

反射相移对光学玻璃电流传感器 抗电磁干扰能力的影响

孙伟民 王政平 黄宗军 康 崇 阮顺龄
(哈尔滨工程大学物理系, 哈尔滨 150001)

Y. N. Ning A. W. Palmer K. T. V. Grattan

(Department of E. E. I. E., City University, London, EC1V 0HB, U. K.)

摘 要 在光学玻璃电流传感器中, 如果光线反射转向时在光的 p 、 s 分量之间引入反射相移, 则会对该传感器的抗电磁干扰能力产生不良影响。本文对这种影响进行了理论上的分析, 并给出了数值模拟和实验的结果。

关键词 光学电流传感器, 反射相移, 电磁干扰。

1 引 言

利用法拉第效应可以制成光学电流传感器^[1~5]。起初人们主要采用光纤作为传感元件^[1], 但随后发现, 光纤中存在的线性双折射严重地影响了测量的精度和稳定性。因此人们转而采用块状玻璃作为传感元件, 这样可以有效地避免线性双折射的影响^[2~5]。但这种传感器要求光线在反射转向处保持偏振态不发生变化, 为此人们提出了多种保偏反射的方案: 如“临界角反射”^[2]、“双正交反射”^[3]、“准双正交反射”^[4]和“保偏膜反射”^[5]等等。但无论何种方法, 都会由于光线入射角度的偏差或反射面的角度加工精度不足等原因, 使光在反射时会在 p 、 s 分量之间引入反射相移, 从而改变入射光的偏振态, 进而对传感器的抗电磁干扰能力产生影响。

以前, 人们对光电流传感器的电磁干扰情况有过测量^[4], 但缺乏理论的解释。本文就方形传感器的反射相移对传感器抗电磁干扰能力的影响进行了理论和数值上的分析, 并与实验结果进行了比较。

2 理论基础

本文讨论一种简化的方型玻璃传感器测量系统(图 1), 偏振方向为 45° 的入射线偏光从 A 点射入玻璃头, 在 B 、 C 、 D 点传播方向均改变 90° , 然后再由 E 点离开该传感器。对于“双正交反射”和“准双正交反射”, 可将每个光线转向处的一对互补反射当作一次复合反射。并在

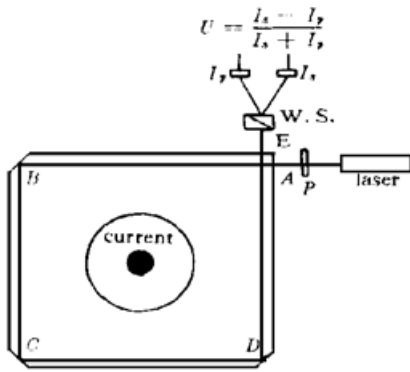


Fig.1 The chema of square-glass optic-current measuring system

下文中将光线转向简称为反射。认为 A、E 两点相距很近，光在传感器中传播构成了闭合回路，则该系统的测量结果为

$$U = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} = \sin 2\Phi = \sin (2VI) \quad (1)$$

其中， I_p 、 I_s 为出射光 p、s 分量的强度， Φ 为法拉第旋转角， V 为玻璃的费尔德常数， I 为玻璃头内闭合光路所包围的电流。该测量结果 U 与外部电流和外磁场无关。此式成立的前提是，光在构成闭合回路时，光的偏振态在各次反射时均不发生改变。若光在反射时偏振态发生变化，即在光的 p、s 分量间引入相差——反射相移，则测量结果 U 会受到

外部电流和外磁场的影响。

本文主要考查了垂直于传感器平面的外部电流(简称垂直外电流)所产生磁场对传感器的测量结果的影响，并进行了数值模拟和实验验证。对平行于传感器平面，但与传感器不共面的外部电流(简称平行外电流)所产生的磁场及外部恒向磁场(如地磁场等)对测量结果的影响也进行了理论上的分析。

3 外部磁场对总的法拉第旋转角 Φ 的影响

首先考虑外部电流和外部恒磁场对总的法拉第旋转角 Φ 的影响。

3.1 垂直外电流的影响

为便于理论分析及数值计算，本文建立直角坐标系。设电流沿 z 轴正向传输，并将尺寸为 $2a \times 2a$ 的方形玻璃传感器平放在 xoy 平面内，中心坐标为 $(b, 0)$ ($a < b$) (如图 2)。考虑到磁场强度 H 的大小和方向后，可将其写成矢量式

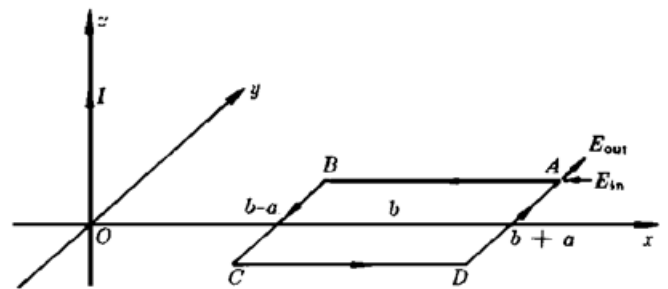


Fig.2 The schema of a Cartesian coodnate system

$$H = \frac{I}{2\pi R} (\mathbf{k} \times \frac{\mathbf{R}}{R}) = \frac{I}{2\pi} \frac{\mathbf{k} \times (x\mathbf{i} + y\mathbf{j})}{x^2 + y^2} = \frac{I}{2\pi} \frac{x\mathbf{j} - y\mathbf{i}}{x^2 + y^2} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{R} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$ 为磁场中一点的矢径，则当光传播 $d\mathbf{L} = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j}$ 后，引起的偏振面旋转为

$$d\Phi = V\mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \frac{VI}{2\pi} \frac{(x\mathbf{j} - y\mathbf{i}) \cdot (dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j})}{x^2 + y^2} = \frac{VI}{2\pi} \frac{xdy - ydx}{x^2 + y^2} \quad (3)$$

因此，可以通过积分求出在各光臂中偏振面的旋转角 Φ

$$\Phi_{AB} = \int_A^B d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{b+a}^{b-a} \frac{-adx}{x^2 + a^2} = \frac{VI}{2\pi} (\tan^{-1} \frac{b+a}{a} - \tan^{-1} \frac{b-a}{a})$$

$$\Phi_{BC} = \int_B^C d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_a^{-a} \frac{(b-a)dy}{(b-a)^2 + y^2} = -\frac{VI}{\pi} \tan^{-1} \frac{a}{b-a}$$

$$\Phi_{CD} = \int_C^D \oint \Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{b-a}^{b+a} \frac{adx}{x^2 + a^2} = \frac{VI}{2\pi} (\tan^{-1} \frac{b+a}{a} - \tan^{-1} \frac{b-a}{a}) \quad (4)$$

$$\Phi_{DA} = \int_D^A \oint \Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{(b+a)dy}{(b+a)^2 + y^2} = \frac{VI}{\pi} \tan^{-1} \frac{a}{b+a}$$

利用关系式 $\arctan \alpha + \arctan (1/\alpha) = \pi/2 (\alpha > 0)$, 可以得到光在完成闭合回路后总的旋转角为

$$\Phi_{total} = \Phi_{AB} + \Phi_{BC} + \Phi_{CD} + \Phi_{DA} = 0 \quad (5)$$

3.2 平行外电流及恒向磁场的影响

假设电流平行于 x 轴, 则在 AB 、 CD 两光臂上 $d\Phi = \mathbf{VH} \cdot d\mathbf{L} = 0$, 而在 BC 、 DA 两光臂中产生的法拉第旋转角相反, 设分别为 Φ 和 $-\Phi$ 。沿 y 轴方向的恒向磁场产生的效果完全相同。则总的旋转角 Φ_{total} 亦为零。

可见, 无论何种外磁场都不会影响 Φ_{total} 。这符合安培环路定理。

4 外部磁场对测量结果 U 的影响

虽然外部磁场对总的法拉第旋转角没有影响, 但若在反射时存在反射相移, 光的偏振态在传播过程中会发生变化, 从而会对测量结果 U 产生影响。

光振幅为 E_0 、偏振角为 45° 的入射线偏光的光矢量为

$$\mathbf{E}_{in} = E_0 \begin{bmatrix} \cos 45^\circ \\ \sin 45^\circ \end{bmatrix} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑三次反射均为全反射, 则 B 、 C 、 D 三处的反射矩阵为

$$R_V = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_{pV}) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_{sV}) \end{bmatrix} = \exp(i\delta_{sV}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_V) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad V = B, C, D \quad (7)$$

这里 $\Delta_V = \delta_{pV} - \delta_{sV}$ 为各面的反射相移。四条传输光臂的传输矩阵为

$$T(\Phi_u) = \begin{bmatrix} \cos \Phi_u & -\sin \Phi_u \\ \sin \Phi_u & \cos \Phi_u \end{bmatrix}, \quad u = AB, BC, CD, DA \quad (8)$$

由(6)~(8)式可得出射光矢量为

$$\mathbf{E}_{out} = T(\Phi_{DA}) R_D T(\Phi_{CD}) R_C T(\Phi_{BC}) R_B T(\Phi_{AB}) \mathbf{E}_{in} \quad (9)$$

通常有两种情况经常出现, 一种是仅有一个面由于加工等问题引入反射相移; 另一种是由于保偏性能不够完善或者光线偏离理想路线造成三次反射具有相同或近似的反射相移。下面分别讨论这两种情况的影响。

4.1 垂直外电流的影响的理论和实验结果

1) 仅有 B 面不保偏, 则 $\Delta_C = \Delta_D = 0$, $\Delta_B \neq 0$ 。利用 $T(\Phi_1) T(\Phi_2) = T(\Phi_1 + \Phi_2)$, 出射光矢量化为

$$\mathbf{E}_{out} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\delta_{SD} + \delta_{SC} + \delta_{SB})] T(\Phi_{DA} + \Phi_{CD} + \Phi_{BC}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_B) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2) 仅有 C 面不保偏, 则

$$\mathbf{E}_{out} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\delta_{SD} + \delta_{SC} + \delta_{SB})] T(\Phi_{DA} + \Phi_{CD}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_C) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{BC} + \Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3) 仅有 D 面不保偏, 则

$$E_{out} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp [i(\delta_{SD} + \delta_{SC} + \delta_{SB})] T(\Phi_{DA}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_D) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{CD} + \Phi_{BC} + \Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

这三种情况的出射光矢量可以统一写作

$$E_{out} = K T(\Phi_2) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = K T(-\Phi_1) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \cos \Phi_1(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \sin \Phi_1(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1) \\ -\sin \Phi_1(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \cos \Phi_1(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 K 为复系数, Φ_1 和 Φ_2 分别为光在遇到不保偏反射面前后的法拉第旋转角, 而且利用了 $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_{total} = 0$ 。则光的 p 、 s 分量的振幅为

$$\begin{aligned} E_p &= K [\cos \Phi_1(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \sin \Phi_1(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1)] \\ E_s &= K [-\sin \Phi_1(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \cos \Phi_1(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1)] \end{aligned} \quad (14)$$

光的 p 、 s 分量的强度为

$$\begin{aligned} I_p &= |E_p|^2 = |K|^2 [1 - \frac{1}{2} \sin 4\Phi_1(1 - \cos \Delta)] \\ I_s &= |E_s|^2 = |K|^2 [1 + \frac{1}{2} \sin 4\Phi_1(1 - \cos \Delta)] \end{aligned} \quad (15)$$

测量结果 U 为

$$U = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta) \sin 4\Phi_1 \quad (16)$$

上式说明, 若反射相移为零, 则测量结果受垂直外电流的影响为零。

4) 三个面具有相同的反射相移, 其理论分析较为复杂, 难以给出简单的解析式, 但实验中较易实现。本文利用(9)式及 $I = |E|^2$ 和(1)式, 采用数值计算的方法给出了一些数值模拟结果, 并与实验结果进行了比较。

特选择费尔德常数为 $V = 2 \times 10^{-5}(\text{rad/A})$, 尺寸为 $2a \times 2a(a = 4 \text{ cm})$ 的块状玻璃传感器作为实验对象, 分析了在各种情况下垂直外电流对测量结果的影响。为了和理论分析结果相比较, 特制了一种传感器, 在 B 、 C 、 D 处采用单个玻璃-空气界面作为反射面, 这种反射面的反射相移约为 1.1 rad 。研究结果如下:

1) 测量结果随垂直外电流变化 当传感器中心位于 $b = 23.5 \text{ cm}$, 反射相移 $\Delta = 1.1 \text{ rad}$, 外电流变化范围为 $0 \sim 120 \text{ A}$ 时, 得到理论和实验结果如图 3。由图可见, 在存在反射相移时测量结果 U 随垂直外电流 I 同样线性改变, 与随内部电流变化的情况类似。实验结果与数值模拟结果符合的很好。

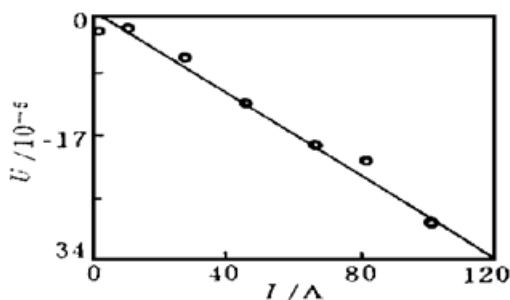


Fig. 3 The curve of $U \times 10^5$ vs. I ($\Delta = 1.1 \text{ rad}$, $b = 23.5 \text{ cm}$), the line means theoretic results, the circles means measured results

2) 垂直外电流与传感器距离的影响 当三个面的反射相移均为 $\Delta = 1.1 \text{ rad}$, $I = 92.5 \text{ A}$ 时, U 随 b 的变化曲线如图 4。实验结果和数值模拟结果表明: 当外部垂直电流距离玻璃传感器较远时, 测量结果受外电流的影响随二者距离增加只缓慢减小。

3) 反射相移的影响 不同的反射相移使传感器在同样的外电流作用下产生不同的测量结果。当 $b =$

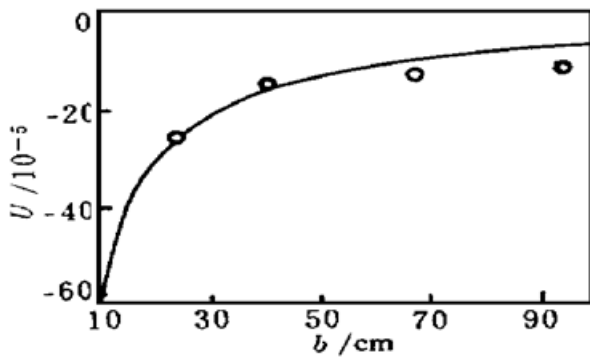


Fig. 4 The curve of $U \times 10^5$ vs. b ($I = 92.5 \text{ A}$, $\Delta = 1.1 \text{ rad}$), the line means theoretic results, the circles means measured results

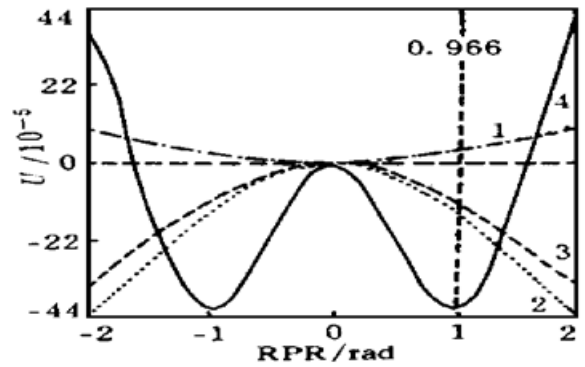


Fig. 5 The curve of $U \times 10^5$ vs. Δ ($I = 120 \text{ A}$, $b = 20 \text{ cm}$), 1: $\Delta_B \neq 0$, 2: $\Delta_C \neq 0$, 3: $\Delta_D \neq 0$, 4: $\Delta_B = \Delta_C = \Delta_D$

20 cm, $I = 120 \text{ A}$, $\Delta = -2 \sim 2 \text{ rad}$ 时, 得到当反射相移只存在于某反射面及同时存在于三个反射面时测量结果 U 与反射相移 Δ 的关系曲线(见图 5)。可见当反射相移存在于不同反射面时, 对测量结果的影响是不同的; 当三个面的反射相移均为 $\Delta = 0.966 \text{ rad}$ 时, 垂直外电流对测量结果的影响最大, 与 20.9 A 的内部电流产生的结果等效。当反射相移较小时, 外电流的影响也较小。

4.2 平行外电流及恒向磁场的影响

与 § 3.2 相同, 设平行电流沿 x 轴(或恒向磁场沿 y 轴)方向, 在 BC 、 DA 两光臂中产生的法拉第旋转角相反, 分别为 Φ 和 $-\Phi$ 。利用 $T(0)$ 为单位矩阵, (9) 式可以写作

$$E_{out} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp [i(\delta_{SD} + \delta_{SC} + \delta_{SB})] T(-\Phi) \begin{bmatrix} \exp [i(\Delta_B + \Delta_C)] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi) \begin{bmatrix} \exp (i\Delta_B) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

同样可以得到测量结果 U 为

$$U = \{ \sin \Delta_B \sin (\Delta_C + \Delta_D) + [1 - \cos (\Delta_C + \Delta_D)] \cos \Delta_B \cos (2\Phi) \} \sin (2\Phi) \quad (18)$$

当 Φ 很小时, 上式近似为

$$U = [\cos \Delta_B - \cos (\Delta_C + \Delta_D)] \sin (2\Phi) \quad (19)$$

可见, 测量结果 U 同样受平行外电流或恒向磁场的影响, 但三个面的反射相移所带来的影响不同。

5 总结与讨论

从理论分析及实验结果可以看出, 如果在光线反射处存在反射相移, 外磁场将对玻璃电流传感器的测量结果产生影响, 从而使该传感器的抗电磁干扰能力下降。

在实际应用中, 尤其是在大电流测量场合(如变电站等), 常有外部电流与被测内部电流相距不远的情况, 这时如果传感器的反射面存在反射相移, 测量结果会受到外部电流磁场的影响。

因此, 在设计、加工玻璃电流传感器时, 应尽量提高设计和加工精度, 减小反射相移。如采用“双正交反射”方法时, 应提高各反射面角度的加工精度; 对于“准双正交反射”, 则应从设计方案上加以改进, 以避免出现反射相移; 在“保偏膜反射”法的使用中, 镀膜精度是决定反射相移大小的主要因素; 在“临界角反射”和以上三种方案的使用中, 光线入射玻璃传感器的角度如果发生偏差, 则会在各个反射面均引起反射相移, 因此在使用玻璃电流传感器时仔

细调整入射角是十分重要的。另外,由图 5 可知,当只在某一反射面上存在反射相移时,可以通过调整传感器的方位来减小外部电流的影响。

总之,为避免外磁场的影响,首先应致力于从理论设计到制作加工传感器的各个环节上消除反射相移;如不能完全消除反射相移,则应正确估计其影响,在测量结果中加以分析。

参 考 文 献

- [1] A. J. Rogers, Optical-fibre current measurement. *Int. J. Optoelectron.*, 1988, **3**(5) : 391~ 407
- [2] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson, Miniature Faraday current sensor based on multiple critical angle reflections in a bulk-optic ring. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24) : 1996~ 1998
- [3] T. Sato, G. Takahashi, Y. Inui, Method and apparatus for optically measuring a current. *European Patent* 0088419 A1
- [4] 王政平, 孙伟民, Y. N. Ning 等, 一种新型多环光路光学电流传感器的研究. *光子学报*, 1996, **25**(9) : 831~ 835
- [5] K. B. Rochford, A. H. Rose, M. N. Deeter *et al.*, Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product. *Proc. SPIE*, 1994, **2360** : 32~ 35

Influence of Reflection-Induced Phase Retardation Upon the Immunity to Electromagnetic Interference of Bulk-Glass Optic-Current Sensors

Sun Weimin Wang Zhengping Huang Zongjun

Kang Cong Ruan Shunling

(*Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001*)

Y. N. Ning A. W. Palmer K. T. V. Grattan

(*Department of E. E. I. E., City University, London, EC1V 0HB, U.K.*)

(Received 7 July 1997; revised 4 October 1997)

Abstract Reflection-induced phase retardation (RPR) on light-turning points of bulk-glass optic-current sensors would influence the immunity to electromagnetic interference of the sensors. The theoretic analysis, results of numerical simulation and experiments are presented.

Key words optic-current sensor (OCS), reflection-induced phase retardation, electromagnetic interference (EMI).