

# 基于侧边粗抛磨单模光纤的高精度曲率传感技术研究

杨洋, 朱肖彤, 闫良俊, 陈旭泽, 宋章启\*

南方科技大学创新创业学院, 广东 深圳 518060

**摘要** 介绍了一种基于单模光纤侧边粗抛磨增敏技术的光纤曲率传感系统, 采用脉冲自参考信号解调技术对增敏区的透过率进行高精度测量。通过悬臂梁曲率测量实验, 测定传感器敏感区的线性响应系数是 0.593, 系统测量噪声幅度为  $5.9 \times 10^{-5}$ , 经过悬臂梁位移与曲率换算, 可知该系统的曲率分辨率可达  $9.95 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 。该系统具有结构简单、响应带宽宽和可实现时分复用等优点。

**关键词** 光纤光学; 抛磨光纤; 曲率测量; 光纤传感; 强度解调

中图分类号 TN212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1406004

## A Highly Accurate Curvature Sensor Based on a Rough Side-Polished Single-Mode Fiber

Yang Yang, Zhu Xiaotong, Yan Liangjun, Cheney Xuze, Song Zhangqi\*

College of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** In this study, a fiber curvature sensor was proposed based on a rough side-polished single-mode fiber with a sensitizing technology. In addition, the transmittance of sensitive area in case of the fiber curvature sensor was accurately measured using the pulse self-reference demodulation technique. The experimental results obtained based on the cantilever beam denote the linear response coefficient of the sensor sensitive area is 0.593 and that the noise amplitude in the measurement system is  $5.9 \times 10^{-5}$ . The curvature resolution of the system can become  $9.95 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  when the cantilever beam displacement is converted to curvature. Furthermore, the curvature sensor has a simple structure and a wide response bandwidth and can be used in a time-division multiplexing system.

**Key words** fiber optics; side-polished fiber; curvature measurement; optical fiber sensing; intensity demodulation

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 060.2430

## 1 引言

形状检测在肢体运动感知、机翼蒙皮形变测量、内窥镜路径跟踪、山体滑坡预警、机器人运动控制等领域具有广泛的应用前景。现有的形状检测手段多基于应变检测将应变信息转化成曲率信息。光纤曲率传感器可直接进行曲率检测, 与传感器所处的位置无关, 所以光纤传感器相对于传统电子传感器具有易于植入、灵敏度高、可阵列复用等优点。

光纤曲率传感器有强度型、干涉型和光纤光栅型等多种类型。干涉型光纤曲率传感器分为基于多芯光纤的远场干涉图案<sup>[1-3]</sup>和基于夹层光纤的模间干涉图案两种。干涉型光纤曲率传感器虽然灵敏度

很高, 但是传感器结构复杂, 解调困难, 且不能判别方向。光纤光栅型曲率传感器利用光纤光栅测量待测件结构弯曲时产生的应变测量曲率, 包括布拉格光栅型、长周期光栅型、倾斜光栅型和分布式弱光栅型<sup>[4-9]</sup>。为了补偿光栅的温度影响, 推挽式双光纤光栅、多芯光纤连续光栅和多根光纤光栅被提出。光纤光栅型曲率传感器在某些曲率范围内具有较高的灵敏度, 但是在曲率远小于 1 的情况下灵敏度极低, 且单光栅曲率传感器难以区分弯曲方向。此外, 光纤光栅解调需要复杂昂贵的光谱测量系统, 这是制约其广泛应用的重要原因。强度型光纤曲率传感器通过在光纤表面制造非对称缺陷来增强灵敏度<sup>[10-12]</sup>。强度型光纤曲率传感器在曲率远小于 1 的

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-04-05; 录用日期: 2020-04-28

基金项目: 深圳市科技计划面上项目(JCYJ20190809154209372)

\* E-mail: songzq@sustech.edu.cn

范围内仍然具有较高的灵敏度,同时具有解调方法简单,方向性好的优点。但是为了降低缺陷加工难度,目前已报道的强度型光纤曲率传感器都是基于塑料光纤。由于塑料光纤存在传输损耗大、长期稳定性差、与传统光通信器件不兼容等问题,故其在多传感器阵列应用和长时间稳定测量方面存在不足。

为了发挥强度型光纤曲率传感器的优势,解决其面临的难点,本文采用侧边横向粗糙抛磨增敏的方法,在普通单模光纤上制作高灵敏度曲率传感器。同时采用脉冲自参考的方法进行强度解调,最后将传感器贴在悬臂梁上进行曲率响应特性测试。实验结果表明该传感器具有较高的曲率灵敏度和方向性,同时解调系统具有极高的稳定性。

## 2 传感器原理与制备方法

### 2.1 传感器原理

单模光纤内的光场分布在宏弯情况下会发生凸侧集中的现象。当弯曲半径大于光纤的弯曲临界半径时,弯曲引起的传输损耗很小,此时光纤对弯曲不敏感。为了提高曲率传感的灵敏度,实现对小曲率范围的弯曲敏感,则需要对光纤表面进行增敏处理。图1给出对传感器敏感区作增敏处理的示意图,即将光纤的一侧进行抛磨,磨掉一部分光纤的包层,并使抛磨区表面粗糙。

由于非对称的光纤曲率增敏结构复杂,目前还难以得到不同增敏结构的曲率增敏解析解。本研究采用有限差分光束传播法对三维侧边抛磨光纤传输特性进行数值仿真研究。图2(a)给出不同抛磨深



图1 强度增敏型光纤曲率传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the intensity-sensitized fiber curvature sensor

度条件下光纤透过率的仿真结果。抛磨区深度为分别为15,20,25,30  $\mu\text{m}$ ,抛磨区长度为30 mm;纤芯折射率为1.478,包层折射率为1.48;注入光波长为1.55  $\mu\text{m}$ 。由于本研究主要关注小曲率情况下的响应特性,因此模拟曲率变化范围设置为 $-1 \sim 1 \text{ m}^{-1}$ 。可以看出,随着抛磨深度越深,透光率随曲率变化的线性度越好,但是损耗会随着抛磨深度增加而增加。图2(b)显示了在抛磨深度为20  $\mu\text{m}$ 的情况下,不同抛磨区长度下抛磨区光纤透过率的变化情况。由图可见,随着抛磨区长度增加,透光率在达到某点最高值后,随着曲率增加,透光率反而开始出现降低的趋势。上述模拟虽难以全面模拟粗糙表面的情况,结果会与实际制作出的传感器特性有所不同,但是总体趋势一致,故通过测量传感器的透过率变化可以测量弯曲曲率。

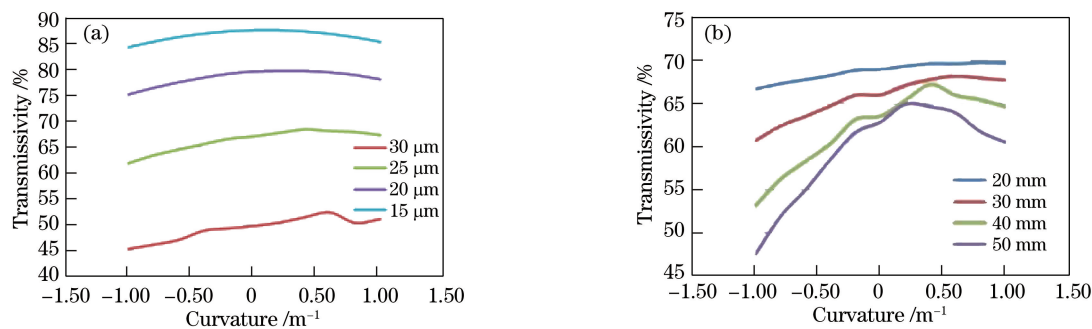


图2 弯曲增敏光纤透过率随曲率变化仿真结果。(a)不同抛磨深度情况;(b)不同抛磨长度情况

Fig. 2 Transmissivity simulation results of bending optical fiber versus curvature. (a) With different polished depths; (b) with different polished zone lengths

### 2.2 传感器的制备

塑料光纤虽然易于加工,但是在阵列复用和长期稳定性方面存在困难。故采用单模石英光纤作为传感器的制作材料。传感器的制作可分为三步。

1)将光纤进行预处理,即剥离光纤涂覆层并清洗干净。然后利用光纤侧边抛磨机对指定区域进行抛磨,抛磨深度控制在设计值范围内。2)将光纤与高弹性钛合金基底黏合,保护光纤敏感区,防止过度弯

曲导致断裂。黏合时确保抛磨面向上并与基底平行,以观察传感器的方向特性。3)打磨光纤抛磨区,制作微型沟槽,根据传感器灵敏度需要来提高传输

光损耗,以防止泄露光重新回到光纤导致灵敏度波动。其结构如图 3(a)所示,插图中显示了抛磨区在注入红光时的散射情况。

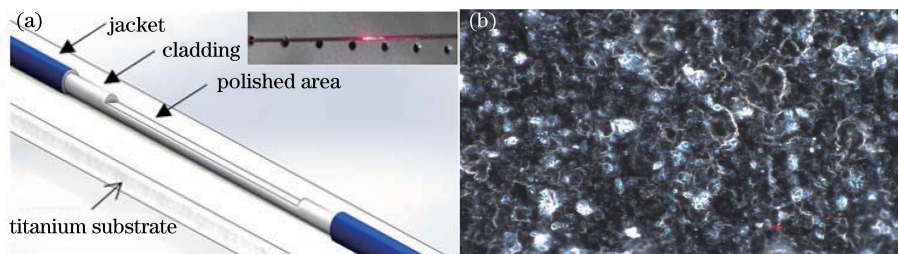


图 3 侧面粗抛磨型光纤曲率传感器结构示意图和其敏感区显微图。(a)结构示意图(插图显示抛磨区在注入红光时的散射情况);(b)敏感区显微图

Fig. 3 Schematic diagram of structure and micrograph of sensitive area for curvature sensor based on rough side-polished single mode fiber. (a) Schematic diagram of structure, in which the inset shows the scattering of the polished area when red light is injected; (b) micrograph of sensitive area

图 3(b)为传感器敏感区显微照片,采用 NIKON(ECLIPSE LV100ND)显微镜,放大倍数为 2000 倍。可见表面不均匀地分布着大小不一的粗糙颗粒。当有光通过时,粗糙表面存在不规则散射,导致部分光会入射到空气中形成损耗。早期文献报道中多采用光线法模拟多模光纤内的场分布随弯曲的变化。但是对于单模光纤,不规则散射会改变光纤内部传输模式,因此光线法不再适用。

### 3 实验及结果

#### 3.1 实验系统

本文研制的侧边粗抛磨光纤曲率传感器本质是一种强度型光纤传感器,为了提高测量精度和稳定性,需要消除由于光源和光路变化引起的强度波动。因此,实验采用基于脉冲自参考解调系统,解调系统框图如图 4 所示。解调系统包括脉冲光源、耦合器、反射镜、光电探测器和 A/D 数据采集卡。光源为超

辐射发光二极管(SLD)在脉冲电流驱动下发出的脉冲光,脉冲宽度为 200 ns,重复频率为 6 kHz。脉冲光经 2×2 耦合器的 1 端等分成 2 路,进入 I 路(信号光路)的光经过传感器探头和反射镜由 3 端口进入光电探测器 D;同理,进入光路 II(参考光路)的脉冲光路经延时光纤和反射镜由 3 端口返回。延时光纤长度为 40 m,参考光往返两次经过延时光纤,比信号光延迟 400 ns 到达探测器 D。这样信号光脉冲和参考光脉冲从时间上被区分开来。两个光脉冲的强度分别为

$$I_s = \alpha_c (1 - C) \alpha_s r \alpha_s C \alpha_c I_0, \quad (1)$$

$$I_r = \alpha_c C r (1 - C) \alpha_c I_0, \quad (2)$$

式中: $I_s$  和  $I_r$  是返回到探测器的信号光脉冲和参考光脉冲的光强; $r$  为反射镜的反射率; $I_0$  为注入光脉冲的强度; $\alpha_c$  为耦合器的透过率; $\alpha_s$  为传感器的透过率; $\alpha_s$  与弯曲曲率相关; $C$  是熔融拉锥型 2×2 光纤耦合器直通端 I 的分光比,1-C 则为其耦合端 II 的分光比。

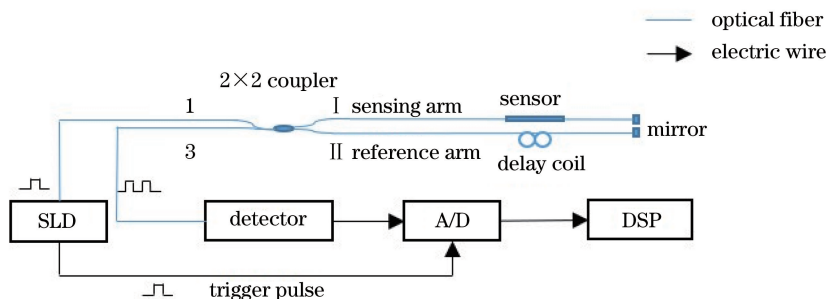


图 4 脉冲自参考解调系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of pulse self-referenced demodulation system



两个返回光脉冲进入探测器 D 转换为电信号, 经放大的再由模数转换器(A/D)采样为数字信号。A/D 转换器采样启动时间受 SLD 发出的触发脉冲(Trigger pulse)控制。A/D 采样的信号输入数字信号处理器(DSP)进行处理。DSP 将两路信号脉冲的幅度进行比值运算, 即

$$\eta = \frac{V_s}{V_r} = \frac{kI_s}{kI_r} = \alpha_s^2, \quad (3)$$

式中:  $k$  为探测器模块的灵敏度;  $V_s$  和  $V_r$  分别为信号脉冲和参考脉冲的电压幅度值。由(3)式推导可知, 自参考脉冲信号处理方法可以消除光路、电路等造成的波动影响, 可以从原理上保证强度检测的精度和稳定性。

传感器对曲率的响应特性可通过悬臂梁进行测试。图 5 为悬臂梁测试系统。将传感器牢固地粘在厚度为 1 mm 的钢梁上。钢梁左侧用夹具固定, 为固定端; 右侧为自由端。当钢梁的自由端在线性平移台的驱动下沿垂直于钢梁的方向移动时, 可以得到不同的曲率。传感器位置的曲率  $c$  与自由端位移  $x$  的运算关系为  $c = 3Sx/L^3$ <sup>[13]</sup>, 其中:  $L$  为悬臂梁自由端到固定点的长度, 大小为 40 cm;  $S$  为传感器敏感区中心到悬臂梁自由端的长度, 大小为 25 cm; 线性平移台可以带动钢梁从平衡位置前后移动 50 mm, 即  $x$  的取值范围为:  $-50 \sim 50$  mm。因此, 该悬臂梁曲率测量范围为  $-0.565 \sim 0.565 \text{ m}^{-1}$ 。

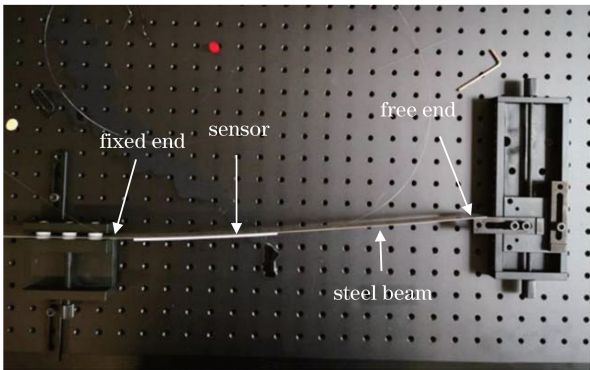


图 5 悬臂梁实验测量图

Fig. 5 Measurement system based on cantilever beam

### 3.2 实验结果分析

实验采用的侧边粗抛磨光纤的抛磨长度为 3 cm。悬臂梁自由端每次等间距移动 5 mm, 测量 21 次。定义传感器向抛磨区一侧弯曲的曲率为正, 向相反方向弯曲的曲率为负。图 6 为悬臂梁测试实验的数据结果。

该曲率传感器在曲率变化范围  $0 \sim 0.565 \text{ m}^{-1}$

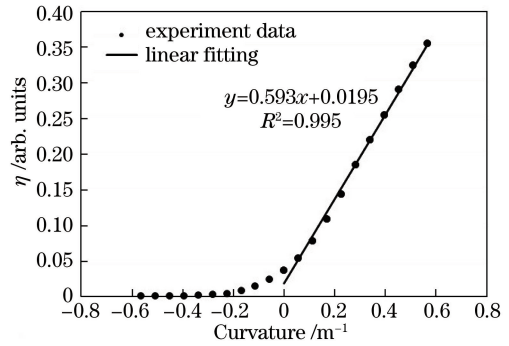


图 6 传感器响应曲线

Fig. 6 Sensor response curve

内响应曲线的线性度较好。对线性区间进行数据拟合得到拟合曲线为  $y = 0.593x + 0.0195$ , 拟合相关系数  $R^2$  为 0.995, 具有较好的线性度。在负曲率范围  $-0.565 \sim 0 \text{ m}^{-1}$  内, 传感器的响应系数逐渐降低并趋于零。该结果与图 2(a) 的仿真分析趋势基本一致, 但是由于实际采用的是粗抛磨表面, 大大增强了传感器部分的散射损耗, 同时采用宽谱光源, 抑制了单波长的模式干涉引起的扰动。究其原因: 传感器向抛磨区相反方向弯曲时, 光场能量分布向抛磨区偏移。由于抛磨区的存在引起包层模能量泄露, 导致光传输损耗急剧增大。当弯曲曲率达到一定程度后, 传感器的透过率降为零, 最终光电探测器探测到的信号光降为零。此后传感器的响应系数趋于零。在线性响应区间内, 传感器的响应系数为 0.593。将传感器探头部分用普通单模光纤替代, 测得的解调系统的本底噪声如图 7 所示。实测系统噪声幅度为  $5.9 \times 10^{-5}$ 。根据分辨率与响应系数及噪声幅度的关系  $c_{\min} = \frac{A}{k}$ , 其中  $c_{\min}$  为可测最小曲率, 即分辨率,  $A$  为系统噪声幅度, 代入数据计算可得传感器分辨率为  $9.95 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 。即该传感器可以测量从平直状态到发生半径为 10 km 的微小弯曲变形。

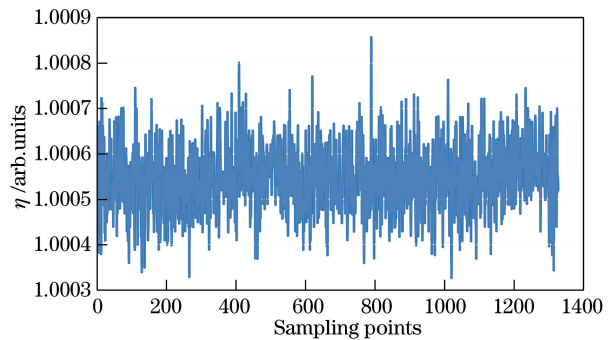


图 7 解调系统的本底噪声

Fig. 7 Background noise of the demodulation system

## 4 结 论

设计并制作了基于侧边粗抛磨单模光纤的曲率传感器,研究了传感器对曲率的响应特性。基于侧边粗抛磨的普通石英光纤所制成的传感器敏感区的线性响应系数是 0.593,灵敏度较高。在曲率范围  $0 \sim 0.565 \text{ m}^{-1}$  内,线性响应度较好。但是,高灵敏度也会导致传感器在负曲率条件下的损耗增加过快,测量灵敏度降为零,此外还会导致传感器动态范围较小。未来将深入研究粗抛磨型单模光纤曲率传感器灵敏度的影响因素,合理设计灵敏度与动态范围的关系。同时还需要研究传感器在实际应用的安全性和可靠性。

## 参 考 文 献

- [1] Covington C E, Blake J, Carrara S L. Two-mode fiber-optic bending sensor with temperature and strain compensation [J]. *Optics Letters*, 1994, 19 (9): 676-678.
- [2] Gander M J, Galliot E A C, McBride R, et al. Bend measurement using multicore optical fiber [C] // 12th International Conference on Optical Fiber Sensors. Washington, D.C.: OSA, 1997: OWC6.
- [3] Zhao S G, Wang X, Yuan L B. Four-core fiber based bending sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1001-1006.  
赵士刚, 王雪, 苑立波. 四芯光纤弯曲传感器 [J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1001-1006.
- [4] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, et al. Structural bending sensor using fiber gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2292: 407-413.
- [5] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(2): 120-121.
- [6] Jin Y X, Chan C C, Dong X Y, et al. Temperature-independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(19): 3905-3907.
- [7] Lally E M, Reaves M, Horrell E, et al. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8345: 83452Y.
- [8] Patrick H J, Chang C C, Vohra S T. Long period fibre gratings for structural bend sensing [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(18): 1773-1775.
- [9] Wang Y P, Rao Y J. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(5): 839-843.
- [10] Danisch L A. Bend-enhanced fiber optic sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1795: 204-214.
- [11] Djordjevich A, He Y Z. Thin structure deflection measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(3): 705-710.
- [12] Liu R Q, Liu P K, Fu Z, et al. Operation principle of a bend enhanced curvature optical fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 807-812.  
刘仁强, 刘品宽, 付庄, 等. 弯曲增敏型光纤曲率传感器机理的研究 [J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 807-812.
- [13] Fu Y L, Di H T, Liu R Q. Light intensity modulation fiber-optic sensor for curvature measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 594-599.