

doi:10.3788/gzxb20164512.1228004

便携式光纤电流互感器传感头设计

王夏霄¹, 张宇宁¹, 于佳¹, 李传生²

(1 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

(2 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘 要:针对电解铝工业中大电流测量现场环境复杂的难题,在传统光纤电流互感器的基础上提出一种便携式光纤电流互感器.对设计安装过程中由于柔性传感头光路不闭合和导体偏心引起的法拉第相移误差进行分析和有限元仿真计算,结果表明:法拉第相移相对误差随传感头不闭合度角度线性增加,随导体到非闭合点的距离增大而减小,且增加传感头匝数能减小法拉第相移误差.由于便携式光纤电流互感器准确度随导体到非闭合点的距离增大而提高,设计了一种使传感头非闭合点向一端延伸且易拆装的结构,实验测试得到该便携式光纤电流互感器的全温准确度为 0.86%,满足电解铝厂准确度 1% 的使用要求.

关键词: 光纤传感; 传感头; 电流互感器; 法拉第效应; 不闭合误差; 导体偏心; 有限元

中图分类号: TM452

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)12-1228004-6

Design of a Sensing Coil in Portable Fiber Optic Current Transformer

WANG Xia-xiao¹, ZHANG Yu-ning¹, YU Jia¹, LI Chuan-sheng²

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

(2 National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: To deal with the problem of complex large current measurement site in electrolytic aluminum industry, a portable fiberoptic current transformer was proposed on the basis of the traditional fiber optic current transformer. The Faraday phase shift error which caused by the flexible sensing coil non-closed optical path and current conductor eccentric position in the process of design and installation was analyzed and calculated by finite element method. It has been obtained that the Faraday phase shift relative error increases linearly with the non-closed angle of sensing coil and decreases with the increasing distance between conductor and the non-closed point, and the Faraday phase shift relative error can be decreased by increasing number of turns. Based the accuracy of portable fiberoptic current transformer increases with the distance between conductor and the non-closed point, a sensor head structure with the extending non-closed point and easy accessibility was designed, it has been obtained that the full temperature accuracy is 0.86% of portable fiberoptic current transformer by experimental test, which meets the required accuracy 1% in smelter.

Key words: Fiber optic sensing; Sensing coil; Current sensor; Faraday effect; Non-closed error; Conductor eccentric; Finite element

OCIS Codes: 060.2370; 067.2420; 060.2340

0 引言

电解铝等电解金属行业利用直流大电流进行生产,直流大电流测量的准确性直接关系到电解铝生产

的全过程参量控制、成本计算和节能降耗,所以要求测量仪器具有抗磁场干扰能力强、测量准确度高、拆装方便、性能稳定可靠等特点^[1-4].目前,大电流直流互感器是电解铝行业测量直流电流的主要设备,其采用的方

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No.2016YFF0102400)资助

第一作者:王夏霄(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术及光纤陀螺. Email:wangxiaxiao@buaa.edu.cn

通讯作者:张宇宁(1991-),女,硕士,主要研究方向为光纤传感. Email:zhangyuning0731@163.com

收稿日期:2016-07-08;录用日期:2016-08-18

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

法主要有:电磁感应法、霍尔效应法、核磁共振法、巨磁阻抗效应法、光栅结合磁致伸缩材料法和法拉第磁光效应法^[5-8],但都无法满足方便拆装的要求.基于法拉第磁光效应的光学电流传感器从测量原理上来说,既可以测量交流,也可以测量直流^[9-10].针对于电解铝工业现场的复杂环境,要求光纤电流互感器测量方便、携带容易,便携式光纤电流互感器由于其体积小、可移动、灵敏度高、稳定可靠、抗电磁干扰、易安装等优点可被应用于电解铝行业中.

本文设计了一种便携式光纤电流互感器(Portable Fiberoptic Current Transformer, P-FOCT),用柔性传感头替代了传统的光纤环.利用有限元仿真软件COMSOL对由光路不闭合及导体偏心产生的输出Faraday相移相对误差^[11-12]进行了研究.得到了传感头的闭合误差和导体位置偏心误差对便携式光纤电流互感器Faraday相移相对误差的影响.由此设计了传感头绕制装置,使其达到电解铝工业对电流计的准确度要求.

1 P-FOCT 结构和原理

P-FOCT 由光源超辐射发光二极管(Super Luminescent Diode, SLD)、偏振器、相位调制器、跳线、 $\lambda/4$ 波片、柔性传感头、光接收组件(PIN-FET)、处理电路等部分组成,其工作原理如图1.光源发出的光经过起偏器变为线偏振光,经 45° 熔点分解为两束正交的线偏振光经跳线传输,由 $1/4$ 波片转换为两束正交的圆偏振光并进入传感光纤,在磁场作用下,两束圆偏振光之间产生正比于被测电流的相位差,经反射镜反射后两束圆偏振光沿原路返回,同时相位差加倍,最终在偏振器发生干涉,由PIN-FET探测器探测干涉光强,处理电路输出结果.相比于反射式光纤电流互感器,通过跳线对传感头和电流计主体相连,其中跳线的中间是螺旋纹紧固型(Ferrule Connector, FC)接头连接器,两边分别和相位调制器及波片熔接起来,这样就实现了电流互感器易拆装功能,采用柔性传感头解决了需多次及时的测量要求.

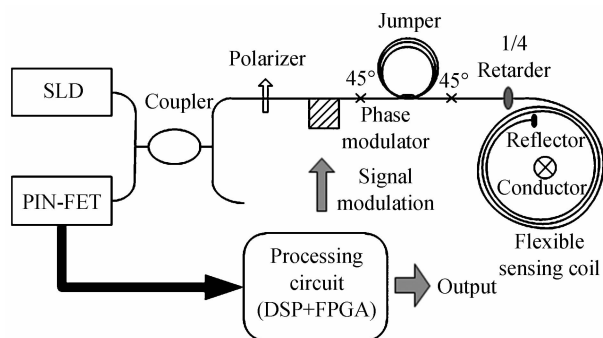


图1 便携式光纤电流互感器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of P-FOCT

P-FOCT的光路具有较好的互异性,干涉结果只携带Faraday效应的相位信息.最终,经光电探测器实现光电转换后的信号表达式为^[13-14]

$$S_d = 0.5K \cdot L \cdot I_0 (1 + \cos \varphi_F) \quad (1)$$

式中, K 是探测器的光电转换系数, L 是光路损耗, I_0 是光源输出光强, φ_F 是Faraday效应相位差.

根据法拉第效应,在磁感应强度为 B 的磁场中,假设传感头光路闭合,导体中流过的电流大小为 I ,则安培环路定理^[15-16]表示为

$$\mu I = \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

式中, μ 为磁导率,在传感光纤中取 $\mu=1$.由于传感头内两束偏振光相向传播,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,输出的Faraday相位差为^[17]

$$\varphi_F = 4NVI \quad (3)$$

式中, V 是维尔德常量, N 是传感光纤匝数.

P-FOCT的Faraday相移的相对误差 ϵ 定义为

$$\epsilon = \left| \frac{\varphi'_F - \varphi_F}{\varphi_F} \right| \quad (4)$$

式中, φ_F 是P-FOCT柔性传感头输出的Faraday相移理想值, φ'_F 是P-FOCT柔性传感头输出的Faraday相移的实际值.

2 柔性传感头误差分析

2.1 柔性传感头光路不闭合误差

P-FOCT采用柔性传感头,测量时需要进行现场绕制,反射镜与 $\lambda/4$ 波片之间存在一定的间隔,并不能保证其光路完全闭合^[18],截面示意图如图2.定义反射镜与 $\lambda/4$ 波片之间的弧长为传感头光路不闭合长度 l_d , θ_d 是不闭合长度 l_d 对应的圆心角,定义为不闭合角度大小为 $\theta_d = l_d/r$.由于传感头存在不闭合长度,安培环路定理不再适用,因此传感头输出的Faraday相移会出现一定的误差.

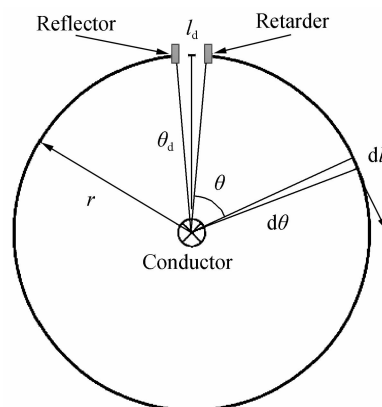


图2 柔性传感头光路闭合误差示意图
Fig.2 Schematic diagram of the flexible sensing coil optic path non-closed error

当柔性传感头半径与长直导线长度满足 $r \ll L$ 时,导体中电流 I 在传感头附近产生的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (5)$$

选取传感头的小段积分元 dl , 其对应的圆心角为 $d\theta$, 在磁场作用下, 偏振光在 dl 段传播时偏振轴偏转角度大小为 $VBdl$, 所以, 非闭合传感头中偏振光发生的 Faraday 相移为

$$\varphi'_F = \int_{l-l_d} V \cdot \frac{\mu I}{2\pi r} \cdot dl \quad (6)$$

由于积分元 $dl = r d\theta$, 取磁导率 $\mu = 1$, 化简式(6)得

$$\varphi'_F = \int_{2N\pi-\theta_d} V \cdot \frac{I}{2\pi} d\theta = NVI - \frac{VI\theta_d}{2\pi} \quad (7)$$

因此, 光纤电流互感器最后输出的 Faraday 相位差为

$$\varphi_F = 4NVI(1 - \theta_d/2N\pi) \quad (8)$$

根据 P-FOCT 存在闭合误差的输出表达式和传统闭合 FOCT 的输出表达式的关系, 可以得出因传感头闭合误差所引起的 Faraday 相移的相对误差为

$$\varepsilon = \left| \frac{\varphi'_F - \varphi_F}{\varphi_F} \right| = \frac{\theta_d}{2N\pi} \quad (9)$$

通过式(9)可以得出, 传感头闭合误差所引起的 Faraday 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 Faraday 相移的相对误差。

2.2 导体偏心位置误差

P-FOCT 每次安装时会带来导体偏心位置问题, 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^[19], 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 3。其中, d 是导体与传感头圆心的距离, 定义为偏心距; α 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。

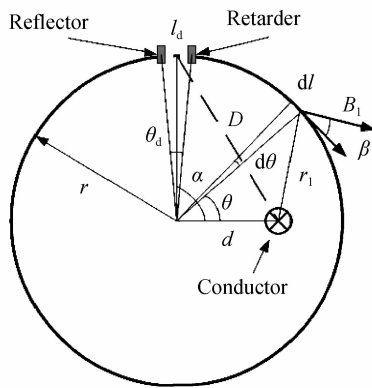


图 3 导体偏心位置几何示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conductor eccentric position

偏振光经过 P-FOCT 柔性传感头上积分元 dl 后的 Faraday 偏转角度为 $VBdl$, 所以, 传感头中偏振光发生的 Faraday 相移为

$$\varphi'_F = \int_{l-l_d} V \cdot B_1 \cos \beta \cdot dl \quad (10)$$

式中, B_1 是导体在 dl 处产生的磁感应强度, β 是 B_1 方向与 dl 处切线方向夹角。因此, 当传感头不闭合角度一定时, P-FOCT 柔性传感头输出的 Faraday 相移的实际值与导体的位置即偏心距和偏心角有关。

3 有限元仿真计算结果

有限元仿真软件 COMSOL5.0 可精确计算通电导线周围产生的磁场大小, 通过对产生的磁场沿着传感光纤进行积分, 乘以相应的 Verdet 常量, 就可以得到 Faraday 相移的大小。对传感头在不同非闭合角度以及导体在不同位置所产生的 Faraday 相移进行计算, 可以得到 P-FOCT 输出的 Faraday 相移相对误差与光路不闭合度和导体位置误差之间的关系。

在 COMSOL 软件中建立三维模型, 设置参量为: 圆柱形导体的半径为 10 mm, 长度为 800 mm; 螺旋式光纤环的半径为 200 mm, 匝数 $N=5$; 周围正方形体空气区域的边长为 800 mm; 对导体添加的 z 向外电流的密度为 $1.27 \times 10^9 \text{ A/m}^2$, 使导体内部电流达到 100 kA, 进行细网格划分。稳态求解得到计算结果如图 4。对磁场结果进行体积分计算, 采用石英光纤作为传感光纤, Verdet 常量取 $4.68 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$, 积分结果与维尔德常量的积为 2.3 rad, 即为传感头完全闭合及导体无位置误差的 Faraday 相移大小, 也就是理想值 φ_F 。

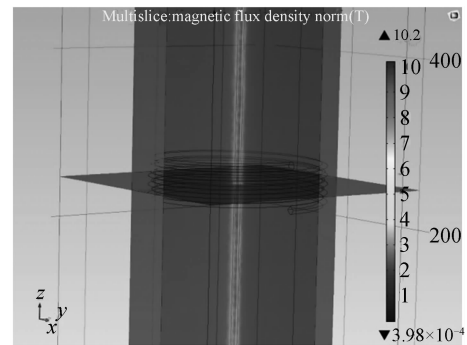


图 4 有限元计算结果示意图

Fig. 4 The contour map of finite element calculation results

改变光纤环的不闭合角度, 计算 Faraday 相移大小的实际值, 可以得到 Faraday 相移相对误差与传感头不闭合角度的关系如图 5。可以看出, 有限元计算结果与式(9)的理论关系相符, Faraday 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 将不会满足使用准确度 1% 的要求。

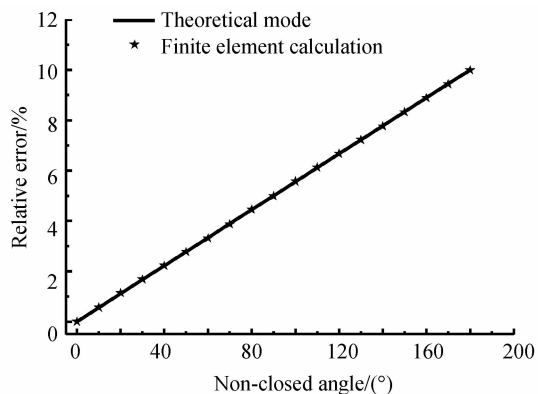


图5 有限元计算和闭合误差理论模型对比

Fig.5 Comparison between finite element calculation and theoretical model of non-closed error

令不闭合角度 θ_a 取 30° , 匝数 $N=5$, 改变导体位置, 分别用 COMSOL 计算偏心距为 50 mm、100 mm 和 150 mm 时不同偏心角所对应的 Faraday 相移相对误差, 计算结果如图 6. 可以看出, 在导体靠近非闭合处即偏心角在 0° 和 360° 附近时, Faraday 相移相对误差最大, 并随偏心距增大而增大; 在远离非闭合处即偏心角在 180° 附近时, Faraday 相移相对误差最小, 并随偏心距增大而减小.

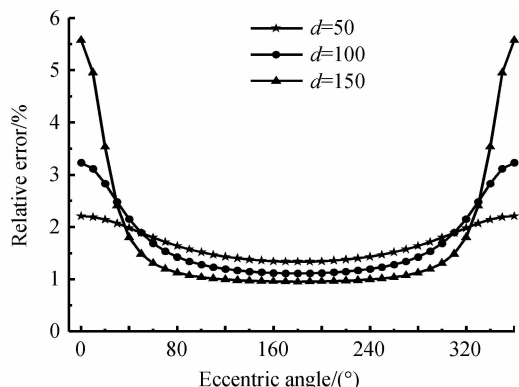


图6 不同偏心距下 Faraday 相移相对误差随偏心角计算结果

Fig.6 The calculate results of relative error versus eccentric angle under different eccentricity

保持传感头参量不变, 分别计算偏心角为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° 时不同偏心距所对应的 Faraday 相移相对误差, 计算结果如图 7. 可以看出, 导体在不同偏心角时, Faraday 相移相对误差随偏心距的变化不一. 由计算结果可知, 导体到非闭合长度 l_d 中心的距离 D 越大, Faraday 相移的相对误差越小.

根据理论分析结果, Faraday 相移相对误差同时与传感头不闭合角度和匝数有关, 所以保持导体的偏心角为 90° , 改变偏心距, 仿真计算得到 Faraday 相移相对误差在不同不闭合角度下的结果如图 8. 从图中可以看出 Faraday 相移相对误差随不闭合角度增大而增大, 并成正比例关系.

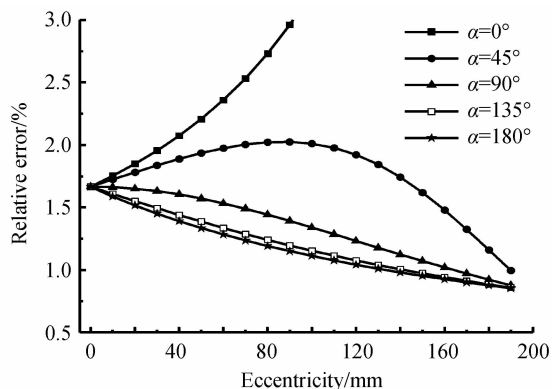


图7 不同偏心角下 Faraday 相移相对误差随偏心距计算结果

Fig.7 The calculate results of relative error versus eccentricity under different eccentric angle

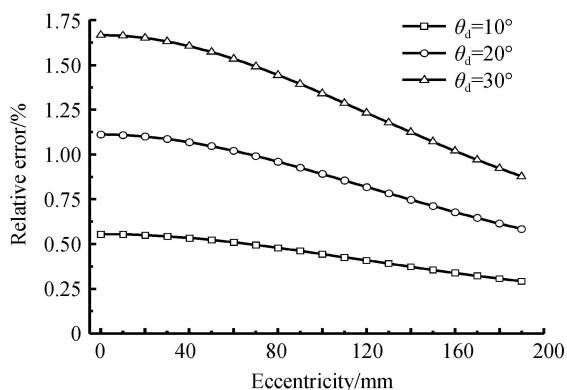


图8 Faraday 相移相对误差随不闭合角度计算结果
Fig.8 The calculate results of relative error versus non-closed angle

保持导体的偏心距为 100 mm, 改变偏心角, 得到 Faraday 相移相对误差与传感头匝数之间的关系如图 9. 可以看出 Faraday 相移相对误差与匝数成反比, 通过增加匝数能够有效减小 Faraday 相移相对误差.

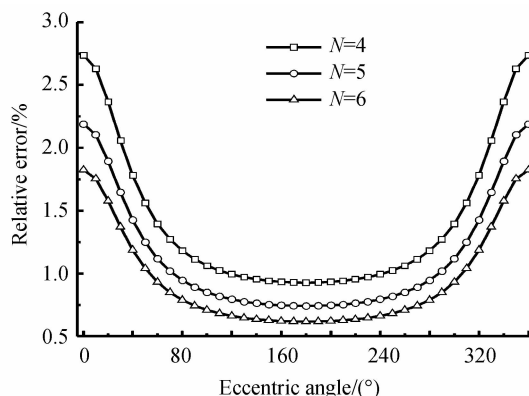


图9 Faraday 相移相对误差在不同匝数下的计算结果
Fig.9 The calculate results of relative error versus number of turns

由于最后的积分结果采用计算结果的派生值求解定积分而得, 因为是相对误差, 所以维尔德常量被抵消, 对最后结果无影响, 当选取不同半径时, 法拉第相

位积分值与半径成正比,而相对误差则与半径值无关.

4 传感头设计及测试结果

由仿真结果可以知道,P-FOCT的准确度与传感头的不闭合角度、匝数和导体位置有关,其中不闭合角度越小、匝数越多、导体离不闭合点越远,P-FOCT的准确度就越高.为了方便安装,传感头的匝数设计为1匝,对不闭合角和导体距不闭合点的距离要求很高,为此设计如图10所示的传感头装置,装置的主体部分采用铝合金材料,半径为180 mm,壁厚为3 mm,伸出部分距离长度为150 mm.此装置保证了在一定的不闭合角下,导体与不闭合点之间存在满足准确度的安全距离.

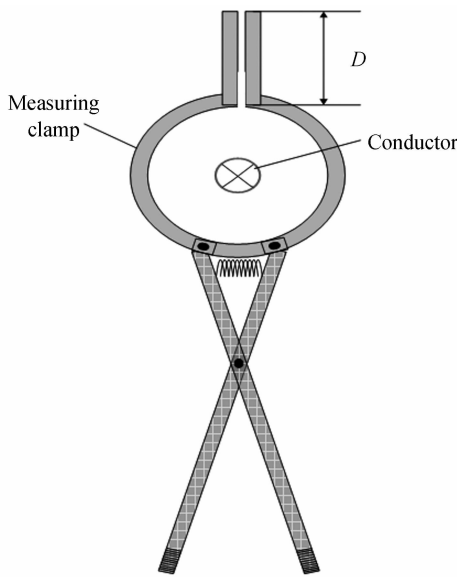


图10 P-FOCT传感头装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of sensing coil in P-FOCT

为了验证所设计的传感头的实用性,对采用该传感头装置的P-FOCT进行实验测试,首先对电流互感器进行常温测试,将导体母线安装到传感头的中心位置,固定好传感头位置.设定电流计采集软件的采样周期为0.1 s,采样时间为15 min,共采样9 000个点,测试电流为110 KA,得到的结果如图11.可以看出,P-FOCT的常温准确度为-0.11%,满足电解铝厂的常温工作需要.

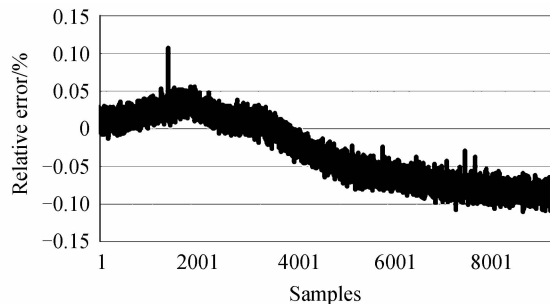


图11 P-FOCT的常温测试结果

Fig. 11 The measurement result of P-FOCT at room temperature

由于电解铝厂温度多变,同时对P-FOCT在变温下的准确度进行测试,实验设定的温度变化范围是25℃~70℃~-40℃~25℃,变化速率为1℃/min,电流计采集软件的采样周期为0.1 s,采样时间为220 min,测试结果如图12.可以看出,采用该传感头装置的P-FOCT的全温准确度达0.86%,满足电解铝工业1%的准确度要求.

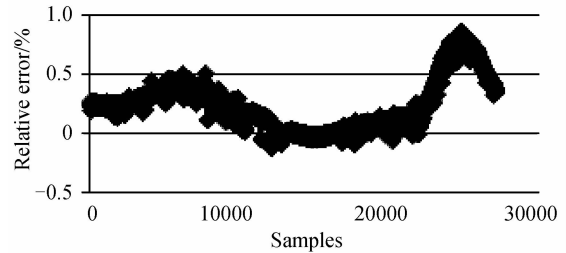


图12 P-FOCT的变温测试结果

Fig. 12 The measurement result of P-FOCT at variable temperature

为了验证P-FOCT的重复性和稳定性,对P-FOCT在常温和全温下进行5次测试,测试结果见表1.从表1中可以看出P-FOCT具有良好的重复性和稳定性.

表1 P-FOCT的测试结果

Table 1 The measurement results of P-FOCT

Number	1	2	3	4	5
Room temperature	-0.11	-0.16	-0.13	-0.1	-0.17
Variable temperature	0.86	0.8	0.79	0.8	0.78

5 结论

本文对P-FOCT中柔性传感头的闭合误差和导体的偏心误差对Faraday相移的影响进行了分析和有限元仿真计算,结果表明Faraday相移相对误差随光路不闭合度角度线性增加,P-FOCT的准确度随导体到非闭合长度中心的距离增大而减小.通过增加传感头匝数可有效减小Faraday相移相对误差,为了提高P-FOCT的测量准确度.最后设计了新型传感头装置,能够使P-FOCT达到电解铝工业的准确度要求,为P-FOCT的设计和安装提供参考.

参考文献

[1] SXSHOR T, AA TSELIKO V, JU DE ARRUD A, *et al.* Imperfect quarter-wave plate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. *Lightwave Technology*, 1998, **16**(7):1212-1219.

[2] WANG Xia-xiao, ZHANG Chun-xi, ZHANG Chao-yang, *et al.* Study of polarization errors of all fiber optical current transformers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 320-323.

王夏霄,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.

[3] ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, *et al.* Influence of SLD's power attenuation on scale factor of closed-loop fiber optic current transformer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2458-2461.

张朝阳,张春熹,王夏霄.等光源功率衰减对闭环光纤电流互

- 感器变比影响研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(12): 2458-2461.
- [4] WANG Li-hui, CAO Min, LIU Qing-chan, *et al.* Modeling and experimental verification of polarization errors in Sagnac fiber optic current sensor[J]. *Optik*, 2015, **126**(20): 2743-2746.
- [5] WANG Xia-xiao, WANG Ye, WANG Xi-chen, *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.
- [6] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J, *et al.* Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 267-276.
- [7] LI Xu-you, HAO Jin-hui, YANG Han-rui, *et al.* Research and development of Sagnacringlike optic current sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, **38**(7): 1-6.
李绪友, 郝金会, 杨汉瑞, 等. Sagnac 环形电流互感器的原理与发展研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(7): 1-6.
- [8] LI Hong, YAO Yong-jian. Rational main circuit topology of high-power DC power supply for electrolytic aluminum [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, **34**(24): 33-36.
李宏, 姚永健. 电解铝用大功率直流电源的合理主电路拓扑[J]. 现代电子技术, 2011, **34**(24): 33-36.
- [9] JIAO Bin-liang, ZHENG Shen-xuan. 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 Shu-han, *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 Guo-qing, GUO Zhi-zhong, *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] WANG Jing-fei, LIANG Jing-wei, DONG Qian-min. Study of sensing coil errors in in-line Sagnac interferometer current transducer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**: 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**: 102303.
- [13] ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, *et al.* Error analysis and experimental research of closed-loop fiber optic current sensor [J]. *High Voltage Apparatus*, 2008, **44**(5): 417-423.
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器, 2008, **44**(5): 417-423.
- [14] PENG Nai, HUANG Yong, WANG Shuang-bao, *et al.* Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(17): 1668-1671.
- [15] AERSSSENS M, DESCAMPS F, GUSAROV A, *et al.* Influence of the optical fiber type on the performances of fiber-optics currentsensor dedicated to plasma current measurement in ITER[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(19): 5983-5991.
- [16] MIHAILOVIC P, PETRICEVIC S, STOJKOVIC Z, *et al.* Development of a portable fiber-optic current sensor for power systems monitoring [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, **53**(1): 24-30.
- [17] YAN Yu, PAN Ding, ZHANG Xu-le, *et al.* Study of electromagnetic compatibility based on reflective fiber optical current transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, **52**(1): 0148-0153.
颜语, 潘丁, 张旭乐, 等. 反射式全光纤电流互感器电磁兼容性能研究[J]. 高压电器, 2016, **52**(1): 0148-0153.
- [18] CHENG Song, GUO Zhi-zhong, ZHANG Guo-qing, *et al.* Distributed parameter model for characterizing magnetic crosstalk in a fiber optic current sensor[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(34): 10009-10017.
- [19] CHI Li-jiang, LIU Wei, RAN Yun-xi. Research on the interference of primary conductor accentricity to the Rogowskicoil[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, **50**(1): 67-71.
池立江, 刘伟, 冉允喜. 一次导体偏心对罗氏线圈的干扰研究[J]. 高压电器, 2014, **50**(1): 67-71.