

# 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

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

罗耀华

(哈尔滨工程大学自动控制系, 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, 如果在光线反射转向时在光的  $p$ 、 $s$  分量之间引入反射相差, 则会降低传感器的测量灵敏度和稳定性。本文对这种影响进行了理论上的分析, 并给出了数值模拟的结果。

**关键词** 玻璃电流传感器, 反射相差, 灵敏度。

## 1 引 言

为克服光纤电流传感器所固有的线性双折射, 人们采用了块状玻璃作为光电流传感器的传感元件<sup>[1~4]</sup>。但这种传感器要求在光线转向处时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: “临界角反射”<sup>[1]</sup>、“双正交反射”<sup>[2]</sup>、“准双正交反射”<sup>[3]</sup>、“保偏膜反射”<sup>[4]</sup>等等。但无论何种方法, 都会由于传感器设计的不完善、保偏膜镀制工艺误差、光线入射角度的微小偏差或反射面角度加工精度不足等原因, 在反射时光的  $p$ 、 $s$  分量的相位延迟引入差值(下称反射相差), 从而改变了入射光的偏振态, 降低了传感器的测量灵敏度和稳定性。本文对这种影响进行了理论和数值上的分析。

## 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, 如图 1 所示, 上述的“双正交反射”、“准双正交反射”、“保偏膜反射”等均可简化为此模型。以偏振方向为  $45^\circ$  的入射线偏光从  $A$  点入射该玻璃传感器, 在  $B$ 、 $C$ 、 $D$  点传播方向改变  $90^\circ$ , 然后再由  $E$  点离开该传感器。 $AE$  两点距离很近, 可以近似认为光在传感器中构成闭合回路, 电流垂直穿过该闭合回路。对于“双正交反射”和“准双正交反射”, 本文将一对互补反射当作一次复合反射(下文中将光线转向简称为

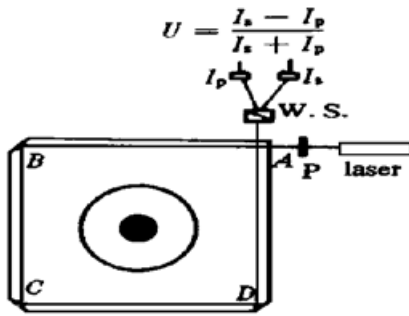


Fig. 1 The schema of square-glass optic-current measuring system

反射)。当光在传感器中传播并构成闭合回路时，该系统的测量结果为

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

式中  $I_p$ 、 $I_s$  为出射光 p、s 分量的强度， $\Phi$  为法拉第旋转角， $V$  为光学玻璃费尔德常数， $I$  为穿过该传感器内部的电流，在电流  $I$  不很大时(小于 3000 A)，测量结果  $U$  与电流  $I$  成正比。上式中测量结果  $U$  与电流在回路内的具体位置无关，但此式成立的前提是光在构成闭合回路时，在各次反射时偏振态不发生改变。

如果光在反射时偏振态发生变化，在光的 p、s 分量间引入位相延迟差——反射相差，则测量结果  $U$  会受到影响。

### 3 法拉第旋转角 $\Phi$ 与电流 $I$ 的关系

为便于理论分析及数值计算，令电流沿  $z$  轴的正向传输，并将一尺寸为  $2a \times 2a$  ( $a = 4$  cm) 的方形玻璃传感器平放在  $xoy$  平面内，中心坐标为  $(b, c)$  ( $b, c < a$ ) 如图 2 所示。考虑到磁场强度  $H$  的大小和方向后，可以将其写成矢量式

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2\pi R} (\mathbf{k} \times \frac{\mathbf{R}}{R}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\mathbf{k} \times (x\mathbf{i} + y\mathbf{j})}{x^2 + y^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{x\mathbf{j} - y\mathbf{i}}{x^2 + y^2} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{R} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$  为场点的矢径，则当光传播  $d\mathbf{L} = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j}$  后，引起的偏振面旋转为

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

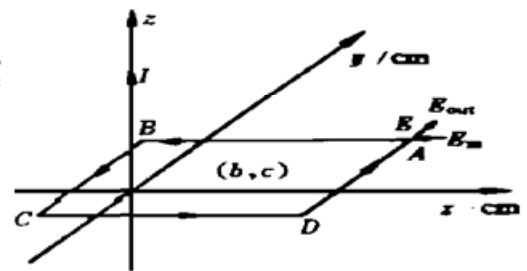


Fig. 2 The schema of a Cartesian coordinate system

这样，可以通过积分求出在各光臂中偏振面的旋转角  $\Phi$ ：

$$\begin{aligned} \Phi_{AB} &= \int_A^B d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{b+a}^{b-a} \frac{-(c+a)dx}{x^2 + (c+a)^2} = \frac{VI}{2\pi} (\arctan \frac{b+a}{c+a} - \arctan \frac{b-a}{c+a}) \\ \Phi_{BC} &= \int_B^C d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{c+a}^{c-a} \frac{(b-a)dy}{(b-a)^2 + y^2} = \frac{VI}{2\pi} (\arctan \frac{c-a}{b-a} - \arctan \frac{c+a}{b-a}) \\ \Phi_{CD} &= \int_C^D d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{b-a}^{b+a} \frac{(c-a)dx}{x^2 + (c-a)^2} = \frac{VI}{2\pi} (\arctan \frac{b-a}{c-a} - \arctan \frac{b+a}{c-a}) \\ \Phi_{DA} &= \int_D^A d\Phi = \frac{VI}{2\pi} \int_{c-a}^{c+a} \frac{(b+a)dy}{(b+a)^2 + y^2} = \frac{VI}{2\pi} (\arctan \frac{c+a}{b+a} - \arctan \frac{c-a}{b+a}) \end{aligned} \quad (4)$$

利用关系式

$$\arctan \alpha + \arctan 1/\alpha = \begin{cases} \pi/2 & (\alpha > 0) \\ -\pi/2 & (\alpha < 0) \end{cases} \quad (5)$$

在不考虑反射相差时，可以得到光在完成闭合回路后四条光臂的总的旋转角为

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{AB} + \Phi_{BC} + \Phi_{CD} + \Phi_{DA} = VI \quad (6)$$

可见, 总的旋转角  $\Phi$  仅受电流  $I$  影响, 这符合安培环路定理。

#### 4 测量结果 $U$ 受反射相差的影响

虽然总的法拉第旋转角  $\Phi$  不受反射相差影响, 但若在反射时存在反射相差, 光的偏振态在传输过程中会发生变化, 从而会影响测量结果  $U$ 。光振幅为  $E_0$  的  $45^\circ$  的线偏光的光矢量为

$$E_{\text{in}} = E_0 \begin{bmatrix} \cos 45^\circ \\ \sin 45^\circ \end{bmatrix} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

考虑在三次反射均为全反射, 则  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三处的反射矩阵为

$$R_V = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_{pV}) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_{sV}) \end{bmatrix} = \exp(i\delta_{sV}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_V) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad V = B, C, D \quad (8)$$

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

$$T(\Phi_u) = \begin{bmatrix} \cos \Phi_u & -\sin \Phi_u \\ \sin \Phi_u & \cos \Phi_u \end{bmatrix}, \quad u = AB, BC, CD, DA \quad (9)$$

由(7)式~(9)式可得出射光矢量为

$$E_{\text{out}} = T(\Phi_{DA})R_D T(\Phi_{CD})R_C T(\Phi_{BC})R_B T(\Phi_{AB})E_{\text{in}} \quad (10)$$

一般有两种情况经常出现, 一种是仅有一个表面由于加工等问题引入反射相差, 另一种是由于保偏手段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差。下面就这两种情况分别讨论反射相差对测量结果的影响。

##### 1) 仅有 $B$ 面不保偏

在这种情况下,  $C$ 、 $D$  两面为理想保偏反射面, 其反射矩阵为一常数乘以一单位矩阵;  $B$  面反射相差设为  $\Delta_B$ 。利用  $T(\Phi_1)T(\Phi_2) = T(\Phi_1 + \Phi_2)$ , 出射光矢量化为

$$E_{\text{out}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\delta_{sD} + \delta_{sC} + \delta_{sB})] T(\Phi_{DA} + \Phi_{CD} + \Phi_{BC}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_B) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

##### 2) 仅有 $C$ 面不保偏

$$E_{\text{out}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\delta_{sD} + \delta_{sC} + \delta_{sB})] T(\Phi_{DA} + \Phi_{CD}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_C) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{BC} + \Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

##### 3) 仅有 $D$ 面不保偏

$$E_{\text{out}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp[i(\delta_{sD} + \delta_{sC} + \delta_{sB})] T(\Phi_{DA}) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta_D) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_{CD} + \Phi_{BC} + \Phi_{AB}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

这三种情况的出射光矢量可以统一写作

$$E_{\text{out}} = K T(\Phi_2) \begin{bmatrix} \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} T(\Phi_1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \cos \Phi_2(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) - \sin \Phi_2(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1) \\ \sin \Phi_2(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \cos \Phi_2(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中  $K$  为复系数, 则光的  $p$ 、 $s$  分量的振幅为

$$\begin{aligned} E_p &= K [\cos \Phi_2(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) - \sin \Phi_2(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1)] \\ E_s &= K [\sin \Phi_2(\cos \Phi_1 - \sin \Phi_1) \exp(i\Delta) + \cos \Phi_2(\cos \Phi_1 + \sin \Phi_1)] \end{aligned} \quad (15)$$

强度为

$$\begin{aligned} I_p &= |E_p|^2 = |K|^2(1 - \sin 2\Phi_1 \cos 2\Phi_2 - \cos 2\Phi_1 \sin 2\Phi_2 \cos \Delta) \\ I_s &= |E_s|^2 = |K|^2(1 + \sin 2\Phi_1 \cos 2\Phi_2 + \cos 2\Phi_1 \sin 2\Phi_2 \cos \Delta) \end{aligned} \quad (16)$$

测量结果  $U$  为

$$\begin{aligned} U &= \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} = \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta) \sin 2(\Phi_1 + \Phi_2) + \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta) \sin 2(\Phi_1 - \Phi_2) = \\ &= \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta) \sin (2VI) + \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta) \sin 2(\Phi_1 - \Phi_2) \end{aligned} \quad (17)$$

4) 三个面具有相同的反射相差

这种情况相当复杂, 当电流恰好穿过闭合回路的中心时, 测量结果  $U$  为<sup>[4]</sup>

$$U = \frac{1}{4}(1 + \cos \Delta + \cos 2\Delta + \cos 3\Delta) \sin (2VI) \quad (18)$$

而对电流不穿过传感器回路中心的情况, 将采用数值计算的方法进行讨论。(17)和(18)式表明, 若反射相差为零, 测量结果与(1)式的理想情况相同。

## 5 数值结果与讨论

本文选择  $V = 2 \times 10^{-5}$  (rad/A) 的玻璃传感器作为研究对象, 利用数值计算的方法对光电流测量系统进行了仿真。

### 5.1 电流流过传感器中心时反射相差的影响

在这种情况下  $(b, c) = (0, 0)$ , 由(18)式可知在电流不很大时, 即使存在反射相差, 测量结果  $U$  仍然与  $I$  成比例, 但灵敏度下降。为详细讨论灵敏度

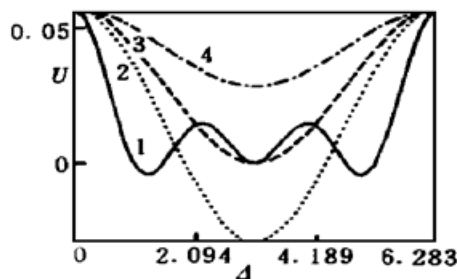


Fig. 3 The curve of  $U$  vs.  $\Delta$  when the current is located at the center of sensing head ( $I = 1500$  A).  
1:  $\Delta_b = \Delta_c = \Delta_d$ , 2:  $\Delta_b = 0$ ,  
3:  $\Delta_c = 0$ , 4:  $\Delta_d = 0$

随反射相差  $\Delta$  的变化, 下面给出在  $I = 1500$  A 的情况下, 测量结果  $U$  随  $\Delta$  的变化曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知, 灵敏度在  $\Delta = 0$  时最大, 在  $\Delta$  接近 0 时灵敏度变化不大; 但在  $\Delta$  超过一定限度后, 灵敏度明显下降。对三个面反射相差相等的情况, 当  $\Delta = \pi/3$  时灵敏度降为 0, 当  $\Delta$  继续增加时, 灵敏度又有所增加, 但此时  $U$  变为负值(对交流电  $U$  的符号没有绝对意义); 当  $\Delta = \pi/2$  时, 灵敏度又降为零。值得注意的是, 当反射相差为  $\pi/3$ , 三次反射相差之和为  $\pi$  时, 如入射光为线偏光, 出射光仍为线偏光, 但实际上此时的测量灵敏度却降为零。

对反射相差只出现于一个反射面的情况, 三个反射面对应的  $U-\Delta$  曲线形状近似, 但程度不同, 如反射相差存在于第一反射面影响较大。

### 5.2 电流位于传感头内不同位置的影响

由(17)式可以看出, 当电流位于传感头内不同位置时, 由于空间磁场分布会发生改变, 进而影响各条光臂的法拉第旋转角  $\Phi$ , 从而得到不同的测量结果  $U$ 。本文利用数值计算的方法得到了当三个反射面具有相同的反射相差  $\Delta = 0.1$  rad 和  $1.1$  rad 时, 对  $I = 1500$  A 的被测电流该传感器的测量结果, 如图 4 所示。图 4 中所标记的数值为实际测量结果的 100 倍。

在仿真过程中, 电流  $I$  保持沿  $z$  轴正向流动, 传感器中心坐标  $(b, c)$  在  $[-3, 3]$  范围内平移, 从而改变垂直电流和传感器回路的相对位置, 得到  $I = 1500$  A 时不同相对位置下的测量

结果图如图 4 所示。图中横纵坐标表示电流在闭合回路内所处的不同位置, 各条曲线为不同相对位置下的不同测量结果的等值线。可见, 对于  $\delta = 0.1 \text{ rad}$  的传感器, 电流位置的不同所带来的影响较小; 而对于  $\Delta = 1.1 \text{ rad}$  的传感器, 当电流位于传感器中部时, 灵敏度为零, 而当电流移到传感器边缘时, 灵敏度明显增高。因而当载波导线位置发生变化或发生振动时, 反射相差越大, 测量结果受到影响越大, 对测量结果的稳定性的损害越大。

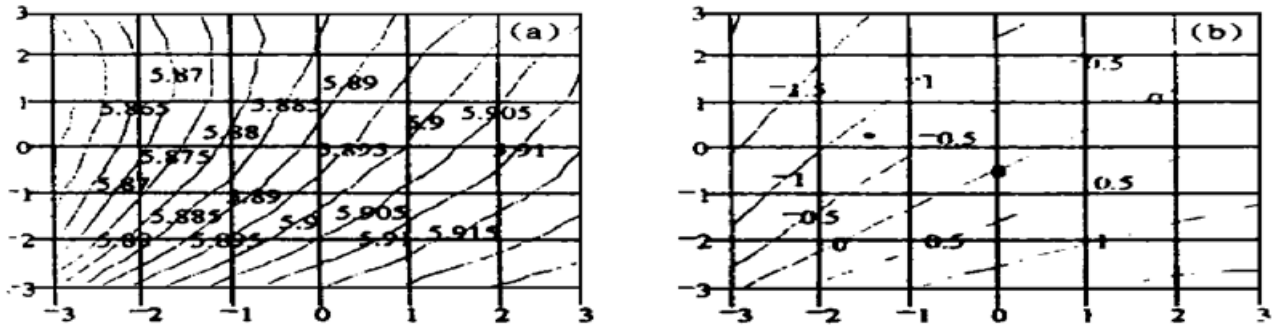


Fig. 4 The influence of the current location upon the sensitivity ( $I = 1500 \text{ A}$ ). (a) Relative phase retardation is  $0.1 \text{ rad}$ , (b) Relative phase retardation is  $1.1 \text{ rad}$

**总 结** 由以上讨论可知, 在制作玻璃头电流传感器时, 需要尽可能地减小反射相差, 避免检测灵敏度的下降和测量结果稳定性的降低。

### 参 考 文 献

- [1] 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
- [2] T. Sato, G. Takahashi, Y. Inui, Method and apparatus for optically measuring a current. *European Patent*, 0088419 A1, September 1983.
- [3] 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
- [4] 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

## The Influence of Reflection-Induced Phase Retardation upon Sensitivity of Bulk-Glass Optic-Current Sensors

Kang Chong Sun Weimin Wang Zhengping Huang Zongjun Ruan Shunling  
(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Luo Yaohua

(Auto-control Department, 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 19 September 1997; revised 17 November 1997)

**Abstract** The reflection-induced phase retardation between p- and s-components of reflected light can reduce the sensitivity and stability of bulk-glass optic-current sensors. The influence of the reflection-induced phase retardation is theoretically analyzed and the results of numerical simulation are given.

**Key words** bulk-glass optic-current sensor, reflection-induced phase retardation, sensitivity.