

# 传感头误差对便携式光纤电流互感器的影响

王夏霄<sup>1</sup>, 张宇宁<sup>1\*</sup>, 于佳<sup>1</sup>, 李传生<sup>2</sup>, 张猛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

<sup>2</sup>中国计量科学研究院, 北京 100029;

<sup>3</sup>山东电力设备有限公司, 山东 济南 250022

**摘要** 为了解决电解领域大电流测量难度大的问题, 在传统光纤电流互感器(FOCT)的基础上提出一种新型的便携式光纤电流互感器(P-FOCT)。由于在 P-FOCT 的设计和安装过程中, 柔性传感头光路不闭合和导体偏心会引起法拉第相移误差, 进而影响电流计精度, 因此对传感头闭合误差和导体偏心位置对 P-FOCT 的影响进行了理论分析和实验测试。结果显示, 法拉第相移相对误差随传感头不闭合角度线性增加, 随导体到非闭合长度中心的距离增大而减小。另外, 增加传感头匝数能减小 P-FOCT 的法拉第相移误差, 提高其测量精度。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 法拉第相移误差; 不闭合误差; 偏心误差

**中图分类号** TN452 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.010601

## Influence of Sensing Coil Errors on Portable Fiber-Optic Current Transformer

Wang Xiaoxiao<sup>1</sup>, Zhang Yuning<sup>1</sup>, Yu Jia<sup>1</sup>, Li Chuansheng<sup>2</sup>, Zhang Meng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

<sup>3</sup>Shandong Power Equipment Co., Ltd., Jinan, Shandong 250022, China

**Abstract** To deal with the problem of high current measurement in electrolytic aluminum industry, a portable fiber-optic current transformer (P-FOCT) is proposed on the basis of the traditional optical fiber current transformer (FOCT). Due to that the galvanometer accuracy is affected by the Faraday phase shift errors which are caused by the flexible sensing coil non-closed optical path and conductor eccentric position in the process of P-FOCT design and installation, the influence of sensing coil errors and conductor eccentric positions on P-FOCT are theoretically analyzed and experimentally tested. The results show that the Faraday phase shift relative error increases with the non-closed angle of sensing coil and decreases with the increase of the distance between conductor and the center of the non-closed length. Moreover, the Faraday phase shift relative error can be decreased by increasing the number of sensor head turns, and its accuracy can be improved.

**Key words** fiber optics; fiber sensing; Faraday phase shift error; non-closed error; eccentric error

**OCIS codes** 060.2370; 067.2420; 060.2340

## 1 引言

随着电力行业对高电压、大电流的需求越来越大(例如在电解金属行业中, 需求的电流高达几十万安<sup>[1]</sup>), 大电流的测量精度显得尤为重要。大电流测量中即使出现一点小误差, 都会造成巨大的能量损失, 通常情况下, 电解铝厂要求测量精度达到 1%<sup>[2]</sup>。近年来, 基于法拉第效应和安培定律的光纤电流互感器

**收稿日期:** 2016-06-27; **收到修改稿日期:** 2016-08-15; **网络出版日期:** 2016-12-20

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0102400)

**作者简介:** 王夏霄(1977—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤陀螺和光纤传感方面的研究。

E-mail: wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: zhangyuning0731@163.com

(FOCT)在电流测量领域受到了广泛关注<sup>[3-5]</sup>,由于其具有精度高、重量轻、测量范围大、动态范围大、易安装等优点<sup>[6-8]</sup>,因此 FOCT 适用于电解金属行业。但是,以电解铝为例,电解铝厂现场环境复杂多变,FOCT 无法保证实时和方便地进行大电流测量。为此,在 FOCT 的基础上引进柔性传感头和光纤跳线,设计了一种便携式光纤电流互感器(P-FOCT),实现了测量方便、可随身携带、易拆装、可插拔等目标。

然而,P-FOCT 需要频繁安装,每次安装时都会引起传感头不闭合和导体不在中心位置的误差。FOCT 的输出是由传感头的法拉第相位差决定的,所以安装误差会影响 FOCT 的精度。为了研究 P-FOCT 安装误差对其精度的具体影响,本文推导了法拉第相移相对误差与传感头闭合误差和导体位置之间的理论关系表达式,并进行了实验验证。研究结果为 P-FOCT 的安装提供了参考依据。

## 2 结构与原理

在 FOCT 的基础上,将传统传感头换成柔性传感头,柔性传感头方便拆装,测量时现场缠绕即可。光纤跳线为两根跳线的一端连接,另一端分别与相位调制器与传感头相连,实现了 P-FOCT 的可插拔功能。光路结构图如图 1 所示,整个结构包括光源、起偏器、耦合器、相位调制器、光纤连接器、波片、柔性传感头、光电探测器。超辐射发光二极管(SLD)光源发出的光经过起偏器后,变成线偏振光,然后经过相位调制器与光纤跳线的 45°熔点,分成两束正交的偏振光,通过 1/4 波片后,两束线偏振光转换成左旋和右旋的圆偏振光。在导体电流周围磁场的法拉第效应作用下,经反射镜反射的两束偏振光会在起偏器处发生干涉,通过探测干涉光强的的大小可以得到导体电流。

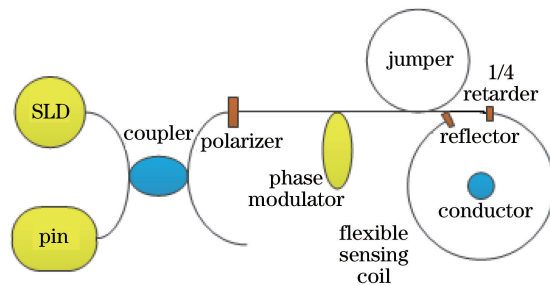


图 1 P-FOCT 的光路结构示意图

Fig. 1 Optical path diagram of P-FOCT

在柔性传感头中,两束圆偏振光在磁场的作用下传播,并且在反射镜的作用下向相反方向传播回相位调制器,根据非互易性原理,电流计输出的法拉第相位差为<sup>[9]</sup>

$$\varphi_F = 4NVI, \quad (1)$$

式中  $V$  为维尔德常数,  $N$  为传感光纤匝数,  $I$  为导体电流。

P-FOCT 的光路具有较好的互异性,干涉结果只包括法拉第效应的相位信息。最终,经光电探测器光电转换后的信号强度表达式为<sup>[10]</sup>

$$S_d = 0.5K_p L I_0 (1 + \cos \varphi_F), \quad (2)$$

式中  $K_p$  为光电探测器的光电转换系数,  $L$  为光路损耗,  $I_0$  为光源输出光强。

定义 P-FOCT 的法拉第相移的相对误差  $\epsilon$  为

$$\epsilon = \frac{\varphi'_F - \varphi_F}{\varphi_F}, \quad (3)$$

式中  $\varphi_F$  为 P-FOCT 柔性传感头输出的法拉第相移理想值,  $\varphi'_F$  为 P-FOCT 柔性传感头输出的法拉第相移的实际值。

## 3 传感头误差分析

P-FOCT 采用柔性传感头,测量时需要现场进行绕制,每次安装时反射镜与 1/4 波片之间会存在一定的间隔,所以并不能保证其光路是非完全闭合的<sup>[11]</sup>,同时还会带来导体偏心位置问题<sup>[12]</sup>。当传感头完全闭合

时,根据安培环路定理可知,导体的位置偏心误差不影响 P-FOCT 的输出<sup>[13]</sup>。但实际上,由于传感头存在闭合误差,所以导体的位置偏心误差会影响 P-FOCT 的输出,截面几何图形如图 2 所示。

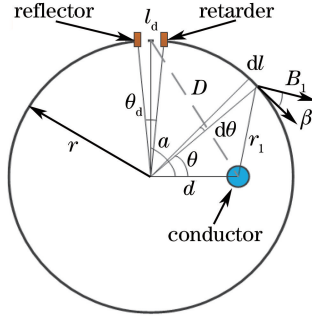


图 2 导体偏心位置几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of conductor eccentric position

图 2 中,定义反射镜与 1/4 波片之间的弧长为传感头光路不闭合长度  $l_d$ ,整个光路总长度为  $l=2N\pi r$ 。 $\theta_d$  为不闭合长度  $l_d$  对应的圆心角,定义其为不闭合角度,大小为  $\theta_d=l_d/r$ 。 $d$  是导体与传感头圆心的距离,定义为偏心距; $\alpha$  是导体与非闭合长度  $l_d$  中心关于传感头圆心的夹角,定义为偏心角; $r_1$  是导体到传感光纤积分元  $dl$  的距离; $D$  是非闭合长度  $l_d$  中心到导体的距离。由于传感头存在不闭合长度,安培环路定理不再适用,所以传感头输出的法拉第相移会出现一定的误差。

偏振光经过 P-FOCT 柔性传感头上积分元  $dl$  后的法拉第偏转角度为  $VBdl$ ,所以,根据法拉第定理可以得到图 2 中传感光纤的法拉第旋转角表达式为

$$\phi'_F = \int_{l-l_d} l VB_1 \cos \beta dl, \quad (4)$$

式中  $B_1$  是导体在积分元处产生的磁感应强度,  $B_1 = \frac{I}{2\pi r_1}$ ;  $\beta$  是磁场强度  $B_1$  与积分元切线方向夹角,其中,  $\cos \beta = \frac{r - d \cos \theta}{r_1}$ 。

由余弦定理可以将(4)式写为

$$\phi'_F = \int_{l-l_d} l \frac{VI(r - d \cos \theta)}{2\pi(r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta)} dl, \quad (5)$$

进一步化简,可以得到法拉第旋转角为

$$\phi'_F = \int_{-(\frac{\theta_d}{2})}^{2N\pi - (\frac{\theta_d}{2})} \frac{VIr(r - d \cos \theta)}{2\pi(r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta)} d\theta, \quad (6)$$

式中的积分由牛顿定律求解,得到

$$\phi'_F = \frac{VI}{2\pi} \left[ \frac{\theta}{2} + \arctan \left( \frac{r+d}{r-d} \tan \frac{\theta}{2} \right) \right]_{-(\frac{\theta_d}{2})}^{2N\pi - (\frac{\theta_d}{2})}. \quad (7)$$

因为反正切函数在积分区间上不单调,所以由导体偏心引起的法拉第旋转角表达式是分段的,当偏心角  $\alpha$  满足  $\alpha < 180 - \theta_d/2 \cup \alpha > 180 + \theta_d/2$  时,法拉第旋转角表达式为

$$\phi'_F = NVI - \frac{VI\theta_d}{4\pi} + \frac{VI}{2\pi} \left[ \arctan \left( \frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_1 \right) - \arctan \left( \frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_2 \right) \right], \quad (8)$$

式中  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  与不闭合角有关,分别为:  $\gamma_1 = \frac{\alpha}{2} - \frac{\theta_d}{4}$ ,  $\gamma_2 = \frac{\alpha}{2} + \frac{\theta_d}{4}$ 。

另外,当偏心角  $\alpha$  满足  $180 - \theta_d/2 < \alpha < 180 + \theta_d/2$  时,法拉第旋转角表达式为

$$\phi'_F = \frac{NVI}{2} - \frac{VI\theta_d}{4\pi} + \frac{VI}{2\pi} \left[ \arctan \left( \frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_1 \right) - \arctan \left( \frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_2 \right) \right], \quad (9)$$

结合(3)式和(8)式,由传感头不闭合误差和导体偏心位置引起的法拉第相移相对误差为

$$\varepsilon = \frac{\varphi'_F - \varphi_F}{\varphi_F} = -\frac{\theta_d}{4N\pi} - \frac{1}{2N\pi} \left[ \arctan\left(\frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_2\right) - \arctan\left(\frac{r+d}{r-d} \tan \gamma_1\right) \right]. \quad (10)$$

从法拉第相移相对误差表达式可以看出,法拉第相移相对误差与导体的偏心距和偏心角有关,同时也由传感头的不闭合度和匝数决定。当偏心距  $d=0$  时,导体将不在偏心位置,法拉第相移相对误差仅受传感头不闭合误差影响,此时的法拉第相移相对误差表达式为

$$\varepsilon = -\frac{\theta_d}{4N\pi} - \frac{1}{2N\pi} \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\theta_d}{4} - \left( \frac{\alpha}{2} - \frac{\theta_d}{4} \right) \right] = -\frac{\theta_d}{2N\pi}. \quad (11)$$

通过(11)式可以得出,传感头闭合误差所引起的法拉第相移的相对误差与不闭合长度无关,只与其对应的圆心角的大小有关。并且通过增加传感头的匝数可以减小由于传感头闭合误差引起的法拉第相移的相对误差。

## 4 实验测试结果

为了验证传感头闭合误差和导体偏心对便携式光纤电流互感器精度的影响,设计了使用柔性传感头的电流互感器,同时加工制作了能够改变导体偏心距和偏心角的实验装置。实验装置原理如图3所示,外盘为支架提供支撑,传感头缠绕在支架上,通过可旋转内盘可以控制导体的偏心距和偏心角,同时导线穿过绝缘管保持长直。通过测试传感头在不同非闭合角度以及导体在不同位置的输出结果,可以得到 P-FOCT 输出的相对误差与光路不闭合度及导体位置误差之间的关系。

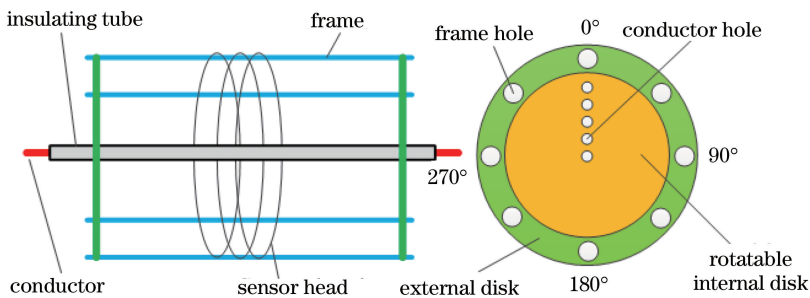


图3 实验装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

实验采用 50 A 的直流电流源,由于导线是回路,除了位于传感头内部的导线外,其余导线会对测量结果造成干扰,所以使用具有高磁导率的铁丝网进行静磁屏蔽。传感头的半径取 330 mm,长直导线长度为 1000 mm,匝数  $N=3$ 。P-FOCT 的输出相移  $\varphi_{out}$  与法拉第相移成正相关,由于输出项还存在线性双折射效应和其他因素引起的法拉第效应  $\varphi_a$ <sup>[14]</sup>,在结构稳定及常温下,把线性双折射和其他因素导致的法拉第效应看作常数项,即电流为零时 P-FOCT 的输出,所以电流计输出表示为

$$\varphi_{out} = \varphi_F + \varphi_a. \quad (12)$$

首先测试电流为零时电流计的输出值  $\varphi_a$ ,然后测试传感头完全闭合且导体在中心时的输出,做差得到电流计输出的标准值。最后改变光纤环的不闭合角度,采用与上面相同的方法计算法拉第相移大小的实际值,可以得到法拉第相对误差与传感头不闭合角度的关系如图4所示。从图4可以看出,有限元计算结果与(12)式的理论关系相符,法拉第相移相对误差与传感头不闭合角度线性增加,当不闭合角度过大时,P-FOCT将不会满足使用精度 1% 的要求。

令不闭合角度为  $30^\circ$ ,偏心距为 40 mm,改变导体所在位置的偏心角,得到电流计法拉第相移相对误差与理论计算结果如图5所示,可以看出,实验结果与理论分析相符,在导体偏心角在  $0^\circ$  和  $360^\circ$  附近时,法拉第相移相对误差最大;在远离非闭合处即偏心角在  $180^\circ$  附近时,法拉第相移相对误差最小。所以可知导体到非闭合长度  $l_d$  中心的距离  $D$  越大,法拉第相移相对误差越小。

令不闭合角度为  $45^\circ$ ,偏心角为  $0^\circ$ ,改变导体所在位置的偏心距,得到电流计法拉第相移相对误差与理论计算结果如图6所示,可以看出,实验结果与理论分析相符,相对误差绝对值随偏心距的增大而增大。同

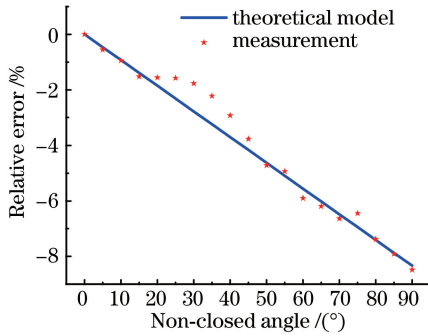


图4 实验测量结果和闭合误差理论模型对比

Fig. 4 Comparison between experimental measurement results and theoretical model of non-closed error

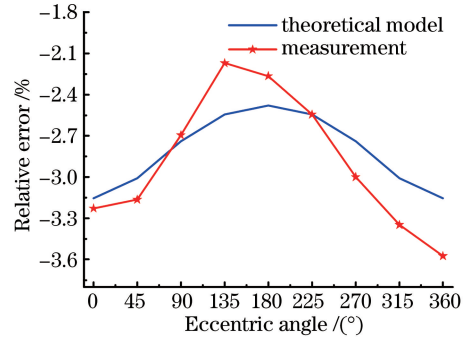


图5 电流计相对误差随偏心角的变化

Fig. 5 Relative error of galvanometer versus eccentric angle

样可以得到结论:导体到非闭合长度  $l_d$  中心的距离  $D$  越大,法拉第相移相对误差越小。

在不同的不闭合角条件下,保持导体的偏心角为  $0^\circ$ ,法拉第相移相对误差与传感头偏心距的变化关系测试结果如图7所示,从图中可以看出法拉第相移相对误差随不闭合角度的增大而增大。

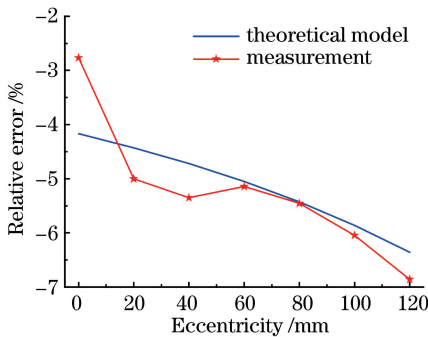


图6 电流计相对误差随偏心距的变化

Fig. 6 Relative error of galvanometer versus eccentricity

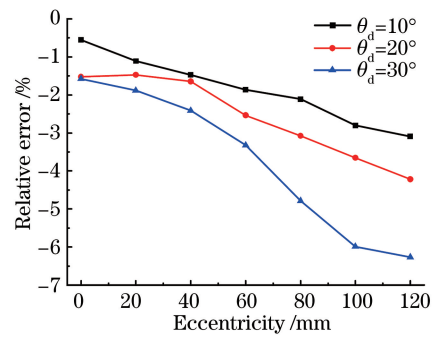


图7 不同不闭合角下电流计相对误差和偏心距离的变化关系

Fig. 7 Relationship between measurement of relative error and eccentricity under different non-closed angles

同时,根据理论分析可知,法拉第相移相对误差与匝数成反比关系,通过增加匝数能够有效减小法拉第相移相对误差,进而提高 P-FOCT 的精度。

## 5 结 论

对柔性传感头的闭合误差和导体的偏心误差对 P-FOCT 的法拉第相移的影响进行了分析和实验测试,得到了法拉第相移相对误差随光路不闭合角度线性增加,P-FOCT 的精度随导体到非闭合长度中心的距离增大而减小等结论。可以通过设计一种使导体远离非闭合长度中心的装置来保证精度要求,同时通过增加传感头匝数来有效减小法拉第相移相对误差,提高 P-FOCT 的测量精度。本研究对 P-FOCT 的设计和实际安装提供一定的理论支持和数据,具有一定的参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Müller G M, Gu X, Frank A, *et al.* Fiber-optic current sensor with passive phase biasing employing highly-birefringent spun fiber[C]. Arlington: Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology, 2013.
- [2] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.* Fiber-optic current sensor for electro-winning of metals[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [3] Li Chuansheng, Zhang Chaoyang, Sun Haijiang, *et al.* Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105008.



- 李传生, 张朝阳, 孙海江, 等. 保偏延迟光纤环偏振串音对光纤电流互感器的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105008.
- [4] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.* Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(2): 267-276.
- [5] Wang Wei, Liu Xiaolong. Effects of azimuth of fiber optic principle axes on optic fiber current sensors[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114003.  
王 伟, 刘晓隆. 光纤主轴方位角对光纤电流传感器的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114003.
- [6] Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Wang Xichen, *et al.* Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 9-14.  
王夏霄, 王 野, 王熙辰, 等. 全光纤电流互感器动态特性实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 9-14.
- [7] Zhang Rongxiang, Han Qun, Liu Tiegeng, *et al.* Investigation of characteristics of single mode-multimode-single mode all fiber optic current sensor with broadband light source inputting[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0705003.  
张荣香, 韩 群, 刘铁根, 等. 宽带光源入射下单模-多模-单模全光纤电流传感器特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0705003.
- [8] Wang L H, Cao M, Liu Q C, *et al.* Modeling and experimental verification of polarization errors in Sagnac fiber optic current sensor[J]. Optik, 2015, 126(20): 2743-2746.
- [9] Jiao Binliang, Zheng Shenxuan. Progress in optical current transducer technique for power systems[J]. Applied Optics, 2004, 25(6): 47-53.  
焦斌亮, 郑绳植. 用于电力系统的光学电流互感器技术进展[J]. 应用光学, 2004, 25(6): 47-53.
- [10] Li He, Li Qian, Zhang Shuhan, *et al.* Development of a zero-flux DC current transformer of HVDC projects[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2981-2985.  
李 鹤, 李 前, 章述汉, 等. 直流输电用零磁通直流电流互感器的研制[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2981-2985.
- [11] Cheng Song, Zhang Guoqing, Guo Zhizhong, *et al.* Influence mechanism of conductor eccentricity on all-fiber optic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 137-143.  
程 嵩, 张国庆, 郭志忠, 等. 全光纤电流互感器受导体偏心影响的机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 137-143.
- [12] Cheng S, Guo Z Z, Zhang G Q, *et al.* Distributed parameter model for characterizing magnetic crosstalk in a fiber optic current sensor[J]. Appl Optics, 2015, 54 (34): 10009-10017.
- [13] Wang Jingfei, Liang Jingwei, Dong Qianmin. Study of sensing coil errors in in-line Sagnac interferometer current transducer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 102303.  
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]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 102303.
- [14] Kang Chong, Lu Wenlei, Ouyang Hong. The separate detection of linear birefringence and Faraday effect in optical current transformer[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 163-168.  
康 崇, 吕文磊, 欧阳鸿, 等. 光学电流互感器中线性双折射与法拉第效应的分离检测[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 163-168.