

# 保偏延迟光纤环偏振串音对光纤电流互感器的影响

李传生 张朝阳 孙海江 崔虎宝

(国网智能电网研究院电力电子研究所, 北京 102211)

**摘要** 利用保偏延迟光纤环的偏振耦合模型, 考虑幅值较大的互易性寄生波列, 计算了光纤电流互感器(FOCS)光路系统的干涉光强, 得到了互感器变比与延迟环偏振串音之间的理论关系, 揭示了延迟环偏振串音的温度相关性对互感器变比的影响机理, 并提出了抑制方法。为保证变温环境下互感器的变比误差在 0.2% 以内, 延迟环的偏振串音应低于 -30 dB。实验结果表明: 在绕制延迟环的过程中, 降低绕环张力、减少胶的用量, 采用低温度系数骨架可有效地改善互感器变比的温度稳定性, 在 -40 °C ~ 70 °C 范围内, 互感器变比的变化量由 0.63% 降低至 0.07%。该研究为光纤电流互感器中保偏延迟光纤环的设计和绕制工艺提供了理论指导。

**关键词** 光纤光学; 光纤电流互感器; 变比误差; 偏振耦合

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105008

## Effect of Polarization Crosstalk of Polarization-Maintaining Delay Optical Fiber Coil on the Fiber-Optic Current Sensor

Li Chuansheng Zhang Chaoyang Sun Haijiang Cui Hubao

(Power Electronics Department, State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract** According to the polarization coupling model of the polarization-maintaining delay optical fiber coil, considering the reciprocal parasitic waves with large amplitude, the interference intensity of the optical system in the fiber-optic current sensor (FOCS) is calculated, and the theoretical relationship between the scale factor and the polarization crosstalk of the delay fiber coil is obtained. The effect mechanism of the temperature dependence of the polarization crosstalk on the scale factor is revealed, and the corresponding suppression methods are proposed. To ensure the scale factor error to be within 0.2% under the varied temperature condition, it is essential for the polarization crosstalk of the delay fiber coil to be less than -30 dB. The experimental results show that the temperature performance of the FOCS can be improved greatly when lowering the tension of winding fiber, reducing the quantity of the glue, and utilizing the frame with low temperature coefficient. The variation of the scale factor is decreased from 0.63% to 0.07% over the temperature range from -40 °C to 70 °C. The research work offers a theoretical guide for the design and manufacture of the optical fiber delayed coil in the FOCS.

**Key words** fiber optics; fiber-optic current sensor; scale factor error; polarization coupling

**OCIS codes** 060.2370; 060.2420; 060.2340

## 1 引 言

光纤电流互感器(FOCS)具有测量精度高、频响范围宽、动态范围大、绝缘简单、数字化输出、体积小、重量轻等优点, 在智能变电站、特高压交、直流输电等领域都有重要应用<sup>[1-3]</sup>。

变比温度误差是制约光纤电流互感器工程应用的主要问题之一, 国内外学者针对该问题开展了深

入研究。传感光纤线性双折射<sup>[4]</sup>、Verdet 常数<sup>[5]</sup>及 1/4 波片相位延迟<sup>[6-7]</sup>等参数随温度变化是造成互感器变比温度误差的主要原因。在实际应用中, 为了现场施工方便, 常将互感器整机置于户外, 并要求在 -40 °C ~ 70 °C 范围内, 测量准确度满足 GB/T 20840.8 0.2 级的要求<sup>[8]</sup>。在这种应用背景下, 除上述因素外, 保偏(PM)延迟光纤环偏振串音的温度相

**收稿日期**: 2014-05-29; **收到修改稿日期**: 2014-06-27

**基金项目**: 国家电网公司科技项目(EPRIGYKJ[2012]4939)

**作者简介**: 李传生(1984—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光纤电力传感技术方面的研究。

E-mail: li\_chuansheng@163.com

关性也将导致变比误差。互感器光路系统中的主波在沿延迟光纤往返传输的过程中,形成了多个寄生的次波,其中光程互易的次波之间的干涉是造成变比误差的主要原因。

本文介绍了光纤电流互感器的工作原理,在建立保偏延迟光纤环偏振耦合模型的基础上,计算了光路系统的干涉光强和闭环相位差,分析了延迟光纤偏振串音对互感器变比的影响机理及抑制方法,并进行了实验验证。

## 2 工作原理

如图 1 所示,超辐射发光二极管(SLD)发出的光经环形器,由 Y 波导集成光学相位调制器起偏、

分光变为两束线偏振光,上、下分支的两束线偏振光经偏振分束器(PBS)合光后沿保偏延迟光纤的快、慢轴传输,并由 1/4 波片变为两束旋向正交的圆偏振光,在被测电流的作用下,两束圆偏振光之间产生相位差,经敏感光纤末端反射镜反射后沿原路返回,相位差加倍,两束正交圆偏振光经 1/4 波片后变为两束偏振方向互换的正交线偏振光(原来沿延迟光纤快轴传输的光此时沿慢轴传输,原来沿延迟光纤慢轴传输的光此时沿快轴传输),经 PBS 分光后再次进入上、下两个分支,最终经 Y 波导检偏并发生干涉,由光电探测器变为电信号后进行数字闭环信号处理<sup>[9]</sup>,检测 Faraday 相移,得到被测电流。

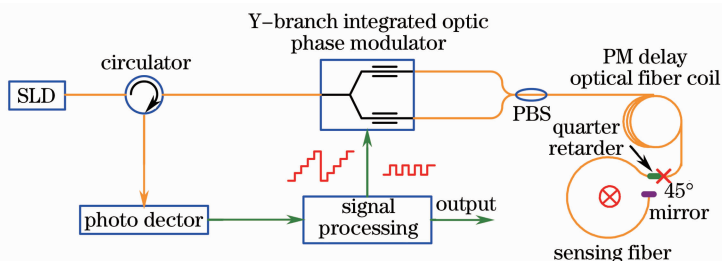


图 1 光纤电流互感器结构示意图

Fig. 1 Configuration of fiber-optic current sensor

## 3 理论分析与仿真

### 3.1 保偏延迟光纤环偏振耦合模型

保偏延迟光纤环的模型可以通过光纤上随机分布的耦合点来描述<sup>[10]</sup>。如图 2 所示,设延迟光纤的长度为  $L_d$ ,每个耦合点都随机分布在一个消偏长度  $L_0$  内,则共有  $N_d = L_d/L_0$  个耦合点,它们的耦合强度相等,均为  $hL_0$ ,  $h$  为偏振保持参数,与保偏延迟光纤偏振串音  $C$  的关系为<sup>[10]</sup>:  $hL_d \approx 10^{C/10}$ 。当光从 1 端口进入,2 端口输出时,保偏延迟光纤的偏振耦合模型为

$$\mathbf{L}_{\text{din}} = \prod_{k=1}^{N_d} \mathbf{T}(L_{dk}) \mathbf{T}(\theta_{dk}), \quad (1)$$

式中  $\mathbf{T}(\theta_{dk}) = \begin{bmatrix} \sqrt{1 - hL_d/N_d} & \sqrt{hL_d/N_d} \\ -\sqrt{hL_d/N_d} & \sqrt{1 - hL_d/N_d} \end{bmatrix}$ ,

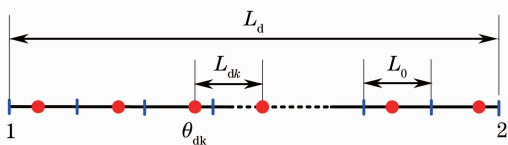


图 2 保偏延迟光纤环模型参数

Fig. 2 Model parameters of polarization-maintaining delay optical fiber coil

$$\mathbf{T}(L_{dk}) = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_{dx}L_{dk}) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_{dy}L_{dk}) \end{bmatrix}, \beta_{dx}, \beta_{dy}$$

为保偏光纤快、慢轴的传播常数,  $L_{dk}$  为相邻耦合点之间的距离。  $L_0$  的典型值约为 10 cm,当  $L_d = 100$  m 时,  $N_d = 1000$ 。当光波反向通过时,其模型为  $\mathbf{L}_{\text{dout}} = \mathbf{L}_{\text{din}}^T$ 。

### 3.2 干涉光强与闭环相位差计算

由于偏振耦合的影响,光路系统中的主波在往返经过延迟环的过程中,形成了大量的幅值较小的寄生次波,次波再次耦合产生幅值更小的波列。为简化计算,只分析耦合总次数不超过 4 次的两波列之间的干涉,它们之间的相位差可能为  $4F$ 、0 或  $-4F$ ,  $F$  为被测电流产生的 Faraday 相移。另外,干涉信号的直流分量不参与闭环检测,只计算干涉光强的交流分量。

#### 3.2.1 相位差为 $4F$ 的干涉项

相位差为  $4F$  的干涉项由沿延迟环正、反向传输的过程中均发生偶数次耦合的互易波列干涉产生。只讨论 0 次耦合波列的干涉、2 次耦合波列的干涉以及 0 次耦合波列与 4 次耦合波列的干涉。

##### 1) 0 次耦合波列的干涉

0次耦合波列即光路系统的主波，它们在沿延迟环往返传输过程中不发生任何偏振耦合，干涉光强的表达式为

$$I_{n1} = I_x \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d} \cos(\Phi_m + 4F), \quad (2)$$

式中  $\Phi_m$  为相位调制器引入的调制相位， $I_x$  为光源发出光波的  $x$  分量的光强。

### 2) 2次耦合波列的干涉

如图3所示，某波列正向传输过程中在  $a$ 、 $b$  两点发生偏振耦合，携带的 Faraday 相移为  $2F$ ，光程与之互易的波列为正向传输过程中耦合0次，反向传输过程中耦合2次，且发生耦合的位置也在  $a$ 、 $b$

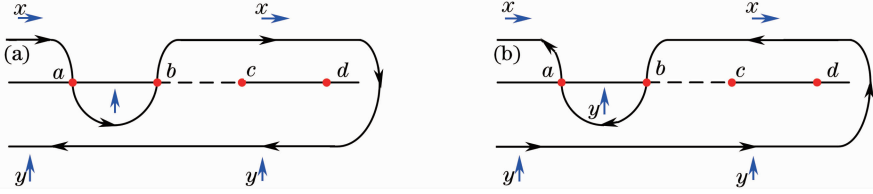


图3 相位差为  $4F$  的2次耦合互易波列

Fig. 3 Reciprocal waves with  $4F$  phase difference whose coupling times are both 2

### 3) 0次耦合波列与4次耦合波列的干涉

如图4所示，与0次耦合波列光程互易的4次耦合波列在沿延迟环往返传输的过程中必定在两个相同的耦合点各发生2次偏振耦合，这类干涉项共

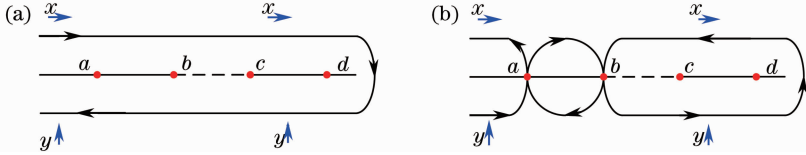


图4 相位差为  $4F$  的0次和4次耦合互易波列

Fig. 4 Reciprocal waves with  $4F$  phase difference whose coupling times are 0 and 4

### 3.2.2 相位差为 $-4F$ 的干涉项

相位差为  $-4F$  的干涉项由沿延迟环往返传输过程中均发生奇数次耦合的互易波列干涉产生。只讨论正、反向传输过程中均发生1次耦合的波列之间的干涉。

如图5所示，某波列沿延迟光纤正向传输过程中在  $a$  点发生偏振耦合，反向传输过程中在  $b$  点发生耦合，与之互易的波列中耦合次数最少的是在正向传输过程中在  $b$  点发生耦合，反向传输过程中在

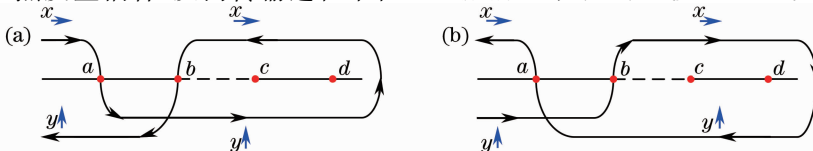


图5 相位差为  $-4F$  的2次耦合互易波列

Fig. 5 Reciprocal waves with  $-4F$  phase difference whose coupling times are both 2

两点的波列，其他与之互易的波列的耦合次数至少为4次，可以忽略。同理，如果某波列在正向传输过程中耦合0次，反向传输过程中耦合2次，与之互易的且耦合次数最少的波列在正向传输过程中耦合2次，反向传输过程中耦合0次，且发生耦合的位置相同。这两类干涉项的幅值相等，各有  $N_d(N_d-1)/2$  项，总干涉光强为

$$I_{n2} = I_x \frac{N_d-1}{N_d} \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2} h^2 L_d^2 \cos(\Phi_m + 4F). \quad (3)$$

有  $N_d(N_d-1)$  项，它们振幅相等，总干涉光强为

$$I_{n3} = I_x \frac{N_d-1}{N_d} \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2} h^2 L_d^2 \cos(\Phi_m + 4F). \quad (4)$$

$a$  点发生耦合的波列，这类干涉项共有  $N_d(N_d-1)$  项，总干涉光强为

$$I_{p1} = I_x \frac{N_d-1}{N_d} \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2} h^2 L_d^2 \cos(\Phi_m - 4F). \quad (5)$$

另外，当  $a$ 、 $b$  两点重合，即正、反向传输过程中在同一耦合点各发生1次耦合，光程与之互易的波列必然也在同一耦合点各发生1次耦合，这些干涉项的振幅相等，共有  $N_d^2$  项，总干涉光强为

$$I_{p2} = I_x \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2} h^2 L_d^2 \cos(\Phi_m - 4F). \quad (6)$$

### 3.2.3 相位差为0的干涉项

相位差为0的干涉项由这样的波列干涉产生：其中一个沿延迟环往返传输过程中均发生了偶数次耦合，而另一个则均发生了奇数次耦合。对于前者，只分析0次耦合波列，正向耦合2次、反向耦合0次的波列及正向耦合0次、反向耦合2次的波列；对于后者，只研究正、反向各耦合1次的波列。

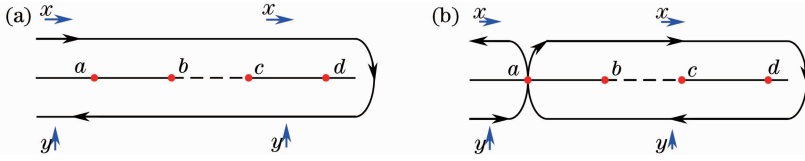


图6 相位差为0的0次和2次耦合互易波列

Fig. 6 Reciprocal waves without phase difference whose coupling times are 0 and 2

2) 2次耦合波列与正、反向各耦合1次的波列的干涉

如图7所示，某波列沿延迟环正向传输过程中在a、b两点发生偏振耦合，与之互易的波列中耦合次数最少的是正向传输过程中在b点发生耦合，反向传输过程中在a点发生耦合的波列。同样，对于正向传输过程中不发生耦合，反向传输过程中在耦合点b、a分别耦合1次的波列，与之互易的波列中

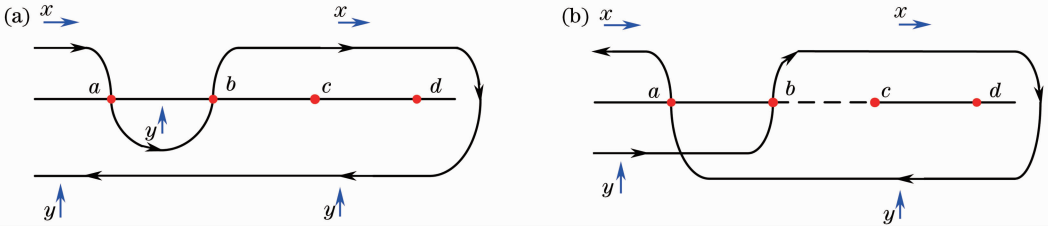


图7 相位差为0的2次耦合互易波列

Fig. 7 Reciprocal waves without phase difference whose coupling times are both 2

根据(2)~(8)式，得到光路系统的总干涉光强为

$$I = I_x \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2}.$$

$$\left\{ \left[ \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^2 + \frac{2h^2 L_d^2 (N_d - 1)}{N_d} \right] \cos(\Phi_m + 4F) - 2hL_d (1 - hL_d) \cos \Phi_m + \frac{h^2 L_d^2 (2N_d - 1)}{N_d} \cos(\Phi_m - 4F) \right\}. \quad (9)$$

对于数字闭环光纤电流互感器， $\Phi_m = \pm \pi/2 + \Phi_F$ ， $\Phi_F$ 为反馈相位，当系统闭环稳定时， $I = 0$ 。根据(9)式，此时，闭环系统检测到的相位差为

$$\Phi_s = \arctan \left\{ \frac{\left[ \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^2 - \frac{h^2 L_d^2}{N_d} \right] \sin 4F}{\left[ \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^2 + h^2 L_d^2 \left(4 - \frac{3}{N_d}\right) \right] \cos 4F - 2hL_d (1 - hL_d)} \right\}. \quad (10)$$

### 3.3 偏振串音对互感器变比的影响及抑制

根据(10)式，互感器的变比与延迟环的偏振串

音有关，偏振串音的温度相关性将导致变比温度误差。图8给出了互感器变比随偏振串音的变化曲

1) 0次耦合波列与正、反向各耦合1次的波列的干涉  
如图6所示，与0次耦合波列互易的沿延迟光纤传输过程中正、反向各耦合1次的波列必定在同一点发生偏振耦合，这样的干涉项共 $2N_d$ 项，总干涉光强为

$$I_{z1} = -2I_x \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-1} hL_d \cos(\Phi_m). \quad (7)$$

耦合次数最少的是正向传输过程中在a点发生耦合，反向传输过程中在b点发生耦合的波列。这两类干涉项的幅值相等，各有 $N_d(N_d - 1)$ 项，总的干涉光强为

$$I_{z2} = 2I_x \frac{N_d - 1}{N_d} \left(1 - \frac{hL_d}{N_d}\right)^{2N_d-2} h^2 L_d^2 \cos(\Phi_m). \quad (8)$$

线,其中  $F=1^\circ$ ,从图中可以看出:互感器变比对偏振串音的变化率随串音的增大而增大,因此,偏振串音越大,互感器变比对温度的敏感性就越强。

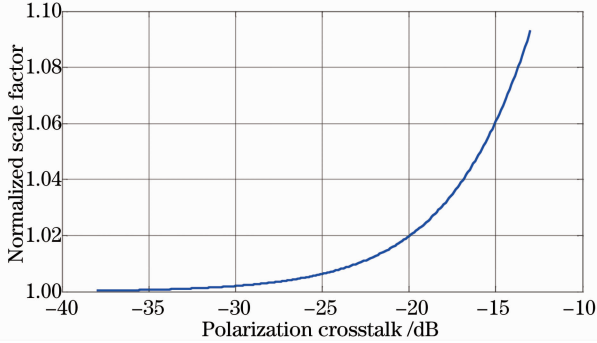


图 8 互感器变比与延迟环偏振串音的关系

Fig. 8 Relationship between scale factor and delayed polarization crosstalk

根据图 8,为保证变温环境下互感器的变比误差在 0.2%以内,应尽量降低常温下延迟环的偏振串音,并减小变温环境下串音的变化量。变温环境下,延迟环的偏振串音应低于-30 dB。为满足该要求,除了选用优质的保偏光纤外,在绕制延迟环的过程中,可采取以下措施:

- 1) 降低绕环张力,减小光纤之间相互挤压对延迟环偏振串音的影响;
- 2) 尽量减少延迟环绕制过程中胶的用量;
- 3) 采用低温度系数材料制作延迟环的骨架,并在环内层铺设底纤作为缓冲层。

## 4 实验验证

将两只偏振串音温变特性不同的延迟环接入互感器,并置于高低温箱内,测试互感器变比随温度的变化规律,进行实验验证。

图 9 和图 10 分别给出了两个延迟环的偏振串音及相应互感器的变比随温度的变化曲线。延迟环采用熊猫型保偏光纤,在绕制过程中均未用胶,绕环张力相同。在  $-40^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$  范围内,A 环偏振串音的变化范围为  $-33.03\text{ dB}\sim -24.51\text{ dB}$ ,在高温段,保偏光纤本身偏振保持能力下降,同时由于骨架材料与光纤的温度系数差异较大,二者之间的热应力作用形成的干扰双折射导致延迟环偏振串音的大幅上升,互感器的变比也随之增大,与理论分析基本一致,变比最大变化量为 0.63%;B 环采用低温度系数材料制作骨架,偏振串音的变化范围为  $-34.9\text{ dB}\sim -33.52\text{ dB}$ ,相应的互感器变比的变化量也很小,仅为 0.07%。

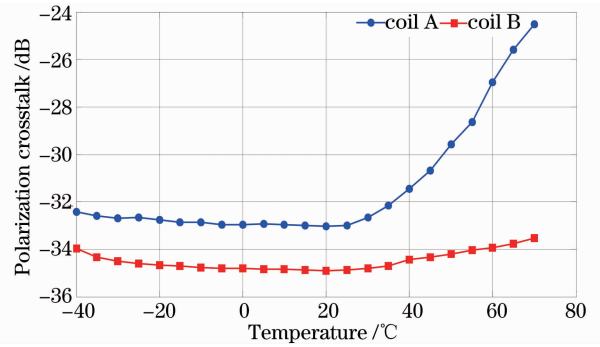


图 9 保偏延迟光纤环偏振串音随温度的变化曲线

Fig. 9 Polarization crosstalk versus coil temperature

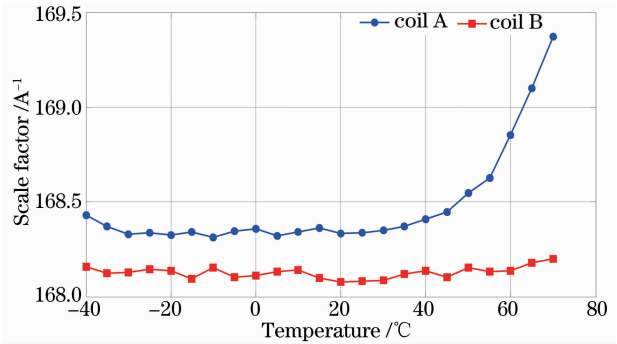


图 10 互感器变比随延迟环温度的变化曲线

Fig. 10 Scale factor versus coil temperature

## 5 结 论

针对变温环境下保偏延迟光纤环偏振串音对互感器变比的影响,开展了较为深入的理论和实验研究,得到了以下结论:

- 1) 延迟环偏振串音的温度相关性是造成互感器变比误差的主要原因之一;
- 2) 为保证变温环境下变比误差在 0.2%以内,延迟环的偏振串音应低于-30 dB。
- 3) 通过选用优质保偏光纤、降低绕环张力、减少胶的用量,采用低温度系数骨架,可降低变温环境下延迟环偏振串音的变化量,减小变比温度误差。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Xiaolei, Zhao Ruiwen. Application of optical current sensor in 110 kV Mengzi substation[J]. East China Electric Power, 2010, 38(4): 516-519.  
徐晓蕾, 赵睿文. 光学电流互感器在 110 kV 蒙自变电站中的应用[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 516-519.
- 2 Pang Hongmei, Li Huaihai, Zhang Zhixin, et al.. Research situation of 110 kV smart substation technology [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 146-150.  
庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV 智能变电站技术研究状况 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 146-150.
- 3 Yang Xianyong, Bai Song, Ding Jie, et al.. Intelligent technical solutions and implementation in 500 kV Suzhoudong substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 96-

99.  
杨贤勇, 柏 嵩, 丁 杰, 等. 500 kV 苏州东变电站智能化技术方案与实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 96—99.
- 4 S X Short, J U de Arrudaand, A A Tselikov, *et al.*. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line Sagnac interferometer current sensors[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(10): 1844—1850.
- 5 K Bohert, P Cabus, J Nehring, *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(2): 267—276.
- 6 S X Short, A A Tselikov, J U de Arrudaand, *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1212—1219.
- 7 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.
- 王夏霄, 王 野, 李传生, 等. 光纤 1/4 波片相位延迟温度特性测量方法与实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1205004.
- 8 Liu Bin, Ye Guoxiong, Guo Keqin, *et al.*. Quality test and problem analysis of electronic transformers[J]. High Voltage Engineer, 2012, 38(11): 2972—2980.
- 刘 彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972—2980.
- 9 Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.*. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205002.
- 王夏霄, 张 猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205002.
- 10 Zhang Weixu. The Fiber-Optic Gyroscope and Its Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 35—38.
- 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 35—38.

栏目编辑: 王晓琪