

基于 LP_{21} 模式的光纤弯曲传感器

范宇强 袁余锋 魏婉婷 陈 新 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 设计并研制了一种基于 LP_{21} 模式的新型光纤弯曲传感器。该传感器通过检测敷设于弹性基片上的光纤所传输的 LP_{21} 模式光斑图像的旋转, 实现对弯曲值的高精度测量。运用光纤耦合模理论和弹光效应求解 LP_{21} 的模方程, 证明该模式具有弯曲无关和扭转线性的特性, 并检验了光纤弯曲传感器对不同结构参数和环境温度下的性能。实验结果与理论分析相吻合, 证实该传感器具有较大的线性动态范围, 温度稳定性高, 且能辨识弯曲方向。

关键词 光纤光学; 弯曲传感器; 光纤 LP_{21} 模式; 光斑旋转; 弹光效应

中图分类号 TP212.1; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1128005

Fiber Bending Sensor Based on LP_{21} Mode

Fan Yuqiang Yuan Yufeng Wei Wanting Chen Xin Wu Xingkun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel fiber optic bending sensor based on LP_{21} mode is developed. A fiber affixed onto an elastic substrate is used to sense bending angles in the real time by measuring rotation of LP_{21} mode spot image. Theoretical analysis is given by fiber coupled-mode theory combining with elastic-optic theory. Relation between spot-rotation angle and sensor bending angle for different structures and temperatures is tested. The experimental results agree with theoretical analysis and validate the accuracy of the sensor. The sensor is temperature-immune and can detect bending direction as well as bending angles with a large dynamic range.

Key words fibers optics; bending sensor; fiber LP_{21} mode; spot rotation; elastic-optic effect

OCIS codes 060.2350; 060.2370; 110.6150

1 引 言

光纤弯曲传感器作为一种新型的弯曲传感器技术, 具有抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、质量轻和体积小等优点, 近年来引起了人们极大的兴趣^[1]。目前国内外已经提出了几种弯曲传感器, 如四芯光纤传感器、光纤布拉格光栅(FBG)传感器与长周期光纤光栅(LPFG)传感器等。它们虽然都达到了一定的灵敏度与分辨率, 但其附属检测系统复杂, 需要光谱分析装置或后续的图像处理, 且不能区分弯曲方向^[2~4], 此外, 传感器的精度受外界环境尤其是温度的影响较大, 存在交叉敏感问题, 因此其实际应用受到一定的限制^[5~7]。

本文介绍了一种基于光纤 LP_{21} 模式的光斑图

像弯曲传感器。当传感器弯曲时, 内含的光纤会发生扭转, 导致输出的 LP_{21} 模式光斑发生同方向的旋转。通过一个简单的 CCD 测量光斑的旋转角, 可得到光纤扭转角, 进而获得传感器的弯曲值。与传统光纤弯曲传感器相比, 不仅结构简单, 而且不受环境温度的干扰, 同时还能根据光斑旋转方向来识别弯曲方向。尤其是, LP_{21} 模式光斑还具有弯曲不变的特性, 即对连接光纤进行纯弯曲时, 光斑既不变形也不旋转, 且由于没有光学泄漏, 其光功率损耗极小。这就避免了光纤传感区外的弯曲对测量结果的影响。这个极为难得的特性使得 LP_{21} 弯曲传感器具有非常强的可扩展性。通过扫描测量光纤带(如 8 或 16 纤并带可以有 8 或 16 通道)上多个传感器的

收稿日期: 2012-05-02; **收到修改稿日期**: 2012-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61178049)资助课题。

作者简介: 范宇强(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: fannike@126.com

导师简介: 吴兴坤(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信器件和集成波导光电器件应用等方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com(通信联系人)

位置组合,可以获得一条空间曲线上多个点的弯曲值。仅用一条光纤带就能测得其附着在空间曲杆上任意点的三维坐标,进而得到曲杆的空间几何形态。在动作捕捉技术、钻井设备姿态测控、人体微创手术设备、虚拟现实以及机器人测控等领域有着广阔的应用前景。

2 实验原理及实验装置

2.1 理论分析

本课题组在前期的实验中得到了纯净的 LP₂₁

$$\begin{aligned} E_{xLP_{21}} &= E_{xHE_{31}} + E_{xEH_{11}} = 0 \\ E_{yLP_{21}} &= E_{yHE_{31}} + E_{yEH_{11}} = -\frac{2i\beta a}{u^2 r} \left[-2aJ_1\left(\frac{ur}{a}\right) + urJ_0\left(\frac{ur}{a}\right) \right] \sin(2\varphi + \theta_0) \\ E_{zLP_{21}} &= E_{zHE_{31}} + E_{zEH_{11}} = J_3\left(\frac{ur}{a}\right) \cos(3\varphi + \theta_0) + J_1\left(\frac{ur}{a}\right) \cos(\varphi + \theta_0), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 β 为传播方向的传播常数, a 为光纤的直径, u 为光纤横向传播常数, $J(\cdot)$ 为贝塞尔函数, r, φ, θ_0 分别为距离光纤的中心距离、相位角以及初始相位角, 初始相位角取值为 0° 和 90° 。由(1)式可知, LP₂₁ 模式的纵向分量很小可忽略, 并且存在两种相互正交的模式, 即 $\theta_0 = 0^\circ$ 的偶模式与 $\theta_0 = 90^\circ$ 的奇模式。

当光纤做纯扭转时, 其光斑受几何效应与弹光效应的共同影响。几何效应使得光斑随着光纤扭转而旋转, 旋转角与扭转角相同。弹光效应则会影响介质的折射率, 使光斑产生一个与光纤扭转方向相反的旋转。折射率改变量为^[9]

$$\Delta n_4^2 = -n^4 p_{44} \xi x, \quad \Delta n_5^2 = n^4 p_{44} \xi y,$$

模式光斑, 并发现其具有扭转线性和弯曲不变的特性, 实验结果与理论解析分析完全相符^[8]。即当光纤受纯扭转应变时, 光斑形状不变, 做同方向旋转, 旋转角与光纤扭转角呈线性关系; 而当光纤受到纯弯曲应变时, 光斑既不变形也不旋转。

LP₂₁ 模式是光纤低阶多模中的一种线偏振模, 它的形状为 4 个对称的相同光斑。对于弱导光纤, 可以通过标量法解正规圆形波导的波动方程(亥姆赫兹方程), 得到光纤内 LP₂₁ 的模式场为

式中 $\Delta n_i (i = 4, 5)$ 为光纤折射率变化张量的两个分量, n 为光纤折射率, p_{44} 为弹光效应系数, ξ 为光纤扭转率, 即单位长度上扭转的角度值。

LP₂₁ 偶模和奇模的耦合系数 $K_{i'j'}$ 为

$$K_{i'j'} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4i P_{j'}} \iint_D \sum_{i,j=1-3} (E_i^{i'} * \Delta n_{ij}^2 E_j^{j'}) dx dy, \quad (2)$$

式中 i', j' 取 $1 \sim 4$, $E_i^{i'}$ 为 i_{th} 模式电场的第 i 项 (i', j' 取 $1 \sim 4$ 分别为 LP₂₁⁺ 偶模, LP₂₁⁻ 偶模, LP₂₁⁺ 奇模和 LP₂₁⁻ 偶模)。 $P_{j'}$ 是 j' 模式的模式功率, Δn_{ij} 转化为 Δn_i : $\Delta n_{ii} = \Delta n_i, \Delta n_{23} = \Delta n_4, \Delta n_{13} = \Delta n_5, \Delta n_{12} = \Delta n_6$ 。

通过应用 Matlab 软件计算 LP₂₁ 模式的耦合系数 $K_{i'j'}$, 算得

$$\begin{aligned} K_{11} &= K_{12} = K_{14} = K_{21} = K_{22} = K_{23} = K_{32} = K_{33} = K_{34} = K_{41} = K_{43} = K_{44} = 0, \\ K_{13} &= -K_{31} = -\frac{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 n^4 p_{44} \xi [-16J_1^2(u) + 2u^2 J_0^2(u) + 4uJ_0(u)J_1(u) + 3u^2 J_1^2(u)]}{2\beta^2 [u^2 J_0^2(u) + u^2 J_1^2(u) - 4J_1^2(u)]}, \\ K_{24} &= -K_{42} = -\frac{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 n^4 p_{44} \xi [2u^2 J_0^2(u) - 4uJ_0(u)J_1(u) + u^2 J_1^2(u)]}{2\beta^2 [u^2 J_0^2(u) + u^2 J_1^2(u) - 4J_1^2(u)]}. \end{aligned} \quad (3)$$

通过简并奇模和偶模, 该 4×4 矩阵 \mathbf{K} 可简化为 2×2 矩阵: $\theta_0 = 0^\circ$ 时的两个 LP₂₁ 模式简并为 (LP₂₁)_{odd}}。同样的, $\theta_0 = 90^\circ$ 的两个模式可简并为 (LP₂₁)_{even}}。(LP₂₁)_{odd}} 和 (LP₂₁)_{even}} 之间的耦合系数 $K_{\text{odd-even}} = (P_1 K_{13} + P_2 K_{24}) / (P_1 + P_2) = -n^2 p_{44} \xi$, 其他模式之间的耦合系数 $K_{\text{odd-odd}} = K_{\text{even-even}} = 0$, $K_{\text{odd-even}} = -K_{\text{even-odd}} = -n^2 p_{44} \xi$ 。由此看到, 奇模和偶模之间有相互耦合, 而不存在自耦合。

根据波导的模耦合方程可以得到 LP₂₁ 模耦合方程, 设偶模和奇模在初始位置光功率的比值为 $1:m$, 由于光纤没有线双折射, 而在纯扭转时只产生圆双折射而也没有线双折射, 所以 $\beta_1 = \beta_2$ 。从而得到以下方程:

$$\begin{aligned} dc_1/dz &= K_{\text{odd-odd}} c_1 + K_{\text{odd-even}} c_2, \quad c_1(0) = 1, \\ dc_2/dz &= K_{\text{even-odd}} c_1 + K_{\text{even-even}} c_2, \quad c_2(0) = m. \end{aligned} \quad (4)$$

将模耦合系数代入方程, 解得

$$c_1 = m \sin \psi + \cos \psi, \quad c_2 = \cos \psi - \sin \psi. \quad (5)$$

式中 $\psi = n^2 p_{44} \xi z$ 。所以在光纤扭转扰动下的 LP₂₁ 模式电场方程为

$$E_x = 0, \quad E_y = c_1 E_{1y} + c_2 E_{2y} = iMN, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} M = -\frac{2\beta a}{u^2 r} \left[-2aJ_1\left(\frac{ur}{a}\right) + urJ_0\left(\frac{ur}{a}\right) \right], \\ N = -m \cos(2\varphi + n^2 p_{44} \xi z) + \sin(2\varphi + n^2 p_{44} \xi z), \end{cases} \quad (7)$$

光纤端面的强度分布为

$$I = (E)^* (E) = M^2 N^2.$$

令 $\partial I / \partial \varphi = 0$ ，则可得 LP₂₁ 四斑光强最大位置

$$\cot 2(2\varphi_m - n^2 p_{44} \xi z) = (m^2 - 1) / 2m = c, \quad (8)$$

式中 c 为固定常数。

当光纤扭转角为 $\Delta\alpha = \xi z$ ，光斑旋转的角度为 $\Delta\varphi = n^2 p_{44} \Delta\alpha / 2$ 。参考石英光纤的机械参数 $n = 1.458$ 和 $p_{44} = 0.5(p_{11} - p_{12}) = -0.0780$ ，得到 $\Delta\varphi / \Delta\alpha = n^2 p_{44} / 2 = -0.0829$ ，所以在几何效应和弹光效应共同作用下，光斑旋转角与光纤扭转角的比值：

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha} = 1 + \frac{n^2 p_{44}}{2} = 1 - 0.0829 = 0.9219. \quad (9)$$

当光纤做纯弯曲变化时，光纤的折射率微扰量为

$$\begin{cases} \Delta n_1^2 = \Delta n_2^2 = -n^2(n^2 q_1 x/R) + n^2(n^2 q_1 x/R)^2, \\ \Delta n_3^2 = -n^2(n^2 q_2 x/R) + n^2(n^2 q_3 x/R)^2, \\ \Delta n_4^2 = \Delta n_5^2 = \Delta n_6^2 = 0. \end{cases} \quad (10)$$

代入 K_{ij} 表达式中的 Δn_i^2 ，可得

$$\begin{cases} K_{\text{odd-even}} = K_{\text{even-odd}} = 0, \\ K_{\pi\pi} = \frac{\omega \epsilon_0}{4iP_{j\omega}} \iint_D (E_y^* \Delta n_2^2 E_y^\pi + E_z^* \Delta n_3^2 E_z^\pi) dx dy, \end{cases} \quad (11)$$

此处 π 为同奇偶，即 $\pi\pi=1-1$ 或 $2-2$ ，而 $j=1,2$ 。由光纤模式理论可知，LP₂₁ 模式的纵向分量远小于横向分量，因此(11)式可省去纵向分量，而简写为 $K_{\text{odd-odd}} = K_{\text{even-even}} = iW$ ，其中

$$\begin{aligned} W &= a^2 n^2 q_1^2 \eta \left[(12u + u^3) J_0^2(u) + \right. \\ &\left. (2u^2 - 24) J_0(u) J_1(u) + (u^3 - 2u) J_1^2(u) \right] / 6uR^2. \end{aligned} \quad (12)$$

式中 W 为实数，所以 $K_{\text{odd-odd}}$ 和 $K_{\text{even-even}}$ 都是虚数且 $K_{\text{odd-odd}} = K_{\text{even-even}}$ 。这表明奇模和偶模仅仅发生自耦合，而没有相互之间耦合，这恰好和光纤扭转时的情况相反。根据耦合系数的分布得到弯曲情况下的模耦合方程：

$$\begin{cases} dc_1/dz = K_{\text{odd-odd}} c_1, & c_1(0) = 1, \\ dc_2/dz = K_{\text{even-even}} c_2, & c_2(0) = m, \end{cases} \quad (13)$$

方程解为

$$c_1 = \exp(K_{\text{odd-odd}} z), \quad c_2 = m \exp(K_{\text{even-even}} z), \quad (14)$$

弯曲后电场强度为

$$\begin{aligned} E'_y &= c_1 E_1 + c_2 E_2 = \exp(iWz) (E_1 + kE_2) = \\ &\exp(iWz) E_y. \end{aligned} \quad (15)$$

这表明在发生纯弯曲时光斑强度无变化，即 $I' = E'^* E' = I$ 。弯曲仅仅使得两个模式发生了相移。

综上所述，应用光纤耦合模理论和弹光效应可精确求解 LP₂₁ 的模方程以及 LP₂₁ 在光纤扭转与弯曲时的功率分布变化，当光纤做纯扭转应变时，LP₂₁ 模式的光斑做同方向旋转，旋转角度与光纤扭转角度的比值为定值 0.9173，光斑的径向形状不会发生变化。而当光纤做纯弯曲应变时，LP₂₁ 光斑形状既不变形也不旋转。基于此特性，设计了带有双圆弧弯折结构的光纤弯曲传感器，利用扭转时 LP₂₁ 光斑旋转的特点测量光纤的弯曲半径。

2.2 实验装置

图 1 为实验测量平台。激光二极管(LD)光源发出 650 nm 的激光，通过模式选择器，在耦合光纤中产生 LP₂₁ 模式光束(光纤为 G652 标准单模光纤，但相对于 650 nm 激光为多模光纤)。模式选择器的作用是使光纤中不包含除 LP₂₁ 模式以外的任何其他模式，以保证实验结果精确。承载光纤的片状弹性基底两端固定于左右两平板上，左侧平板固定。右侧平板可绕转轴转动任意角度，带动弹性基片产生相同角度的弯曲。在转动过程中，需保证弹性基片弯曲后的形状呈圆弧形。弹性基片的弯曲角可通过旋转平台上的刻度读取。CCD 采集因光纤扭转而旋转的 LP₂₁ 模式光斑，并将图像传输至计算机端。通过 Matlab 软件读取光斑亮度分布数值，对光斑旋转的角度进行精确计算。

传感器弹性基片和光纤的结构如图 2 所示。光纤由两段圆心角为 δ 相切圆弧与两端直线段部分组

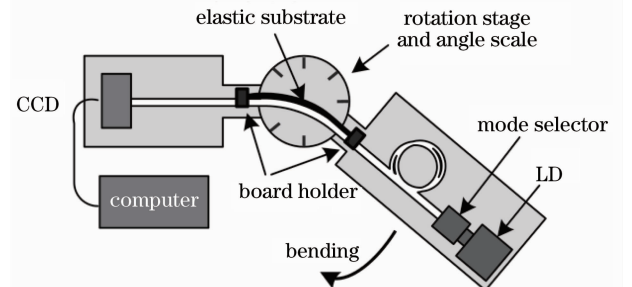


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

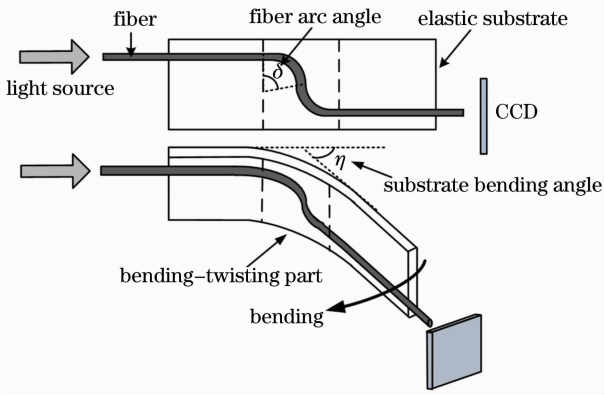


图 2 光纤弯曲传感器结构示意图

Fig. 2 Structure of the fiber bending sensor

成。弹性基片受力时均匀弯曲,带动光纤做相应运动。图中两虚线之间部分是传感区域,光纤呈弧线形分布,由软胶固定于弹性基片上。弹性基片弯曲时,光纤同时弯曲。且由于弯曲的对称轴与光纤不垂直,因此会同时引起光纤的扭转和弯曲,扭转使得光斑旋转,而弯曲对光斑无影响;虚线区以外为非传感区域,光纤呈直线分布,弯曲时对称轴与光纤垂直,弹性基片的弯曲将只引起光纤弯曲,而无扭转,有效避免传感区域之外应变对光斑的影响。CCD 正对光纤末端,采集输出的光斑。

弯曲弹性基片的传感区,使之呈圆弧状,设弯曲角为 η 。由螺旋线的弯扭度相关知识^[10]可知,此时可将传感区圆弧角为 δ 的光纤视为无数段螺旋角从 0° 到 δ 的螺旋线的总和。对于螺旋角为 ω_0 的螺旋线,扭转角 $\Delta\alpha = k \sin \omega_0$,其中 k 为螺旋线所对应的圆心角。通过微分法,可算得圆弧段光纤的总扭转角:

$$\Delta\alpha = \frac{\eta(1 - \cos 2\delta)}{4 \sin \delta}. \quad (15)$$

根据(15)式可知,光纤扭转角 $\Delta\alpha$ 与弹性基片弯曲角 η 和光纤圆弧角 δ 皆成正比。其中弹性基片的弯曲角 η 与光纤扭转角 $\Delta\alpha$ 呈线性关系。而在相同的弹性基片弯曲角 η 下,光纤的圆弧角 δ 越大,光纤扭转角就越大,光斑旋转也就越明显,灵敏度也就越高。通过在弹性板上用精密雕刻机 CAD/CAM 刻出具有一定形状、深度和宽度的凹槽,并将光纤嵌于凹槽中,即可精确控制 δ 角。

理论和实验研究均表明:光纤弯曲(宏弯)时,若曲率半径大于临界值 R_c ($R > R_c$),因弯曲而引起的附加功率损耗很小,可忽略不计;若曲率半径小于临界值 R_c ($R < R_c$),附加损耗按指数规律迅速增加^[11]。从实用性和可扩展性考虑,弯曲传感器的光纤功率损耗越小越好。因此,圆弧段光纤半径不能过小。同时,在保证半径大于 R_c 的同时,为尽量减小传感器的尺寸,需减少光纤圆弧角 δ 。

综合考虑传感器的灵敏度、尺寸和功率损耗等因素,本文研究了圆弧角介于 $10^\circ \sim 40^\circ$ 之间的 4 组不同参数的传感器: $\delta = 10^\circ, R = 25 \text{ mm}$; $\delta = 20^\circ, R = 20 \text{ mm}$; $\delta = 30^\circ, R = 15 \text{ mm}$; $\delta = 40^\circ, R = 10 \text{ mm}$ 。4 种传感器的尺寸均小于 $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, LP_{21} 模式的损耗在 5% 以下。

3 实验结果及讨论

图 3 为光纤圆弧角 $\delta = 40^\circ$ 结构的传感器,当弹性基片从 0° 弯曲至 90° 过程中,光斑的变化情况。可以看出,弹性基片每弯曲 10° ,光斑都会旋转一个大致固定的角度,此处约为 3° 。光斑形状基本没有变化,功率的变化值小于 5%。

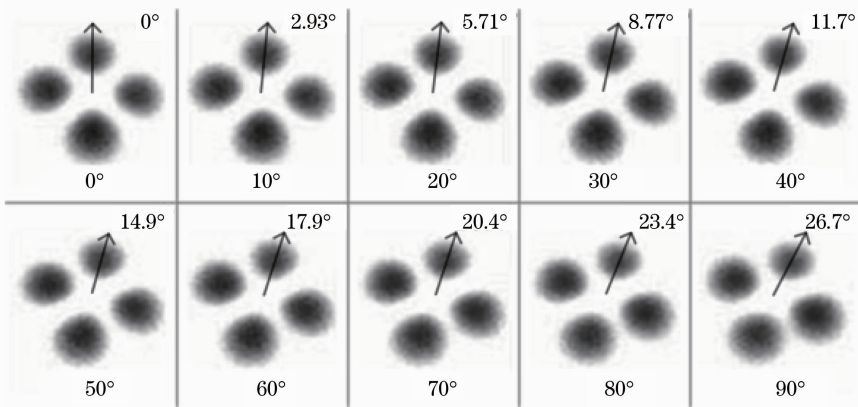


图 3 当传感器从 0° 弯曲至 90° 时, CCD 上得到的光斑旋转图

Fig. 3 Experimental images obtained from CCD when the sensor bending angle varies from 0° to 90°

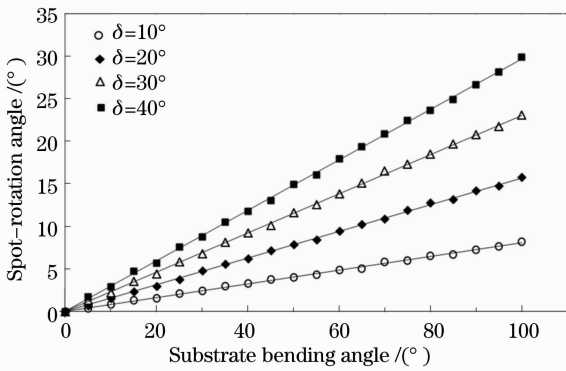


图 4 不同光纤圆弧角下光斑旋转角与传感器弯曲角的关系

Fig. 4 spot-rotation angle versus sensor bending angle at different fiber arc angles δ

图 4 横坐标为弹性基片弯曲角,纵坐标为光斑旋转角,可清楚的看出两者呈线性关系。拟合后,得到 $\delta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时的直线方程分别为: $Y = 0.0822X, Y = 0.1562X, Y = 0.2307X, Y = 0.2960X$ 。即当 δ 角分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时,弹性基片弯曲 100° ,光斑旋转角 $\Delta\varphi$ 分别为 $8.22^\circ, 15.62^\circ, 23.07^\circ, 29.60^\circ$,旋转方向与光纤扭转方向相同。

根据(15)式,当弹性基片弯曲角 $\eta=100^\circ$,光纤圆弧角 δ 角分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时,光纤扭转角 $\Delta\alpha$ 分别为 $8.87^\circ, 17.10^\circ, 25.00^\circ, 32.12^\circ$ 。于是可得光斑旋转角 $\Delta\varphi$ 与光纤扭转角 $\Delta\alpha$ 的比值为 $0.9265, 0.9137, 0.9228, 0.9215$ 。两者的比值 $\frac{\Delta\varphi}{\Delta\alpha}$ 平均为 0.9211 ,理论数值为 0.9171 。两者的误差仅为 0.42% 。

LP₂₁ 光纤弯曲传感器的灵敏度取决于光纤圆弧角的大小和传感器弯曲段的长度。当 $\delta=40^\circ$,弯曲段 $L=4$ cm 时,灵敏度最高可达 37 rad/m。 δ 角越大,弯曲段越短,则灵敏度越高。

实验中计算光斑旋转角时,数据采集过程中有

表 1 不同圆弧角下弯曲传感器测试结果 ($T=20^\circ\text{C}$) 以及工作温度变化引起的误差

Table 1 Experimental results of bending sensor at different fiber arc angles ($T=20^\circ\text{C}$) and errors due to different working temperatures

Fiber arc angle $\delta / (^\circ)$	Spot-rotation angle/fiber twist angle	Relative error / %	Temperature error / %		
			0°C	40°C	80°C
10	0.9265	1.02	0.34	0.21	0.17
20	0.9137	-0.37	0.31	0.32	0.24
30	0.9228	0.62	0.26	0.45	0.31
40	0.9215	0.48	0.39	0.62	0.35

4 结 论

提出并研制了一种新型的基于光纤 LP₂₁ 模式

0.02° 的噪声,而 Matlab 读取光斑角度的精确度为 0.01° ,因此光斑旋转角分辨率为 0.02° 。因此传感器分辨率最高可达 $9.43 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。

现有的能同时测量弯曲曲率和弯曲方向的长周期光纤光栅传感器,具有 6.4 nm/m^{-1} 的灵敏度和 0.0156 m^{-1} 的分辨率^[12];而基于迈克耳孙干涉的光纤弯曲传感器具有 43.96 rad/m^{-1} 的灵敏度及 0.004 m^{-1} 的分辨率,与它们相比,LP₂₁ 光纤弯曲传感器具有更好的灵敏度和分辨率。

传统的光纤弯曲传感器对温度较为敏感,外界温度的小幅变化都会使得测量结果产生比较大的误差^[13]。为了测试该光纤弯曲传感器对温度的敏感程度,将传感器的光纤部分浸入水中,在不同水温条件下,测试在不同温度下光斑的变化情况。

图 5 为光纤圆弧角 $\delta=40^\circ$,弹性基片弯曲角 $\eta=100^\circ$ 时,将水从 0°C 加热到 80°C 时,光斑的旋转值。可以看出在 80°C 的温差变化,光斑旋转角浮动值在 0.1° 以内,误差仅为 0.34% 。其他参数条件下的温度误差也都在 0.5% 以下。测试结果表明,该传感器具有非常好的温度稳定性。具体数据如表 1 所示。

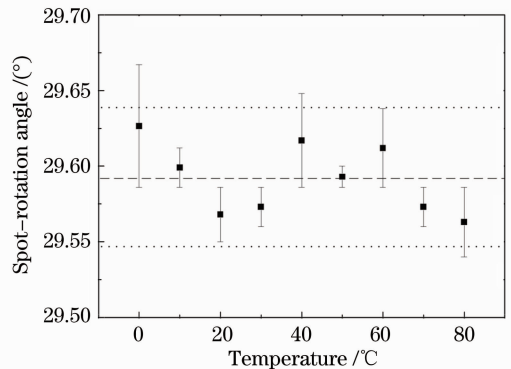


图 5 温度对光斑旋转角的影响

Fig. 5 Spot-rotation angle versus temperature

的弯曲传感器,介绍了该传感器的工作原理和光纤 LP₂₁ 模式特性,研究了多种结构参数和温度的对弯

曲传感的影响。结果表明,该传感器具有结构简单、大动态范围且线性度好、同时具有了较好的温度稳定性。此单光纤弯曲传感器易于集成和扩展,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Sui Haidu, Shi Bin, Zhang Dan *et al.*. Review on fiber optic sensor based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering [J]. *J. Engineering Geology*, 2008, **16**(1): 135~143
隋海渡, 施斌, 张丹等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. *工程地质学报*, 2008, **16**(1): 135~143
- 2 Zhao Shigang, Wang Xue, Yuan Libo. 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
- 3 Zhao Xiaoyun, Gu Zhengtian. Comparisons and applications of fiber Bragg grating and long period fiber grating[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(2): 11~14
赵晓云, 顾铮先. 光纤 Bragg 光栅与长周期光纤光栅比较及传感应用[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(2): 11~14
- 4 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 5 Ding Guilan, Liu Zhenfu, Cui Yuming *et al.*. An all fiber optic accelerometer based on compliant cylinder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 340~343
丁桂兰, 刘振富, 崔宇明等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 340~343
- 6 Lin Qiao, Chen Liuhua, Li Shu *et al.*. Optical fiber bending sensor based on Michelson interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 251~254
林巧, 陈柳华, 李书等. 基于迈克耳孙干涉的光纤弯曲传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 251~254
- 7 Miao Yiping, Liu Bo, Zhao Qida *et al.*. Simultaneous measurement of bending-curvature and temperature using single tilted fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 722~725
苗银萍, 刘波, 赵启大等. 用单一倾斜光纤光栅实现曲率和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 722~725
- 8 Yufeng Yuan, George Wu, Xian Li *et al.*. Effects of twisting and bending on LP₂₁ mode propagation in optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(12): 4248~4250
- 9 Zeng Fuquan. Theory and Technology of Fiber[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990. 155~187
曾甫泉. 光纤理论与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990. 155~187
- 10 Liu Yanzhu. Nonlinear Mechanics of Thin Elastic Rod-Theoretical Basis of Mechanical Model of DNA[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 4~8
刘延柱. 弹性细杆的非线性力学: DNA 力学模型的理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 4~8
- 11 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 93~95
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 93~95
- 12 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Long period fiber grating sensors measuring bend-curvature and determining bend-direction simultaneously [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(10): 1139~1143
王义平, 陈建平, 饶云江. 同时测量弯曲曲率和弯曲方向的长周期光纤光栅传感器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(10): 1139~1143
- 13 Dong Xinyong, Zhang Ying, Guan Bai'ou *et al.*. Experimental research of fiber grating circum flexion sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 807~809
董新永, 张颖, 关柏鸥等. 光纤光栅曲率传感的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(9): 807~809

栏目编辑: 王晓琰