

反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究

王景飞¹ 梁京伟² 董前民¹

(¹ 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; ² 东营区供电公司, 山东 东营 257000)

摘要 阐述了反射式 Sagnac 干涉型电流互感器的原理, 对 Sagnac 型光纤电流互感器进行了深入的理论研究, 建立了完整的系统理论模型; 对影响互感器测量准确度的各种因素进行了全面的理论分析和仿真研究, 得到了这些影响因素对系统响应的作用规律。利用偏振系统的琼斯矩阵对反射式 Sagnac 干涉型电流互感器的偏振误差进行了研究, 并对光纤传感头中的线性双折射、圆双折射对测量准确度的影响进行了模拟分析, 从理论上得到了反映影响规律的曲线。从仿真结果来看, 传感头中大量的圆双折射可以有效地抑制线性双折射对光纤电流互感器测量准确度的影响。

关键词 互感器; 全光纤电流互感器; 琼斯矩阵; 线性双折射; 圆双折射

中图分类号 TM452 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.102303

Study of Sensing Coil Errors in In-Line Sagnac Interferometer Current Transducer

Wang Jingfei¹ Liang Jingwei² Dong Qianmin¹

(¹ College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)
(² Dongying County Power Supply Company, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract The principle of the in-line Sagnac interferometer current transducer is introduced. The Sagnac fiber-optic current sensor is deeply researched, and the complete system theory model has been established. The factors which affect the measuring precision are comprehensively analyzed and simulated. Some rules which influence the system precision are acquired. The polarization errors of the in-line Sagnac interferometer current transducer are studied by using the Jones matrices formalism. The effects of linear and circular birefringence in the sensing coil on measuring precision are simulated, and curves and typical error data which represent the effecting rules are theoretically acquired. The simulation result shows that the linear birefringence can be restrained by adding a larger amount of circular birefringence in the sensing fiber.

Key words transducer; fiber optical current transducer; Jones matrix; linear birefringence; circular birefringence

OCIS codes 230.1150; 230.2240; 280.4788

1 引言

全光纤电流互感器(FOCT)^[1~4]是一种新兴的电力计量装置, 基于安培定律和法拉第效应, 其传输与传感部分均使用光纤, 为全光学系统。与传统的电磁式电流互感器相比, FOCT 采用光纤传感技术^[5~7]具有明显的优越性: 绝缘结构简单、运行安全可靠、抗电磁干扰、动态范围大、响应频域宽、体积小、重量轻、易安装等。是传统电磁式电流互感器最好的替代产品, 有着广泛的应用前景。近几年光纤电流互感器已逐渐成为

收稿日期: 2011-03-18; **收到修改稿日期**: 2011-06-01; **网络出版日期**: 2011-08-27

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y407370)资助课题。

作者简介: 王景飞(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术与光通信技术等方面的研究。

E-mail: michelle_w@cjlu.edu.cn

导师简介: 董前民(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感技术与光通信技术等方面的研究。

E-mail: qmdong@cjlu.edu.cn(通信联系人)

国内外同行业研究的热点。

FOCT实质上是一种Sagnac型的偏振干涉仪,其中反射式Sagnac干涉型光纤电流互感器具有优良的互易性^[8~11],较强的抗外界环境干扰能力,是一个具有实用价值的全光纤电流互感器方案。它要求光在传播过程中保持特定的偏振态,而非理想的光学器件会造成偏振光之间的串扰,会影响测量准确度,因此在实用中需要对非理想的光学器件引起的误差进行全面的评价。本文就反射式Sagnac干涉型光纤电流互感器的光纤传感头进行分析,研究其误差特性。

2 反射式Sagnac干涉型光纤电流互感器

反射式Sagnac干涉型光纤电流互感器如图1所示。

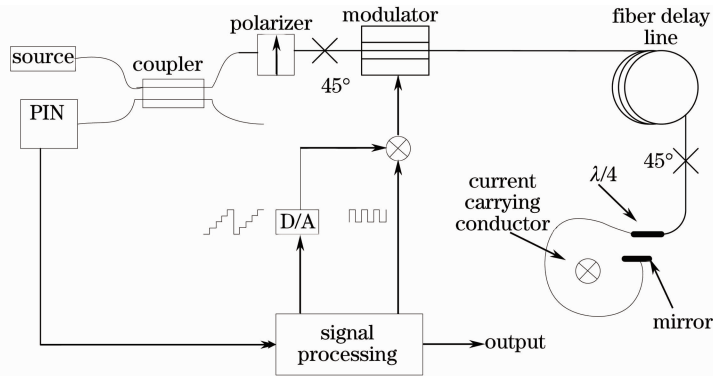


图1 In-line Sagnac干涉型电流互感器

Fig. 1 In-line Sagnac interferometer current sensor

由光源发出的光经过耦合器后由光纤偏振器起偏,形成线偏振光。线偏振光以 45° 注入消偏头的保偏光纤后,被平均注入保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输,当这两束正交模式的光通过 $\lambda/4$ 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后,这时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)第二次穿过传导光纤,并和电流产生的磁场再次发生相互作用,使产生的相位差加倍。然后这两束光再次通过 $\lambda/4$ 波片,恢复为线偏振光,在光纤偏振器发生干涉,并由耦合器耦合进探测。由于发生干涉的两束光,在光路的传输过程中,分别都通过了保偏光纤的 X 轴和 Y 轴、传感光纤的左旋和右旋模式,只在时间上略有差别,因此返回探测器的光只携带了由于法拉第效应产生的非互易相位差。

3 传感头双折射的影响

本方案的全光纤电流互感器采用光纤陀螺仪的闭环原理。闭环方案的关键是如何引入补偿用的非互易相移。为了保证光路的互易性,所采用的反馈器本身都是满足互易性要求的,只不过将它们以一定的方式接入光路,再加上时变信号后,才产生了非互易相移。而本方案是在反馈系统中加入一个与法拉第相位差大小相等、方向相反的反馈相位差,这样总的相位差被控制在零位上。因此在闭环方案中,新的测量信号是反馈相位差,它与返回的光功率和检测通道增益无关,这就得到了一个稳定性好的线性响应,且由于系统总是工作在一个斜率很大的工作点上,从而提供了很高的灵敏度,测量范围也大大增加。

理想情况下传感光纤中只存在法拉第效应引起的旋转角 F ,但传感光纤部分不可避免的会存在残余线性双折射 δ 和如弯曲等引入的圆双折射 T 。传感光纤中的线性双折射同电流产生的法拉第效应一样,会造成偏振光偏振面的旋转,产生一个与法拉第效应无法区分的误差信号,从而造成光纤电流互感器的测量误差。为此,需要分析传感头线性双折射对光纤电流互感器的影响。对各主要光路器件建立琼斯矩阵^[12~14]:

1) 起偏器的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{L}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2) 起偏器尾纤与相位调制器的 45° 熔点的琼斯矩阵表达式为

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

3) 闭环系统下的相位调制器的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{L}_{\text{PMout}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[j\varphi(t) + \gamma_0(\delta, 2T, F, z)] \end{bmatrix}; \quad (3)$$

式中 $\varphi(t)$ 为 t 时刻相位调制器的调制相位, $\gamma_0(\delta, 2T, F, z)$ 为相位调制器加入的非互易相移。

$$\mathbf{L}_{\text{PMin}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[j\varphi(t - \tau)] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\varphi(t - \tau)$ 为 $t - \tau$ 时刻调制器的调制相位。而相位差调制

$$\varphi_m(t) = \varphi(t) - \varphi(t - \tau).$$

4) $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{L}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[-j(\pi/2)] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

5) 假设传感头中存在线性双折射 δ 和圆双折射 T , 而它们均匀地分布在传感线圈上。传感线圈通常绕载流导体, 利用安培定律提取当前信息。磁场 \mathbf{H} 聚集在绕着导体的感应线圈里, 而尺寸因子会沿着感应线圈发生变化。传感头的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{L}_{\text{coil 1}} = \begin{bmatrix} P + jQ & -R \\ R & P - jQ \end{bmatrix}; \quad (6)$$

式中

$$P = \cos \frac{\phi}{2}, Q = \sin \frac{\phi}{2} \cos \chi, R = \sin \frac{\phi}{2} \sin \chi, \quad (7)$$

$$\phi = \left(\frac{L - z}{L} \right) \sqrt{\delta^2 + (2T)^2}, \chi = \arctan \left(\frac{2T}{\delta} \right). \quad (8)$$

$$\mathbf{L}_{\text{coil 2}} = \begin{bmatrix} X + jY & -Z \\ Z & X - jY \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中

$$X = \cos \frac{\gamma}{2}, Y = \sin \frac{\gamma}{2} \cos \chi, Z = \sin \frac{\gamma}{2} \sin \chi, \gamma = \left(\frac{z}{L} \right) \sqrt{\delta^2 + (2T)^2}. \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_{\text{Fout}} = \begin{bmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\mathbf{L}_{\text{Fin}} = \begin{bmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $F = NVI$, N 为传感光纤的匝数, V 为维尔德常量, I 为导线中的电流。

6) 传感头端面的镜面反射的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{L}_{\text{mirror}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

设输入光为自然光 \mathbf{E}_{in} , 则输出光的表达式为

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{L}_p \mathbf{L}_{45^\circ} \mathbf{L}_{\text{PMout}} \mathbf{L}_{\lambda/4} \mathbf{L}_{\text{coil 1}} \mathbf{L}_{\text{Fout}} \mathbf{L}_{\text{coil 2}} \mathbf{L}_{\text{mirror}} \mathbf{L}_{\text{coil 2}} \mathbf{L}_{\text{Fin}} \mathbf{L}_{\text{coil 1}} \mathbf{L}_{\lambda/4} \mathbf{L}_{\text{PMin}} \mathbf{L}_{45^\circ} \mathbf{L}_p \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (14)$$

$$I_{\text{out}} = \langle \mathbf{E}_{\text{out}} \mathbf{E}_{\text{out}}^* \rangle. \quad (15)$$

根据正弦调制和应用于光纤陀螺仪的开环解调信号处理一样, 可以得到全光纤电流互感器的一次谐波信号

$$V_{1H} = 2I_{\text{in}} J_1(\varphi_m) \times \{ [4QY(-PX + RZ)(X^2 - Y^2 + Z^2)] \sin 2F +$$

$$\left[\frac{1}{2} (P^2 - Q^2 + R^2)^2 (X^2 - Y^2 + Z^2)^2 \right] \sin 4F, \quad (16)$$

式中 V_{1H} 为信号处理单元给出的对应于一阶谐波分量的电压信号, 即干涉信号经锁相检测后的输出, 而 $I_{in} = \langle |\mathbf{E}_{in}|^2 \rangle$, $J_1(\varphi_m)$ 为调制深度。

一般情况下, 法拉第效应产生的相位变化很小, 所以 $\sin 2F \approx 2F$, $\sin 4F \approx 4F$, 而局域尺寸因子的表达式为

$$S_{local}(\delta, 2T, z) = \frac{V_{1H}}{I_{in} J_1(\varphi_m) 4F} = \left\{ \frac{(2T)^2 + \delta^2 \cos \left[z \sqrt{\delta^2 + (2T)^2} / L \right]}{\delta^2 + (2T)^2} \right\} \times \left[\frac{(2T)^2 + \delta^2 \cos \sqrt{\delta^2 + (2T)^2}}{\delta^2 + (2T)^2} \right], \quad (17)$$

经过琼斯矩阵分析可以得到

$$\gamma_0(\delta, 2T, F, z) = -2 \arctan \left\{ \tan 2F \left\{ \frac{(2T)^2 + \delta^2 \cos \left[z \sqrt{\delta^2 + (2T)^2} / L \right]}{(2T)^2 + \delta^2 \cos \sqrt{\delta^2 + (2T)^2}} \right\} \right\}. \quad (18)$$

假设传感线圈中磁场分布均匀, 则

$$\gamma_0(\delta, 2T, F) = \frac{1}{L} \int_0^L \gamma_0(\delta, 2T, F, z) dz = -4F \times \left[\frac{(2T)^2 + \delta^2 \frac{\sin \sqrt{\delta^2 + (2T)^2}}{\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}}}{\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}} \right] \left[(2T)^2 + \delta^2 \cos \sqrt{\delta^2 + (2T)^2} \right]^{-1}. \quad (19)$$

所以闭环系统的尺寸因子表达式为

$$S_{cl}(\delta, 2T) = \frac{\gamma_0(\delta, 2T, F)}{-4F}. \quad (20)$$

图 2 为尺寸因子随线性双折射和圆双折射变化的函数关系图, 图 3 为全光纤电流互感器的尺寸因子误差在不同线性双折射时与圆双折射的函数关系图, 从图 2, 3 可以看到, 在闭环系统下(假设 $2T > \delta$), 无论在传感线圈中的线性双折射是多少, 尺寸因子误差都有相交点。而且在传感线圈中掺入大量的圆双折射, 能够克服线性双折射及线性双折射带来的尺寸因子误差。由图 3 可以知道, 继续增加圆双折射, 就可以忽略尺寸因子误差。

从图 3 来看, 当线性双折射为零时, 固有圆双折射对系统响应没有影响, 这是因为固有圆双折射是互易的而 Faraday 旋转是非互易的, 当被测电流对正反向传播光产生的 Faraday 相位差叠加时, 固有圆双折射相互抵消

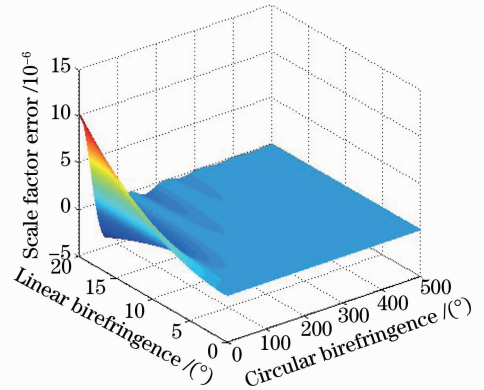


图 2 尺寸因子误差与双折射的关系

Fig. 2 Scale factor error as a function of birefringence

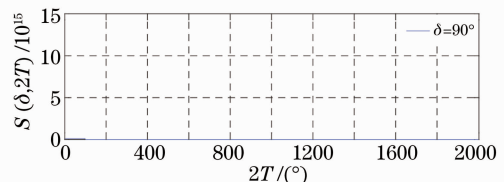
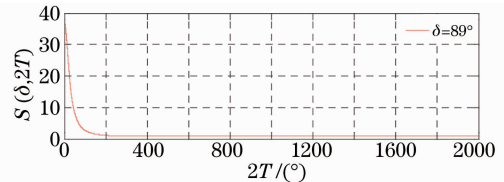
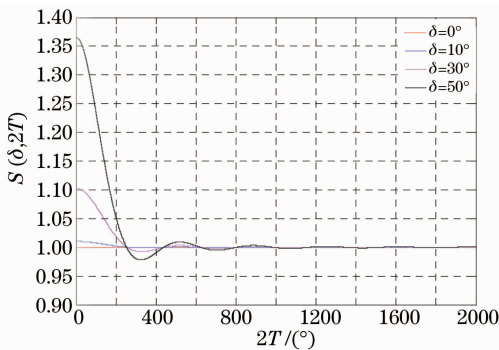


图 3 尺寸因子与圆双折射的关系

Fig. 3 Scale factor as a function of $2T$

了。随着线性双折射增大,曲线逐渐偏离 1,非互易相移逐渐偏离法拉第相位差,尺寸因子误差增大;且当线性双折射增大到 $\pi/2$ 时,曲线已失真,因此 $\pi/2$ 值可以作为可容忍线性双折射的极限值。所以利用在传感光纤中掺入大量的圆双折射来抑制传感光纤中的残余线性双折射,使传感光纤中的线性双折射在 $\pi/2$ 以内,并尽量减少。

当传感头中的 T 足够大时,由于 $\tan 2T = 2T \gg \delta$,则 $\gamma_0(\delta, 2T, F) = -4F$,就是理想状态下的表达式,即传感头中大量的圆双折射可以有效地抑制线性双折射对光纤电流互感器测量准确度的影响,可以通过对单模光纤扭转实现。

4 结 论

本论文以波动光学理论为基础,利用琼斯矩阵分析法建立了反射式 Sagnac 干涉型电流互感器的理论模型;对光纤传感头中的线性双折射、圆双折射对测量准确度的影响进行了模拟分析,从理论上得到了反映影响规律的曲线。

从理论分析和模拟结果可以得到以下主要结论:

- 1) 固有圆双折射对系统误差影响较小;
- 2) 光纤传感中能容忍线性双折射的极限值为 $\pi/2$;
- 3) 线性双折射是影响系统测量误差的主要因素,如果系统没有线性双折射,则其他误差源的影响将容易预测和处理;
- 4) 传感头中大量的圆双折射可以有效地抑制线性双折射对光纤电流互感器测量准确度的影响。

参 考 文 献

- 1 K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle *et al.*. Fiber-optic current sensor for the electro-chemical industry[C]. Freiburg: Sensoren und Messsysteme 2006, Technical Digest, 2006. 103~106
- 2 K. Bohnert, P. Gabus, H. Braendle *et al.*. Fiber-optic dcurrent sensor for the electro-winning industry[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 210~213
- 3 Yu Youlong, Ye Hongan, Liu Zhiguo *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 586~588
余有龙,叶红安,刘治国等. 光纤光栅电流传感器[J]. 光学学报, 2001, **21**(5): 586~588
- 4 Alasia Dario, Thevenaz Luc. A novel all-fiber configuration for a flexible polarimetric current sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(8): 1525~1530
- 5 Xu Shiqing, Dai Shixun, Zhang Junjie *et al.*. Recent progress of all-fiber optic current sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*. 2004, **41**(1): 41~45
徐时清,戴世勋,张军杰等. 全光纤电流传感器研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(1): 41~45
- 6 Feng Fei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Techniques of fibre grating sensors by high temperature and high pressure[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*. 2008, **27**(6): 9~11
冯飞,乔学光,贾振安等. 光纤光栅高温高压传感器技术[J]. 传感器与微系统, 2008, **27**(6): 9~11
- 7 Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber transducer for elimination of vibration effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 469~472
焦斌亮,王朝辉,郑绳植. 用于消除振动影响的光纤电流传感器结构[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 469~472
- 8 Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang *et al.*. A new all digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*. 2006, **30**(16): 77~80
王夏霄,张春熹,张朝阳等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, **30**(16): 77~80
- 9 Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Wang Haiming. A new type optical fiber current transformer[J]. *Optical Technique*. 2005, **32**(5): 782~784
娄凤伟,郑绳植,王海明. 一种新型光纤电流互感器[J]. 光学技术, 2005, **32**(5): 782~784
- 10 Kang Chong, Lü Wenlei, Ouyang Hong *et al.*. 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

- 11 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 156~162
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 156~162
- 12 X. S. Shayne, A. T. Alexandr, J. U. De Arrudaand *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. *J. Lightwave Technology*, 1998, **16**(7): 1212~1219
- 13 Li Chongzhen, Wu Baojian. Evolution of polarized state in linearly birefringent magneto-optic fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3153~3158
李崇真, 武宝剑. 线双折射磁光光纤光栅中光偏振态演化[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3153~3158
- 14 T. Prinya, T. Charoen, M. Somna. Study of current measurement error due to vibration in reciprocal fiber-optic polarimetric current sensor[C]. 2001 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2001. 699~704