

文章编号 1004-924X(2014)11-2930-07

## 光纤电流传感器的延迟光纤偏振串音误差

王夏霄<sup>1</sup>, 秦 祎<sup>1</sup>, 王 野<sup>2\*</sup>, 于 佳<sup>1</sup>, 吕江涛<sup>3</sup>, 周先贵<sup>4</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中国科学院 信息工程研究所, 北京 100093;

3. 中国航天科工集团 第九总体设计部, 湖北 武汉 430040;

4. 中国航天科工集团 第四研究院 红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

**摘要:**为了减小保偏延迟光纤偏振串音对光纤电流传感器测量精度的影响,利用琼斯矩阵研究了全光纤电流传感器的偏振耦合误差。简化了保偏延迟光纤的偏振串音模型,并基于简化模型得出了保偏延迟光纤偏振串音与输出的关系。通过理论仿真分别分析了在常温和变温条件下偏振串音对传感器变比的影响。对比实验结果与理论分析结论,验证了简化的偏振串音模型的合理性和仿真结果的正确性。测量了实际保偏延迟光纤偏振串音的温度特性,结果表明:在延迟光纤存在一定偏振串音时,光纤电流传感器的变比误差随电流的增加而增大;电流一定时,延迟光纤串音越高,光纤电流传感器的变比误差越大。最后,给出了满足光纤电流传感器 0.2S 级误差要求时延迟光纤偏振串音的允许波动范围。

**关键词:**光纤电流传感器;保偏延迟光纤;偏振串音;琼斯矩阵;误差分析

**中图分类号:**TN253;TM452.94 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2930

## Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor

WANG Xia-xiao<sup>1</sup>, QIN Yi<sup>1</sup>, WANG Ye<sup>2\*</sup>, YU Jia<sup>1</sup>, LÜ Jiang-tao<sup>3</sup>, ZHOU Xian-gui<sup>4</sup>

(1. School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Institute of Information Engineering,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

3. The Ninth Overall Design Department,  
China Aerospace Science & Industry Corporation, Wuhan 430040, China;

4. Hongfeng Control Co., Ltd., the Fourth Research Institute,  
China Aerospace Science & Industry Corporation, Xiaogan 432000, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangyes11@sina.com

**Abstract:** To overcome the effect of polarization-maintaining fiber delay polarization crosstalk on the measuring accuracy of an all Fiber Optical Current Sensor (FOCS), the polarization error of the FOCS was studied by using the Jones matrix. The error model for the polarization-maintaining fiber delay polarization crosstalk was simplified, and the relation between the polarization crosstalk and the

收稿日期:2014-03-06;修订日期:2014-05-04.

基金项目:航空科学基金项目(No. 20120851011)

output was deduced based on the simplified model. The influences of the polarization crosstalk on FOCS's normalized scale ratio under a normal temperature and variable temperatures were analyzed respectively by simulation and analysis. The comparison between the experiment results and theory conclusions show that the simplified model is reasonable and the simulation result is correct. The actual temperature characteristic of the polarization-maintaining fiber delay polarization crosstalk was tested. Experimental results indicate that when there is polarization crosstalk in the fiber delay line, the ratio error of the FOCS is proportional to the current; when the current is constant, the higher the polarization crosstalk is, the higher the FOCS's ratio error is. Finally, the fluctuation range of the fiber delay line polarization crosstalk to meet the 0.2S class error of FOCS was put forward.

**Key words:** fiber optical current sensor; polarization-maintaining delay fiber; polarization crosstalk; Jones matrix; error analysis

## 1 引 言

光纤电流传感器(Fiber Optical Current Sensor, FOCS)是新型的适用于高电压环境的电流测量设备,具有测量精度高、动态范围大、绝缘简单、抗干扰能力强、体积小、重量轻、数字化输出等优点,能够克服传统电磁式电流传感器的固有缺陷,适应电力系统数字化和智能化的发展需求<sup>[1-2]</sup>。目前,它已成为智能变电站建设的关键设备,并在国内智能变电站试点工程中挂网应用<sup>[3]</sup>。

温度漂移是限制 FOCS 工程应用的主要瓶颈。在 FOCS 光路系统中,主波的干涉反映被检测电流产生的法拉第相移,寄生次波的干涉则造成了偏振误差,而变温环境下的偏振误差则是导致传感器测量结果产生温度漂移的主要原因<sup>[3-5]</sup>。目前,国内外关于 FOCS 的偏振误差研究主要集中在  $\lambda/4$  波片相位延迟角度误差<sup>[4,6]</sup>和敏感环路线性双折射<sup>[5,7]</sup>上。而 FOCS 中,保偏延迟光纤是高压侧敏感环路与低压侧信号处理单元之间的传光介质,其长度通常为几百米,传输两束正交线偏振光,因此其偏振串音对 FOCS 偏振误差的影响不可忽视<sup>[8-9]</sup>。

本文对保偏延迟光纤的偏振耦合模型进行了简化,利用琼斯矩阵得到了系统输出与保偏延迟光纤偏振串音之间的关系。通过 MATLAB 进行了模拟仿真分析,并设计实验验证了保偏延迟光纤偏振耦合简化模型的合理性与正确性。最后测量了保偏延迟光纤偏振串音的温度特性,为保偏延迟光纤性能指标的选择和制作工艺等提供了依据。

## 2 理论研究

FOCS 的基本原理为:SLD 光源发出的光经环形器后由光纤偏振器起偏,形成线偏振光。线偏振光以  $45^\circ$  注入消偏头的保偏光纤后,被平均注入到保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输。当这两束正交模式的线偏振光经过调制器和保偏延迟光纤传输并通过  $\lambda/4$  波片后,分别转变为左旋和右旋的圆偏振光,进入传感光纤。由于传输电流产生磁场的法拉第效应,这两束圆偏振光以不同的速度传输,产生相位差。圆偏振光由传感光纤端面反射镜反射后,两束圆偏振光的偏振模式互换(即左旋光变为右旋光,右旋光变为左旋光),然后第二次通过传感光纤,产生的法拉第相位差加倍。再经  $\lambda/4$  片后波片恢复为线偏振光,在光纤偏振器处发生干涉。最后携带相位信息的光经环形器耦合进探测器。FOCS 结构如图 1 所示<sup>[1-2]</sup>。

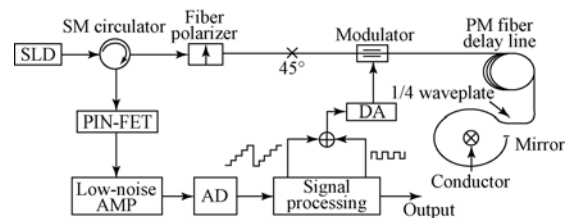


图 1 光纤电流传感器原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optical current sensor

理想情况下,FOCS 的两个主波列沿偏振器的通光方向输入、输出,并以不同的先后顺序经历相位调制器的 TE、TM 偏振模式和保偏延迟光纤的快慢轴,在往返传输的过程中不发生任何偏振耦合,光程完全互异。返回光电探测器的干涉光

反映了被测电流产生的法拉第相移。而在实际传输过程中主波通过保偏延迟光纤的耦合点时将会有少量能量耦合到正交偏振模式上形成次波,寄生次波的干涉(包括次波与主波及次波之间的干涉)将会造成系统的偏振误差<sup>[3,8]</sup>。

为方便分析保偏延迟光纤偏振串音对系统输出的影响,分别对除保偏延迟光纤外的各主要光路器件建立理想化的琼斯矩阵<sup>[1-2,8]</sup>:

(1)起偏器:

$$\mathbf{L}_{\text{pin}} = \mathbf{L}_{\text{pout}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

(2)45°熔点:

$$\mathbf{L}_{45^\circ \text{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_{45^\circ \text{out}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

(3)相位调制器:

$$\mathbf{L}_{\text{PMin}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi(t-\tau)} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_{\text{PMout}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi(t)} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中: $\phi(t)$ 为 $t$ 时刻相位调制器的调制相位, $\phi(t-\tau)$ 为 $(t-\tau)$ 时刻相位调制器的调制相位。

(4)1/4波片:

$$\mathbf{L}_{\lambda/4 \text{in}} = \mathbf{L}_{\lambda/4 \text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

(5)传感光纤法拉第效应:

$$\mathbf{L}_{\text{Fin}} = \begin{pmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_{\text{Fout}} = \begin{pmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{pmatrix}, \quad (8)$$

其中: $F = NVI$ , $N$ 为传感光纤的匝数, $V$ 为维尔德常数, $I$ 为导线中的电流; $\text{in}$ 表示传输光正向通过时的表达式, $\text{out}$ 表示经传感光纤端面反射镜反射后反向通过时的表达式。

(6)传感头端面的镜面反射:

$$\mathbf{L}_{\text{mirror}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

通常保偏光纤的偏振耦合模型非常复杂,实际计算中一般需要做适当的简化<sup>[9-10]</sup>。本文将保偏光纤偏振串音等效为一次对轴角度偏差 $\theta$ 造成的偏振耦合,则保偏延迟光纤的偏振串音 $CT_d$ 表示为:

$$CT_d = 20 \log(\tan \theta). \quad (10)$$

则其琼斯矩阵表达式为:

$$\mathbf{L}_{\text{Din}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{L}_{\text{Dout}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (12)$$

输出光的表达式为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}_{\text{p}} \cdot \mathbf{L}_{45^\circ \text{out}} \cdot \mathbf{L}_{\text{PMout}} \cdot \mathbf{L}_{\text{Dout}} \cdot \mathbf{L}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{L}_{\text{Fout}} \cdot \mathbf{L}_{\text{mirror}} \cdot \mathbf{L}_{\text{Fin}} \cdot \mathbf{L}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{L}_{\text{Din}} \cdot \mathbf{L}_{\text{PMin}} \cdot \mathbf{L}_{45^\circ \text{in}} \cdot \mathbf{L}_{\text{p}} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (13)$$

输出干涉光强的简化表达式为:

$$I_{\text{out}} = \mathbf{E}^+ \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{2} E_x^2 [1 + A \cos(\phi(t) - \phi(t-\tau) - \delta)], \quad (14)$$

其中:

$$A = \cos^4 \theta + \sin^4 \theta - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos 4F,$$

$$\delta = 2 \arctan \left( \frac{\tan 2F}{\cos 2\theta} \right).$$

在采用方波调制的条件下:

$$\phi(t) - \phi(t-\tau) = \pm \frac{\pi}{2} + \varphi_f, \quad (15)$$

其中: $\varphi_f$ 为反馈相移,可得:

$$I_{\text{out}} = 0.5 \cdot E_x^2 \cdot (1 \pm A \sin(\varphi_f - \delta)). \quad (16)$$

### 3 仿真分析

闭环条件下: $\sin(\varphi_f - \delta) = 0$ ,由式(14)、(16)得系统检测得到的法拉第相位差为:

$$\delta = \varphi_f = 2 \arctan \left( \frac{\tan 2F}{\cos 2\theta} \right). \quad (17)$$

为了方便分析光纤电流传感器的测量精度,用传感器检测到的相位差与实际电流产生的法拉第相位差的比值来衡量测量精度,称之为传感器的输出变比。变比 $NR$ 的表达式为:

$$NR = \frac{\delta}{4F}. \quad (18)$$

由式(17)、(18)可以看出,理想情况下 $\theta$ 为0,保偏延迟光纤不存在偏振串音,传感器变比始终为1,故也可称之为归一化变比。当 $\theta$ 不为0时, $NR$ 会出现漂移从而不再是常值1,检测到的相位差不能真实反映实际电流产生的相位差,由此产生的测量误差称为变比误差。

### 3.1 常温下偏振串音对传感器变比的影响

根据式(17)、(18),由于保偏延迟光纤偏振串音的影响,传感器闭环系统检测到的相位差  $\delta$  与实际法拉第相移  $F$  之间呈非线性关系。图 2 给出了常温下不同偏振串音条件下传感器归一化变比与法拉第相移的曲线关系。可以看出,常温下保偏延迟光纤的偏振串音越大,传感器输出变比与法拉第相移之间的非线性关系越明显;法拉第相移越大,归一化变比变化越大,传感器变比误差越大。

如 Faraday 相移为  $0 \sim 7.4^\circ$ ,当偏振串音为  $-20$  dB时,传感器的变比随 Faraday 相移变化了  $0.0876\%$ ;而当偏振串音低于  $-25$  dB时,传感器的变比随 Faraday 相移的变化小于  $0.03\%$ 。由于法拉第相移  $F = NVI$ ,常温下  $1310$  nm 波长的  $V_0 \approx 1.1 \times 10^{-6}$  rad/A,当  $NI = 10000$  A 时,电流产生的法拉第相移为  $6.3^\circ$ ;而实际应用中测量电流值一般小于  $10000$  A,因此,当保偏延迟光纤的偏振串音恒定不变时,它对传感器变比的影响几乎可以忽略。

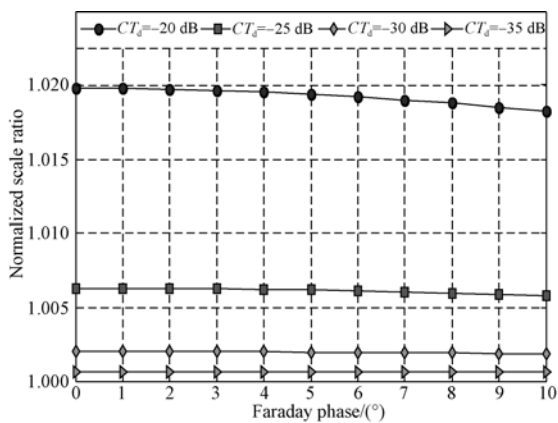


图 2 归一化变比随电流的变化曲线  
Fig. 2 Normalized scale ratio versus current

### 3.2 变温下偏振串音对传感器变比的影响

根据式(17)、(18),当传感器工作在固定电流时(实际应用中 FOCS 通常工作在额定电流条件下),传感器的变比与保偏延迟光纤的偏振串音有关,因此偏振串音随温度变化时,传感器的变比也随之改变,从而造成变比温度误差。图 3 给出了传感器变比随保偏延迟光纤偏振串音的变化曲线,其中  $N = 30, I = 3000$  A,则  $F = 5.31^\circ$ 。可以看出,传感器的变比随保偏延迟光纤偏振串音的

增大而增大,且传感器变比对保偏延迟光纤偏振串音的变化率也随偏振串音的增大而增大。

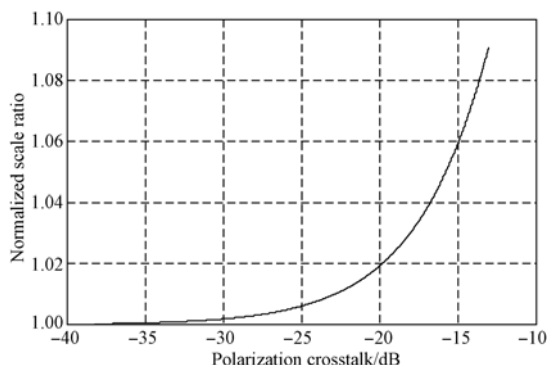


图 3 归一化变比随偏振串音的变化曲线  
Fig. 3 Normalized scale ratio versus polarization crosstalk

进一步分析可得,常温下不同偏振串音的保偏延迟光纤为了满足在额定电流下测量精度为  $0.2S$  级的要求,其允许的偏振串音相对变化量不同,具体范围如图 4 所示(精度为  $0.1$  dB)。如常温下保偏延迟光纤的偏振串音为  $-25$  dB时,为了满足  $0.2S$  级要求,在变温条件下其偏振串音的正向变化量不能大于  $1.2$  dB,负向变化量不能超过  $1.6$  dB。

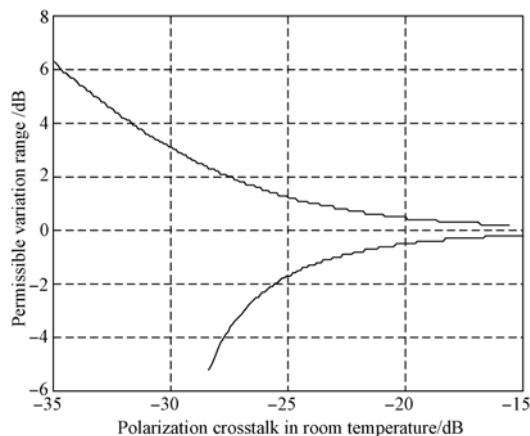


图 4 满足系统变比误差  $0.2S$  级要求时延迟光纤串音的变化范围  
Fig. 4 Permissible variation range of fiber delay line crosstalk for  $0.2S$  class ratio error requirement

## 4 实验验证

由于相位调制器尾纤与保偏延迟光纤的对轴熔接角度能够等效产生延迟光纤的偏振串音,选择常温下偏振串音较低的延迟光纤,以保证对轴

熔接角产生的等效延迟光纤的偏振串音为主要因素。改变相位调制器尾纤与延迟光纤之间的对轴熔接角度,形成不同的偏振串音值,理论关系如式(10)所示。但在实际光纤电流传感器的制作中,光纤熔接角误差在 $1^\circ$ 以内,理论上造成的偏振串音低于 $-35.2$  dB,一般低于延迟光纤的固有偏振串音,其影响可以忽略不计。

#### 4.1 常温验证

采用室内型铠装延迟光缆,测得常温下偏振串音为 $-34.1$  dB,由 3.1 节分析可以看出,此时偏振串音对传感器变比的影响太小,不易测得。故将相位调制器尾纤与延迟光纤以 $3^\circ$ 对轴角熔接,理论等效延迟光纤的串音为 $-25.5$  dB, $N=30$ ,利用高精度校验仪测得传感器系统变比与被测电流的非线性关系曲线。为了排除传感器其他误差的影响,采用实验电流源最小输出时传感器输出变比为基准的相对变比误差进行分析,实验结果如图 5 所示。

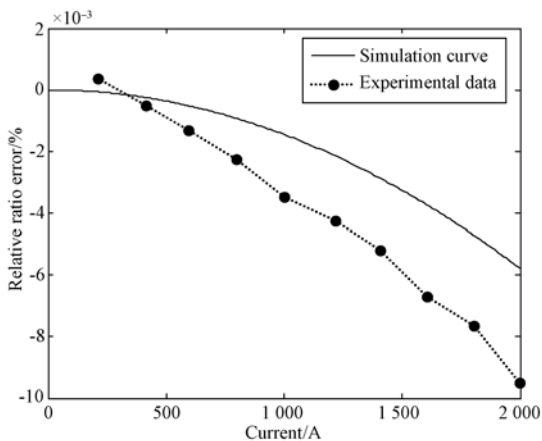


图 5 相对变比误差随电流变化的实验曲线

Fig. 5 Experimental relative ratio error versus current

由图可以看出,实验曲线与模拟曲线的趋势一致。由于光纤对轴熔接角度不可能十分精确,实际产生的偏振串音与理论值会有一定差异,而且光纤电流传感器中也存在其他导致系统输出变比非线性的因素,所以实际测试结果比模拟结果的相对变比误差要大。

#### 4.2 偏振串音影响实验

##### 4.2.1 不同熔接角对应的偏振串音

光纤电流传感器工作的额定电流为 $3\ 000$  A时,通过改变直波导尾纤与保偏延迟光缆的熔接

角度来等效不同的保偏延迟光纤的偏振串音。理论上不同熔接角度对应的等效偏振串音如表 1 所示。

表 1 不同熔接角度下的实际串音值

Tab. 1 Corresponding crosstalks with different fiber fusion angles

Fusion angle/ $(^\circ)$	0	2	3	6	8	10
Crosstalk/dB	-34.1	-29.2	-25.6	-19.6	-17.0	-15.1

为排除传感器其他误差因素的干扰,以 $0^\circ$ 熔接时测得的传感器归一化变比为基准,计算相对变比误差。实验结果如图 6 所示。

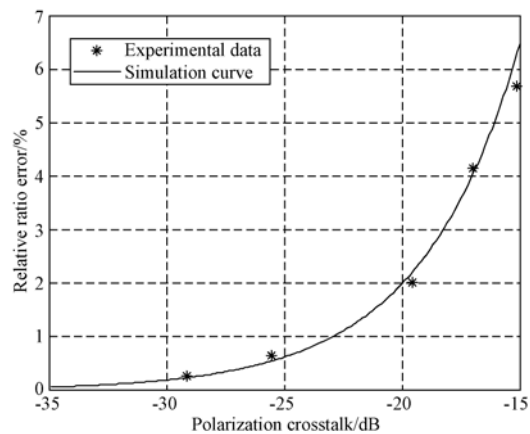


图 6 实验获得的相对变比误差与偏振串音的关系曲线

Fig. 6 Ratio relative error versus polarization crosstalk from experiment

由图 6 可以看出,实验数据基本与模拟仿真曲线重合,证明了理论分析的正确性。其中 $-15.1$  dB测试数据对应的相对变比误差与模拟曲线之间的偏差体现了延迟光纤偏振串音越大,变比误差对偏振串音变化越敏感。所以常温下延迟光纤的偏振串音要尽量保持较小水平。

##### 4.2.2 不同温度对应的延迟光纤偏振串音

保偏延迟光纤偏振串音的测试装置如图 7 所示,SLD 发出的光经偏振器起偏变为线偏振光,调整偏振器的方位角直至输出光波的消光比最大,此时被测光纤处于主轴注入状态。根据 $CT_d = -10\lg(1+10ER/10)$ ,将被测保偏光纤置于高低

温实验箱内,测试不同温度下输出光波的消光比 ER,进而得到偏振串音随温度的变化规律。

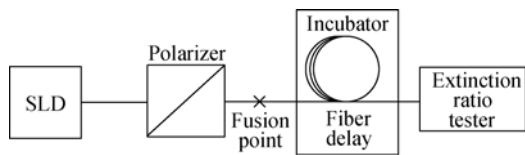


图 7 保偏延迟光纤偏振串音测试系统框图

Fig. 7 Test system for polarization crosstalk of fiber delay line

对于室内型电流传感器,延迟光纤一般采用铠装光缆;而对于户外型或地理信息系统(GIS)应用的电流传感器,一般采用保偏光纤环。本文分别对室内型和户外型光纤电流传感器的保偏光缆和光纤环的偏振串音进行了全温测试( $-40 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),结果如图 8 所示。

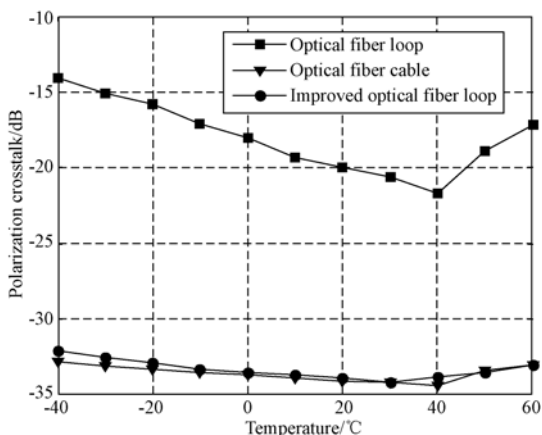


图 8 保偏光缆和光纤环串音的温度曲线

Fig. 8 Polarization crosstalks of different kinds of fiber delay lines versus temperature

由实验结果可知,保偏延迟光缆常温下的偏振串音约为 $-34.1\text{ dB}$ ,主要由保偏光纤内部的制造缺陷造成;全温下的最大偏振串音为 $-32.8\text{ dB}$ ,最低为 $-34.4\text{ dB}$ 。正向变化最大为 $1.3\text{ dB}$ ,负向最大为 $0.3\text{ dB}$ ,最大变比变化量为 $0.027\%$ ,主要变化源于不同温度下涂覆层材料对光纤的热应力作用<sup>[10]</sup>。所以,一般情况下可以忽略保偏延迟光缆在全温下偏振串音对传感器变比的影响,但在实际应用中需要利用图 7 装置对保偏延迟光缆的偏振

串音进行测试筛选,满足 3.2 节的分析结果。

保偏光纤环偏振串音的影响因素除了上述与保偏延迟光缆相同的因素外,还有由于绕环张力以及固化胶与光纤之间的应力作用形成明显的干扰双折射<sup>[11-12]</sup>,保偏光纤环常温下的偏振串音达到 $-20\text{ dB}$ 。由于固化胶与光纤之间的热膨胀系数不匹配,变温环境下固化胶会对光纤产生附加热应力<sup>[11]</sup>,因此,保偏光纤环在全温下的最大正向偏振串音达 $5.9\text{ dB}$ ,负向最大达到 $1.7\text{ dB}$ ,造成的系统变比误差远远超过了 $0.2\text{ S}$ 级要求。改变绕环工艺后,常温下的偏振串音为 $-33.9\text{ dB}$ ,全温下最大的正向偏振串音为 $1.8\text{ dB}$ ,负向最大为 $0.3\text{ dB}$ ,造成的系统变比误差仅为 $0.04\%$ 。所以对保偏光纤环的制造质量以及绕环工艺要满足一定的要求,以符合 3.2 节的分析结果。

## 5 结 论

FOCS 实质上是一种偏振干涉仪,对光路中传输光的偏振态有比较严格的要求。为了减小保偏延迟光纤偏振串音对传感器测量精度的影响,本文对偏振串音模型进行了简化,利用琼斯矩阵得到了输出光强表达式。用 MATLAB 进行模拟仿真分析,结果表明:常温偏振串音的存在导致传感器闭环系统检测到的相位差与实际法拉第相移之间呈现非线性关系,但是在较小的法拉第相移情况下,非线性造成的传感器变比误差非常小,可以忽略其影响;FOCS 在额定电流下工作,偏振串音随温度变化时,传感器的变比也随之改变,且常温时偏振串音越大,变比的温度敏感性也越强。为了满足在额定电流下测量精度为 $0.2\text{ S}$ 级的要求,进一步给出了常温偏振串音不同的保偏延迟光纤允许的偏振串音的相对变化范围。通过实验验证了偏振串音模型的合理性和模拟仿真结果的正确性。最后研究了变温条件下影响保偏延迟光纤偏振串音的主要因素:对于室内用保偏延迟光缆,主要因素为光纤制造水平;对于室外用保偏延迟光纤环,主要影响因素为绕环工艺及固化胶的使用。所得结论对光纤电流传感器的温度环境适应性有着重要意义。

## 参考文献:

- [1] BLAKE J, TANTASWADI P, de CARVALHO R T. In-line sagnac interferometer current sensor [J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1996, 11(1):116-121.
- [2] FROSIO G. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(25):6111-6122.
- [3] 李传生,张春焘,王夏霄,等. 反射式 Sagnac 型光纤电流互感器的关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(12):104-108.  
LI CH SH, ZHANG CH X, WANG X X, *et al.*. Key techniques of reflective sagnac interferometer-type fiber optic current transformers [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12):104-108. (in Chinese)
- [4] SHORT S X, TSELIKOV A A, de ARRUDA J U, *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in sagnac interferometer-type current sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(7):1212-1219.
- [5] SHORT S X, DE ARRUDA J U, TSELIKOW 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.
- [6] 张朝阳,张春焘,王夏霄,等. 光纤电流互感器 1/4 波片温度误差补偿[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(12):55-59.  
ZHANG CH Y, ZHANG CH X, WANG X X, *et al.*. Temperature compensation methods of 1/4 wave plate for fiber optic current sensor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(12):55-59. (in Chinese)
- [7] 王景飞,梁京伟,董前民. 反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(4):23-26.  
WANG J F, LIANG J W, DONG Q M. Study of sensing coil errors in the in-line Sagnac interferometer current transducer[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(4):23-26. (in Chinese)
- [8] YU J, ZHANG CH X, LI CH SH, *et al.*. Influence of polarization-dependent crosstalk on scale factor in the in-line Sagnac interferometer current sensor [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11):117101.
- [9] 龙亮,钟少龙,徐静,等. 微型光纤磁传感器的设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9):2294-2302.  
LONG L, ZHONG SH L, XU J, *et al.*. Design and fabrication of micro fiber-optic magnetic sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2294-2302. (in Chinese)
- [10] 杨远洪,李莉,蒋大刚,等. 高精度保偏光纤拍长测试[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6):807-811.  
YANG Y H, LI L, JIANG D G, *et al.*. Precision measurement scheme for beat-length of polarization maintain optical fiber[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):807-811. (in Chinese)
- [11] 于强,张琛,何周,等. 固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(2):170-174.  
YU Q, ZHANG CH, HE ZH, *et al.*. Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2):170-174. (in Chinese)
- [12] 李绪友,张琛,何周,等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(4):1053-1057.  
LI X Y, ZHANG CH, HE ZH, *et al.*. Temperature performance research of fiber optics gyroscope based on polarization coupling theory[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4):1053-1057. (in Chinese)

## 导师简介:



王夏霄(1977—),男,山西太原人,博士,讲师,2000年,2007年于北京航空航天大学分别获得学士、博士学位,主要从事光纤陀螺及光纤电力传感技术方面的研究。E-mail: wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

## 通讯作者:



王野(1989—),男,河北承德人,硕士,助理工程师,2011年,2014年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光纤通信安全。E-mail: wangyes111@sina.com