

文章编号: 0253-2239(2006)12-1857-4

无偏振效应分束器反射相移对法拉第镜式光学 电流互感器输出光偏振态的影响*

康 崇 王政平 黄宗军 刘宁宁

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 线性双折射和反射相移使光学电流互感器输出光偏振态产生椭圆退化并导致灵敏度降低, 法拉第镜式光学电流互感器可以有效解决椭圆退化问题。无偏振效应分束器是构成该方案的核心器件, 为了准确掌握无偏振效应分束器的性能和作用, 用琼斯矩阵建立了无偏振效应分束器和法拉第镜式光学电流互感器的矩阵模型。分析了无偏振效应分束器反射相移对系统输出光偏振态的影响。提出无偏振效应分束器反射相移的测量方案并测出其常温下的实际值为 5.02° , 绘制了温度实验曲线。用 MathCAD 软件仿真了系统输出光偏振态图, 并分析了椭圆率与无偏振效应分束器反射相移的关系。指出计量 0.2 级光学电流互感器所允许的反射相移漂移范围要小于 0.1%。所得结果可为光学电流互感器的实用化研究提供参考。

关键词: 物理光学; 偏振光学; 光学电流互感器; 琼斯矩阵; 无偏振效应分束器; 反射相移

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

Influence of Reflection-Induced-Retardance of Non-Polarizing Beam Splitter upon the Polarization State of the Output Light of Faraday Mirror Optical Current Transformer

Kang Chong Wang Zhengping Huang Zongjun Liu Ningning

(Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: Elliptical degeneration of output light of optical current transformer is caused by linear birefringence and reflection-induced retardance, which results in reduction of sensitivity. Faraday mirror-typed optical current transformer (FMOCT) can effectively solve this problem. Non-polarizing beam splitter (NPBS) is the core apparatus in this project. In order to exactly master the capability and function of NPBS, matrix model of NPBS and Faraday mirror-typed optical current transformer is built by Jones matrix. The influence of reflection-induced-retardance of NPBS upon the polarization state of the output light of FMOCT is analyzed. Then the project of measuring the value of reflection-induced-retardance of NPBS whose actual value is 5.02° under normal temperature is proposed and experimental temperature curve is drawn. The curve of polarization state of output light of system is simulated by the software MathCAD and the relation between elliptical ratio and reflection-induced-retardance is analyzed. Drift range of reflection-induced-retardance which is 0.2 grade allowed in metering level of optical current transformer is less than 0.1%. The result might have reference on the practical application investigation of FMOCT.

Key words: physical optics; polarization optics; optical current transformer; Jones matrix; non-polarizing beam splitter; reflection-induced-retardance

1 引 言

随着电力传输容量和电网电压的提高, 光学电流互感器(Optical current transformer, OCT)所特有的绝缘性好、体小质轻、不受电磁干扰等优点得到

了许多研究者的关注^[1]。具有折返传感光路的法拉第镜式光学电流互感器(Faraday mirror optical current transformer, FMOCT)方案可以克服线性双折射^[2]和反射相移^[3~5]引起的输出光椭圆退化问

* 哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUF04015)资助课题。

作者简介: 康 崇(1970~), 男, 哈尔滨人, 哈尔滨工程大学教授, 博士, 主要从事光电子技术研究。

E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-21; 收到修改稿日期: 2006-04-28

题,因而具有实用性。

无偏振效应分束器 (Non-polarizing beam splitter, NPBS) 是法拉第镜式光学电流互感器的核心器件之一,其特征参量有两个:分光比与反射相移。分光比对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态几乎没有影响,但随着反射相移的增大,系统输出光从线偏振退化成椭圆偏振以及退化程度的增加会使依赖偏振检测方案的法拉第镜式光学电流互感器的灵敏度下降直至为零,因而针对无偏振效应分束器反射相移的研究将为法拉第镜式光学电流互感器系统设计提供参考。

2 理论分析

2.1 法拉第镜式光学电流互感器系统介绍

法拉第镜式光学电流互感器的光路如图 1 所示,与纸面成 45° 夹角的线偏振光透过无偏振效应分束器后射入光学玻璃电流传感头,被三次反射,经法拉第镜反射,反向绕传感头一圈后,再经无偏振效应分束器反射到达检偏棱镜 PBS,出射光被分成 p 光与 s 光,经光电转换,生成输出信号。

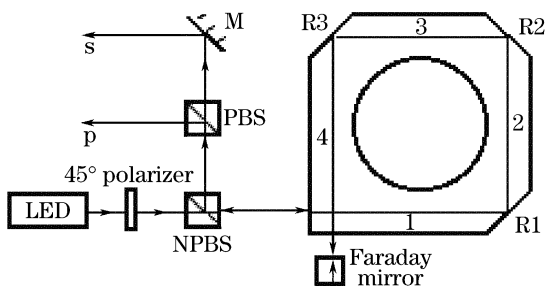


图 1 法拉第镜式光学电流互感器系统

Fig.1 Faraday mirror optical current transformer system

2.2 系统矩阵理论

设入射光能量归一化,忽略无偏振效应分束器的吸收,定义无偏振效应分束器透射与反射光强之比为 $a:(1-a)$, 45° 入射的线偏振光通过无偏振效应分束器后,矩阵为

$$\mathbf{E}_{in} = \sqrt{a} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

理想情况下法拉第镜的光学矩阵表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2) & -\sin(\pi/2) \\ \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

为了简化分析,设光学玻璃传感头中的线性双折射为零。其单臂传输矩阵^[6,7]简化为

$$\mathbf{F}(\phi_k) = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & -\sin \phi_k \\ \sin \phi_k & \cos \phi_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$k = 1, 2, 3, 4$ 是传感臂的序号。 ϕ_k 是臂 k 上由待测电

流产生的法拉第旋转角^[8]。当被测电流 $I = 500$ A, 光波长为 1310 nm 时, ZF-7 光学玻璃的菲尔德常数^[9] $V = 7.222 \times 10^{-6} \text{ A}^{-1}$, 折射率 $n = 1.7999$, 于是 $\phi_k = VI/4 = 0.903 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。

如图 1, 入射起偏角和反射角均为 45° 时, 用菲涅耳公式计算各反射面的反射相移均为 1.11 rad, 于是传感头各反射面的反射矩阵为

$$\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} e^{1.11 \cdot i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$j = 1, 2, 3$ 是反射面序号。

无偏振效应分束器存在反射相移 Δ 时, 其反射矩阵为

$$\mathbf{R}_{NPBS}(\Delta) = \sqrt{1-a} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\Delta} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

经过无偏振效应分束器反射后的输出光矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{out}(\phi_k, \Delta) = & \mathbf{R}_{NPBS}(\Delta) \cdot \mathbf{F}(\phi_1) \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \\ & \mathbf{F}(\phi_2) \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{F}(\phi_3) \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{F}(\phi_4) \cdot \\ & \mathbf{M} \cdot \mathbf{F}(\phi_4) \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{F}(\phi_3) \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \\ & \mathbf{F}(\phi_2) \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{F}(\phi_1) \cdot \mathbf{E}_{in}, \end{aligned} \quad (6)$$

设入射光的频率为 ν , 令 $\theta = 2\pi\nu \cdot t$, 则输出椭圆偏振光的 s、p 分量振动方程分别为

$$x(\Delta, \theta) = |[\mathbf{E}(\Delta)]_0| \cdot \cos\{\theta + \arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_0\}, \quad (7)$$

$$y(\Delta, \theta) = |[\mathbf{E}(\Delta)]_1| \cdot \cos\{\theta + \arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_1\}, \quad (8)$$

(7) 式和 (8) 式中 $|[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_0|$ 、 $\arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_0$ 以及 $|[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_1|$ 、 $\arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_1$ 分别是出射椭圆偏振光 S、P 分量上的振幅和相位在 MathCAD 软件中的表示形式。

2.3 法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的计算机仿真

设无偏振效应分束器的分光比为 $a = 50\%$, 设

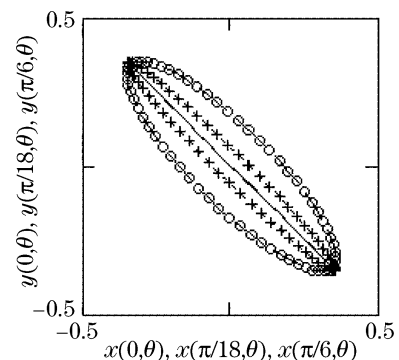


图 2 不同的 Δ 的输出光偏振图

Fig.2 Polarization maintaining curve of output light with different value Δ

反射相移 $\Delta=0, \pi/18, \pi/6$, 后两个值是假设无偏振效应分束器制作不完善造成的, 利用 MathCAD 软件做出(7)式、(8)两式对应的法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振图, 如图 2 所示。

当无偏振效应分束器理想, 即 $\Delta=0^\circ$ 时, 输出光保持线偏振状态, 当无偏振效应分束器非理想, 输出光退化成椭圆偏振光, 这会降低法拉第镜式光学电流互感器的灵敏度和工作稳定性。

2.4 法拉第镜式光学电流互感器输出光椭率与 Δ 的关系

为了描述法拉第镜式光学电流互感器输出光的椭圆退化程度, 定义椭圆的短、长轴 (a, b) 之比为椭率, 计为: a/b , 其值在 $[0, 1]$ 闭区间, 0 代表线偏振光, 1 代表圆偏振光。输出圆偏振光时, 法拉第镜式光学电流互感器的电流传感灵敏度为零。

令 $A = |[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_0|$ 、 $B = |[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_1|$ 、 $\delta = \arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_1 - \arg[\mathbf{E}_{out}(\Delta)]_0$, 经计算得

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos 2\delta}},$$

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos 2\delta}}.$$

MathCAD 绘制的椭率与 Δ 的曲线如图 3 所示, 椭率随着 Δ 的增加而增加, 选择 Δ 值小的无偏振效应分束器并使其恒是保证法拉第镜式光学电流互感器灵敏度和稳定性的有效方法。

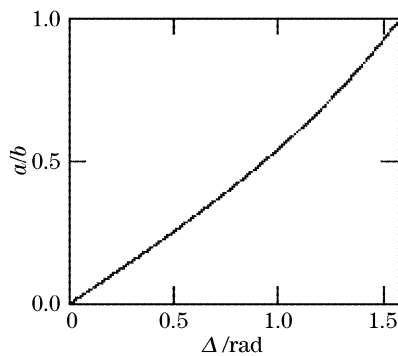


图 3 法拉第镜式光学电流互感器的 a/b 与 Δ 的曲线
Fig. 3 Faraday mirror-typed optical current transformer curve of a/b versus Δ

3 无偏振效应分束器反射相移的实验研究

3.1 Δ 的测量原理

按图 4 光路, 设起偏器、检偏器^[10]光轴与纸面夹角分别为 θ 和 φ , 检偏过程^[11]的琼斯矩阵为

$$\mathbf{P}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

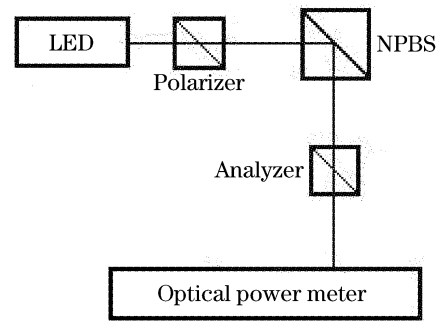


图 4 反射光光路

Fig. 4 Optical paths of reflected light

图 4 光路的输出光矩阵为

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{P}(\varphi) \cdot \mathbf{R}_{NPBS}(\Delta) \cdot \mathbf{E}_{in}(\theta) = \sqrt{1-a} \cdot (\cos \varphi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta \cdot e^{i\Delta}) \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$I_{out} = \mathbf{E}_{out}^+ \mathbf{E}_{out} = (1-a) \cdot (1 + \cos 2\varphi \cos 2\theta + \sin 2\varphi \sin 2\theta \cos \Delta), \quad (11)$$

为了求 I_{out} 的极值 I_{max} 、 I_{min} , 对 I_{out} 求偏导:

$$\frac{\partial I_{out}}{\partial \varphi} = -\sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \Delta + \cos^2 2\theta} \cdot$$

$$(1-a) \cdot \sin[2\varphi - \arctan(\tan 2\theta \cos \Delta)], \quad (12)$$

令 $\partial I_{out} / \partial \varphi = 0$, 即 $2\varphi = m\pi + \arctan(\tan 2\theta \cos \Delta)$, 其中 $m = 0, 1, 2$, 在 $0 \leq \varphi \leq \pi$ 内, $m = 0, 1$ 分别对应 I_{max} 、 I_{min} 。令 $Z = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, 则

$$Z = \sqrt{\sin^2 2\theta \cos^2 \Delta + \cos^2 2\theta} = \sqrt{1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \Delta}, \quad (13)$$

得 $\Delta = \arcsin(\pm \sqrt{(1 - Z^2) / \sin^2 2\theta})$, 由于 Δ 和 $-\Delta$ 对输出光偏振态具有相同的影响, 可在以下的计算中略去负号。若 $\theta = \pi/4$, 无偏振效应分束器反射相移简化为

$$\Delta = \arcsin \sqrt{1 - Z^2}. \quad (14)$$

3.2 Δ 的测量实验

只要测出 I_{max} 、 I_{min} , 就可以由(14)式算出反射相移。在室温 (26.5 °C) 条件下记录检偏器旋转过程中光功率计的最大值和最小值, 数据于表 1。实验测出 Δ 的平均值为 5.02°。

表 1 无偏振效应分束器的反射相移

Table 1 Reflection-induced retardance of NPBS

Number	$I_{max} / \mu W$	$I_{min} / \mu W$	$\sqrt{1-Z^2}$	$\Delta / (^\circ)$
1	33.51	0.064	0.0872	5.00
2	30.18	0.059	0.0883	5.06
3	32.09	0.061	0.0870	4.99
Average	31.91	0.061	0.0875	5.02

3.3 Δ 的温度曲线

温度是严重影响 Δ 值的环境因素^[12,13]之一,为了了解温度变化对 Δ 的影响,用局部恒温控制的方法,在 26.5 °C 至 71.5 °C 温度范围内测量 Δ 的大小,数据如图 5,图中两条曲线分别是先后两次测量的结果。温度对无偏振效应分束器反射相移的影响幅度在 $\pm 4\%$ 以内。

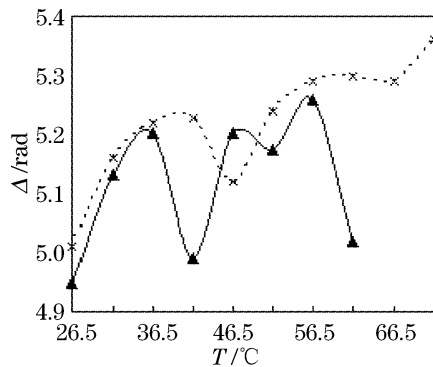


图 5 Δ 的温度曲线

Fig. 5 Curves of Δ with different temperature

曲线形状说明 Δ 随温度变化没有明显的规律,这给温度补偿带来了困难,为了法拉第镜式光学电流互感器工作稳定,保持无偏振效应分束器局部温度基本恒定是简单易行的方法。

4 Δ 的允许变化范围

对于设计量程为 500 A,精度等级为 0.2 的计量式法拉第镜式光学电流互感器,45°检偏后的输出光强表示为

$$U_{\text{out}}(\Delta) = |\mathbf{P}(\pi/4) \cdot \mathbf{E}_{\text{out}}(\Delta)|^2, \quad (15)$$

$$\Delta U_{\text{out}}(\Delta) = 0.2\% \times U_{\text{out}}(\Delta) = \frac{\partial U_{\text{out}}(\Delta)}{\partial \Delta} \cdot \Delta \Delta,$$

$$\frac{\Delta \Delta}{\Delta} = \frac{0.2\% \times U_{\text{out}}(\Delta)}{\Delta \cdot (\partial U_{\text{out}}(\Delta) / \partial \Delta)} \Big|_{\Delta=5.02^\circ} = 0.1\%, \quad (16)$$

对于 0.2 级精度的法拉第镜式光学电流互感器, Δ 的相对漂移要小于 0.1%。

5 结 论

无偏振效应分束器是构成法拉第镜式光学电流互感器的核心器件之一。无偏振效应分束器反射相移使法拉第镜式光学电流互感器输出光退化成椭圆偏振光,椭率随着 Δ 的增加而增加。实验测出无偏振效应分束器的实际反射相移 $\Delta=5.02^\circ$;在 26.5 ~ 71.5 °C, Δ 的漂移幅度为 4%;理论上量程为 500 A,精度为 0.2 级的计量式法拉第镜式光学电流互感器, Δ 的相对漂移要小于 0.1%,因此选择 Δ 值较小的无

偏振效应分束器并保持其局部温度相对恒定是计量式法拉第镜式光学电流互感器稳定工作的要求。

参 考 文 献

- Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber transducer for elimination of vibration effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 469~472 (in Chinese)
焦斌亮,王朝辉,郑绳植. 用于消除震动影响的光纤电流传感器结构[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 469~472
- Wang Zhengping, Li Qingbo, Wang Huili *et al.*. A method to measure the linear birefringence inside the bulk glass head of an optical current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 612~614 (in Chinese)
王政平,李庆波,王慧丽等. 光学玻璃电流传感头线性双折射的一种测量方法[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 612~614
- Li Weiwen, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng *et al.*. A study for phase-shift characteristics of polarization controller based on simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 449~453 (in Chinese)
李伟文,章献民,陈抗生等. 基于模拟退火算法的偏振控制器波片相移特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 449~453
- Wang Zhengping, Huang Zongjun, Kang Chong *et al.*. Optical current sensing element with single medium layers for high voltage applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 455~458
- Wang Zhengping, Kang Chong, Huang Zongjun *et al.*. Optical current sensing element with polarization-preserving coatings for Faraday current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2): 136~140 (in Chinese)
- Kang Chong, Sun Weimin, Wang Zhengping *et al.*. The influence of reflection-induced phase retardation upon sensitivity of bulk-glass optic-current sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(11): 1513~1517 (in Chinese)
康 崇,孙伟民,王政平等. 反射相差对光学玻璃电流传感器测量灵敏度和稳定性的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(11): 1513~1517
- Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng. *Principles and Technologies of Guided-Wave Optical Sensors* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 195~196 (in Chinese)
靳 伟,廖延彪,张志鹏. 导波光传感器原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 195~196
- Zheng Yonglin, Zheng Ruilun. Research of magnetic granular film Faraday rotation angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1126~1130 (in Chinese)
郑勇林,郑瑞伦. 磁性颗粒膜法拉第转角的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1126~1130
- Wang Zhengping, Ruan Sunling, Sun Weimin *et al.*. Reflecting prism-retarders with a single medium layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 556~560 (in Chinese)
王政平,阮顺龄,孙伟民等. 单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究[J]. *光子学报*, 1997, **26**(6): 556~560
- Huang Jianbing, Wang Yingjian, Fang Ming *et al.*. Design of reflection-induced phase retarder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1169~1172 (in Chinese)
黄建兵,王英剑,方 明等. 反射式相位延迟器的设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1169~1172
- Wang Z P, Li Q B, Tan Q *et al.*. Novel method for measurement of retardance of a quarter-wave plate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**: 285~290
- Yu Youlong, Ye Hongan, Liu Zhiguo *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 586~588 (in Chinese)
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
- Li Hongbin. Study on the sensing probe of optical current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 946~949 (in Chinese)
李红斌. 光学电流传感器传感头的研究[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 946~949