

光学电流传感器传感头的研究*

李红斌

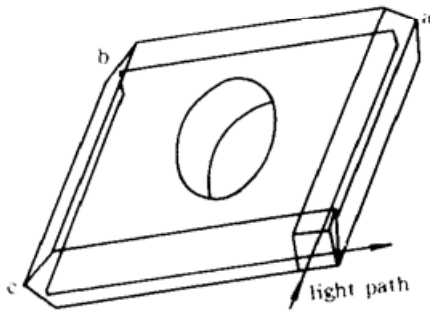
(武汉城市建设学院基础科学系, 武汉 430074)

摘 要 设计了一种光路全闭合的光学电流传感头, 推导出传感头双折射和被测量关系的解析式, 得出了若干重要的结论, 给出了实验结果。此传感头已在 110 kV 变电站投入试运行。

关键词 法拉第效应, 电流互感器, 光学玻璃, 双折射。

1 引 言

基于法拉第效应的电流传感器一直是人们努力研究的对象。其中用光学玻璃制成的块状



双层光路传感头结构, 更是研究的重点^[1,2], 如图 1 所示。此种结构的传感头与以前的结构^[5]相比, 虽然有了一定的改进, 但仍存在以下缺点: 1) 基于法拉第效应的电流传感器在其原理推导过程中应用了全电流定律, 因而要求光路尽可能围绕载流导体全闭合以减少导体位置变化及外界磁场的影响, 提高测量精度。但在图 1 所示的这种结构中, 光从双层光路的下层入射进传感头, 然后从上层出射, 显然光路不是完全闭合的。一般这种传感头是长方体形状, 文献[1]提供的外形尺寸

为 $98 \times 98 \times 33$ mm, 其光路总长约为 441.5 mm, 而光出射时不闭合长度为 $33 \text{ mm}/2$ (即 16.5 mm), 不闭合程度占总光路

长的 3.7%, 因而使得测量易受传感头中心孔中导体的位置变化影响, 并易受另外二相电流产生的磁场影响, 从而降低整个电流传感器的精度; 2) 从图 1 的结构分析, 一般须在进光和出光面胶合一小块材料, 使得光束能正入射进入及透射出传感头。这导致光在绕导体一周时两次通过胶合面。由于胶合面用的光学胶的折射率与材料的折射率差异较大, 因而在胶合面上会产生光反射损耗。

2 传感头结构的改进

根据以上分析, 作者设计了一种光路闭合、损耗小, 保偏性好且可靠性较高的光学传感头以满足测量电流精度要求, 如图 2 所示。

* 国家“八五”攻关计划资助项目。

收稿日期: 1996 年 1 月 15 日; 收到修改稿日期: 1996 年 7 月 17 日

从光路上看,它具有的优点是:

1) 光束在 C 角处,向下反射,然后出射,这样入射及出射光同在下层传播,其光路的不闭合程度与图 1 所示的结构相比,可大为改善。在作者制作的一个外形尺寸为 70×70×24 mm 的传感头中,其入射与出射光的不闭合程度仅为 0.6% 左右,因而基本上可认为是闭合光路,测量不受导体位置变化及外界磁场的影响,这已被实验证实。

2) 作者设计的这种传感头由于在各个反射面的形状上作了较大的改进,加工较以前更为简单,且可以直接由一整块材料制成,显然这不仅减少了传感头的光损耗,更重要的,使得传感头的可靠性大大提高。

3) 该传感头是采用几何补偿法^[5]的原理消除光全反射引起的位相差变化,因而仍具有保偏性好的优点。

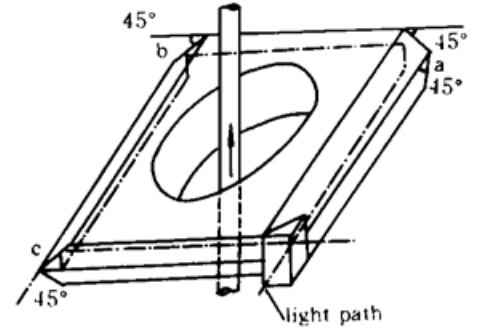


Fig. 2 Diagram of improved double optical path sensing probe

3 双折射对测量的影响分析

当光学玻璃中存在固有双折射或由于外界干扰而引起双折射时,描述传感头中第 n 个臂的法拉第效应的琼斯矩阵为:

$$F(\varphi_n) = \begin{bmatrix} A_n & -B_n \\ B_n & A_n^* \end{bmatrix}$$

式中: $A_n = \cos(\Delta_n/2) + j \cos(x_n) \sin(\Delta_n/2)$, $B_n = \sin(x_n) \sin(\Delta_n/2)$,

$$(\Delta_n/2)^2 = (\delta/2)^2 + (\varphi_n)^2, \sin x_n = 2\varphi_n/\Delta_n, \cos x_n = \delta/\Delta_n$$

其中: φ_n 为第 n 个臂的法拉第效应引起的偏振面旋转角, δ 是由于该臂中的线性双折射而引入的相位延迟,这种相位延迟将使得输入线偏光变成椭圆偏光,造成测量灵敏度变化,从而影响测量。此时最终输出光强 $I = 1/2[1 - 2\varphi_n(\sin\Delta_n/\Delta_n)]$,与理想状况 $I = 1/2(1 - \sin 2\varphi_n)$ 相比较,在 $2\varphi_n$ 的前面多了 $\sin\Delta_n/\Delta_n$ 的系数,当 $\delta \ll \varphi_n$ 时, $\Delta_n \approx 2\varphi_n$, $I = 1/2(1 - \sin 2\varphi_n)$,回到理想状况。当 $\delta \gg \varphi_n$ 时, $\Delta_n \approx \delta$, 则 $I = 1/2[1 - 2\varphi_n(\sin\delta/\delta)]$,由此看出 δ 的存在不仅将降低探测灵敏度,而且由于 δ 的大小可随外界因素变化,从而造成了输出的不稳定。

在以前的文献中,没有定量分析及讨论过四角状双层光路传感头结构中四臂存在双折射时,双折射对测量的影响。作者对此种结构的传感头进行了理论分析并得到了表征双折射与测量两者关系的明确的解析式。

为分析方便,假设 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi$ 这也是对实际情况的合理简化,则

$$F(\varphi) = F(\varphi_2) = F(\varphi_3) = F(\varphi_4) = F(\varphi) = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}$$

式中: $A = \cos(\Delta/2) + j \cos x \sin(\Delta/2)$; $B = \sin x \sin(\Delta/2)$; $(\Delta/2)^2 = (\delta/2)^2 + \varphi^2$; $\sin x = (2\varphi/\Delta)$; $\cos x = (\delta/\Delta)$ 。将入射线偏振光的偏振方向取为 y 轴,其归一化的琼斯矢量 $E_i =$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

此时,传感头输出为

$$E_i = FRFRFRFRFE_i = \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 是各个反射角处的全反射矩阵。展开(1)式可得

$$E_{ix} = -B[A(A^2 - B^2) + B(-AB - BA^*)] + A^*[-B(A^2 - B^2) + A^*(-AB - BA^*)]$$

$$E_{iy} = -B\{A(AB + A^*B) + B[-B^2 + (A^*)^2]\} + A^*\{-B(AB + A^*B) + A^*[-B^2 + (A^*)^2]\}$$

整理后可得

$$E_{ix} = -B(A + A^*)[(A^*)^2 + A^2 - 2B^2]$$

$$E_{iy} = -B(A + A^*)^2 + (A^*)^4 - 2(A^*)^2B^2 + B^4$$

当检偏器与起偏器的透射轴成 45° 时, 检偏器的输出电场为 $E = (E_{ix} + E_{iy})/\sqrt{2}$, 代入 A, B, A^* 的值, 并整理可得

$$E = 1/\sqrt{2}[(\cos\Delta)^2 - (\sin\Delta)^2 - \sin x \sin 2\Delta - j \cos x \sin 2\Delta]$$

输出光强

$$I = E \cdot E^* = (1/2)(1 - \sin x \sin 4\Delta) = (1/2)[1 - (2\varphi/\Delta) \sin 4\Delta] \quad (2)$$

由此得到了表征四角状传感头的双折射与法拉第旋转角关系的解析式。

当 $\delta = 0$ 时, $\Delta = 2\varphi$, 代入(2)式可得 $I' = (1 - \sin 8\varphi)/2$ 。设 $I' = (1 - \sin 2\theta)/2$, 其中 $\theta = 4\varphi$ 即传感头四臂总的法拉第旋转角, 从而回到了理想状况时四角状传感头的输出关系式。这说明(2)式表征的双折射 δ 与旋转角 φ 的关系是正确的。

比较(2)式与理想状况下传感头输出表达式 I' , 可得到双折射对测量灵敏度影响的相对表达式为(不考虑光强中固定不变部分)

$$\epsilon = \frac{(2\varphi/\Delta) \sin 4\Delta}{\sin 8\varphi} \times 100\% \quad (3)$$

当光学玻璃存在固有双折射 δ' (nm/cm) 时, 对于一个单臂长度 L (cm) 的传感头, 其 $\delta = \delta' L 2\pi/\lambda$ (rad)。

假设 δ' 从 1 nm/cm 变化到 8 nm/cm, L 为 7 cm, 被测电流为 100 A, $\lambda = 850$ nm, 材料的 Verdet 常数为 1.39×10^{-5} rad/A^[3], 则:

$$\varphi = (1/4) V I = 0.3475 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

由于 $\delta' = 1$ nm/cm 时, $\delta = 0.0517439$ rad, 可认为 $\delta \gg \varphi$, 则 $\Delta \approx \delta$; φ 很小时, $\sin 8\varphi \approx 8\varphi$, 代入(3)式可得

$$\epsilon = (\sin 4\delta/4\delta) \times 100\% \quad (4)$$

根据(4)式可得出在被测电流、 L 、 λ 、 V 为定值时, ϵ 随 δ' 的增加而降低的定量关系。例如对于 $I = 100$ A, 通过计算可得, 当 δ' 大于 3 nm/cm 时, ϵ 显著降低; 当 δ' 增大到 8 nm/cm 时, ϵ 降为 60.2%。

对于四角状的传感头, 由于其光程长, 光吸收大, 光斑发散较严重。将它与准直、耦合透镜、起偏、检偏器及光纤粘合在一起构成全光学传感头时, 损耗可达 16 dB 左右, 直接影响测量的分辨率及测量小电流信号(< 100 A)的精度; 如果为了提高到达探测器的光功率而加大光源功率或是为了提高光透过率而提高对各光学器件及工艺的要求, 势必大大提高成本且由于某些国产器件光学性能的限制导致实现困难。从上述推导已经知道光学玻璃的固有双折射对测量灵敏度的提高具有极为重要的作用, 因而可从这方面着手, 着重加强对传感头材料及

加工工艺的研究, 以达到提高测量灵敏度的目的。

当材料受到外界应力及不均匀温度场作用时, 也会产生双折射。由于该因素是变化的且难以预测, 因而它将使得 ϵ 的变化成为一个随机误差, 严重时甚至导致测量结果完全失真。这也是国际上一直未能完全消除双折射对测量影响的重要原因。当已知 ϵ 与 δ 之间的明确关系后, 作者认为可以采用计算机数值计算的方法, 研究不均匀温度场及振动引起的应力对测量的影响, 从而从传感机理上找到解决这一难题的有效方法。

4 实验结果

采用作者设计的传感头结构的光学电流传感器(根据 GB1208-87 《电流互感器》), 已在电力工业部电气设备质量检验测试中心对其进行了实验检测。确定其主要技术指标为: 额定电压: 110 kV; 额定一次电流: 100 A; 二次信号输出: 数字显示; 二次信号输出精度: $I \times 0.2\% \pm 0.1$ (A); 额定动稳定电流: 10 kA。该传感器已于 1993 年 12 月成功地挂上 110 kV 电网试运行^[4], 并于 1994 年 12 月通过电力工业部主持的鉴定。

参 考 文 献

- [1] M. Kanoi, G. Takahashi, T. Sato *et al.*, Optical voltage and current measuring system for electric power systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1986, (1): 91~ 97
- [2] 陈锡坤, 邱静和, 戴来发等, 四角状 ZF-7 玻璃双层光路电流传感头研究. *光学学报*, 1993, 13(6): 532~ 535
- [3] T. D. Maffetone, T. M. McClelland, 345 kV substation optical current measurement system for revenue metering and protective relaying. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1991, 6(4): 1430~ 1437
- [4] 李红斌, 刘延冰, 张卫军等, 用于 110 kV 变电站的光学电流互感器, *华中理工大学学报*, 1995, 23(7): 6~ 10
- [5] 李红斌, 光学电流传感器的研究, 华中理工大学博士学位论文, 1994: 19~ 20

Study on the Sensing Probe of Optical Current Sensor

Li Hongbin

(Department of Basic Science, Wuhan Urban Construction Institute, Wuhan 430074)

(Received 15 January 1996; revised 17 July 1996)

Abstract An optical current sensing probe with completely closed optical path is designed, The formula which shows the relation between birefringence and the measurement are derived. Some important conclusions and experimental results are given. The sensing probe has been test run in a 110 kV substation.

Key words Faraday effect, current transducer, optical glass, birefringence.