

偏振调制型导波光学传感器光路误差分析

蒙文, 李云霞, 赵尚弘

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:对一种典型的用光学玻璃作探测头的光学电流传感器光路进行分析计算,探讨了影响测量的一些因素。分析计算和试验结果都表明光学玻璃探测头的面型加工误差引起的线性双折射及光学元件的装配误差对探测器灵敏度和测量精度都有直接的影响。

关键词:光学电流传感器;法拉第磁光效应;全反射;线性双折射

中图分类号:TP212.14 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)04-0073-03

光学电流传感器是利用光学技术直接或间接对电流换能或测量,从而实现对电流传感的装置,它所利用的物理效应主要有法拉第(Faraday)磁光效应和磁致伸缩效应^[1,4]。从1976年提出利用光纤做光学电流传感器开始,许多光学电流传感器的新技术、新方法、新方案不断出现,但真正实用化的产品仍很少,主要原因是一些影响检测灵敏度和可靠性的因素一直无法彻底消除^[3]。目前比较有使用价值的光学电流传感器采用光学玻璃作探测头,使用具有较高菲尔德(Verdet)常数的整块光学玻璃,并对玻璃进行退火处理,使其内在的线性双折射极小,从而克服了光纤光学电流传感器线性双折射导致的光波偏振态退化的问题^[1,2]。但仍有一些因素对检测结果有影响,本文对一种典型的光学电流传感器的光路进行分析计算,探讨影响测量的一些因素。

1 光学电流传感器的测量原理和光路结构

根据Faraday磁光效应,在被测电流产生的磁场作用下,光学介质中沿磁场方向传播的线偏振光的偏振方向将发生变化,偏振角的变化 $\theta = \int_L VHdl$,式中 V 为Verdet常数, H 为磁场强度, L 为光线走过的路径。当介质中的光路形成围绕载流导线的闭合环路时, $\theta = \oint VHdl$ 。此时,根据安培环路定理,通过介质并环绕载流导线的线偏振光的偏振角的变化与光束所围电流大小成正比,即 $\theta = VKI$, K 为比例系数, I 为电流强度,这是Faraday磁光效应光学电流传感器的理论基础。需要指出的是,只有线偏振光的偏振态能保持不受磁场外的外界条件影响时,理论才能成立^[5]。

常用的测量Faraday型光学电流传感器输出线偏光偏转角的方法是正交偏振测量法^[1],即用Wollaston棱镜做检偏器,线偏光经过电流传感元件输出后,被Wollaston棱镜分成两束偏振态互相垂直的线偏光,两束光的强度被分别检测出来并进行如下运算:

$$S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$$

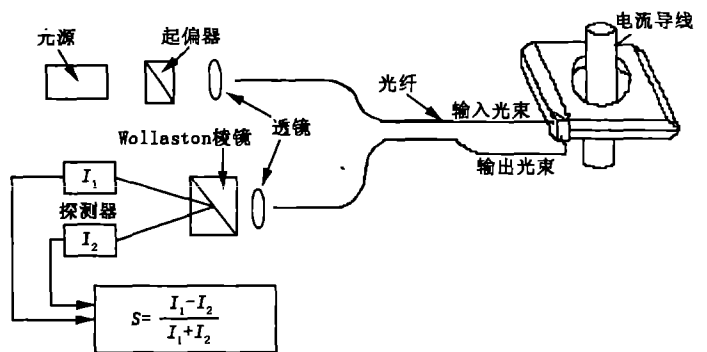


图1 光学电流传感器结构图

运算:

当 Wollaston 棱镜的偏振方向与起偏器的偏振方向夹角为 45° 时, $S = \sin 2\theta$, 当 θ 较小时, $S \approx 2\theta$, 即输出信号与偏转角 θ 近似成正比, 从而有输出信号与被测电流成正比。本系统即采用此方法, 具体结构如图 1 所示。

2 典型光路的分析计算

该结构用经退火处理的光学玻璃做传感头, 最大限度地避免了线性双折射引起的偏振光偏振态退化的问题, 但由于光束需要在探头内形成围绕载流导体的闭合光路, 因而不可避免的要采用全反射, 由此又引起了所谓“由全反射导致的位相差”的问题。为解决该问题, 通常采用双正交反射法进行相位补偿, 即在方玻璃的每个角进行两次全反射, 两个全反射面互相垂直, 从而使垂直于全反射界面和平行于全反射界面的偏振分量的相位差为零。

线偏光经光学玻璃传感头, 由 Wollaston 棱镜输出的过程可用 Jones 矩阵来描述。设输入光场电场分量为 E_{in} , 输出为 E_{out} , 根据矩阵光学理论, 有电流通过导体即有 Faraday 旋光效应时,

$$E_{out} = W(\varphi) F_4 R_s R_p F_3 R_s R_p F_2 R_s R_p F_1 E_{in}$$

式中 $W(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix}$ 为 Wollaston 棱镜的变换矩阵, φ 为与起偏器偏振方向的夹

角。 $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$ 为 Faraday 旋光效应的变换矩阵, Ω 为被测电流产生的磁场引起的偏振光的偏振方向的变化值。 $R_s = \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix}$, $R_p = \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix}$ 为垂直于全反射界面的偏振分量和平行于全反射界面的偏振分量的全反射变换矩阵, $r_s = \exp(i\delta_s)$ 是 s 方向偏振分量的反射系数, δ_s 为 s 方向反射引起的相位差, $r_p = \exp(i\delta_p)$ 是 p 方向偏振分量的反射系数, δ_p 为 p 方向反射引起的相位差。由于在每个角的两全反射入射角相同, 全反射面互相垂直, 所以在理想情况下, $\delta_s + \delta_p = 0$ 。

设起偏器输出的线偏振光为 X 方向的偏振光, 则 $E_{in} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, 代入(1)式得:

$$E_{out} = \frac{A_0}{2} \begin{pmatrix} \cos \theta + \cos(2\varphi + \theta) \\ \sin \theta + \sin(2\varphi + \theta) \end{pmatrix}, \text{ 式中 } A_0 \text{ 为振幅系数, } \theta = 4\Omega。$$

由 Wollaston 棱镜输出的两束光的强度分别为

$$I_1 = \frac{A_0^2}{4} [\cos^2 \theta + \cos^2(2\varphi + \theta) + 2\cos \theta \cos(2\varphi + \theta)]$$

$$I_2 = \frac{A_0^2}{4} [\sin^2 \theta + \sin^2(2\varphi - \theta) + 2\sin \theta \sin(2\varphi + \theta)]$$

$$\text{当 } \varphi = 45^\circ \text{ 时, } I_1 = \frac{A_0^2}{4} [1 - \sin 2\theta] \quad I_2 = \frac{A_0^2}{4} [1 + \sin 2\theta]$$

$$S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) = \sin 2\theta$$

以上是理想情况下的结论。在实际应用中有些因素(如双反射法进行相位补偿时产生的误差及起偏方向与检偏方向 45° 角调整误差等)会对偏振光束的输出产生影响, 最终影响传感器的检测灵敏度和系统的可靠性。

2.1 双正交反射法进行相位补偿时产生的误差

根据菲涅尔公式, 在全反射时, 反射光中 S 分量、 P 分量相对入射光场的相位变化由下式给出^[5]

$$\text{tg } \frac{\delta_s}{2} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \text{tg } \frac{\delta_p}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2 2\theta_i - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}{\cos \theta_i}$$

δ_s 为 s 方向全反射引起的相位变化, δ_p 为 p 方向全反射引起的相位变化, θ_i 为光的人射角, n_1 、 n_2 为两介质的折射率。可见, δ_s 、 δ_p 与人射角 θ_i 直接相关。如果双正交反射的两个全反射面的人射角度不一致或两个全反射面不完全垂直, 在这种情况下, $\delta_s + \delta_p \neq 0$, 即全反射引起的相位差不能完全消除, 产生的结果与光纤中的线性双折射一样, 使线偏振光变成了椭圆偏振光(如图 2 所示)。令 $\delta_s + \delta_p = \delta$, 则:

$$E_{out} = \frac{A_0}{2} \begin{pmatrix} \cos \theta + \cos(2\varphi + \theta) \\ \sin \theta + \sin(2\varphi + \theta) \end{pmatrix} e^{i\delta}$$

当 $\varphi = 45^\circ$, θ 角较小时:

$$I_1 \approx \frac{A_0^2}{4} [1 - (2\theta \sin \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2} / \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2})]$$

$$I_2 \approx \frac{A_0^2}{4} [1 + (2\theta \sin \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2} / \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2})]$$

$$S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) = 2\theta \sin \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2} / \sqrt{\delta^2 + 4\theta^2}$$

显然, S 与 θ 的线性关系已经变坏, 对测量结果会带来一些影响。由于对玻璃面型的加工误差不可避免, 全反射引起的相位差 δ 也不能完全消除。

2.2 起偏方向与检偏方向 45° 角调整误差的影响

起偏方向与检偏方向的 45° 角调整在实验室中实现起来似乎很容易, 而在做成实际应用的产品时, 由于结构设计、调整方法以及其他方面的一些原因, 往往会出现人为的调整误差即 $\varphi \neq 45^\circ$, 此时令 $\varphi + \Delta = 45^\circ$,

$$\text{则 } E_{out} = \frac{A_0}{2} = \begin{pmatrix} \cos \theta + \cos(90^\circ - 2\Delta + \theta) \\ \sin \theta + \sin(90^\circ - 2\Delta - \theta) \end{pmatrix} = \frac{A_0}{2} = \begin{pmatrix} \cos \theta + \sin(2\Delta + \theta) \\ \sin \theta + \cos(2\Delta - \theta) \end{pmatrix}$$

$$I_1 = \frac{A_0}{2} = [\cos^2 \theta + \sin^2(2\Delta - \theta) + \cos \theta \sin(2\Delta - \theta)]$$

$$I_2 = \frac{A_0}{2} = [\sin^2 \theta + \cos^2(2\Delta - \theta) + \sin \theta \cos(2\Delta - \theta)]$$

显然, 此时 $S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$ 的函数关系已经与理想情况下相差很大。因此在实际应用中, 光路调整安装的一些细节也不能忽视。

3 试验结果

用波长为 650 nm 的半导体激光器做光源, 用多股直导线加上同方向电流模拟被测大电流, 人为使两个全反射面的入射角度不一致或两个全反射面不垂直, 在相位差 δ 不同的情况下测得被测参量 S 间的关系如图 3 所示。由图可见相位差 δ 的引入使 S 减小, 从而影响系统的测量灵敏度和精度。

人为使起偏方向与检偏方向的 45° 角调整出现误差, 测得实际电流值和被测参量 S 间的关系如图 4 所示。可以看出, 起偏方向与检偏方向的 45° 角调整出现误差使系统测量线性度变差, 外加电流与被测参量 S 已经不再是正比例关系, 这将直接影响系统的测量精度。

4 结论

光学电流传感器光路结构并不复杂, 但是在实际应用过程中仍然有一些因素必须认真对待, 以上分析的两种影响光学电流传感器测量的因素中, 起偏方向与检偏方向的 45° 角调整误差是可以基本消除的, 而双正交反射的两个全反射面的入射角度不一致或两个全反射面不完全垂直带来的相位补偿误差则只能通过提高元件的加工精度来尽量减小。

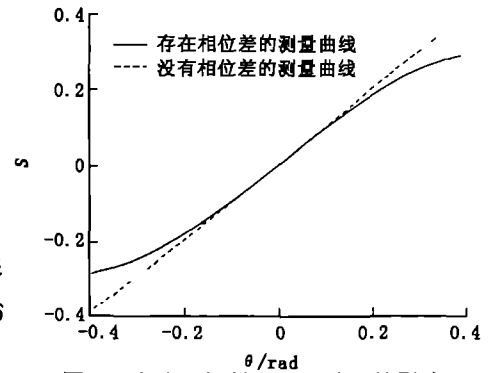


图2 线性双折射对测量结果的影响

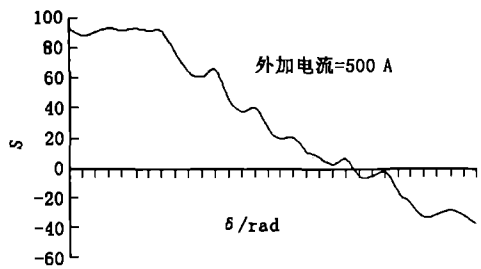


图3 相位差 δ 与 S 的关系曲线

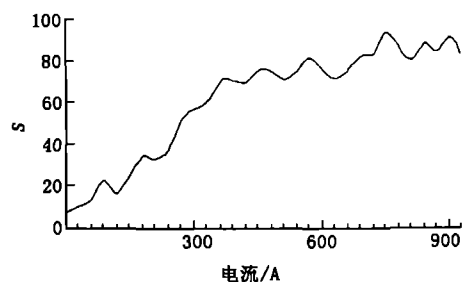


图4 电流 S 的关系曲线