

Faraday 镜预转角对 FMOCT 输出光偏振态的影响*

黄宗军 康崇** 王政平 刘宁宁

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘要 通过计算机仿真,运用琼斯矩阵理论分析了 Faraday 镜预转角对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的影响. 实验测量了 Faraday 镜实际预转角的大小,测量了外磁场的改变对 Faraday 镜预转角的影响. 外磁场的存在和变化使 Faraday 镜预转角偏离初始值,并使系统输出光由理想状态下的线偏振光退化成椭圆偏振光,并引起法拉第镜式光学电流互感器工作灵敏度和稳定性的下降. 提出了用电磁屏蔽解决外界磁场影响的方法.

关键词 偏振光学;光学电流互感器;法拉第镜;线性双折射;反射相移

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A

0 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)所特有的安全、体小、质轻、不受电磁干扰等优点^[1,2]得到了许多研究者的关注. 线性双折射和反射相移对系统输出的影响是 OCT 研究中有待解决的核心技术问题^[3,4].

本文提出了一种利用法拉第镜(Faraday Mirror, FM)构成的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. 计算机仿真表明:FM 预转角处于理想值的条件下, FMOCT 可以抵消线性双折射和反射相移对输出光偏振态的影响,并使传感信号加倍. 然而在实际情况中,各种条件并不理想, FM 预转角相对于理想值的偏离将使系统输出光退化成椭圆偏振光,最终系统的灵敏度和工作稳定性下降. 而待测电流磁场和外界杂散磁场很容易诱发 FM 预转角发生变化. FM 预转角是否理想且不受外界因素影响将成为 FMOCT 方案设计与实施的重要前提.

1 FMOCT 原理

1.1 FMOCT 系统构成

FMOCT 的光路如图 1. 与纸面成 45° 夹角的线偏光通过无偏振效应分束器 NPBS 后射入光学玻璃电流传感头,经过三次反射,进入 FM,经 FM 反射并反向绕传感头一圈后,再经 NPBS 反射到达偏振分束器 PBS,出射光被分成 P 光与 S 光,分别经光电转换及信号处理,生成输出信号.

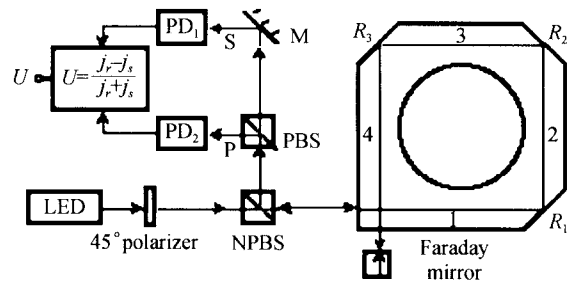


图 1 法拉第镜式光学电流互感器系统

Fig. 1 Faraday mirror-typed optical current transformer system

1.2 数学模型与工作原理

振幅归一化的入射光经 45° 起偏后的光矢为

$$E_{in} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

三次反射的反射矩阵为

$$R(\Delta_j) = \begin{bmatrix} e^{i\delta_{pj}} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_{sj}} \end{bmatrix} = e^{i\delta_{sj}} \begin{bmatrix} e^{i\Delta_j} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, 3, \Delta_j = \delta_{pj} - \delta_{sj}$ 为反射相移.

设传感光路构成的平面平行于纸面,则光通过传输光臂(1、2、3、4)的传输矩阵为^[5,6]

$$F(\chi_k, \Psi_k) = \begin{bmatrix} A(\chi_k, \Psi_k) & -B(\chi_k, \Psi_k) \\ B(\chi_k, \Psi_k) & A(\chi_k, \Psi_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $k=1, 2, 3, 4, A(\chi_k, \Psi_k)$ 是 $A(\chi_k, \Psi_k)$ 的复共轭.

$$A(\chi_k, \Psi_k) = \cos\left(\frac{\Psi_k}{2}\right) + i \cdot \sin\left(\frac{\Psi_k}{2}\right) \cdot \cos(\chi_k)$$

$$B(\chi_k, \Psi_k) = \sin\left(\frac{\Psi_k}{2}\right) \cdot \sin(\chi_k)$$

$$\tan(\chi_k) = \frac{2 \cdot \phi_k}{r_k}$$

$$\left(\frac{\Psi_k}{2}\right)^2 = \left(\frac{\gamma_k}{2}\right)^2 + \phi_k^2$$

γ_k, ϕ_k 分别为第 k 个传感臂上的线性双折射值和由待测电流作用产生的法拉第旋转角.

1.3 法拉第旋转角与电流的关系

* 哈尔滨工程大学基础研究基金资助(HEUF04015)

** Tel: 0451-82519758 Email: kangchong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-10

电流穿过光学玻璃的正中央,由法拉第磁光效应,每条传感臂上由电流产生的法拉第旋转角相等,即 $\phi_k = \phi(I) = \frac{VI}{4}$, V 为 Verdet 常量,对 ZF-7 玻璃,光波长为 1310 nm 时, $V = 7.22 \times 10^{-6} / A$,得: $\phi(I) = 1.80 \times 10^{-6} I$.

1.4 FM 的琼斯矩阵

垂直射入 FM 的偏振光在永久外磁场的作用下,入射过程先旋转 β 角,然后被 FM 反射,反射无半波损失,反向出射过程偏振面再旋转 β 角. 对于理想情况, $\beta = 45^\circ$ 或 -45° . FM 的琼斯矩阵为

$$M(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(-i \cdot 0) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.5 输出光的电矢量

入射光 E_{in} 经过 FMOCT 系统后,输出光 E_{out} 的矩阵为

$$E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta) = F(I, \gamma_1) \cdot R(\Delta_1) \cdot F(I, \gamma_2) \cdot R(\Delta_2) \cdot F(I, \gamma_3) \cdot R(\Delta_3) \cdot F(I, \gamma_4) \cdot M(\beta) \cdot F(I, \gamma_4) \cdot R(\Delta_3) \cdot F(I, \gamma_3) \cdot R(\Delta_2) \cdot F(I, \gamma_2) \cdot R(\Delta_1) \cdot F(I, \gamma_1) \cdot E_{in} \quad (5)$$

输出光 E_{out} 经过 PBS 后形成的相互正交的两个分量 (S、P 分量) 在 MathCAD 软件中分别表示为

$$[E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_0, [E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_1$$

2 输出光的偏振态分析

2.1 参量方程

为描绘输出光矢的轨迹,引入参量 θ ,其取值范围为: $0 \sim 2\pi$. 输出光 S、P 分量的振动方向分别设为与光传输方向 z 互相垂直并形成右手螺旋坐标系的 x 和 y 方向,输出光在 x 、 y 方向上的振动方程如下

$$x(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta, \theta) = |[E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_0| \cos(\theta) \quad (6)$$

$$y(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta, \theta) = |[E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_1| \cos\{\theta + \arg[E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_1 - \arg[E_{out}(I, \gamma_k, \Delta_j, \beta)]_0\} \quad (7)$$

2.2 输出光的偏振态

被测电流 I 的取值为 500 A. 测量表明: ZF-7 光学玻璃,当波长为 1310 nm、反射角为 45° 时,各反射面上反射相移约为 61° ^[7], γ_k 的测量值为 0.08 rad ^[8],分别取 $\beta = 0.785, 0.873, 0.96, 1.047$ (即 FM 预转角为理想值 45° 、正偏 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 四种情况). 用 MathCAD 做出式 (6)、(7) 对应的输出光偏振图,如图 2. 随着 β 值的增加,输出光由线偏光退化为椭圆偏振光,这将使整个系统的灵敏度和稳定性受到负面影响.

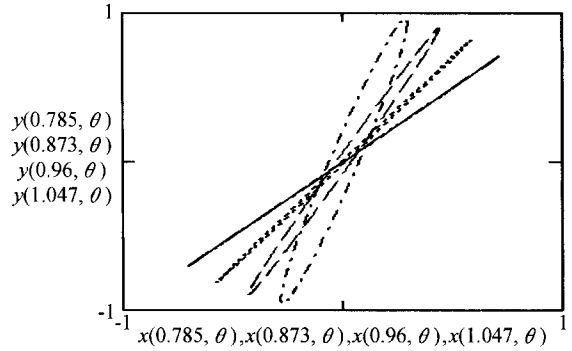


图 2 不同 β 值的 FMOCT 的输出光偏振图
Fig. 2 Diagram of the output polarizations of FMOCT with different value β

3 FM 预转角的实验测量

如图 3,起偏器 120° 起偏,光源注入电流恒定,旋转检偏器,通过度盘记录每旋转 10° 光功率计的读数,旋转范围 360° ,并测量消光点位置 D . 利用 Mathematica 软件将测量的数据绘成光强极坐标分布图,如图 4,极径长度代表光强.

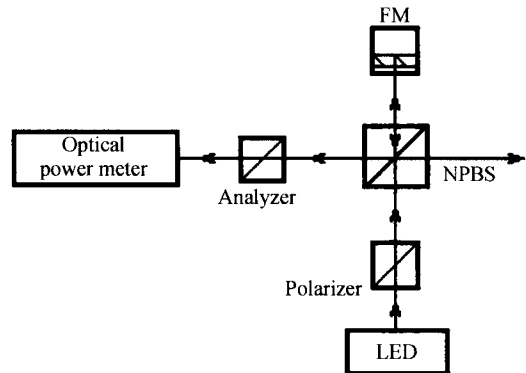


图 3 FM 的实验测量光路
Fig. 3 Optical paths of FM

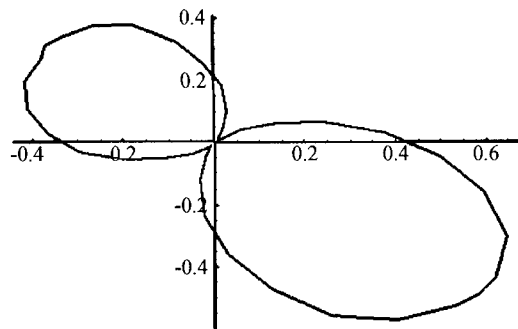


图 4 光强极坐标分布图
Fig. 4 Distribution of light power

消光点位置测量结果 $D = 125^\circ, I_{min} = 0.010$; $D = 305^\circ, I_{min} = 0.010$; 当面向 FM 入射光方向观察, FM 预转角以逆时针方向为正,则

$$125^\circ = 120^\circ + 2\beta - 90^\circ$$

$$305^\circ = 120^\circ + 2\beta + 90^\circ$$

或

$$125^\circ = 120^\circ + 2\beta + 90^\circ$$

$$305^\circ = 120^\circ + 2\beta - 90^\circ$$

由此计算出: $\beta = 47.5^\circ$ 或 $\beta = -42.5^\circ$, 与理想值相差 2.5° . FM 出厂说明书给出的技术指标为: $\beta = 45^\circ$, $\Delta\beta \leq 3^\circ$.

4 外磁场对 FM 预转角的影响

按照图 3 布置光路,起偏器 120° 起偏,在 FM 外面同心套置环形永久磁铁(总场强测量值为 FM 内部原测值的 101%),以模拟外场存在而改变 FM 内部场强. 旋转检偏器,测量消光点位置: $D = 126^\circ$, $I_{\min} = 0.011$; $D = 306^\circ$, $I_{\min} = 0.011$; 则

$$126^\circ = 120^\circ + 2\beta - 90^\circ$$

$$306^\circ = 120^\circ + 2\beta + 90^\circ$$

或

$$126^\circ = 120^\circ + 2\beta + 90^\circ$$

$$306^\circ = 120^\circ + 2\beta - 90^\circ$$

由此计算出存在外场条件下的 FM 预转角为: $\beta = 48.0^\circ$ 或 $\beta = -42.0^\circ$, 即与理想 FM 预转角相差 3° , 与没加磁环时相差 0.5° . 实验证明,外磁场对 FM 预转角的影响是存在的,因此在实际工作环境中需要采用磁场屏蔽.

5 结论

本文通过仿真方法,提出了 FMOCT 传感方案. 理论分析表明,当 FM 的预转角 β 等于理想值 45° 时,此方案可以有效地抑制由于线性双折射、反射相移等因素引起的输出光椭圆退化问题. 但当预转角 β 偏离理想值时,输出光将退化成具有一定椭圆率的椭圆光. 因而构成计量式的 FMOCT 的前提是 FM 的预转角要等于理想值,而且要采用电磁屏

蔽材料将 FM 封闭起来,使其不能受到外磁场影响.

参考文献

- 1 Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W. Recent process in optical current sensing techniques. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(5): 3097~3111
- 2 Wang Z P, Huang Z J, Kang C. Optical current sensing element with single medium layers for high voltage applications. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**: 455~458
- 3 Wang Z P, Kang C, Huang Z J. Optical current sensing element with polarization-preserving coatings for faraday current sensor. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2): 136~140
- 4 王政平,阮顺龄,孙伟民. 单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究. *光子学报*, 1997, **26**(6): 556~560
Wang Z P, Ruan S L, Sun W M. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 556~560
- 5 Tabor W J, Chen F S. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence: experiments with ytterbium orthoferrite. *J of Appl Phys*, 1969, **40**(7): 2760~2765
- 6 靳伟,廖延彪,张志鹏. 导波光学传感器原理与技术. 北京: 科学出版社, 1998. 195~196
Jin W, Liao Y B, Zhang Z P. Principles and Technologies of Guided-Wave Optical Sensors. Beijing: Science Press, 1998. 195~196
- 7 Wang Z P, Li Q B, Tan Q. Novel method for measurement of retardance of a quarter-wave plate. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**: 285~290
- 8 王政平,李庆波,王慧丽. 光学玻璃电流传感头线性双折射的一种测量方法. *光子学报*, 2003, **32**(5): 612~614
Wang Z P, Li Q B, Wang H L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 612~614

Influence of Bias Angle of Faraday Mirror upon Polarization State of Output Light of FMOCT

Huang Zongjun, Kang Chong, Wang Zhengping, Liu Ningning

Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2005-05-10

Abstract By the way of computer simulation, the influence of bias angle of Faraday mirror upon polarization state of output light of Faraday Mirror-typed Optical Current Transformer is analyzed using the theory of Jones Matrix. The value of actual bias angle of Faraday mirror and the effect of out magnetic field upon bias angle of Faraday mirror are measured by experimentally. Existence and changes of out magnetic field cause bias angle of Faraday mirror deviating initial value and output light of system degenerating into elliptical polarization light from ideal linear polarization light. It brings the decline of sensitivity and stability of FMOCT. At the same time solving the influence of out magnetic field by electromagnetic shield is proposed.

Keywords Polarization optics; Optical current transformers; Faraday mirror; Linear birefringence; Reflection-induced retardance



Huang Zongjun an associate professor at Harbin Engineering University (HEU), was born in Heilongjiang Province, China in 1963 and obtained his B. Eng. degree in electronic engineering at Dept. of Electronic Engineering, HEU in 1989. His research focuses on optical fiber sensing techniques. More than 45 papers reflecting the research work have been published on academic journals and proceedings of international conferences at home and abroad since 1991.