

# 旋转高双折射全光纤型电流互感器

李卓岩<sup>1,2</sup>, 孟义朝<sup>1,2</sup>, 郝祥雨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学光纤研究所, 上海 201800;

<sup>2</sup>上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

**摘要** 为了降低传感光纤的线双折射对全光纤电流互感器测量准确度的影响,将旋转高双折射(SHB)光纤作为互感器的传感光纤。根据琼斯矩阵,建立了互感器数学模型。研究了平面镜和法拉第旋转镜对基于SHB光纤的反射干涉式互感器测量准确度的影响,分析了SHB光纤的旋转比与互感器抗温度扰动能力之间的关系,讨论了使用光纤1/4波片对基于SHB光纤的互感器进行误差补偿的方案。结果表明,在平面镜式互感器中,采用谐波相除法、闭环信号调制法可以消除SHB光纤的长度敏感性。当旋转比大于30时,在-40~60℃温度范围内,标度因数的变化小于0.2%。在相同条件下,法拉第旋转镜式互感器中SHB光纤所需的最小旋转比为3.4,可见法拉第旋转镜提高了互感器的温度稳定性,选择合适的1/4波片可以补偿由SHB光纤线双折射引起的互感器标度因数温度误差。

**关键词** 光纤光学; 传感器; 全光纤电流互感器; 旋转高双折射光纤; 法拉第旋转镜; 信号调制; 光纤波片

**中图分类号** TM933.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.020601

## Spun High Birefringence All-Fiber Current Transformers

Li Zhuoyan<sup>1,2</sup>, Meng Yichao<sup>1,2</sup>, Hao Xiangyu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

**Abstract** To reduce the influence of linear birefringence of sensing fiber on the measurement accuracy of all-fiber current transformers, a spun high birefringence (SHB) fiber can be used as the sensing fiber of transformer. A mathematical model of transformer is established based on Jones matrix. The influences of plane mirror and Faraday rotator mirror on the measurement accuracy of reflection interference type transformer are studied. The relationship between the rotation ratio of SHB fiber and the ability of resistance temperature disturbance of transformer is analyzed, and the error compensation scheme for the SHB-type transformer which uses the fiber 1/4 wave plate is discussed. Results show that, for the plane mirror type transformer, the harmonic division method and the closed-loop signal modulation can eliminate the length sensitivity of SHB fiber. When the rotation ratio is larger than 30, the scale factor variation is less than 0.2% in the temperature range of -40~60℃. For the Faraday rotator mirror type transformer, the minimum rotation ratio for SHB fiber is 3.4 under the same condition. It indicates that the Faraday rotator mirror improves the temperature stability of transformer, and the scale factor temperature error of transformer caused by linear birefringence can be compensated when we choose an appropriate fiber 1/4 wave plate.

**Key words** fiber optics; sensors; all-fiber current transformers; spun high birefringence fiber; Faraday rotator mirror; signal modulation; fiber wave plate

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 230.2240

**收稿日期:** 2016-09-21; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

**基金项目:** 上海市重点学科建设项目(S30108)

**作者简介:** 李卓岩(1991—),男,硕士研究生,主要从事特种光纤、光纤传感应用方面的研究。

E-mail: 2621530932@qq.com

**导师简介:** 孟义朝(1970—),男,博士,助理研究员,主要从事特种光纤和器件、保密光通信以及光纤传感方面的研究。

E-mail: myc@shu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

全光纤电流互感器(FOCT)与传统的电磁式互感器相比有诸多优点<sup>[1]</sup>,因此具有广阔的应用前景,并在近20年内得到了快速的发展<sup>[2]</sup>,但是FOCT还未达到实用化要求。限制FOCT实用化的因素<sup>[3-4]</sup>主要有:起偏器的偏振消光比误差、相位调制器误差、1/4波片制造时的截取误差以及传感光纤的线双折射。其中,传感光纤的线双折射是最主要的误差源<sup>[5]</sup>。传感光纤的线双折射对温度、弯曲、应力、振动等外界干扰比较敏感,从而降低了FOCT的稳定性。因此,如何通过抑制传感光纤的线双折射来提高互感器稳定性成为研究人员的研究重点。

温度变化会引起传感光纤线双折射的变化,导致偏振误差的产生和标度因数的改变,从而降低了互感器的测量准确度。研究人员提出了使用退火光纤<sup>[6]</sup>和低弹光系数的火石玻璃光纤<sup>[7]</sup>作为传感环来降低温度敏感性,并利用硬扭光纤<sup>[8]</sup>、螺旋缠绕光纤<sup>[9]</sup>、旋转光纤<sup>[10]</sup>等引入圆双折射以抑制传感光纤的线双折射。旋转光纤是在熔融状态下由光纤沿轴向匀速旋转制得,该方法很容易引入大量的圆双折射。旋转光纤分为旋转低双折射(SLB)光纤和旋转高双折射(SHB)光纤。虽然SLB光纤内在的线双折射可以被有效抑制,但是其抗弯曲、抗应力等外界扰动能力差<sup>[10]</sup>,无法适用于高精度的电流互感器,因此选用SHB光纤作为传感环。在反射式FOCT中的传感光纤末端放置一个反射镜,则信号光可两次通过光纤环,使系统的灵敏度提高了1倍,并消除了Sagnac效应。不同类型的反射器件对线双折射的作用不相同,本文建立了基于SHB光纤的反射干涉式FOCT模型,研究了平面镜式互感器与法拉第旋转镜式互感器<sup>[10]</sup>两种结构,探讨了SHB光纤旋转比、信号处理方法与互感器温度稳定性间的关系,介绍了光纤波片对互感器标度因数的影响。

## 2 基本工作原理

基于SHB光纤的反射干涉式FOCT结构示意图如图1所示。光源出射的光经耦合器进入起偏器,产生了线偏振光。起偏器透光轴与相位调制器输入端尾纤主轴以45°熔接,线偏振光进入相位调制器后分为两束沿快、慢轴传输的正交线偏振光。两束线偏振光经过相位调制器后产生了相位差,并沿保偏延迟线圈传输。保偏延迟线圈的输出端尾纤主轴与光纤1/4波片主轴呈45°熔接,两束正交线偏振光经过1/4波片后变成两束正交的圆偏振光,圆偏振光进入传感光纤并受到法拉第效应的作用。法拉第效应的本质是磁致圆双折射效应,且具有非互易特性,因此两束正交的圆偏振光在传感光纤中沿着磁场方向传输将产生大小为 $2F_0$ 的相位差, $F_0 = N \cdot V_0 \cdot I_0$ 为法拉第相移,其中 $N$ 为传感光纤的圈数, $V_0$ 为光纤的费尔德常数, $I_0$ 为待测电流。经传感光纤末端的反射镜反射后,两束光沿原路径返回,相位差变为 $4F_0$ ,再经1/4波片后两束光变为正交线偏振光,相位差 $4F_0$ 携带了电流信息。正交线偏振光经延迟线圈、相位调制器后在检偏器(起偏器)处发生干涉。光电探测器可检测到干涉光,得到干涉光强分布;经过相关信号处理可获得法拉第效应引起的相位差,从而得到待测电流值。

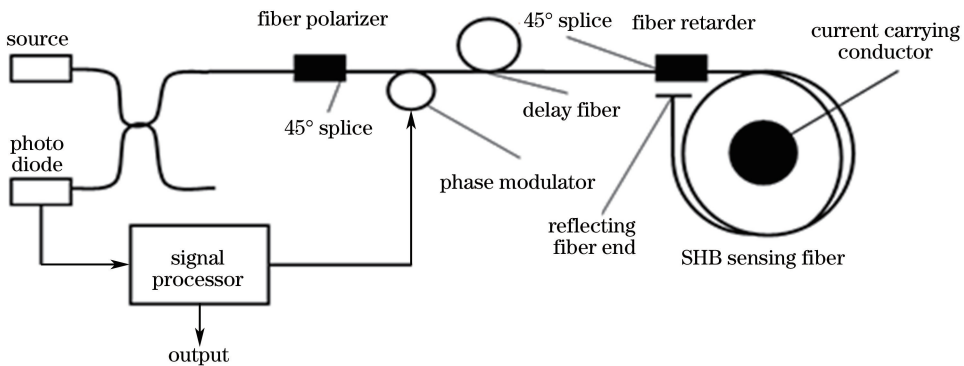


图1 基于SHB光纤的反射干涉式FOCT的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of reflection interference type FOCT based on SHB fiber

在不考虑各器件误差的情况下,各器件的琼斯矩阵模型为

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_{\text{pin}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{\text{pout}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_{\text{pmin}} = \begin{bmatrix} \exp[i\varphi_m(t)/2] & 0 \\ 0 & \exp[-i\varphi_m(t)/2] \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_{\text{pout}} = \begin{bmatrix} \exp[i\varphi_m(t+T_0)/2] & 0 \\ 0 & \exp[-i\varphi_m(t+T_0)/2] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_{\text{din}} = \begin{bmatrix} \exp(i\varphi_d/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi_d/2) \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{\text{dout}} = \begin{bmatrix} \exp(i\varphi_d/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\varphi_d/2) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{45\text{in}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{45\text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_{14\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/2) \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{14\text{out}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_{\text{coilin}} = \begin{bmatrix} A+iB & C \\ -C & A-iB \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{\text{coilout}} = \begin{bmatrix} A_1+iB_1 & C_1 \\ -C_1 & A_1-iB_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_{\text{mirror}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$A = \cos(gZ), B = \sin(gZ) \cos \phi, C = \sin(gZ) \sin \phi, \quad (9)$$

$$A_1 = \cos(g_1Z), B_1 = \sin(g_1Z) \cos \phi_1, C_1 = \sin(g_1Z) \sin \phi_1, \quad (10)$$

$$g = \sqrt{(\tau+f)^2 + (\Delta\beta/2)^2}, \phi = \arctan\left(\frac{2\tau+2f}{\Delta\beta}\right), \quad (11)$$

$$g_1 = \sqrt{(\tau-f)^2 + (\Delta\beta/2)^2}, \phi_1 = \arctan\left(\frac{2\tau-2f}{\Delta\beta}\right), \quad (12)$$

式中  $\mathbf{E}_{\text{in}}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{p}}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{pm}}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{d}}$ 、 $\mathbf{J}_{45}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{coil}}$  和  $\mathbf{J}_{\text{mirror}}$  分别为入射光、起偏器、相位调制器、保偏延迟线圈、光纤 1/4 波片、SHB 光纤传感线圈<sup>[11]</sup> 和普通平面反射镜的琼斯矩阵,  $\mathbf{J}_{45}$  为延迟线圈输出端尾纤主轴与光纤 1/4 波片主轴熔接角的琼斯矩阵, 下标 in 和 out 分别表示光初次入射经过各器件及经反射镜反射后再次经过各器件,  $\varphi_m$  为调制相位,  $\varphi_d$  为延迟线圈引入的互异性相位差,  $T_0$  为光在延迟线圈及传感光纤中的传播时间,  $Z$  为 SHB 光纤的总长度,  $f$  为单位距离下的法拉第相移,  $\tau$  为 SHB 光纤的旋转速率(单位为 rad/mm),  $\Delta\beta$  为 SHB 光纤快、慢轴的传播常数差(即线双折射)。定义  $\eta = 2\tau/\Delta\beta$  为 SHB 光纤的旋转比, 则输出光可表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{J}_{\text{pout}} \mathbf{J}_{\text{pmin}} \mathbf{J}_{\text{dout}} \mathbf{J}_{45\text{out}} \mathbf{J}_{14\text{out}} \mathbf{J}_{\text{coilout}} \mathbf{J}_{\text{mirror}} \mathbf{J}_{\text{coilin}} \mathbf{J}_{14\text{in}} \mathbf{J}_{45\text{in}} \mathbf{J}_{\text{din}} \mathbf{J}_{\text{pmin}} \mathbf{J}_{\text{pin}} \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (13)$$

经计算得到干涉光强为

$$I = [X \cos a - Y \sin a]^2 = \frac{1}{2}(X^2 + Y^2) + \frac{1}{2}(X^2 - Y^2) \cos(2a) - XY \sin(2a), \quad (14)$$

式中  $X = -AA_1 + BB_1 - CC_1$ ,  $Y = -AC_1 + A_1C$ ,  $2a = \varphi_m(t+T_0) - \varphi_m(t)$  为相位调制器引入的总相位差。

## 3 标度因数法拉第相移稳定性分析

### 3.1 平面镜式 FOCT

反射干涉式 FOCT 的信号调制方法包括开环法和闭环法, 其中开环法主要包括一次谐波法和一次、二次谐波相除法<sup>[12]</sup>。对于开环调制方法, 相位调制器引入的总相位差  $2a = \varphi_0 \sin(\omega_m t)$ ,  $\omega_m$ 、 $\varphi_0$  分别为相位调制器的调制角频率和调制深度。将(14)式进行贝塞尔展开, 得到一次、二次谐波分量分别为  $V_1 = -2XYJ_1(\varphi_0)$ 、 $V_2 = (X^2 - Y^2)J_2(\varphi_0)$ , 其中  $J_1(\varphi_0)$ 、 $J_2(\varphi_0)$  分别为一阶、二阶贝塞尔函数数值, 一次谐波法和二次谐波相除法得到的相位差分别为

$$4F_1 = \arcsin(-2XY), \quad (15)$$

$$4F_{12} = \arctan\left(\frac{2XY}{Y^2 - X^2}\right). \quad (16)$$

标度因数  $K$  定义为互感器检测相位差与实际由法拉第效应引起相位差之比。图 2 为平面镜式 FOCT 在不同信号处理方法下得到的标度因数相对变化量与 SHB 光纤长度的关系。在 20~2000 A 电流范围内, SHB 光纤中的固有线双折射  $\Delta\beta = \pi/2$  rad/mm, SHB 光纤的旋转速率  $\tau = 2\pi$  rad/mm, SHB 光纤的费尔德常数  $V_0 = 4.65 \times 10^{-6}$  rad/A, 线圈半径  $R = 40$  mm, 线圈圈数  $N$  的范围为 1~40, 在最大相位差  $4F_0 = 85.2^\circ$  条件下, FOCT 的标度因数的相对变化量与 SHB 光纤长度之间关系满足

$$\Delta K = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max}}, \quad (17)$$

式中  $K_{\max}$ 、 $K_{\min}$  分别为电流在 20~2000 A 范围内 FOCT 标度因数的最大值和最小值。

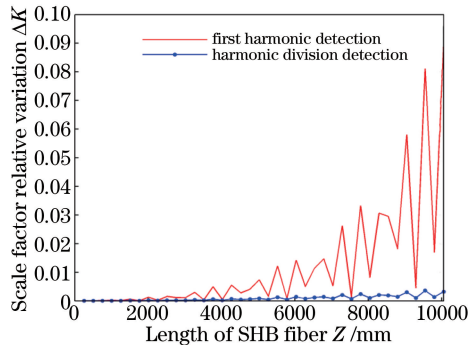


图 2 平面镜式 FOCT 在不同信号处理方法下得到的标度因数相对变化量与 SHB 光纤长度的关系

Fig. 2 Relationship between scale factor relative variation and length of SHB fiber obtained by plane mirror FOCT with different signal processing methods

由图 2 可知,在一次谐波法中,相同电流范围内标度因数的相对变化量与传感光纤长度(即法拉第相移)之间并非呈单调递增关系,当传感光纤长度为某些值时,标度因数相对变化量较小,标度因数对传感光纤长度的变化非常敏感。通过进一步的计算发现,线圈长度  $Z = N2\pi R$  满足

$$2g_0 Z = n2\pi, \quad (18)$$

式中  $g_0 = \sqrt{\tau^2 + (\Delta\beta/2)^2}$ ,  $n$  为正整数。参考文献[13],有

$$g = g_0 + f \sin \phi_0, \quad (19)$$

$$g_1 = g_0 - f \sin \phi_0, \quad (20)$$

$$\phi_0 = \arctan(2\tau/\Delta\beta), \quad (21)$$

$$-2XY = \sin^3 \phi_0 \sin(4F_0 \sin \phi_0) + \cos \phi_0 \sin 2\phi_0 \cos(2g_0 z) \sin(2F_0 \sin \phi_0). \quad (22)$$

输出信号不仅与相位差有关,还受 SHB 光纤的固有线双折射、旋转速率、线圈长度因素的共同作用。当满足  $g_0 Z = n\pi$  时,即线圈总长度为 SHB 光纤整数倍拍长时,有

$$-2XY = \sin^3 \phi_0 \sin(4F_0 \sin \phi_0) + \cos \phi_0 \sin 2\phi_0 \sin(2F_0 \sin \phi_0). \quad (23)$$

由上述分析可知,标度因数的相对变化量最小,证实了图 2 的结果。在实际应用中,受各种扰动因素的影响,满足(18)式的条件很难保持稳定,限制了椭圆双折射光纤的实用化,该结论与文献[11]结论一致。当 SHB 光纤的旋转比  $\eta = 2\tau/\Delta\beta \gg 1$  时,SHB 光纤本征模椭圆度  $\tan(\phi_0/2)$  近似等于 1,椭圆本征模趋近于圆偏振态,则(23)式可写为  $-2XY = \sin(4F_0)$ 。提高 SHB 光纤的旋转比可以提高互感器的稳定性,然而旋转比过高又会削弱 SHB 光纤抗弯曲和抗压能力<sup>[14]</sup>,相当于降低了互感器的稳定性。由谐波相除法标度因数的相对变化量可知,光纤长度敏感性大幅降低。因此,与一次谐波法相比,谐波相除法不仅可以避免由光源抖动带来的测量误差<sup>[9]</sup>,而且不必满足(18)式的苛刻条件便可保持互感器标度因数的稳定性,并得到较高的测量准确度。

对于闭环调制方法,相应的相位调制信号变为  $2a = \pm\pi/2 + \varphi_{fb}$ ,  $\pi/2$  为偏置相移,该偏置相移可使互感器工作在灵敏区域, $\varphi_{fb}$  为反馈相移<sup>[15]</sup>。将调制信号代入(14)式,可得

$$I = \frac{1}{2}(X^2 + Y^2) + \frac{1}{2}(X^2 - Y^2)(\pm \sin \varphi_{fb}) - XY(\pm \cos \varphi_{fb}). \quad (24)$$

将正负半周期信号相减,可得

$$I_d = (Y^2 - X^2) \sin \varphi_{fb} - 2XY \cos \varphi_{fb}. \quad (25)$$

相位差可表示为

$$4F_2 = \varphi_{fb} = \arctan\left(\frac{2XY}{Y^2 - X^2}\right). \quad (26)$$

由于(26)式与(16)式相同,因此通过闭环调制方法同样可以消除 SHB 光纤的长度敏感性,并保持标度因数的稳定性。不同之处在于,与开环调制方法相比,闭环调制方法具有更大的动态测量范围和更好的线性度<sup>[16]</sup>。

### 3.2 法拉第旋转镜式 FOCT

法拉第旋转镜又称为正交共轭反射镜,是由法拉第旋光器和反射镜构成的一种集成光学器件。法拉第旋转镜作为反射器件,(8)式应改为  $\mathbf{J}_{\text{mirror}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,将其代入(13)式,其他器件的传输矩阵不变,得到的干涉光强为

$$I = (X \cos a - Y \sin a)^2, \quad (27)$$

式中  $X = A_1 C - AC_1, Y = AA_1 + BB_1 + CC_1$ ,其余代数式均与上文相同。将(19)、(20)式代入(10)、(11)式,再将(24)式按贝塞尔级数展开,其一次谐波、二次谐波分别为

$$2XY = \sin \phi_0 \sin(2gz - 2g_1z) = \sin \phi_0 \sin(4F_0 \sin \phi_0), \quad (28)$$

$$Y^2 - X^2 = [\cos(2gz - 2g_1z)(1 + \sin^2 \phi_0) - \sin^2 \phi_0 + 1] / 2. \quad (29)$$

由(28)式和(22)式可知,使用法拉第旋转镜时,在不需要满足(18)式条件的情况下,可以得到较高的标度因数稳定性,因为法拉第旋转镜可使 SHB 光纤中圆偏振光的两线偏振分量的振动方向旋转  $90^\circ$  并发生模式互换。无外加磁场时,线双折射作用完全抵消,不会产生零漂现象;有外加磁场时,线双折射作用部分抵消。与上文分析相同,具有高旋转比的 SHB 光纤互感器的稳定性更好。

图 3 为法拉第旋转镜式 FOCT 在不同信号处理方法下标度因数的相对变化量与 SHB 光纤长度之间的关系,其他条件与上文中讨论的平面镜式 FOCT 相同。

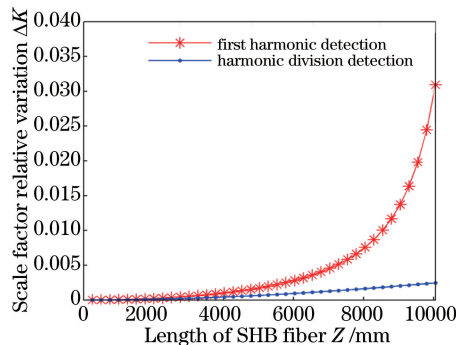


图 3 法拉第旋转镜式 FOCT 在不同信号处理方法下得到的标度因数的相对变化量与 SHB 光纤长度的关系

Fig. 3 Relationship between scale factor relative variation and length of SHB fiber obtained by Faraday rotator mirror with different signal processing methods

由图 3 可知,标度因数的相对变化量与法拉第相移有关,并且随着法拉第相移的增大而增大。当法拉第相移较小时,一次谐波法与谐波相除法类似,随着法拉第相移的增大,一次谐波法标度因数的相对变化量急剧增加,当 SHB 光纤长度为 5529.2 mm 时,即传感线圈圈数  $N=22$  时,法拉第相移引起的最大相位差为

$$4F_0 = 4N \cdot V_0 \cdot I_0 = 46.9^\circ, \quad (30)$$

式中最大电流值  $I_0=2000$  A,此时标度因数的相对变化量为 0.22%,当最大相位差超过  $47^\circ$  时,标度因数的相对变化量大于 0.2%。谐波相除法得到的标度因数的相对变化量随法拉第相移的增大而缓慢增大,相位差低于  $75^\circ$ ,标度因数的相对变化量小于 0.1%。闭环调制方法的性能与上文分析相同,不单独讨论。



## 4 标度因数温度稳定性分析

工作于户外的 FOCT 易受到各种扰动因素的影响,其中温度对互感器标度因数稳定性的影响最大。SHB 光纤的线双折射与温度满足<sup>[17]</sup>

$$\Delta\beta(T) = \Delta\beta(T_0) + \Delta\beta(T_0)c(T - T_0), \quad (31)$$

式中  $T_0$  为 20 °C,  $\Delta\beta(T_0)$  为常温下 SHB 光纤的线双折射,  $c$  为线双折射光纤的双折射温度系数。为了得到较高的温度稳定性,采用温度系数较低的椭芯型线双折射光纤<sup>[18]</sup>,温度系数  $c = -2.2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。对于平面镜式 FOCT,将(31)式代入(15)、(16)式,得到传感环线圈数为 30、电流为 2000 A、温度在  $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$  范围内变动时 FOCT 的标度因数随温度的变化,如图 4 所示。

由图 4 可知,标度因数随温度呈周期性变化,变化周期为 19.5 °C,在一个温度变化周期内 SHB 光纤中两椭圆本征模的相位延迟改变量为  $2\pi$  的整数倍,即  $2\Delta g_0 z = m2\pi$ ,  $m$  为整数。两种方法的温度变化周期相同,在相同温度范围内,谐波相除法的标度因数的相对变化量小于一次谐波法的标度因数的相对变化量,即谐波相除法优于一次谐波法。以上讨论的 SHB 光纤旋转比  $\eta = 8$ ,两种方法均达不到标度因数的相对变化量小于 0.2% 的指标。保持固有的线双折射不变,增大 SHB 光纤的旋转速率,观察谐波相除法中 SHB 光纤的旋转比与抗温度扰动的关系,不同 SHB 光纤旋转比下标度因数与温度的关系如图 5 所示,各曲线对应 SHB 光纤的旋转比分别为 16, 30, 40。

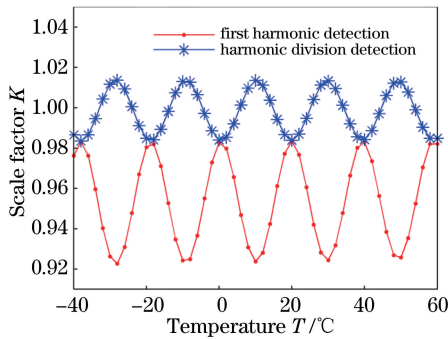


图 4 平面反射镜式 FOCT 在不同信号处理方法下标度因数与温度的关系

Fig. 4 Relationship between scale factor and temperature obtained by plane mirror FOCT with different signal processing methods

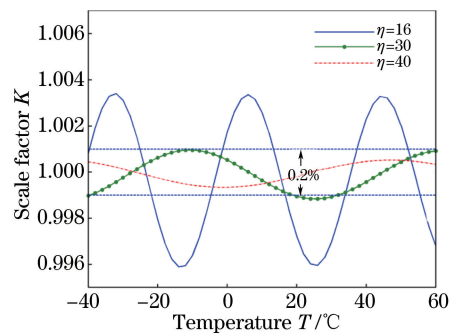


图 5 平面镜式 FOCT 在不同 SHB 光纤旋转比下标度因数与温度的关系

Fig. 5 Relationship between scale factor and temperature obtained by plane mirror FOCT with different rotation ratios of SHB fiber

由图 5 可知,SHB 光纤的旋转比越大,FOCT 标度因数的相对变化量越小,抗温度扰动能力越强,当 SHB 光纤的旋转比达到 30 时,标度因数的相对变化量仅为 0.2%,可达到实用要求。但是,SHB 光纤的旋转比过高又会降低 SHB 光纤抗弯曲、抗受压的能力<sup>[14]</sup>,因此在平面镜式 FOCT 中仅通过提高 SHB 光纤的旋转比并不能达到实用要求。

图 6、7 分别为利用一次谐波法和谐波相除法测得的法拉第旋转镜式 FOCT 在不同 SHB 光纤旋转比下标度因数与温度的关系。

由图 6、7 可知,标度因数与温度呈线性关系。SHB 光纤的旋转比越大,线性斜率越低,则标度因数受温度的影响越小。在一次谐波法中,当 SHB 光纤的旋转比为 4 时,标度因数的相对变化量为 0.21%,基本满足测量准确度的要求。在谐波相除法中,当 SHB 光纤的旋转比为 4 时,标度因数的相对变化量仅为 0.14%;当 SHB 光纤的旋转比为 3.4 时,标度因数的相对变化量为 0.19%。参考 FOCT 归一化灵敏度<sup>[19]</sup>的定义,利用谐波相除法测得的法拉第旋转镜式 FOCT 的归一化灵敏度为

$$S_N = \frac{\eta^2}{1 + \eta^2}. \quad (32)$$

SHB 光纤的旋转比为 4 时归一化灵敏度达到 0.9412,SHB 光纤的旋转比为 3.4 时归一化灵敏度达到 0.9204,SHB 光纤的旋转比与相对灵敏度的关系如图 8 所示。由图 8 可知,谐波相除法相较于一次谐波法的

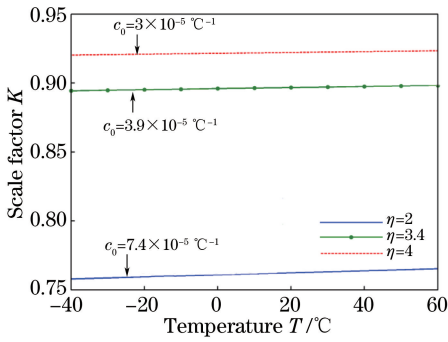


图 6 利用一次谐波法得到不同 SHB 光纤旋转比下标度因数与温度的关系

Fig. 6 Relationship between scale factor and temperature with different rotation ratios of SHB fiber obtained by first harmonic method

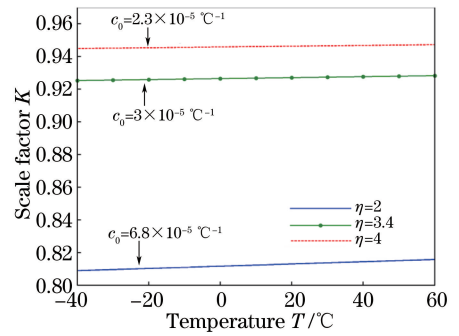


图 7 利用谐波相除法得到不同 SHB 光纤旋转比下标度因数与温度的关系

Fig. 7 Relationship between scale factor and temperature with different rotation ratios of SHB fiber obtained by harmonic division method

性能更好。综上可知,与平面镜式 FOCT 相比,法拉第旋转镜式 FOCT 仅需较小旋转比的 SHB 光纤便可达到较高的测量准确度,而且可以克服温度扰动,保持了 SHB 光纤抗弯曲及抗受压的能力。

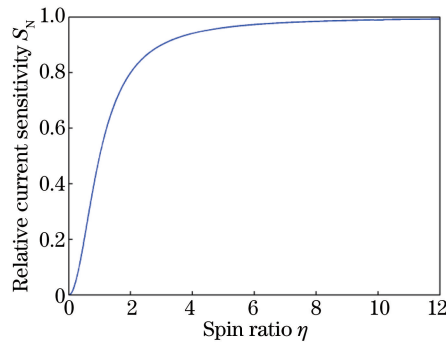


图 8 利用法拉第旋转镜式 FOCT 测得的 SHB 光纤旋转比与相对灵敏度的关系

Fig. 8 Relationship between rotation ratio of SHB fiber and relative sensitivity obtained by Faraday rotator mirror FOCT

1/4 波片是通过截取 1/4 拍长高线双折射光纤制得的,相位延迟量会随温度的升高而减小<sup>[17]</sup>,因此使得互感器的标度因数发生改变。上文的分析并未考虑 1/4 波片的影响,现考虑波片对 SHB 光纤型 FOCT 性能的影响。以法拉第旋转镜式 FOCT 为研究对象,考查其温度特性。假设波片主轴与延迟光纤主轴、传感光纤主轴均理想熔接,仅考虑波片相位延迟这一动态误差。波片相位延迟量为

$$\delta_T = \delta + \delta_{c_0}(T - T_0), \quad (33)$$

式中  $\delta$  为常温下波片的初始相位延迟量, $c_0$  为波片温度系数。将(6)式中的  $\pi/2$  替换为  $\delta_T$ ,计算互感器的标度因数。图 9 为在闭环调制方法中,不同波片初始相位延迟量、波片温度系数、SHB 光纤旋转比条件下标度因数与互感器温度的关系。

由图 9(a)可知,合理设置波片的初始相位延迟量可以补偿由 SHB 光纤线双折射温度敏感引起的标度因数误差,标度因数与温度之间呈线性关系。以  $90^\circ$  相位延迟量为基准,增大相位延迟量,斜率增加,相同温度范围内标度因数变化幅度增加,误差增大;减小相位延迟量,斜率减小,斜率等于 0 时可达补偿线双折射温度敏感引起的标度因数误差的目的,斜率小于 0 时还可以补偿费尔德常数引起的标度因数误差<sup>[17]</sup>。图 9 (b)采用温度特性较差的波片<sup>[14]</sup>,与图 9(a)相比,在相同初始相位延迟量条件下,温度系数绝对值越大,互感器标度因数对温度越敏感。由图 9(c)可知,在一定的旋转比范围内,随着旋转比的增加,波片温度作用效果增强,当旋转比达到一定值时,波片温度作用效果基本保持不变,因为旋转比过高时,SHB 光纤的线双折射受到抑制。SHB 光纤可视为圆双折射光纤,温度变化仅改变波片的相位延迟和光纤的费尔德常数。设计 FOCT 时,通过综合考虑波片初始相位延迟、波片温度系数、SHB 光纤的旋转比,便可达到最优的温度稳定性。

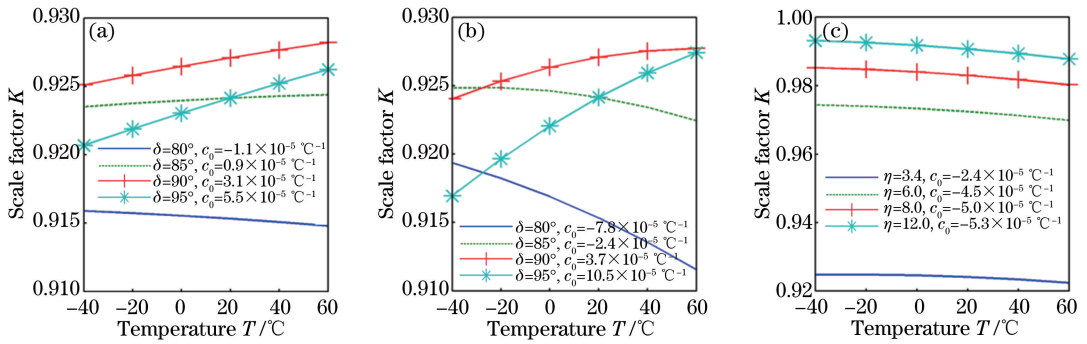


图9 标度因数与温度的关系。(a)  $\eta=3.4$ ,  $c_0=-2.2\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; (b)  $\eta=3.4$ ,  
 $c_0=-6.02\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; (c)  $\delta=85^{\circ}$ ,  $c_0=-6.02\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Fig. 9 Relationship between scale factor and temperature. (a)  $\eta=3.4$ ,  $c_0=-2.2\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; (b)  $\eta=3.4$ ,  
 $c_0=-6.02\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; (c)  $\delta=85^{\circ}$ ,  $c_0=-6.02\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

## 5 结 论

对基于旋转高线双折射光纤的反射干涉式 FOCT 进行了分析,比较分析了平面镜式 FOCT 与法拉第旋转镜式 FOCT 之间的性能差异。探讨了 SHB 光纤的旋转比与标度因数温度误差之间的关系及互感器误差的自补偿方案。结果表明,为了达到期望的测量准确度,一次谐波法要求 SHB 光纤长度等于其整数倍拍长,而谐波相除法、闭环调制法虽对 SHB 光纤长度无精确要求,但在变温环境下,SHB 光纤旋转比需达到 30,高旋转比的 SHB 光纤又会降低互感器的抗扰动能力。对于法拉第旋转镜式 FOCT,旋转比为 4 时,一次谐波法标度因数的变化为 0.21%,谐波相除法、闭环调制法标度因数的变化仅为 0.14%,可达到抗温度扰动、保持互感器准确度的目的,并且使互感器维持高灵敏度。因此,法拉第旋转镜和谐波相除法更有利于保持互感器的准确度。合理设置波片初始相位延迟、波片温度系数和 SHB 光纤的旋转比,可以达到互感器标度因数温度误差自补偿的目的。

## 参 考 文 献

- [1] Bohnert K, Gabus P, Kostovic J, *et al.* Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3): 511-526.
- [2] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.* Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [3] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, *et al.* Study of polarization errors of all fiber optical current transformers[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, 36(2): 320-323.  
王夏宵, 张春熹, 张朝阳, 等. 全光纤电流互感器的偏振误差研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(2): 320-323.
- [4] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.* Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 267-276.
- [5] Huang Jianhua, Wang Jia. Key technology of optical current transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(12): 94-97.  
黄建华, 王 佳. 光学电流互感器的关键技术[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(12): 94-97.
- [6] Rose A H, Ren Z B, Day G W. Twisting and annealing optical fiber for current sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(11): 2492-2498.
- [7] Kurosawa K. Optical current transducers using flint glass fiber as the Farady sensor element[J]. *Optical Review*, 1997, 4(1): 38-44.
- [8] Ulrich R, Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(30): 2241-2251.
- [9] Short S X, de Arruda J U, Tselikov A A, *et al.* Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(10): 1844-1850.
- [10] Laming R I, Payne D N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(12): 2084-2094.



- [11] Hung-Chia H. Elliptically birefringent optical fiber transmission characteristics[J]. *Fiber & Integrated Optics*, 1996, 15(2): 71-80.
- [12] Wang Gang. Research and analysis on performance of fiber optic current sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 35-40.  
王刚. 光纤电流传感器性能分析与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 35-40.
- [13] Qian J R, Guo Q, Li L. Spun linear birefringence fibres and their sensing mechanism in current sensors with temperature compensation[J]. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 1994, 141(6): 373-380.
- [14] Qian Jingren, Wang Xuxu. Coupled-mode theory for spun multi-lobe stress region fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 550-554.  
钱景仁, 王许旭. 多叶应力区扭转光纤的耦合模理论[J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 550-554.
- [15] Ouyang Kang, Hong Xiaobin, Wu Jian, *et al.* A novel method on modulation and demodulation of all fiber optical current transformer[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0105004.  
欧阳康, 洪小斌, 伍剑, 等. 全光纤电流互感器的新型调制解调方案研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105004.
- [16] Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.* Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(30): 42-46.  
张朝阳, 张春熹, 王夏宵, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(30): 42-46.
- [17] Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Li Chuansheng, *et al.* Measurement method and experimental research of the temperature dependence of the phase delay of quarter wave plates[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1205004.  
王夏宵, 王野, 李传生, 等. 光纤 1/4 波片相位延迟温度特性测量方法及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1205004.
- [18] Peng N, Huang Y, Wang S, *et al.* Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(17): 1668-1671.
- [19] Dong Xiaopeng, Dai Wenhua. Measurement of verdet constant for fibers with intrinsic linear birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(10): 1452-1457.  
董小鹏, 戴文华. 存在固有双折射光纤费尔德常数的测量[J]. *光学学报*, 1995, 15(10): 1452-1457.