

doi:10.3788/gzxb20174603.0306002

# 偏芯光纤弯曲特性分析

张颖, 赵俊雪, 吴俊, 金祖武

(燕山大学 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:**根据光纤传输理论建立了偏芯光纤理论计算模型. 采用保角变换方法将偏芯光纤不对称的三层结构转换成同轴对称的三层结构, 得到关于传播常量的特征方程, 给出了偏芯光纤弯曲损耗公式. 仿真分析了偏芯光纤弯曲损耗和弯曲半径之间的关系, 结果表明当弯曲半径达到 3 mm 时, 弯曲损耗几乎为零, 同时得到弯曲损耗随偏芯距离的变化关系. 运用 Rsoft 软件中的 BeamPROP 模块建立偏芯光纤弯曲的光学模型, 模拟仿真了弯曲的偏芯光纤中模场分布情况. 仿真结果表明, 偏芯光纤的弯曲方向与纤芯偏移中心轴线方向相同的弯曲损耗小于反方向的弯曲损耗.

**关键词:**偏芯光纤; 弯曲特性; 保角变换; 传播常量; 偏芯距离; BeamPROP

中图分类号: O436; TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0306002-6

## Bendind Characteristics Analysis of Eccentric Core Optical Fiber

ZHANG Ying, ZHAO Jun-xue, WU Jun, JIN Zu-wu

(Hebei key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University,  
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** A theoretical model of the eccentric core fiber was established based on traditional optical transmission theory. By using conformal mapping, the asymmetric three-layer structure of the eccentric core fiber was converted into a three-layer structure of coaxial symmetry. Characteristic equation about propagation constant was obtained. Bending loss formula of eccentric fiber was given. The relationship between bending loss and bending radius of the eccentric fiber was analyzed by simulation. When the bending radius reaches 3 mm, the bending loss is almost zero. Meanwhile, the relationship between bending loss and eccentricity distance change was obtained. Optical model of eccentric fiber bending was established by using BeamPROP module in Rsoft software. Mode field distribution in the curved eccentric core fiber was simulated. The simulation result shows that bending loss of the eccentric optical fiber in the same direction as that of the core deflection center axis is smaller than that of the opposite direction.

**Key words:** Eccentric core optic fiber; Bending characteristics; Conformal mapping; Propagation constant; Eccentricity distance; BeamPROP

**OCIS Codes:** 060.2270; 060.2310; 060.2370; 060.2430

## 0 引言

偏芯光纤是一种纤芯偏离光纤中心轴线的非对称几何结构的特种光纤, 其纤芯比普通光纤纤芯更加靠近外界环境, 因此具有较强的倏逝场<sup>[1]</sup>, 对外界环境变化很敏感<sup>[2]</sup>. 在液体液面的测量<sup>[3]</sup>、温度传感<sup>[4]</sup>、弯曲传感<sup>[5]</sup>等方面占有优势. 偏芯光纤的弯曲响应是双极的, 能够区分特定的方向, 具有很强的方向弯曲敏感特性<sup>[5-7]</sup>. 如已知偏芯光纤弯曲与损耗的关系, 则应用偏芯光纤测量振动信号时, 既能测出振动信号的大小又能判断出振动信号的方向, 较传统光纤具有特殊的优势, 因此分析偏芯光纤弯曲损耗特性具有实际意义.

基金项目: 河北省百人计划 (No. 4570018) 和河北省自然科学基金 (No. F2014501150) 资助

第一作者: 张颖 (1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感与光电检测技术. Email: zhangy@ysu.edu.cn

通讯作者: 赵俊雪 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: 15032387569@163.com

收稿日期: 2016-09-18; 录用日期: 2016-12-09

<http://www.photon.ac.cn>

本文通过建立偏芯光纤的理论计算模型,采用保角变换方法<sup>[8]</sup>分析了偏芯光纤的弯曲损耗特性,得到偏芯光纤弯曲损耗随弯曲半径和偏芯距离的变化关系.并运用 Rsoft 软件中的 BeamPORT 模块建立偏芯光纤弯曲的光学模型,模拟仿真出偏芯光纤弯曲时的模场分布<sup>[9]</sup>,并且得到传输光能量的损耗情况.可为偏芯光纤传感应用提供理论依据.

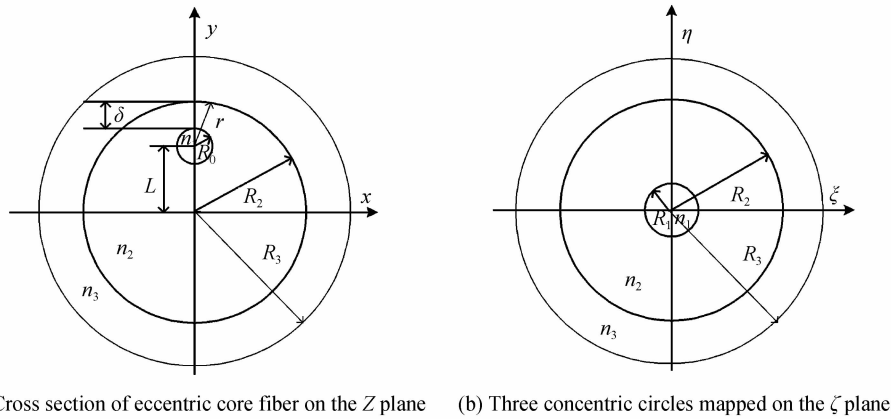
## 1 偏芯光纤弯曲特性分析

### 1.1 偏芯光纤理论计算模型

偏芯光纤的理论计算模型如图 1.  $Z$  平面代表原始坐标面,  $\zeta$  平面表示转换后的新坐标面. 假设纤芯、包层、涂层的折射率分别为  $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$ . 当  $n_3 > n_2$  时, 光以辐射模传播<sup>[10]</sup>, 导致光纤损耗大大增加. 因此, 令  $n_3 = n_2$  或者  $n_3$  略小于  $n_2$ . 图 1 中  $R_0$  是纤芯半径,  $R_2$  是包层半径,  $L$  是纤芯中心偏离光纤中心轴线的距离,  $\delta$  是纤芯与包层表面的最小距离. 根据图 1(a) 中各参量关系, 得到的径向距离  $r$  与偏芯距离  $L$  之间的关系为

$$r = L \cos \phi \pm [L^2 \cos^2 \phi - (L^2 - R_2^2)]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $\phi$  是径向距离  $r$  与  $y$  轴的夹角. 偏芯距离  $L$  是偏芯光纤的一个重要参量, 当  $L=0$  时, 偏芯光纤为普通光纤; 当  $L$  趋近于  $R_2$  时, 偏芯光纤为表面芯光纤<sup>[11]</sup>.



(a) Cross section of eccentric core fiber on the  $Z$  plane (b) Three concentric circles mapped on the  $\zeta$  plane

图 1 偏芯光纤理论计算模型

Fig. 1 A model for calculating the eccentric core optical fiber

### 1.2 基于保角变换的弯曲损耗分析

偏芯光纤的结构是不对称的三层圆柱形光纤, 如图 1.  $Z$  平面不对称的三层几何结构通过保角变换, 转换成  $\zeta$  平面同轴对称的三层几何结构, 使分析偏芯光纤的问题变得相对简单. 零阶近似法证明了该方法的可行性, 此时亥姆赫兹波动方程转化为

$$[\nabla_t^2 + (1 - y_1/y_2)(k_0^2 n^2 - \beta^2)] \begin{pmatrix} E_z \\ H_z \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

式中,  $y_1$  和  $y_2$  是一对对称点, 满足

$$\begin{cases} y_1 y_2 = R_2^2 \\ (y_1 - L)(y_2 - L) = R_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

若所有相位参量都按照  $(1 - y_1/y_2)$  展开, 则式(2)可写成

$$\begin{cases} \psi_1 = A J_m \left( u_1 \frac{r}{R_1} \right) \cos(m\varphi) \\ \psi_2 = \begin{cases} \left[ B I_m \left( w_2 \frac{r}{r'} \right) + C K_m \left( w_2 \frac{r}{r'} \right) \right] \cos(m\varphi) & (\beta > k_0 n_2) \\ \left[ B J_m \left( u_2 \frac{r}{r'} \right) + C Y_m \left( u_2 \frac{r}{r'} \right) \right] \cos(m\varphi) & (\beta < k_0 n_2) \end{cases} \\ \psi_3 = D K_m \left( w_3 \frac{r}{R_2} \right) \cos(m\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $A, B, C, D$  是常量,  $R_1$  和  $R_2$  是转换到  $\zeta$  平面的纤芯半径和包层半径. 其中  $R_1 = R_0 \left| \frac{y_2}{L - y_2} \right|$ , 且

$$\begin{cases} u_1 = R_1 (k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) \\ u_2 = R_1 (k_0^2 n_2^2 - \beta^2)^{1/2} \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) \\ \omega_2 = R_1 (\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2} \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) \\ \omega_3 = R_2 (\beta^2 - k_0^2 n_3^2)^{1/2} \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

对于给定几何结构的偏芯光纤,都可使用保角变换方法转换成对称的几何结构.在纤芯模式截止前, $\psi$ 的连续性和其导数在纤芯与包层表面、包层与涂层表面给出的特征方程为

$$\frac{J'_m(u_1)K'_m(\omega_3)}{R_2 J_m(u_1)K_m(\omega_3)} p_m - \frac{\omega_2 J'_m(u_1)}{\omega_3 R_1 J_m(u_1)} r_m = \frac{\omega_2 K'_m(\omega_3)}{u_1 R_2 K_m(\omega_3)} q_m - \frac{\omega_2^2}{u_1 \omega_3 R_1} s_m \quad (6)$$

式中, $p_m$ 、 $q_m$ 、 $r_m$ 和 $s_m$ 是贝塞尔向量函数<sup>[12]</sup>,定义为

$$\begin{cases} p_m = I_m(\omega_2 R) K_m(\omega_2) - I_m(\omega_2) K_m(\omega_2 R) \\ q_m = I_m(\omega_2 R) K'_m(\omega_2) - I'_m(\omega_2) K_m(\omega_2 R) \\ r_m = I'_m(\omega_2 R) K_m(\omega_2) - I_m(\omega_2) K'_m(\omega_2 R) \\ s_m = I'_m(\omega_2 R) K'_m(\omega_2) - I'_m(\omega_2) K'_m(\omega_2 R) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $R=R_1/R_2$ .

不同光波导,其传播常量 $\beta$ 不同.本文由式(6)获取偏芯光纤的传播常量 $\beta$ 值,通过等效的 $\beta$ 值,代入标准光纤的弯曲损耗公式,即可得到偏芯光纤弯曲损耗公式.弱导近似条件下,弯曲光纤中的横向场分布 $\psi(x,y)$ 满足二维标量方程,根据 Hagen Renner 研究的光纤弯曲损耗公式<sup>[13-14]</sup>,标量方程对 $y$ 的傅里叶变换为

$$\frac{d^2 \psi_q(x, \zeta)}{dx^2} + \left[ k_0^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2x}{R}\right) - \beta_0^2 - \zeta^2 \right] \psi_q(x, \zeta) = 0 \quad (8)$$

式中, $\beta_0$ 为未受扰动时直光纤基模的传播常量, $\zeta$ 为 $y$ 分量的傅里叶变换共轭量, $n_q$ 是 $q$ 区域的折射率.解式(8),得到

$$\psi_q(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_q(\zeta) B_i(X_q) + H_q(\zeta) A_i(X_q)] \exp(-i\zeta y) d\zeta \quad (9)$$

式中, $X_q(x, \zeta) = \left(\frac{R}{2k_0^2 n_q^2}\right)^{2/3} \left[\beta_0^2 + \zeta^2 - k_0^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2x}{R}\right)\right]$ , $q=2,3$ ;  $A_i$ 和 $B_i$ 均为 Airy 函数; $D_q(\zeta)$ 和 $H_q(\zeta)$ 通过傅里叶频谱确定.

设弯曲半径临界值为 $R_c$ ,当 $R < R_c$ 时,损耗急剧增加且出现振荡现象, $R_c = 2k_0^2 n_2^2 b/r^2$ ;  $r = (\beta_0^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$ .通过 Airy 函数近似<sup>[15]</sup>,应用 Vassallo 简单扰动公式<sup>[16]</sup>,将传输常量的变化量与光纤的后向场的强度结合,得到带有涂层单模偏芯光纤弯曲损耗为

$$2\alpha_{BC} = 2\alpha_B \frac{2(Z_3 Z_2)^{1/2}}{(Z_3 + Z_2) - (Z_3 - Z_2) \cos(2\theta_0)} \quad (10)$$

式中, $Z_q = k_0^2 n_q^2 (1 + 2b/R) - \beta_0^2$ , $\theta_0 = \frac{\gamma^3 R}{3k_0^2 n_2^2} \left(\frac{R_c}{R} - 1\right)^{3/2}$ ,则

$$2\alpha_B = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\gamma^3 R}\right)^{1/2} \frac{\kappa^2}{V^2 K_1^2(\gamma a)} \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R}{3\beta_0^2}\right) \quad (11)$$

式中, $\kappa^2 = k^2 n_1^2 - \beta_0^2$ , $V = ak(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ , $2\alpha_B$ 为无限大包层的单模偏芯光纤弯曲损耗公式.

## 2 偏芯光纤弯曲损耗仿真分析

由于偏芯光纤的不对称结构,其弯曲损耗受很多因素影响,如偏芯距离、弯曲方向、弯曲半径、工作波长、光纤的制作材料等.在模拟仿真分析中,本文以石英光纤为研究对象,令 $n_1=1.45$ , $n_2=1.444$ , $n_3=1$ (空气), $R_0=4.5 \mu\text{m}$ , $R_2=62.5 \mu\text{m}$ , $\lambda=1550 \text{ nm}$ .

### 2.1 偏芯光纤弯曲损耗理论仿真分析

为研究纤芯位于光纤中不同位置时偏芯光纤弯曲损耗随弯曲半径变化的关系,选取几个特殊位置进行

研究,得到偏芯光纤的偏芯距离  $L$  分别为  $0, 30, 50, 55 \mu\text{m}$  时的仿真曲线,如图 2. 图中横坐标是偏芯光纤弯曲时的弯曲半径,纵坐标是偏芯光纤弯曲时的损耗. 图中平滑部分是无限大包层偏芯光纤弯曲损耗的仿真结果,振荡部分是带有涂层单模偏芯光纤弯曲损耗的仿真结果,带有振荡的原因是从基模中泄露出去的能量并没有完全损耗掉. 从图 2 中可见,弯曲损耗与弯曲半径的关系是单调递减的,当弯曲半径较大时( $R > 3 \text{ mm}$ ),损耗变得很小,几乎为零. 当弯曲半径小于临界值  $R_c$  时,损耗急剧增加,曲线变得很陡.

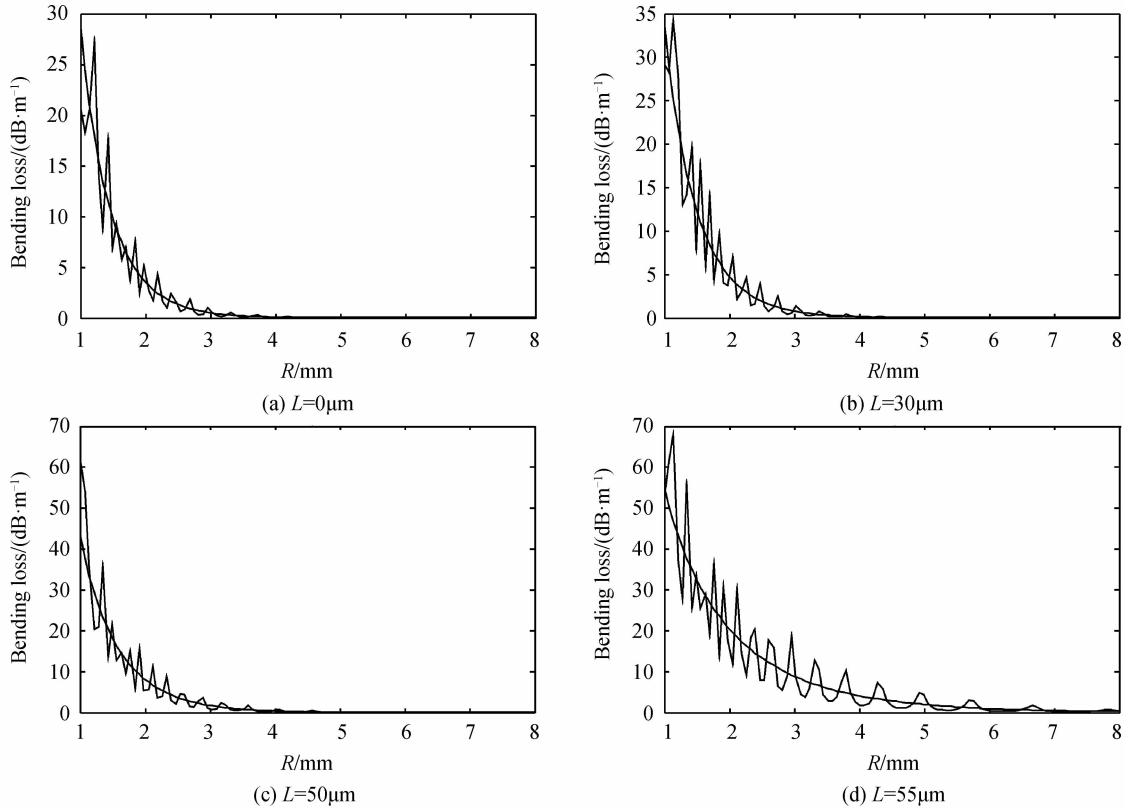


图 2 偏芯光纤弯曲损耗仿真曲线

Fig. 2 Eccentric core fiber bending loss simulation curve

从偏芯光纤的物理模型分析,其纤芯偏移中心轴线,在实际弯曲时,弯曲半径并不等于仿真分析中的弯曲半径  $R$ ,且在不同方向上的弯曲,弯曲半径也不同,则需要对不同的弯曲方向进行弯曲损耗分析. 图 3 为偏芯光纤在  $0^\circ$  方向与  $180^\circ$  方向弯曲的物理模型,图 3(a) 中向  $0^\circ$  方向弯曲,实际弯曲半径  $R' = R - \delta < R$ ; 图 3(b) 中向  $180^\circ$  方向弯曲,实际弯曲半径  $R' = R + \delta > R$ . 所以,偏芯光纤向不同方向弯曲时,需要用对应的弯曲半径求其弯曲损耗. 根据图 2 的仿真结果可知偏芯光纤在  $0^\circ$  方向的弯曲损耗要大于  $180^\circ$  方向的弯曲损耗.

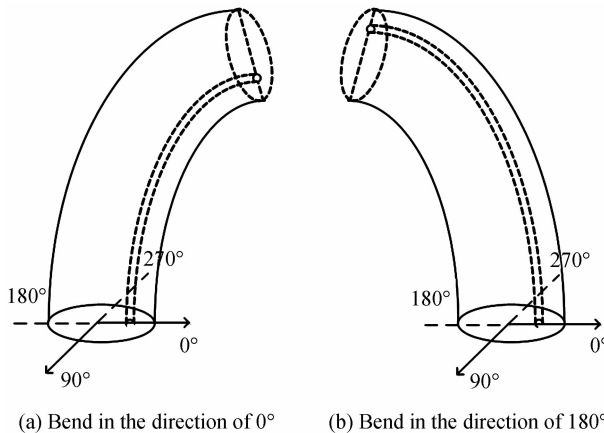


图 3 偏芯光纤弯曲物理模型

Fig. 3 Eccentric core fiber bending physical model

对比图 2 中各个曲线可以得到,在弯曲半径相同的情况下,随着偏芯距离的增加,偏芯光纤的弯曲损耗会逐渐增大。

## 2.2 偏芯光纤不同方向弯曲损耗仿真分析

根据图 3 偏芯光纤弯曲物理模型,在 Rsoft 软件中的 BeamPROP 模块建立偏芯光纤弯曲的光学模型,利用有限差分光束传播法分析偏芯光纤在  $0^\circ$  方向和  $180^\circ$  方向的弯曲损耗,仿真中为获得较为清晰的模场分布情况,取偏芯光纤的偏芯距离  $L=55\ \mu\text{m}$ ,弯曲半径  $R=1.6\ \text{mm}$ ,得到偏芯光纤弯曲时的模场分布图(见图 4)。

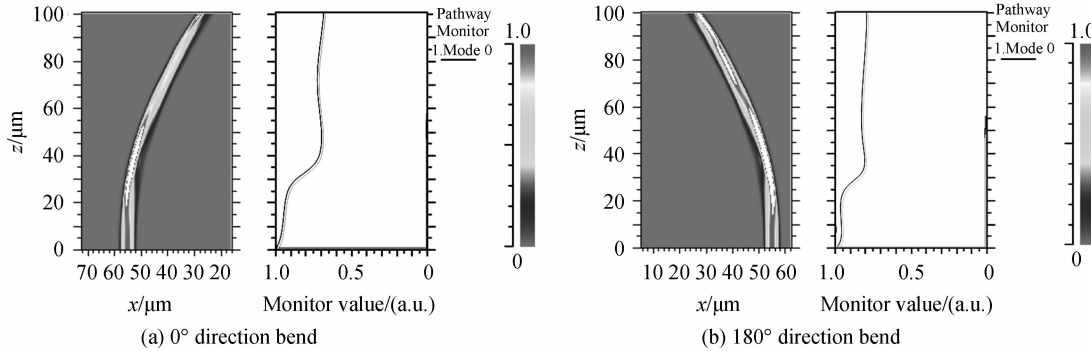


图 4 偏芯光纤弯曲模场分布  $x-z$  截面图

Fig. 4 Mode field distribution of  $x-z$  cross-section view

偏芯光纤同样利用光的全反射原理将光波能量约束在其界面内,并引导光波沿着偏芯光纤纤芯轴线方向传播.图 4 为入射光从下部耦合到弯曲的偏芯光纤的纤芯中,入射光在偏芯光纤的纤芯中传播时,偏芯光纤中基模模场分布的  $x-z$  截面图. $x$  轴代表光纤的包层和纤芯的直径, $z$  轴代表光纤的长度.图 4 中矩形部分代表偏芯光纤包层,中间部分代表偏芯光纤的纤芯.光在波导中进行传播时,会形成一个初始场,沿着光传输方向剖开偏芯光纤,所得截面显示的就是光在偏芯光纤中传输的模场分布情况。

根据图 4(a)和(b)的右侧能量参考条可知,值 1.00 代表能量最强,值 0.00 代表无能量,由上至下光能量是逐级递减的. Monitor Value 曲线为监测纤芯中传输的光能量值,通过 Monitor Value 曲线知弯曲的偏芯光纤很好地将光波能量约束在其界面内,并引导光波向前传播.但对于图 4(a)和(b)两个方向上的弯曲,弯曲后传输光的能量变化不同.图 4(a)中光在光纤中传输,开始时纤芯中能量值为 1.00,随着光纤向  $0^\circ$  方向弯曲,传输能量有很小的变化,曲线所示能量也在减少,经过弯曲部分后纤芯中能量处于 0.65 左右,说明传输光能量有损耗,弯曲处能量泄露较大.图 4(b)中随着光纤向  $180^\circ$  方向弯曲,经过弯曲部分后,纤芯中的能量处于 0.80 左右,通过对比两次弯曲 Monitor Value 曲线,可得偏芯光纤向  $180^\circ$  方向弯曲损耗小于  $0^\circ$  方向弯曲损耗.仿真结果与理论分析结果相符合。

## 3 结论

本文根据偏芯光纤理论计算模型,采用保角变换法对偏芯光纤弯曲损耗特性进行了分析.得到偏芯光纤弯曲损耗与弯曲半径的关系,在同一方向上弯曲时,弯曲半径越小,弯曲损耗越大,当弯曲半径  $R>3\ \text{mm}$  时,弯曲损耗几乎为零.在弯曲半径相同的情况下,随着偏芯距离的增加,弯曲损耗会逐渐增大.并运用 Rsoft 软件中的 BeamPROP 模块建立偏芯光纤弯曲的光学模型,模拟仿真出弯曲的偏芯光纤中的模场分布情况,得到弯曲方向与纤芯偏移中心轴线方向相同的损耗小于反方向的弯曲损耗,根据这个原理可以研究偏芯光纤的传感测量。

### 参考文献

- [1] GHARAATI A R, ELAHI P, JAFARI M. Calculation of temperature distribution in eccentric multi core diode pumped fiber lasers by green function method[J]. *Acta Physica Polonica-series A General Physics*, 2009, **116**(4): 566.
- [2] CHENG Hua-qi, JING Zhen-guo, PENG Wei, *et al.* Research of refractive index sensor based on eccentric core optic fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(4): 649-653.  
程华奇, 荆振国, 彭伟, 等. 基于单模光纤偏芯结构的光纤折射率传感器研究[J]. *光电子 • 激光*, 2012, **23**(4): 649-653.
- [3] YAGI T, KUBOKI N, SUZUKI Y, *et al.* Fiber-optic ammonia sensors utilizing rectangular cladding eccentric core fiber

- [J]. *Optical Review*, 1997, **4**(5): 596-600.
- [4] DONG Bo. Temperature insensitive curvature measurement with a core offset polarization maintaining photonic crystal fiber based interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, **17**(3): 233-235.
- [5] CHEN Xian-feng. Highly sensitive bend sensor based on bragg grating in eccentric core polymer fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(11): 850-852.
- [6] PATRICK H J. Self-aligning bipolar bend transducer based on long period grating written in eccentric core fibre[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(21): 1763-1764.
- [7] ZHONG Xing. Bending characteristics of a long-period fiber grating in a hollow eccentric optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(26): 7879-7883.
- [8] LIU Jian-xia, YUAN Li-bo. Evanescent field characteristics of eccentric core optical fiber for distributed sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2014, **31**(3): 475-479.
- [9] TANG Jie-yuan, ZHANG Quan-quan, ZENG Yang-fu, *et al.* Based on U-shaped bend optical fiber mode interference between the refractive index of the sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 88-93.  
唐洁媛, 张仨仨, 曾央夫, 等. 基于 U 型弯曲光纤模间干涉的折射率传感[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 88-93.
- [10] SHEN Lu-fa, WANG Zi-hua. Anisotropic left-handed materials form planar waveguide transmission characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 120-125.  
沈陆发, 王子华. 各向异性左手材料劈形平面波导传输特性[J]. 光子学报, 2015, **44**(10): 120-125.
- [11] GUAN Chun-ying. Characteristics of near-surface-core optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(19): 3004-3008.
- [12] YU M B. Momentum autocorrelation function of a classic diatomic chain[J]. *Physics Letters A*, 2016, **380**(43): 3583-3587.
- [13] DORADLA P, JOSEPH C S, KUMAR J, *et al.* Characterization of bending loss in hollow flexible terahertz waveguides [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 19176-19184.
- [14] CHEN Yung-chuan. Power losses in bent and elongated polymer optical fibers[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(21): 4570-4578.
- [15] KRASIKOV I. Approximations for the Bessel and Airy functions with an explicit error term[J]. *Lms Journal of Computation & Mathematics*, 2014, **17**(1): 209-225.
- [16] VASSALLO C. Perturbation of a LP mode of an optical fibre by a quasi-degenerate field; a simple formula[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 1985, **17**(3): 201-205.