

文章编号: 0253-2239(2006)05-0807-6

# 弯曲增敏型光纤曲率传感器机理的研究\*

刘仁强<sup>1</sup> 刘品宽<sup>1</sup> 付 庄<sup>1</sup> 赵言正<sup>1</sup> 王树国<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学机器人研究所, 上海 200030  
<sup>2</sup>哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 近年国外出现一种直接检测弯曲的低成本光纤曲率传感器,采用弯曲增敏技术提高光纤对弯曲的灵敏度。这种传感器的线性范围宽,能区分正向弯曲和负向弯曲,在测量较大弯曲变形的场合更具优势;并且适合埋入结构内部检测,通过转换还可测量轴向应变。然而其传感机理方面的研究仍处于探索阶段。通过分析光辐射度余弦定律理论、回音壁光线理论、沟槽角度理论等国内外对该传感器机理的研究成果,并基于平面波导的光散射损耗理论,提出了光纤曲率传感器的机理。指出弯曲引起光纤敏感区表面散射损耗的改变是导致光传输损耗改变的原因;推导出损耗与光纤弯曲半径、表面特性、光纤结构参量关系的数学模型,并通过实验验证了模型的有效性。

**关键词:** 光纤光学; 传感机理; 表面散射; 弯曲检测; 光纤曲率传感器

中图分类号: TH823.3 文献标识码: A

## Operation Principle of a Bend Enhanced Curvature Optical Fiber Sensor

Liu Renqiang<sup>1</sup> Liu Pinkuan<sup>1</sup> Fu Zhuang<sup>1</sup> Zhao Yanzheng<sup>1</sup> Wang Shuguo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Robot institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030  
<sup>2</sup> Robot institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** A low cost curvature optical fiber sensor that can detect curvature directly is developed in recent years; its curvature measurement sensitivity is improved using bend enhanced method and the sensor can distinguish between positive bending and negative bending. This sensor has a wide linear range and is suitable for measuring large curvature deformation. It meets the demand for embedded measuring in structure. With transferring strain to curvature, it can also measure axial strain. Nevertheless, the operation principle of this sensor is still under exploration. Through analyzing radiation law of cosines, whisper gallery ray and groove angle theories, the operation principle of this intensity modulated macro-bend curvature optical fiber sensor is presented based on light scattering theory: bending of sensitive zone bring about mode coupling and lead to the variation of surface scattering loss. The mathematic model of relationship among light loss, bending curvature, surface roughness and parameters of the fiber's configuration is also presented. Experimental results have demonstrated the proposed model.

**Key words:** fiber optics; operation principle; surface scattering loss; curvature measurement; curvature optical fiber sensor

## 1 引 言

直接以结构曲率为被测量的传感器并不多见。Claire Davis 等<sup>[1]</sup>利用光纤大曲率宏弯时光强损耗突然增大的原理,制成监测人工呼吸时胸腔轮廓变

化的光纤传感器;但这种光纤传感器的光纤表面未经过处理,因此灵敏度很低,还需区分弯曲损耗是来自光纤探测段还是来自引线,而且无法区分正向和负向弯曲。目前国内外研究较多的长周期布拉格光

\* 国家 863 计划(9804-10)和中国博士后基金(2005038437) 资助课题。

作者简介: 刘仁强(1972-),男,黑龙江哈尔滨人,博士后,主要从事光纤传感器、移动机器人、微电子设备方面的研究。  
E-mail: liurenqiang@sjtu.edu.cn

导师简介: 赵言正(1965-),男,山东龙口人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感器技术,微电子装备技术,特种机器人技术的研究。E-mail: yzh-zhao@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-07-07; 收到修改稿日期: 2006-10-08

纤传感器或四芯光纤弯曲传感器也可检测弯曲变形<sup>[2~5]</sup>,但需要昂贵的光谱分析仪或后续的图像处理。另外还有利用光纤的微弯损耗原理制成的直接或间接测量曲率的传感器<sup>[6,7]</sup>,但需要有附加的机械变形装置,不适合在需要埋入式测量的智能结构中应用。1992年,加拿大学者 Lee Danisch<sup>[8]</sup>发明了一种光纤曲率传感器,将光纤的包层和部分纤芯表面破坏掉,利用其光损耗同弯曲变形有关的特性检测结构的弯曲变形。这种性价比很好的传感器其传感机理尚未有学者做出清晰的解释,为进一步提高传感器的性能,有必要对其传感机理做深入研究。

## 2 光纤曲率传感器的弯曲增敏结构

对于未做弯曲增敏处理的光纤,当光纤弯曲半径小于 10 mm 时,光强随曲率的增大按指数衰减,但光强衰减变化并不大,输出线性度不好;同时光纤弯曲半径过小易于折断。因此即使在小弯曲半径下通常也不能利用光纤的宏弯损耗特性来检测结构的弯曲变形,必须采用弯曲增敏技术提高光纤对弯曲的灵敏度。弯曲增敏方法是在塑芯多模光纤表面加工出敏感区,增大光纤弯曲时光传输损耗的变化率。光纤敏感区是一段经过物理或化学方法处理,去除包层及部分纤芯后的光纤表面,如图 1 所示为获得的敏感区表面照片。将敏感区部分的光纤用柔性树脂胶粘贴在待测结构表面或直接埋置于结构中性层处,发光二极管(LED)光源从光纤一端入射,光接收器从另一端检测光强变化。输出光强随弯曲大小和方向而改变,传感器的静态输出特性曲线如图 2 所示。实验结果表明,相对于未经表面处理的光纤,传感器对弯曲的灵敏度可提高 3 个数量级。

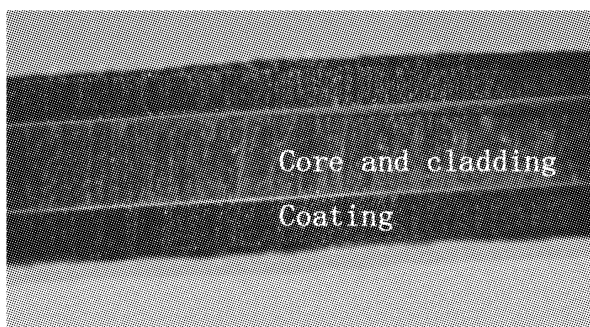


图 1 光纤曲率传感器敏感区表面

Fig. 1 Sensitive zone of curvature optical fiber sensor

## 3 对传感器机理已有的解释和不足之处

由于光纤理论的复杂性,虽然这种光纤传感器在 1992 年就被发明出来,但其工作机理尚未有公认

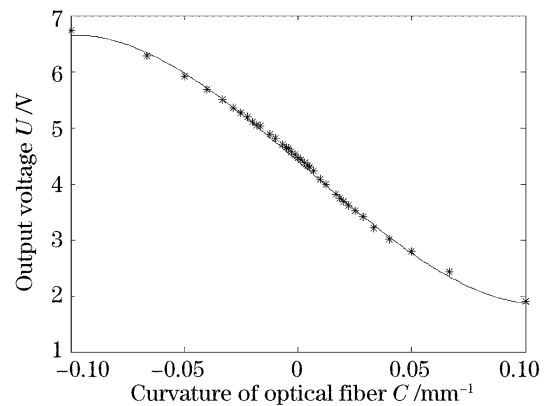


图 2 光纤曲率传感器的静态特性曲线

Fig. 2 Static characteristic of curvature optical fiber sensor

的结论;目前国内外已有 5 位学者分别从不同的角度定性地对传感器的机理作了阐述,得出各不相同的结论<sup>[9~14]</sup>,对光纤曲率传感器机理的分析作了有益的探索,但都缺少理论证明和实验验证,在文献<sup>[15]</sup>工作中发现以上结论的理论值都同实验结果存在矛盾之处,因此这些解释仍停留在猜测阶段。

## 4 光纤曲率传感器传感机理的理论分析

实验中发现,与常见的对轴向拉压应变敏感的传感器<sup>[16]</sup>不同,光纤曲率传感器仅对弯曲敏感。而且当敏感区表面光滑(表面粗糙度  $R_a$  小于 0.6)时灵敏度很低。受此启发可知,敏感区纤芯同外界交界面的不平滑使波导界面产生畸变,部分传输至此的光因此会散射到各个方向造成表面散射损耗。这种因散射引起的光纤中部分导模耦合成辐射模的损耗,其各种模式的衰减不同,光纤弯曲时高次模增多,散射损耗增大。通过大量的实验,结合理论分析,本文提出光纤曲率传感器的机理:光纤弯曲过程中传输损耗的改变源于光纤表面散射损耗的改变,即光纤弯曲半径的变化引起光传输模式的变化,而传输模式的变化导致光纤表面散射损耗的改变。

光纤曲率传感器的传感器机理可类比平面波导损耗的原理来分析,将光纤曲率传感器简化为有表面损耗的平面波导,其传输损耗主要来自粗糙表面所产生的随传输长度增加的波导表面散射损耗。为避免边界模型难以确定造成的基于模式理论和耦合模式理论方法的计算误差,下面利用射线光学和电磁场理论来分析平面波导的传输损耗,以便定量地类比光纤的表面散射损耗。图 3 是反射和散射的示意图, $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  分别为衬底、平面波导、包层的折射率;平面波在粗糙平面波导上表面反射, $B$  是沿  $z$  轴单位长度,沿  $y$  轴单位宽度,入射角为  $\theta_i$  的入射光

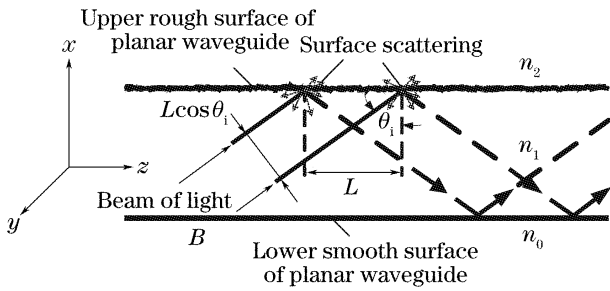


图 3 平面波在粗糙平面波导上表面反射  
Fig. 3 Light scattering on rough surface of planar waveguide

束。按瑞利准则<sup>[17]</sup>,入射光束经表面散射,所携传输功率用高斯单位表示,由平面波导上表面反射回来的功率  $P_{r21}$  为

$$P_{r21} = \frac{c}{8\pi} n_1 E_y^2 \cos \theta_i \exp \left[ - \left( \frac{4\pi\sigma_{12}}{\lambda_1} \cos \theta_i \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中  $E_y$  为电场分量(V/m);  $c$  为光速(m/s);  $\sigma_{12}$  为平面波导上表面轮廓的均方根偏差;  $\lambda_1$  平面波导介质中的光波波长;  $\lambda_1 = \lambda_0/n_1$ ,  $\lambda_0$  为真空中波长。则衰减系数  $\alpha$ (dB/m)为

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{dP/dz}{P} \approx \frac{1}{2} \frac{(c/8\pi)n_1 E_y^2 K^2 \cos^3 \theta_i}{(c/4\pi)n_1 E_y^2 \sin \theta_i d_{\text{eff}}} = 217.2 \times \frac{K^2 \cos^3 \theta_i}{\sin \theta_i d_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中  $d_{\text{eff}}$  为平面波导的有效厚度,  $K$  为表面特性,  $K = \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma_{12}$ ;  $P$  为沿  $z$  轴传输的功率流(沿  $y$  轴单位宽度传输的功率)。

对于平面波导表面散射,由(2)式可见:

- 1) 表面散射损耗与表面特性有关,衰减同平面波导上下表面粗糙度成正比。
- 2) 表面散射损耗与  $\theta_i$  有关,也就是与模式有关。模式越低,  $\theta_i$  越大,损耗越小;衰减同入射角度  $\theta_i$  成反比。
- 3) 表面散射损耗与平板波导的有效厚度  $d_{\text{eff}}$  成反比,波导越厚,散射损耗越小。

Hensler 等<sup>[18]</sup>的相关实验表明平面波导表面损耗随模式的增高而显著增大。D. Marcuse<sup>[19]</sup>曾对随机壁微扰损耗作了研究,指出相对功率损耗同壁的随机偏差的平方成正比,随传输模式的增大而增加,即损耗同表面特性和传输模式有关。

从平面波导模式得到的上述近似模型直接用于圆光纤,可知光纤曲率传感器宏弯损耗变化的原因是由光纤弯曲引起散射损耗的改变引起的。如图 4 所示是一种直观的分析,光纤弯曲时仅考虑子午光线,当光纤敏感区位于光纤凸弧一侧时(规定向此方

向的弯曲为正向弯曲),假设此段光纤左侧的入射端位置固定,右侧部分的光纤段将随弯曲半径的增大而改变位置(图中虚线),敏感区处的法线方向将同时转动到虚线位置。可发现弯曲半径增大后,光传输到敏感区表面后的入射角  $\theta_i$  将增大,变为  $\theta_i'$ ,即传输模式发生了改变,部分高阶模转变为低阶模。相应地,表面散射将减小,输出光强将增大。同理可对光纤负向弯曲做出分析。

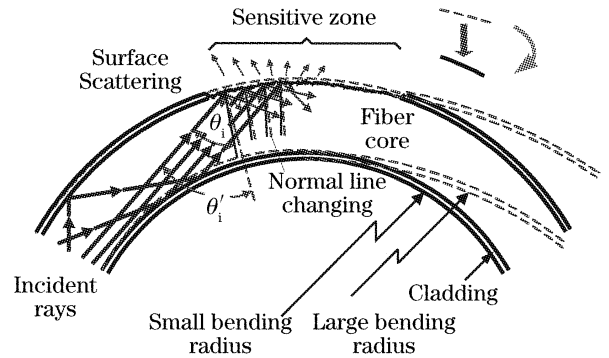


图 4 光纤弯曲与入射角度的关系(正向弯曲)  
Fig. 4 Relation between curvature and incident angle (positive bending direction)

下面定量分析圆光纤弯曲和入射角度间(与模式有关)的关系。光纤弯曲引起模式沿  $z$  方向的传播常量  $\beta$  改变,类比于上表面粗糙的平面波导,参见图 3,此时表面特性  $K$  为

$$K = (4\pi/\lambda_1)(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)^{1/2}, \quad (3)$$

光纤弯曲半径与子午光线入射角的几何关系如图 5 所示,设光纤直径为  $2a$ ,弯曲前由直光纤段入射的子午光线入射角为  $\theta$ ;点  $P$  左侧的光纤固定,绕点  $P$  弯曲光纤,圆心在直光纤段的垂线上;点  $P$  右侧的光纤由半径  $R$  减小到  $r$  时,易知子午光线入射角将减小,由  $\theta_1$  减小为  $\theta_2$ ;入射光线分别与敏感区在  $A$ 、 $B$  两点相遇。由图中几何关系得

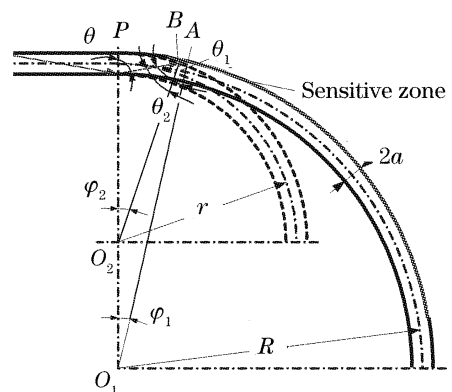


图 5 光纤弯曲半径与子午光线入射角的关系  
Fig. 5 Relation between curvature and incident angle of meridional rays

$$\frac{\sin \theta}{R+a} = \frac{\sin \theta_1}{R-a}, \quad (4)$$

弯曲半径同入射角的关系为

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{R-a}{R+a}\sin \theta\right), \quad (5)$$

由(5)式,消除掉其他因素的影响,仅考虑入射角改变造成的衰减系数变化,为方便起见引入无量纲因子  $\alpha'$ ,即归一化衰减系数:

$$\alpha' = 2 \frac{dP/dz}{P} \frac{d_{\text{eff}}}{K^2}, \quad (6)$$

对于多模光纤,设  $2a$  为光纤纤芯直径,则  $d_{\text{eff}} \approx 2a$ , 归一化相对衰减系数  $\alpha'$  为

$$\alpha' = 2 \frac{dP/dz}{P} \frac{2a}{K^2} = \frac{\cos^3 \theta_1}{\sin \theta_1} \left[1 - \left(\frac{R-a}{R+a}\sin \theta\right)^2\right]^{3/2} \left(\frac{R-a}{R+a}\sin \theta\right)^{-1}, \quad (7)$$

同理可推导出光纤负方向弯曲时,归一化相对衰减系数  $\alpha''$ :

$$\alpha'' = 2 \frac{dP/dz}{P} \frac{2a}{K^2} = \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} \left[1 - \left(\frac{R+a}{R-a}\sin \theta\right)^2\right]^{3/2} \left(\frac{R+a}{R-a}\sin \theta\right)^{-1}. \quad (8)$$

考虑到光纤中存在多种模式,入射角  $\theta$  应有多个值,因此假设  $a=0.125$  mm,则当  $\theta$  分别为 1.325 rad, 1.273 rad, 1.221 rad, 1.168 rad 时,归一化衰减系数同弯曲半径关系的仿真结果如图 6、图 7 所示。可见对于只在一侧面加工有敏感区的光纤,正向弯曲时输出光功率随弯曲半径增大而增大,负向弯曲时输出光功率随弯曲半径增大而减小(半径均取绝对值);功率损耗随入射角增大而减小,即高阶模相对损耗较大。

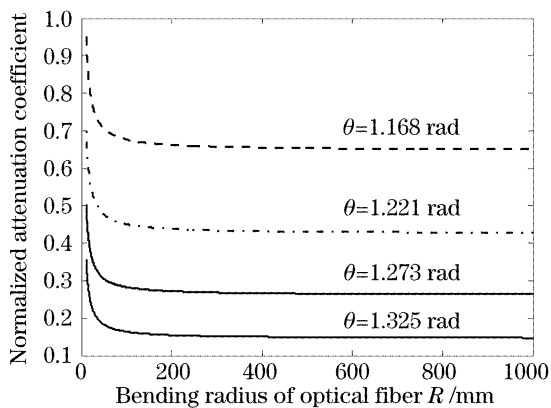


图 6 正向弯曲时弯曲与衰减系数的关系

Fig. 6 Relation between positive bending and normalized attenuation coefficient

对于某一特定导模下(传播常量为  $\beta$ )的光波,由(2)式、(7)式、(8)式,并引入正向和负向弯曲时的

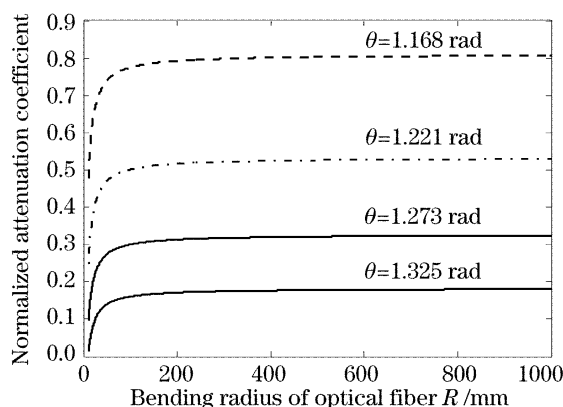


图 7 负向弯曲时弯曲与衰减系数的关系

Fig. 7 Relation between negative bending and normalized attenuation coefficient

输出光功率损耗比例系数  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ ,可分别得到正向弯曲时的输出光功率  $P'$  和负向弯曲时的输出光功率  $P''$  同光纤弯曲半径  $R$  和光纤各参量的关系,即弯曲导致光纤表面散射改变的数学模型为

$$P' = \eta_1 P_0 \exp\left\{-\frac{1}{4} \frac{zK^2}{a} \left[1 - \left(\frac{R-a}{R+a}\sin \theta\right)^2\right]^{3/2} \times \left(\frac{R-a}{R+a}\sin \theta\right)^{-1}\right\}, \quad (9)$$

$$P'' = \eta_2 P_0 \exp\left\{-\frac{1}{4} \frac{zK^2}{a} \left[1 - \left(\frac{R+a}{R-a}\sin \theta\right)^2\right]^{3/2} \times \left(\frac{R+a}{R-a}\sin \theta\right)^{-1}\right\}, \quad (10)$$

式中  $P_0$  为导模的起始功率; $z$  为传输距离; $\theta$  为某一传播常量  $\beta$  下的入射角; $a$  为光纤半径; $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为正向和负向弯曲时的输出光功率损耗比例系数,常量。表面特性  $K$  由(3)式求得。

由于圆光纤同平面波导结构有差异,基于平板波导的模型仅分析了子午光线,未考虑偏斜光线的影响,所以光传输功率同弯曲半径和各波导参量关系的数学模型,必须进一步通过实验,用多元回归分析的方法修正和确定。(9)式、(10)式表明,光纤弯曲后光功率损耗同表面散射损耗有关,光纤弯曲时传输模式的改变将引起表面散射损耗的改变,另外表面损耗大小同敏感区表面粗糙度和光纤直径有关。

## 5 光纤曲率传感器传感机理的实验验证

实验装置如图 8 所示,光纤曲率传感器敏感区粘贴在两端筒支梁的中部,用螺旋测微器调整出固定偏移量。实验中选用外径  $250 \mu\text{m}$  的多模塑芯光纤,用研磨法得到 12 种不同粗糙度的敏感区表面(每一组实验在同一光纤传感器上进行,由低到高获得不同粗糙度表面,因实测敏感区深度对输出影响

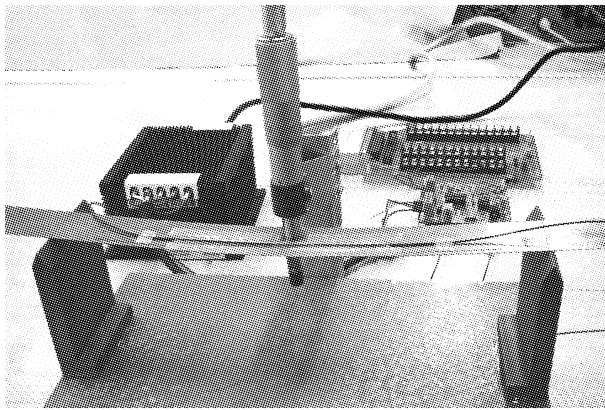


图 8 弯曲特性测试装置

Fig. 8 Experimental setup for bend characteristics test

很小,所以可忽略先后顺序的影响。共进行 5 组实验,表面粗糙度在 Taylorsurf-6 表面轮廓仪上测得)。实测敏感区表面粗糙度与相对光功率输出损耗的关系如图 9 所示,输出功率损耗随粗糙度增加而增大。实验中发现,当敏感区是比较光滑的表面 ( $R_a < 0.6 \mu\text{m}$ ) 时,弯曲引起的光纤表面散射损耗改变很小,原因是此时表面散射损耗非常小。当光纤敏感区糙化处理后,表面散射损耗随表面粗糙程度增大而增大(但  $R_a > 6 \mu\text{m}$  后,散射损耗趋于稳定)。(2)式表明,功率损耗系数  $2\alpha$  与光纤芯径成反比。在实验中选用三种不同芯径的光纤,保持敏感区长度为 20 mm,敏感区深度与直径的比例为 1/4,以及表面粗糙度不变,实测不同光纤直径下的功率损耗系数。光纤直径同功率损耗系数的关系见表 1,可知二者成反比,理论计算与实测基本符合。

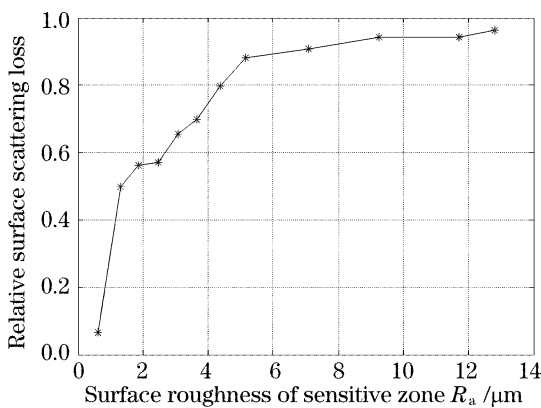


图 9 敏感区粗糙度与相对输出损耗的关系

Fig. 9 Relation between surface roughness and relative loss

由(9)式、(10)式,相对输出(即以光检测器相对输出电压表示的相对光功率输出)同光纤弯曲曲率的关系如图 10 所示。理论计算与实测基本符合,表明(9)式、(10)式的定量的数学模型是有效的。但由于传感器的模型是从平面波导模型推导出的,因此

不够准确。当弯曲半径是光纤直径的 20 倍以上时,宏弯损耗可忽略,损耗仅由散射引起。图 11 所示是整个圆周上都加工有敏感区(敏感区长度仍为 20 mm)的光纤在弯曲下的输出,理论值与实测值的对比。此时正向和负向弯曲时输出都减小,仿真结果与实测基本符合。这个实验现象用 Alexandar 的回音壁光线理论是无法解释的。

表 1 光纤直径与相对输出损耗的关系

Table 1 Relation between fiber diameter and relative output loss

Diameter of fiber /mm	Output without sensitive zone /V	Output with sensitive zone /V	Coefficient of power loss /dB/m
1.00	9.262	3.356	440.9
0.50	9.304	1.070	939.3
0.25	8.561	0.504	1230.0

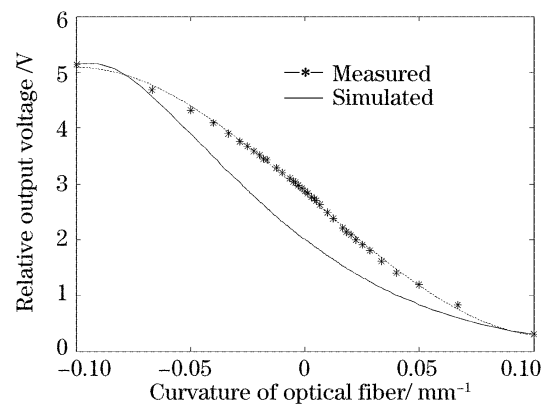


图 10 弯曲曲率与相对输出的理论值与实测值

Fig. 10 Compare theory with experiment for the relation of curvature with output

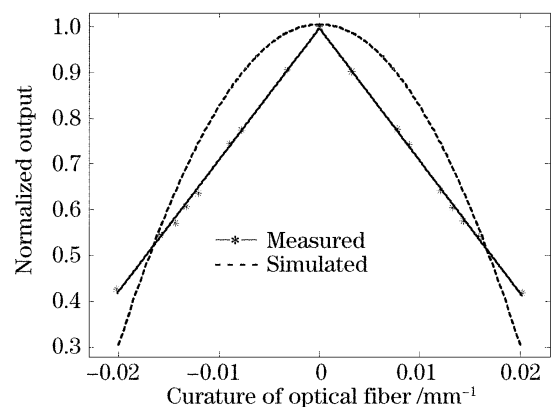


图 11 周向有敏感区的光纤弯曲输出理论与实测值

Fig. 11 Theoretical and experimental output of fiber with sensitive zone on all circumference

另外,当弯曲方向与光纤敏感区中心线(法向剖面)不一致时,灵敏度具有方向性。将传感器粘贴在一根柔性杆的根部附近,杆根部端固定,另一端由步进电机带动拨杆以恒定的半径拨动旋转,使光纤敏感

区在 360°范围内向不同方向弯曲,得到弯曲方向同输出间关系如图 12 所示。可见输出基本上按照余弦规律变化,说明散射损耗同入射角直接有关。

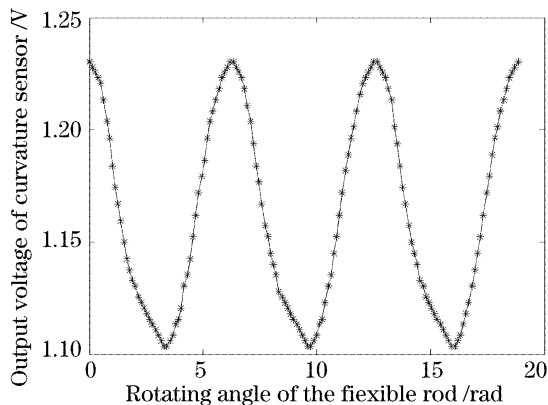


图 12 柔杆一端旋转时传感器的极性输出

Fig. 12 Output of polarity measurements while turning the flexible rod

当弯曲平面与敏感区法平面夹角为  $\theta$  时,弯曲灵敏度  $S_\theta$  为

$$S_\theta = S_m \cos \theta, \quad (11)$$

式中  $S_m$  为最大灵敏度(单位为  $V \cdot m$ )。

## 6 结 论

可得出光纤曲率传感器的传感机理为:光纤弯曲过程中传输损耗的改变源于表面散射损耗,即弯曲引起传输模式的改变,而传输模式的改变导致光纤表面散射损耗的改变。因此为了提高传感器强度,可不局限于传统的去除材料的弯曲增敏方法,尝试研究在包层中掺杂散射体的方法。实验表明,借鉴平面波导表面散射的理论来解释波导表面损耗同弯曲变形和波导参量间的关系是有效的,但光功率损耗同各参量间的数学模型有待完善。由于弯曲量程很大,这种传感器可用于虚拟现实技术如人体姿态检测或作为触觉传感器用于机器人避障检测等。

## 参 考 文 献

- 1 Claire Davis, Alex Mazzolini. A new sensor for monitoring chest wall motion during high frequency oscillatory ventilation [J]. *Medical Engineering & Physics*, 1999, **21**(9): 619~623
- 2 Yongsun Yu, Zhiyong Zhao, Zhongchang Zhuo *et al.*. Bend sensor using an embedded etched fiber Bragg grating [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2004, **43**(5): 414~417.
- 3 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 (in Chinese)

- 4 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Study on torsion characteristic of novel long period fiber grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1091~1096 (in Chinese)
- 5 王义平,陈建平,饶云江. 新型长周期光纤光栅的扭曲特性研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1091~1096
- 6 Zhao Shigang, Wang Xue, Yuan Libo. Four core fiber based bending sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1001~1006 (in Chinese)
- 7 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
- 8 Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 9 Christopher M. Lawson, V. J. Tekippe. Fiber-optic diaphragm curvature pressure transducer [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(5): 286~288
- 10 Lee Danisch, Walter Thompson, Abraham Ele *et al.*. Bend enhanced fiber optic sensors in a teleoperation application [C]. *Proc. SPIE, Fiber optic and laser sensors XI*, 1993, **2070**(11): 73~85
- 11 Lee Danisch. Fiber optic bending and positioning sensor including a light emission surface formed on a portion of a light guide [P]. *United States Patent*. 5,321,257, 1994
- 12 M. Kovacevic, A. Djordjevich, D. Nikezic. Monte Carlo simulation of curvature gauges by ray tracing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(10): 1756~1761
- 13 Alexandar Djordjevich, Marijana Fung, Richard Y. K. Fung. Principles of deflection-curvature measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(11): 1983~1989
- 14 R. Philip-Chandy, P. J. Scully, R. Morgan. The design, development and performance characteristics of a fibre optic drag-force flow sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, **11**(3): 31~35
- 15 K. S. C. Kuang, W. J. Cantwell, P. J. Scully. An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(10): 1523~1534
- 16 Zhou Ling. Thin structure vibration measurement using curvature optical fiber sensor [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2002. 58~68 (in Chinese)
- 17 周 玲. 用于薄结构振动测量的分布式光纤曲率模态传感器的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2003. 58~68
- 18 Liu Renqiang. Research on operation principle and characteristics of curvature optical fiber sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. 33~58 (in Chinese)
- 19 刘仁强. 光纤曲率传感器机理与特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004. 33~58
- 20 Masoud Vaziri, Chin-lin Chen. Etched fibers as strain gauges [J]. *J. Lightwave Technology*, 1992, **10**(6): 836~841
- 21 P. K. Tien. Light waves in thin films and integrated optics [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(11): 2395~2413
- 22 D. H. Hensler, J. D. Cuthbert, R. J. Martin *et al.*. Optical propagation in sheet and pattern generated films of  $Ta_2O_5$  [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(5): 1037~1048
- 23 D. Marcuse. *Transmission Optics* [M]. Cheng Xiwang Transl., Beijing: Post and Telecom Press, 1987. 318~457 (in Chinese)
- 24 D. Marcuse. 传输光学 [M]. 程希望译, 北京: 人民邮电出版社, 1987. 318~457