

文章编号: 1001-3806(2007)04-0378-03

## 两种类型的光学电流传感头的灵敏度比较

陈金玲, 李红斌\*, 刘延冰

(华中科技大学 电气与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了对块状和点式两种典型结构的传感头的灵敏度进行比较, 采用矩阵光学的方法, 对影响传感头灵敏度的诸因素如线性双折射、加工角差、正交反射间垂直小段的椭圆等进行了分析, 推导了块状传感头中垂直小段的椭圆单独作用时对灵敏度影响的解析式, 并对各因素同时作用时的灵敏度校正因子进行了定量仿真分析。结果表明, 影响灵敏度最关键的因素是材料的线性双折射。单位长度内的线性双折射增加时, 点式传感头灵敏度变化不大; 且当其超过一定值时, 点式具有比块状更高的灵敏度。

**关键词:** 仪器测量与计量; 光学电流互感器; 灵敏度; 琼斯矩阵; 块状传感头; 点式传感头

**中图分类号:** TM 452<sup>+</sup>. 93 O 436 4 **文献标识码:** A

### Comparison of sensitivity between two types of optical current sensors

CHEN Jin-ling, LI Hong-bin, LIU Yan-bing

(College of Electrical and Electronic Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** The sensitivity of a bulk type optical current sensor(OCS) was compared with that of a point type OCS. Based on Jones matrix, the factors affecting the bulk type OCS's sensitivity, such as linear birefringence in horizontal path, angle tolerance and elliptical polarization in vertical cantlet were analyzed and the effect of only elliptical polarization in vertical cantlet on the sensitivity was deduced. When all the factors act together, a calibrating factor is necessary. This factor was simulated quantitatively. The comparison result shows that the linear birefringence existing in the material is the most important factor affecting the sensitivity and that the sensitivity of a point type OCS decrease little when linear birefringence of unit length increases. Even when it exceeds a specific value, the sensitivity of a point type can be greater than that of a bulk type.

**Key words** instrumentation measurement and metrology, optical current transformer, sensitivity, Jones matrix, bulk type optical current sensor, point type optical current sensor

### 引 言

对光学电流传感器而言, 较大的传感头灵敏度可提供更大信噪比的测量信号, 对测量准确度的提高具有重要意义。块状和点式结构是最具代表性的传感头结构。大多数研究者认为, 块状结构的光学传感头有效路径较长, 具有较大的灵敏度; 点式传感头有效路径较短, 灵敏度小, 且光路不闭合易受外界磁场干扰。因此一般多采用块状传感头<sup>[1-3]</sup>。但作者的研究发现, 实际上块状传感头的性能受到材料的线性双折射、反射相移、正交反射间垂直小段的椭圆等因素的综合影响, 其实际灵敏度与理想状况相差较远。

由于同时考虑诸因素的影响时, 其输出表达的解析式推导较为困难, 因此, 已经有研究者推导了线性双折射<sup>[4-6]</sup>及反射相移<sup>[7]</sup>分别单独作用时对块状传感头灵敏度的影响。本文中首先推导了块状传感头中垂直小段的椭圆单独作用时, 对灵敏度影响的解析式, 在此基础上, 对各因素同时作用时的灵敏度校正因子进行了定量仿真计算, 并对块状传感头和点式传感头的灵敏度进行了仿真比较分析, 结果表明, 影响块状传感头灵敏度最关键的因素是材料的线性双折射。单位长度内的线性双折射增加时, 由于点式传感头的光程比块状的要短得多, 灵敏度变化不大; 且当单位长度内的线性双折射超过一定值时, 点式传感头具有比块状传感头更高的灵敏度。这一结论对设计者进行传感头形式的选择具有参考意义。

### 1 两类传感头的结构

块状传感头和点式传感头的工作原理都是基于光学玻璃的法拉第磁光效应, 它们的不同在于是否形成环绕电流的环路, 如图 1a 图 1b 所示。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377011)

作者简介: 陈金玲 (1978), 女, 博士研究生, 现主要从事光学电流及光学电压互感器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: whhb2000@vip.sina.com

收稿日期: 2006-04-10 收到修改稿日期: 2006-06-15

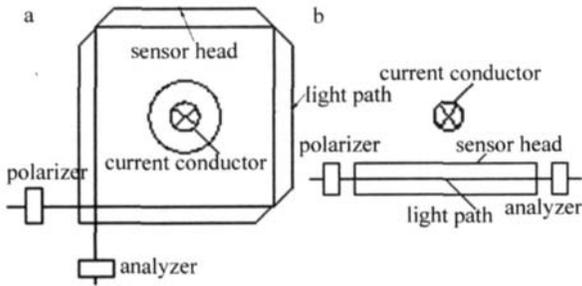


Fig 1 a—bulk type optical current b—point type optical current

为了论述清楚,文中所有与块状传感头有关的量均以标 a 表示,与点式传感头有关的量以下标 b 表示。理想状况下,两类传感头经电流磁场作用后产生的法拉第旋转角分别为:  $\varphi_a = V \int_{L_a} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$   $\varphi_b = V \int_{L_b} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ ,  $L_a$ ,  $L_b$  分别为两类传感头中有效光路的长度,显然:  $L_a = 4L_b$ , 所以有:

$$\varphi_a = 4\varphi_b \quad (1)$$

点式传感头为最简单的直通式结构,构成环节最少。块状传感头结构相对复杂。为了使得光线能形成闭合回路,必须改变光的传播方向,因而块状传感头不可避免地需要使用全反射单元。众所周知,光在发生全反射时,由于其平行于入射面的  $p$  分量和垂直于入射面的  $s$  分量经历的相移不同会产生相位差,使得入射光的偏振态由线偏变为椭圆,降低了传感头的灵敏度。为了克服这个缺陷,目前的块状传感头多采用是正交双全反射式结构<sup>[8]</sup>,该结构在每个光路拐角处,将一次全反射分解为入射面相互垂直的两次全反射,这样两次  $p$  分量和  $s$  分量之间产生的反射相移可相互抵消。

$$E_o = \begin{bmatrix} (e^{\frac{3}{2}\delta_L} + e^{-\frac{3}{2}\delta_L} + e^{\frac{\delta_L}{2}} + e^{-\frac{\delta_L}{2}}) \sin\varphi \cos^3\varphi - 2(e^{\frac{\delta_L}{2}} + e^{-\frac{\delta_L}{2}}) \sin^3\varphi \cos\varphi \\ e^{\frac{\delta_L}{2}} \sin^4\varphi - (e^{\frac{3}{2}\delta_L} + 2e^{\frac{\delta_L}{2}} + 3e^{-\frac{\delta_L}{2}}) \sin^2\varphi \cos^2\varphi + e^{-\frac{3}{2}\delta_L} \cos^4\varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

当检偏器与起偏器的投射轴成  $45^\circ$  时,检偏器的输出电场为:

$$E = (E_x + E_y) / \sqrt{2} = (4\sqrt{2})^{-1} \times \left[ \cos\frac{3}{2}\delta_L (\sin 4\varphi + \cos 4\varphi + 2\sin 2\varphi + 2\cos 2\varphi + 1) + \cos\frac{\delta_L}{2} (3\sin 4\varphi + 3\cos 4\varphi - 2\sin 2\varphi - 2\cos 2\varphi - 1) + 4 \left[ \sin\frac{\delta_L}{2} \sin^2\varphi - \sin\frac{3\delta_L}{2} \cos^2\varphi \right] \right] \quad (7)$$

最后的输出光强为:

$$I = E \cdot E^* = [1 + 8\varphi \cdot (\cos 3\delta_L + \cos 2\delta_L + \cos \delta_L + 1) / 4] / 2 \quad (8)$$

除掉本底光强后的法拉第旋转角可以表示为:

$$\varphi_a(\delta_L) = 8\varphi \cdot (\cos 3\delta_L + \cos 2\delta_L + \cos \delta_L + 1) / 4 = \varphi_a \cdot f_1(\delta_L) \quad (9)$$

从上面的推导发现垂直小段的椭圆,使得输出乘了一

## 2 灵敏度比较分析

理想状况下, (1) 式成立,块状传感头的灵敏度为点式传感头的 4 倍。事实却并非如此,灵敏度还会受其它因素的影响,下面具体分析。

### 2.1 垂直小段的椭圆

块状传感头的正交双全反射结构虽然消除了  $p$ ,  $s$  分量间的相移,但是在两次正交反射间的垂直(与被测电流产生的磁场相垂直)小段,由于线性双折射的存在,光线仍然是严重椭圆,考虑这种椭圆的影响,用 Jones 矩阵分析传感头的输出为:

$$E_o = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = F_0 F_\perp F_0 F_\perp F_0 F_\perp F_0 E_i \quad (2)$$

式中,

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

为归一化的输入 Jones 矢量:

$$F_0 = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

为水平段法拉第旋转的 Jones 矩阵,  $\varphi$  为块状传感头每个有效臂的法拉第效应引起的偏振面旋转角:

$$F_\perp = \begin{bmatrix} e^{\frac{\delta_L}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\delta_L}{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

为垂直小段的 Jones 矩阵,  $\delta_L$  为每个垂直小段的线性双折射大小。

将 (3) 式 ~ (5) 式代入 (2) 式,可得最后输出为:

个小于 1 的因子  $f_1(\delta_L)$ , 灵敏度降低。

### 2.2 加工角差的影响

正交双全反射结构的传感头在设计时,要求每个入射面与水平面的夹角均为  $45^\circ$ 。在实际工艺水平的限制,加工角度存在一定的偏差。此时  $p$ ,  $s$  分量的相移不能完全抵消,导致光线椭圆,灵敏度降低。推导加工角差的影响因子涉及到空间光学,非常复杂,文献 [7] 中在假定加工角差  $\sigma$  相等,以及因此引起的每个转角处两次反射后产生的相位差  $\theta$  相等的前提下,给出此时传感头的输出:

$$\varphi_a(\theta) = [(\cos 3\theta + \cos 2\theta + \cos \theta + 1) / 4] \times \varphi_a = f_2(\theta) \cdot \varphi_a \quad (10)$$

显然  $f_2(\theta) < 1$ , 加工角差的存在,传感头灵敏度降低。

对于点式传感头而言,上述两个因子  $f_1(\delta_L)$ ,  $f_2(\theta)$  的影响都不存在。

### 2 3 水平段线性双折射的影响

文献 [4]中推导了水平 (与被测电流产生的磁场平行)段线性双折射对传感头的影响:

$$\varphi_a(\delta_l) = \varphi_a \cdot (\sin 4\Delta/4\Delta) = \varphi_a \cdot f_a(\delta_l) \quad (11)$$

$$\varphi_b(\delta_l) = \varphi_b \cdot (\sin \Delta/\Delta) = \varphi_b \cdot f_b(\delta_l) \quad (12)$$

其中,  $(\Delta/2)^2 = (\delta_l/2)^2 + \varphi^2$ ,  $\delta_l$  为每条有效臂上的线性双折射。

### 2 4 综合影响时的校正因子

从上面的分析不难看出,对于块状传感头而言,影响其灵敏度的因素有 3个:垂直小段的椭圆偏  $f(\delta_v)$ 、加工角差的影响  $f_2(\theta)$ 及线性双折射  $f_a(\delta_l)$ 。但是当这三者同时作用时,传感头的最终输出并不是 3个因子直接相乘,而是另有一个校正因子的共同作用。设此校正因子为  $f_0(\theta, \delta_v, \delta_l)$ ,则有考虑上述各影响因素时,传感头的实际输出:

$$\varphi_a' = f_0(\theta, \delta_v, \delta_l) \cdot f_1(\delta_v) \cdot f_2(\theta) \cdot f_a(\delta_l) \cdot \varphi_a \quad (13)$$

显然,校正因子与线性双折射和加工角差都有关,要得到它的解析式较为困难。利用 MATLAB对 (13)式的结果与理论输出进行比对,可得校正因子随线性双折射和加工角差变化而变化的数值关系如图 2所示。

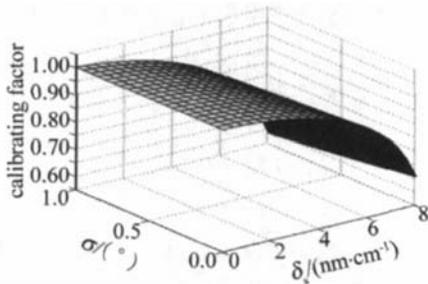


Fig 2 The diagram of calibrating factor vs  $\sigma$  and  $\delta_l$

$\sigma$ 变化时,  $f_0(\theta, \delta_v, \delta_l)$ 变化较小,单位长度的线性双折射  $\delta_l^{[9]}$ 对  $f_0(\theta, \delta_v, \delta_l)$ 影响较大,  $\delta_l$ 增大时,  $f_0(\theta, \delta_v, \delta_l)$ 迅速减小。实际应用中,可依据具体传感头的尺寸,制作一个校正因子的表格,利用 (13)式可有效简化块状传感头的设计。

### 3 仿真试验

为了考察诸因素对传感头灵敏度的影响程度,对传感头进行了仿真试验。设定传感头每个有效臂的长度为 109mm,垂直小段的长度为 10mm,当各因素独立作用时,仿真试验结果如图 3~图 5所示。

不难看出,线性双折射对传感头灵敏度影响较大,尤其是水平段,因其光程较长,双折射较大,影响最大;垂直段由于光程较短,影响稍小。加工角差的影响最小(小于 0.03%),几乎可忽略。

忽略 (13)式中  $f(\theta)$ 项,有:

$$\varphi_a' = f_0(\theta, \delta_v, \delta_l) \cdot f_1(\delta_v) \cdot f_a(\delta_l) \cdot \varphi_a \quad (14)$$

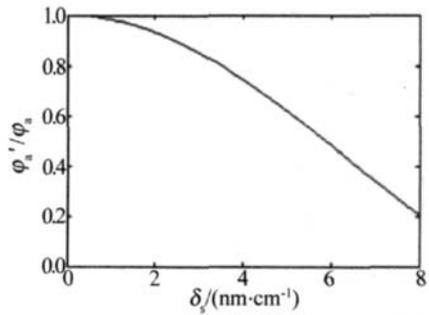


Fig 3 The sensitivity change caused only by linear birefringence in horizontal path

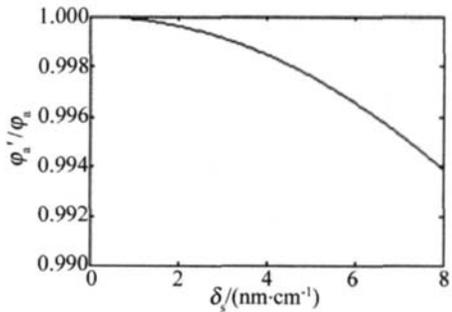


Fig 4 The sensitivity change caused only by elliptical polarization in vertical channel

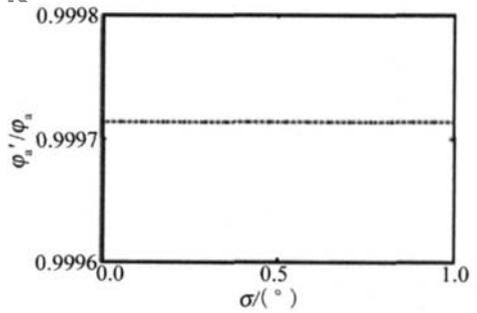


Fig 5 The sensitivity change caused only by angle tolerance

$$\varphi_b' = f_b(\delta_l) \cdot \varphi_b \quad (15)$$

同样的,取相同材料的点式传感头的有效长度亦为 109mm(即块状传感头的单臂有效长度),比较 (14)式、(15)式的输出,仿真结果如图 6所示。从图中不难看出,随着单位长度内线性双折射的增加,块状传感头的灵敏度迅速降低,点式传感头则下降较缓,当线性双折射超过一定值(约 7.4mm/cm)时,点式传感头的

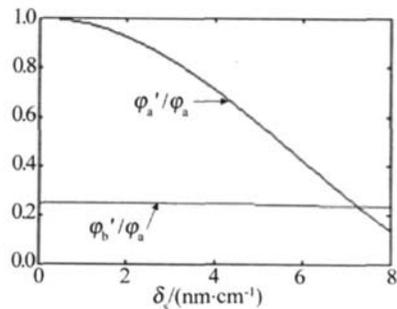


Fig 6 The sensitivity comparison between two types of sensors

(下转第 383页)

号和反射信号,可以实时监测薄膜破坏的时间。图中  $R_1$  为激光信号;  $R_2$  和  $R_3$  是激光束辐照薄膜元件表面的反射信号。从图中可以看出,当激光强度为  $630\text{W}/\text{cm}^2$  时薄膜表面反射光信号在激光辐照过程中没有发生变化,说明薄膜没有损伤;当激光强度为  $2743\text{W}/\text{cm}^2$  时,薄膜表面反射光信号在辐照时间  $t=3.44\text{s}$  发生突变,也就是薄膜发生损伤的时间,当激光强度增加到  $4128\text{W}/\text{cm}^2$  时,薄膜表面反射光信号在辐照时间  $t=1.44\text{s}$  发生突变,薄膜在此刻发生损伤。

### 3 结 论

以某种光电探测系统中所使用的特殊薄膜光学元件为实验样品,利用不同波长、不同工作方式激光辐照薄膜,通过测量薄膜表面激光反射信号随时间的变化过程,得到了一种简捷测量薄膜损伤时间的方法。在实验中,薄膜表面反射信号在激光辐照过程中发生突变,说明由于薄膜特性发生改变而引起反射信号特性发生变化。通过此方法,可以使用简单的仪器快速测量出薄膜激光损伤所发生的时刻,这对于研究并提高薄膜抗激光加固有着一定的参考价值。

#### 参 考 文 献

[1] GAO Zh Y, GAO Y, ZHANG KH. Military photo electricity system

[M]. Beijing: Beijing Institute of Science and Technology Press, 1996. 7: 1~20 (in Chinese).

- [2] ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y Zh *et al* Research on damage of  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  film induced by  $1.06\mu\text{m}$  CW laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 77~81 (in Chinese).
- [3] LI Zh Y, DENG H, FAN Zh X.  $1.06\mu\text{m}$  laser induced of Ti:Zr thin-film optical coating [J]. Chinese Journal of Laser, 1988, 16(7): 413~416 (in Chinese).
- [4] XIA J J, LI Zh Y, CHENG L.  $532\text{nm}$  laser induced damage to optical film [J]. Laser Technology, 1996, 20(3): 378~379 (in Chinese).
- [5] ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y Zh Thermal effect of  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{K}_9$  film by  $1.06\mu\text{m}$  CW laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 17(9): 1308~1311 (in Chinese).
- [6] MASUD M, NEVILLE C G A, GOODMAN J W. Laser induced local heating of multilayer [J]. Appl Opt, 1982, 21(6): 1107~1114.
- [7] ZHAO Q, FAN Zh X, WANG Zh J Digital analysis of laser induced thermal process in optical coatings [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(8): 1020~1023 (in Chinese).
- [8] COHEN S S, BERMSTEIN TB, WYATT PW *et al* The effect of multiple laser pulses on damage to thin metallic films [J]. Appl Phys, 1992, 71(2): 630~637.
- [9] QIANG X W, ZHANG J Q, LIU F *et al* Thermal stress damage of semiconductors induced by laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(8): 710~713 (in Chinese).
- [10] GONG H, EICH F, CUI J W *et al* Optical damage study of materials with high repetitive laser pulse irradiation [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(2): 229~231 (in Chinese).

(上接第 380 页)

灵敏度更高。通常能得到的光学玻璃其双折射类别为两类,按照无色光学玻璃国家标准 GB903-1987 的规定,两类意味着其最长边中部单位长度上的光程差为  $6\text{nm}/\text{cm}$ ,与该值已经比较接近。所以,上述结论具有一定实际意义。

### 4 结 论

影响块状传感头灵敏度的因素包括:材料的线性双折射和加工角差,其中后者的影响较小,可忽略。而前者的影响较大,尤其是水平段,光程较长,使传感头灵敏度迅速下降;垂直小段则由于光程较短,影响稍小,但对高精度(如 0.2 级)测量仍是不可忽略的。点式传感头的结构相对简单,其灵敏度影响因素只有一个:材料的线性双折射,但其光程比块状的要短的多,单位长度内的线性双折射  $\delta_s$  增加时,灵敏度变化不大。当  $\delta_s$  超过一定值时,点式传感头的灵敏度更高。

实际应用中可根据需要来选择具体的传感头形式。具备直通式最简结构的点式传感头,降低了加工难度和成本,同时也为温度补偿等手段的采用提供了更多的空间。但点式传感头的非闭合结构,易受外磁

场干扰的缺陷<sup>[10]</sup>,是需要考虑解决的问题之一。

#### 参 考 文 献

- [1] LIU S YE M, ZHU Y *et al*  $220\text{kV}$  combined optical voltage and current transformer [J]. SPIE, 1999, 3897: 728~733.
- [2] NING Y N, JACKSON D A. Demountable optical current sensor using a bulk glass sensing element [J]. SPIE, 1993, 2070: 305~312.
- [3] LI E, LU Y, MACALPINE J *et al* Optical current transducer and its signal processing analysis [J]. SPIE, 1996, 2895: 2~7.
- [4] LIH B. Study on the sensing probe of optical current sensor [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(7): 946~949 (in Chinese).
- [5] TABOR W J, CHEN F S. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence experiments with ytterbium orthoferrite [J]. Appl Phys, 1969, 40(7): 2760~2765.
- [6] JAECKLIN A A, LIETZ M. Elimination of disturbing birefringence effects on Faraday rotation [J]. Appl Opt, 1972, 11(3): 617~621.
- [7] ROCHFORD K B, ROSE A H, DEETER M N. Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product [J]. Opt Lett, 1994, 19(22): 1903~1905.
- [8] SATO T, TAKAHASHI G, NUI Y. Method and apparatus for optically measuring a current [P]. European Patent 0088419A1, 1983-09-09.
- [9] YI B. Research on performance and compensation methods of optical current transducers [D]. Wuhai Huazhong University of Science and Technology, 1996. 36~37 (in Chinese).
- [10] LIH B, CHEN Q, LIU Y B. Research of disturbance caused by magnetic crosstalk within point type optical current transformer [J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(4): 16~18 (in Chinese).