

三角形双层光路光学电流 互感器传感头的研究

盛 珑 高 桦* 郭志忠

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要 分析了四角形双层光路光学电流互感器(OCT)传感头的位相差补偿原理及其存在的问题,进而提出了一种结构更为简洁,性能更加优越的光学电流互感器传感头方案;详细地介绍了这种结构的设计原理、方法;进一步论证了光的色散对于这种传感头造成的位相差是非常小的,对测量影响可以忽略,因而该方案具有实用价值。

关键词 电力系统, 光学电流互感器, 法拉第效应。

1 引 言

近年来,运用光学方法,利用光纤良好的绝缘性能而发展起来的光学电流互感器被认为是最具有前途的一种高压大电流测量装置。这类装置具有绝缘,简单可靠,测量电力系统中故障电流时无磁饱和,抗电磁干扰,体积小,重量轻,运输、安装方便等诸多优点,很有可能逐步取代现有的庞大而笨重的电磁式电流互感器(CT),有着广泛的应用前景。

现有的光学电流互感器方案可分为五种^[1]: 1) 具有光输出的常规电流互感器; 2) 带有铁芯的混合型光学电流互感器; 3) 块玻璃型光学电流互感器; 4) 全光纤型光学电流互感器; 5) 简易型光学电流互感器。其中,块玻璃方案有许多优点,因此采用的较多。在四角形双层光路块玻璃方案中,光路不完全闭合,测量受外界电磁场影响,反射面多,引起测量误差较大。

本文提出一种三角形双层光路光学电流互感器传感头结构。它的反射面少,光路完全闭合,克服了原四角形双层光路块玻璃方案中存在的不足,性能优于后者。

2 四角形块玻璃方案中位相差补偿原理及应用中存在的问题

在块玻璃方案中,传感头由光学玻璃制成,一般用弱磁性的重火石玻璃为材料。线偏振光经若干次全反射构成环绕导体的闭合光路。但是,绝大多数情况下的全反射将造成线偏振光电矢量的水平分量和垂直分量间的位相差,从而产生椭圆偏振光,降低了测量灵敏度^[2]。

* 哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001。

收稿日期: 1997-04-28; 收到修改稿日期: 1997-09-15

全反射时, 线偏振光两分量位相差可由下式得出^[3]:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \tan \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = \frac{\cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - N_{12}^2}}{\sin^2 \theta_i} \quad (1)$$

式中, δ 为全反射后位相差的角度; δ_p 为线偏振光中与入射面平行的分量的位相跃变; δ_s 为线偏振光中与入射面垂直的分量的位相跃变; $N_{12} = N_2/N_1$, N_1 表示第一媒质的折射率, N_2 表示第二媒质的折射率。光从第一媒质入射到两媒质组成的界面上。从上式可以看出, 位相差与入射角和相对折射率有关。

由(1)式得到产生全反射而无位相差的方法: 令 $\tan \frac{\delta}{2} = 0$, 则:

$$\frac{\cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - N_{12}^2}}{\sin^2 \theta_i} = 0$$

上式成立只有两种情况: 1) $\theta_i = \pi/2$, 对应着掠入射; 2) 入射角 θ_i 为临界角(即 $\sin \theta_i = N_{12}$)。这两种情况时没有位相差。在闭合光路电流传感头的设计中无法用掠入射, 但入射角为临界角是可以实现的。具体方法是让光经过每一个反射面时入射角都为临界角, 则入射光为线偏振光时, 反射光也为线偏振光, 不会出现消偏作用。但应用中存在一些问题, 因与本文讨论内容无关, 故不进一步阐述。

1983 年 Sato 首次提出了图 1 所示的另一结构。这种方法的原理实质上是利用图 2 所示的线偏振光位相偏移棱镜结构, 让光经过两次全反射, 前后两次全反射的入射面相互垂直。第一次全反射时电矢量平行于入射面的分量, 在第二次全反射时就成为垂直于入射面的分量; 而第一次全反射时垂直于入射面的分量, 在第二次全反射时成为平行于入射面的分量。因两次全反射的入射角相等, 相互垂直的两分量经两次全反射后总相移相同, 只是反射顺序不同, 故不产生相位差^[4]。这是目前块玻璃方案中最普遍的一种结构。

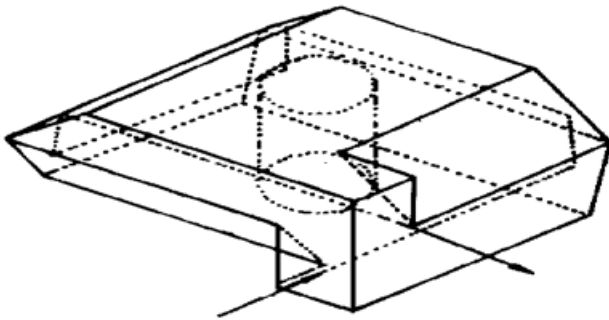


Fig. 1 The tetragonal sensor head with dual-layer optic circuit

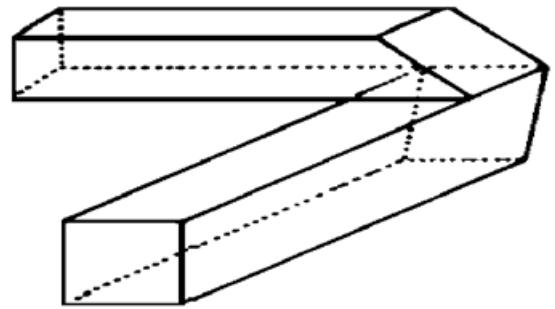


Fig. 2 The prism presenting phase-offset

从图 1 中不难看出, 这种结构经过六次全反射后光路仍然不闭合(光从上层入射, 下层出射或下层入射, 上层出射), 不闭合程度约占 3.7%, 故测量受外界磁场及孔中心导体位置变化的影响; 加之反射面多, 有六个反射面需精加工, 若每个面有同样加工精度, 整个系统加工误差就将累加六次。在光路调整中不可能使每次全反射都恰为 45° , 反射面越多, 误差越大^[3]。

3 三角形双层光路光学电流互感器传感头的设计原理

为了减少反射面, 实现光路完全闭合, 提高测量精度, 作者设计了一种双层光路四次全

反射的传感头。显然，为了通过连续两次全反射补偿位相差，且使光路闭合，这是最少的反射次数。

从上述分析可知，为了抵消全反射位相差，只须满足两个条件：1) 两次全反射的入射面相互垂直；2) 两次全反射产生的位相差相等。

为了说明新结构的位相差补偿原理，首先引入图 3 光路走向模型。该模型为一正三棱镜锥，各侧面 S 、 P 、 Q 为等腰三角形。不难证明 P 、 S 、 Q 两两互相垂直。假如有一光线走向为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$ ，其中全反射的反射面在 B 、 C 、 D 、 E 处。 B 、 C 为棱 OM 上的点， D 、 E 为棱 ON 上的点。这样，入射面 S 垂直入射面 P ，入射面 P 垂直入射面 Q 。因而，条件 1) 得到满足。

下面考虑条件 2)。设媒质 1 折射率为 n ，媒质 2 为空气，则：

$$N_{12} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

代入(1)式得：

$$\tan \frac{\delta}{2} = \tan \frac{\delta_p - \delta_s}{2} = \frac{\cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n \sin^2 \theta} \quad (2)$$

由(2)式得到反射后的位相差 δ 与入射角 θ 有图 4 所示的关系。从图 4 可见，对于同一位相差有两个入射角可以满足。例如，折射率 $n = 1.788$ 时，根据(2)式当 $\theta = 67^\circ 30'$ 或 $35^\circ 06'$ 时，位相差 $\delta = 36^\circ 30'$ 。如果令图 3 中的入射角分别为 $35^\circ 06'$ 和 $67^\circ 30'$ ，即 $\angle ABC = 70^\circ 12'$ ， $\angle BCD = 135^\circ$ ， $\angle CDE = 135^\circ$ ， $\angle DEA = 70^\circ 12'$ ，则条件 2 得到满足。所以，图 3 中的光路经过四次全反射后位相差为零，即入射的线偏振光出射后仍为线偏振光。

根据上述原理，双层光路四次全反射传感头结构应按如下方法设计：

- 1) 根据图 3 确定光路走向，为了使光路对称及方便设计，可使图 3 中的 CD 段光线平行于纸面，于是得到 C 、 D 两处的入射角为 $67^\circ 30'$ ；
- 2) 将所选材料的折射率和 $\theta = 67^\circ 30'$ 代入(2)式中，算出位相差 δ_0 ；
- 3) 将折射率值和 δ_0 反代入(2)式中得到另一入射角的值，即得到 B 、 E 处的入射角；
- 4) 根据各入射角来设计传感头各个反射面。

图 5 是根据图 3 的光路走向，采用上述方法，选用 ZF-7 材料设计的三角形传感头结构。

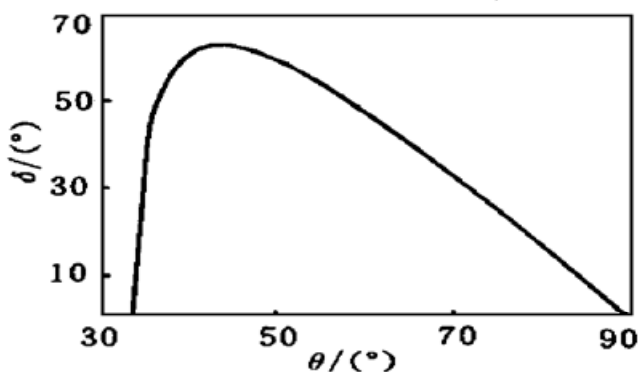


Fig. 4 The curve of incidence and phase-discrepancy

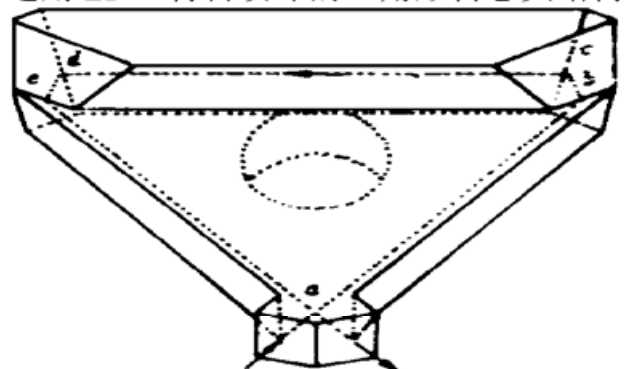


Fig. 5 The trigonal sensor head

其中, $\angle ABC = 70^{\circ}12'$ (即 B 处入射角为 $35^{\circ}06'$), $\angle BCD = 135^{\circ}$ (即 C 处入射角为 $67^{\circ}30'$), $\angle CDE = 135^{\circ}$ (即 D 处入射角为 $67^{\circ}30'$), $\angle DEA = 70^{\circ}12'$ (即 E 处入射角为 $35^{\circ}06'$)。这里的四个反射面的空间位置是由这四个入射角确定的。

表 1 给出根据上述方法计算出的几种常用光学电流互感器传感头材料的 B 、 E 处入射角的值。

Table 1. The incidence at the area B 、 E in the trigonal sensor made from different material

	ZF-3	ZF-4	ZF-5	ZF-6	ZF-7
n	1.700	1.712	1.724	1.738	1.788
θ_i	$37^{\circ}20'$	$37^{\circ}01'$	$36^{\circ}42'$	$36^{\circ}20'$	$35^{\circ}06'$

这种结构的传感头与四角形六次全反射传感头相比, 前者光路完全闭合, 仅仅是光出、入射的方向不同, 闭合度为 100%, 高于后者。前者反射面为四个, 少于后者, 因此, 测量误差小, 光路调整容易。对于通过相同外径导体的传感头, 前者光路长度小于后者, 光吸收少, 而且光纤耦合效率高。

4 光的色散对位相差的影响

光源光谱有一定宽度范围。对于任何材料, 光波长不同, 折射率也不同。在四角形传感头结构中, 因为每次全反射的入射角相等, 对于光源中不同波长的光线, 虽然折射率不同, 但前后两次全反射的位相差仍然相等, 总的位相差被完全抵消。而新型四次全反射方案的传感头前后两次全反射的入射角不同, 当对与某一折射率来说位相差相等时, 而对与另一折射率来说位相差却不等。如果用激光二极管作为光源, 谱宽小于 2 nm, 就不必考虑色散引起的位相差。测量中, 为了得到较高的信噪比, 常选用红外发光二极管作为光源。红外发光二极管谱宽在 100 nm~ 30 nm 左右, 色散较大。但计算表明, 它引起的位相差并不大。如某一红外发光二极管有效波长为 $0.8 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$, 峰值波长为 $0.85 \mu\text{m}$, 则对于材料 ZF-7, 折射率 $N_{0.8} = 1.79$, $N_{0.9} = 1.786$, 将入射角 $\theta_i = 76^{\circ}30'$ 和 $\theta_i = 35^{\circ}06'$ 分别代入(2) 式中得到图 6 关系曲线。其中, 纵坐标为位相差 δ , 横坐标为折射率。可以看出, 当折射率从 1.786~ 1.79 变化时, 即波长在 $0.8 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$ 之间, 两者位相差之差小于 0.65° 。这意味着, 对于红外发光二极管光源中含有的各个波长的光线, 经过这样两次全反射后, 其线偏振光的两个正交分量位相差小于 0.65° 。经过四次全反射后, 位相差小于 1.3° , 并且差值是由中心向两端逐渐扩大, 而光源功率是由峰值波长 $0.85 \mu\text{m}$ 向两端逐渐减小的, 探测器响应度也是由峰值波长 $0.85 \mu\text{m}$ 向两端逐渐减小。所以, 这一微小的位相差对测量系统影响可以忽略。

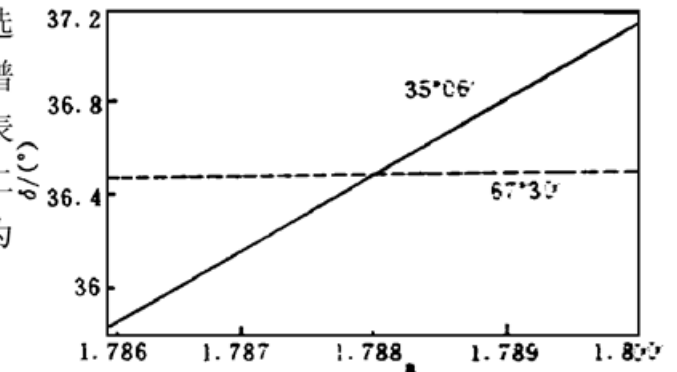


Fig. 6 The curve of refractive index and phase-discrepancy with different incidence

结 论 由于四角形双层光路传感头方案, 理论上光路就不闭合, 实际应用中必然造成测量误差。并且反射面多, 光路的调整、光纤的耦合较困难, 由此引起的误差也较大。本文提出的三角形四次全反射双层光路传感头方案, 理论上是完全闭合的, 并且反射面少, 因此性能优

于前者, 有较大的实用价值。

参 考 文 献

- [1] The Emerging Technologic Working Group, *et al.*, Optical current transducers for power systems: A review. *IEEE Trans Power Delivery*, 1994, **PD-9**(4) : 1778~ 1787
- [2] 宗伟勇, 陈锡昆, 全反射对混合型光纤电流传感器检测灵敏度的影响. *光学学报*, 1991, **11**(3) : 260~ 263
- [3] 易本顺, 光学电流传感器特性及补偿方法研究. 华中理工大学博士论文, 1996 : 60~ 63
- [4] 高 桦, 盛 珑, 郭志忠, 线偏振光位相偏移棱镜. *哈尔滨工业大学学报*, 1997, **29**(1) : 90~ 93

OCT Sensor Head with Dual-Layer Optic Circuit

Sheng Long Gao Hua Guo Zhizhong

(*Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

(Received 28 April 1997; revised 15 September 1997)

Abstract The principle of phase-discrepancy compensation of the tetragonal OCT (Optic Current Transducer) sensor head with dual-layer optic circuit is analysed as well as its existing problem. A new kind of the OCT sensor head is designed, of which the structure is simpler and the performance is better. It is demonstrated that the phase-discrepancy caused by optical dispersion of this new kind sensor head is very small and its influence on measurement can be ignored, showing practical significance.

Key words power system, optic current transducer, Faraday effect.