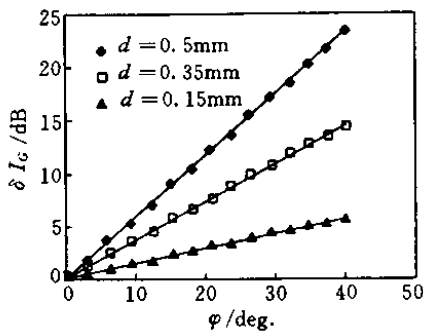


图4 不同直径的金属丝相对微弯损耗  $\delta I_G$  与扭角  $\varphi$  的实验对比曲线。其中  $s = 10 \text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$

Fig.4 Contrast experimental curves between relative power loss of micro-bend  $\delta I_G$  and torsional angle  $\varphi$  for the thin wire with different diameter. Here,  $s = 10 \text{ mm}$ ,  $\theta_l = 20^\circ$

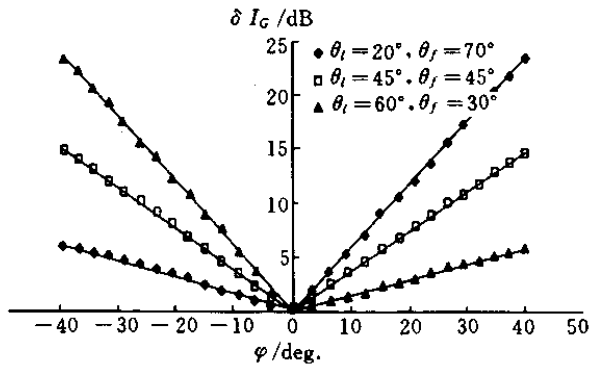


图5 同一金属丝  $\theta_l$  与  $\theta_f$  三组典型值的相对微弯损耗  $\delta I_G$  与扭角  $\varphi$  的实验对比曲线。其中  $s = 10 \text{ mm}$ ,  $d = 0.35 \text{ mm}$

Fig.5 Contrast experimental curves of three group between relative power loss of micro-bend  $\delta I_G$  and torsional angle  $\varphi$  for the same thin wire when  $\theta_l$  and  $\theta_f$  are changed. Here,  $s = 10 \text{ mm}$ ,  $d = 0.35 \text{ mm}$

0.0933 nm/deg.<sup>[4,5]</sup> 后者亦达到 0.375 dB/deg.。为获得高的传感灵敏度, 光纤干涉型扭转传感器需要使用长达几百米到几千米的保偏光纤, 光纤光栅的写入设备(如准分子激光器)价格昂贵, 前两种扭转传感器均需要隔离器以及多个耦合器, 故其成本相对较高。相比而言, 多模光纤缠绕型扭转传感器结构简单, 不需要隔离器与耦合器, 其性价比在未来的应用中具有较强的竞争力。

## 4 结 论

基于光纤微弯原理, 设计并实现了一种新型多

模光纤扭转传感器。该传感器具有双向可调、灵敏度高、复用性好等特点, 其扭角与多模光纤的功率损耗呈线性关系。在对称双向扭转传感中, 许用扭角  $\varphi_m = \pm 40^\circ$ , 实验结果与理论预计值符合得很好; 在非对称双向扭转传感中, 正向许用扭角  $\varphi_m$  超过  $60^\circ$ 。通过优化有关参数, 可以设计所需的扭转传感灵敏度。若将其应用于光传感领域, 可望实现多种物理量的光学测量(如机械、建筑材料性质(剪切模量、刚性、韧性等)的检测、结构形变(内部、外表面的应变、位移等)的实时监控等)。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Guanglin, Wan Zhi, Tao Chongde *et al.*. High precision angle displacement sensor to torsional rigidity measuring [J]. *Journal of Transducer Technology* (传感器技术), 1998, **17**(3): 42 ~ 43, 51 (in Chinese)
- 2 Feng Hao, He Tongneng, Zhong Degang *et al.*. Study on grating torque sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor* (仪表技术与传感器), 2000, (11): 9 ~ 10, 36 (in Chinese)
- 3 Hu Zhaoyang, Zheng Ludi, Zhang Yanshen *et al.*. Research on reentrant interferometric fiber optic rotation sensor [J]. *Laser and Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(2): 108 ~ 110 (in Chinese)
- 4 Zhang Weigang, Dong Xiaoyi, Feng Dejun *et al.*. Linear fibre-grating-type sensing tuned by applying torsion stress [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20): 1686 ~ 1688
- 5 Zhang Weigang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. Study of new-type torsion sensor of fiber grating [J]. *ACTA Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(10): 1237 ~ 1239 (in Chinese)
- 6 Mao Liangming, Meng Aidong, Zhang Deyin *et al.*. Study on fiber optic microbend sensor [J]. *Journal of Transduction Technology* (传感技术学报), 1999, **12**(1): 1 ~ 5 (in Chinese)
- 7 Shu Yunxing, Zhang Yongsheng, Yu Ke. Study of optical fiber array for smart composite material state detection [J]. *Optical Technique* (光学技术), 1999, **25**(5): 85 ~ 88 (in Chinese)
- 8 Wu Delong, Zhang Yong, Zhang Zhong *et al.*. Sensing principle based on modal power modulation and experimental study of embedded optical fiber in space smart structure [J]. *Optical Technique* (光学技术), 2000, **26**(6): 556 ~ 562 (in Chinese)
- 9 Yu Ke, Sun Yongsheng, Guan Li *et al.*. Structural state detection with twisted type fiber optic sensing array and OTDR technology [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(11): 1530 ~ 1535 (in Chinese)
- 10 Ye Peida. *Fiber Theory* [M]. Shanghai: Knowledge Publishing Company, 1985, first press. 78 ~ 119 (in Chinese)