

光学电流互感器传感单元输出特性的研究

对光学电流互感器的琼斯矩阵进行了推导,并对线性双折射、光程长度及入射起偏角输出特性的影响进行了推导与分析。给出非理想状态下线性双折射对光学电流互感器输出电压的调制函数,并给出入射起偏角对系统影响的数学表达式及作用条件。结果表明,线性双折射会以抽样函数的形式调制光学电流互感器输出信号的尺度因子,同时以 $\sin^2(\delta_0 L/2)$ 为影响因子决定入射起偏角对系统的影响,当入射起偏角取某些特殊值时,其对系统的影响为零。另外,还研究了线性双折射的温度特性及其对光学电流互感器输出特性的影响。

陶永健 王西邓 姜艳娟 张宇迪 徐艳艳/许继电气股份有限公司



陶永健/助理工程师

关键词/Keywords

光学电流互感器·
琼斯矩阵·
线性双折射·
温度特性·

光学电流互感器 (Optical Current Transformer, OCT) 是指利用光学技术直接或间接地对电流进行换能或测量,从而实现对电流传感的装置^[1]。与传统的油浸式电流互感器相比,在高压、大电流测量中采用光学技术具有明显的优越性:无发生爆炸等灾难性事故的潜在危险、无二次侧开路导致高压的危险、满足绝缘性能要求、无磁饱和及铁心大电感导致信号滞后的现象、抗电磁干扰、响应频域宽、便于遥感和遥测、结构紧凑以及质量轻等^[2]。但目前真正可立足于市场的光学电流传感器产品仍不多见^[3]。其根本原因之一就在于光学玻璃电流传感头或光纤的线性双折射效应对测量结果存在明显的影响,故在很大程度上限制了光学电流传感器的进一步发展^[4]。因此,对于光学电流互感器而言,仍有必要从理论、实验及工艺等方面对线性双折射性能产生影响的机理、克服办法等进行深入的研究。

从光学电流互感器的原理可知,

输出光强仅与光程中总法拉第旋转角有关,即仅与内部电流有关,因而光学电流互感器具有良好的抗干扰能力。但是,事实上法拉第旋光元件中不可避免地存在线性双折射,当材料中同时存在线性双折射时,对法拉第旋光元件的琼斯矩阵如何描述,是本文讨论的主要内容。

以往的研究多数是在假设线性双折射和法拉第旋转角都为均匀的情况下进行的。但这种假设并不合理,本文将在此基础上讨论法拉第旋转角不均匀的情况下,法拉第旋光元件的琼斯矩阵模型,进而得到考虑参数分布特性的输出光强的数学表达式,并展开讨论。

光学电流互感器分布参数光路模型

OCT系统的构成如图1所示。

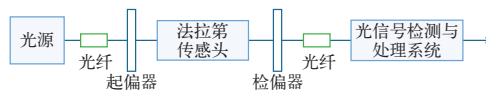


图1 OCT系统结构

光学电流互感器的物理结构是线偏振光依次通过旋光元件和检偏器,表现为偏振元件的级联形式,在数学上表现为琼斯矩阵的连乘。

假定光学电流互感器的输入线偏振光方位角为 θ ,则输入线偏振光的琼斯矩阵表示为^[5]

$$E_i = J_i \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

得到的光学电流互感器的完整数学模型为

$$E_o = P_{(\pm 45^\circ + \theta)} F E_i \quad (2)$$

$$J_o = \mathbf{E}_o^T \mathbf{E}_o \quad (3)$$

其中, 与入射光偏振方向成 $\pm 45^\circ$ 夹角的检偏器的琼斯矩阵为^[6]

$$\mathbf{P}_{(\pm 45^\circ + \theta)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - \sin 2\theta & \cos 2\theta \\ \cos 2\theta & 1 + \sin 2\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

法拉第旋光元件的琼斯矩阵为^[7]

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} A & -B \\ \hat{B} & \hat{A} \end{pmatrix} \quad (5)$$

当法拉第旋光元件仅有旋光性而无线性双折射时, 假定其旋光角为 φ , 则其琼斯矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (6)$$

得到输出光强为

$$J_o = \frac{1}{2} J_i (1 \pm \sin 2\varphi) \quad (7)$$

当考虑线性双折射时, 假定介质的长度为 l , 单位行程两本征振动矢量位相差为 Δ_0 , 容易得到直角坐标系下相应的琼斯矩阵为

$$\mathbf{F}_\delta = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\Delta}{2}) + j \sin(\frac{\Delta}{2})(\frac{\delta_0}{\Delta_0}) & \sin(\frac{\Delta}{2})(\frac{2\delta_0}{\Delta_0}) \\ \sin(\frac{\Delta}{2})(\frac{2\delta_0}{\Delta_0}) & \cos(\frac{\Delta}{2}) - j \sin(\frac{\Delta}{2})(\frac{\delta_0}{\Delta_0}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\Delta_0 \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{(\eta^2 + \sigma^2) / \varepsilon} = \sqrt{\delta_0^2 + 4\varphi_0^2} \quad (9)$$

$$\Delta = \Delta_0 l = \sqrt{\delta^2 + (2\varphi)^2} \quad (10)$$

式中, δ_0 为单位长度行程无圆双折射时由线性双折射造成的相位差; φ_0 为单位长度行程无线性双折射时偏振光旋转角。

上面推导了带有线性双折射的法拉第旋光元件的输出光强表达式, 得到该琼斯矩阵的前提是圆双折射和线性双折射都是均匀的, 而这一条件很难得到满足, 因此, 需建立分布参数模型。

一个长度为 l 的法拉第旋光元件可以分成若干份, 若份数足够多, 在一个小段内可以认为圆双折射和线性双折射是均匀的, 假设法拉第旋光元件划分为 n 份, 则第 k 个微元内法拉第旋光元件的琼斯矩阵可写为

$$\mathbf{F}_{\delta k} = \begin{pmatrix} A_k & -B_k \\ \hat{B}_k & \hat{A}_k \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中

$$A_k = \cos(\frac{\Delta_k}{2}) + j \sin(\frac{\Delta_k}{2})(\frac{\delta_k}{\Delta_k}) \quad (12)$$

$$B_k = \sin(\frac{\Delta_k}{2})(\frac{2\varphi_k}{\Delta_k}) \quad (13)$$

则总琼斯矩阵为各微元琼斯矩阵的级联, 即

$$\mathbf{F}_\delta = \prod_{k=1}^n \mathbf{F}_{\delta k} \quad (14)$$

式中, 矩阵 $\mathbf{F}_{\delta k}$ 为酉矩阵, 而若干个酉矩阵的乘积仍为酉矩阵。

故最终的等效琼斯矩阵的形式为

$$\mathbf{F}_\delta = \prod_{k=1}^n \mathbf{F}_{\delta k} = \begin{pmatrix} A & -B \\ \hat{B} & \hat{A} \end{pmatrix} \quad (15)$$

其中的每一个元素可根据矩阵的乘积运算法则进行计算, 由于各部分参数并不相同, 且具有空间分布特性, 本文中称此准确的数学模型为法拉第旋光元件的分布参数模型。在对法拉第旋光元件进行准确分析时, 必须使用分布参数模型, 当然在某些情况下可以简化为集中参数。

简化为集中参数模型时有

$$\mathbf{F}_\delta = \begin{pmatrix} e^{j\frac{\delta_0 L}{2}} & -\int_0^L [e^{j\frac{(L-2x)\delta_0}{2}} d\varphi(x)] \\ \int_0^L [e^{-j\frac{(L-2x)\delta_0}{2}} d\varphi(x)] & e^{-j\frac{\delta_0 L}{2}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中, x 为距光程首段的距离。

联立式(1)~式(4)和式(16), 经过信号处理可得

$$u_o = \frac{J_{o1} - J_{o2}}{J_{o1} + J_{o2}} \quad (17)$$

从而得到

$$u_o = -\sin^2(\frac{\delta_0 L}{2}) \sin 4\theta + \int_0^L k(x) d\varphi(x) \quad (18)$$

其中

$$k(x) = \cos^2(2\theta) \cos[\delta_0(L-x)] + \sin^2(2\theta) \cos(\delta_0 x) \quad (19)$$

$$d\varphi(x) = \frac{V_i}{L} dx \quad (20)$$

式中, V 为菲尔德常数; L 为光程长度。

化简得

$$u_o = \frac{V_i \sin(\delta_0 L)}{L} - \sin^2\left(\frac{\delta_0 L}{2}\right) \sin(4\theta) \quad (21)$$

不同实验条件对光学电流互感器输出结果的影响

1. 入射起偏角对系统输出特性曲线的影响

令待测电流 $I = 0 \sim 10\ 000\text{ A}$, 线性双折射为 $0.5^\circ/\text{cm}$, 光程长度为 40 cm , 入射起偏角分别为 60° 、 45° 和 30° , 得到的输出特性仿真结果如图2所示。

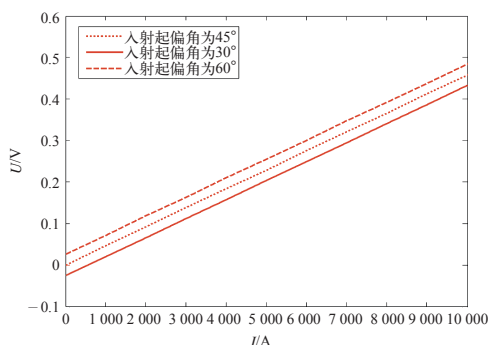


图2 入射起偏角对输出结果的影响

令待测电流 $I = 0 \sim 10\ 000\text{ A}$, 线性双折射为 $0^\circ/\text{cm}$, 得到的输出特性仿真结果如图3所示。

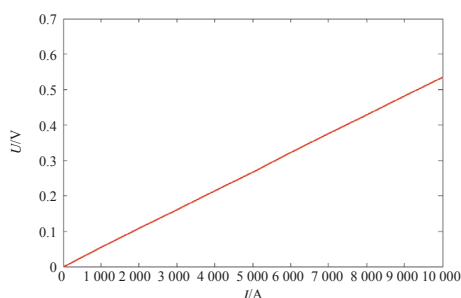


图3 无线性双折射时的输出特性曲线

从图2、图3可以看出, 在无线性双折射和有线性双折射两种情况下, 输出电压和所测电流都是呈线性关系, 且电压随着电流的增大而单调上升。从图2还可发现, 当线性双折射不为零时, 入射起偏角的变化明显地引起输出曲线截距的变化, 入射起偏角大于 45° 且小于 90° 时, 输出曲线的截距为正; 入射起偏角大于 0° 且小于 45° 时, 输出曲线的截距为负。因此, 为了方便测量电压随电流的关系, 入射起偏角应选择 0° 、 45° 和 90° 左右的值。

2. 光程长度对系统输出特性曲线的影响

令待测电流 $I = 0 \sim 10\ 000\text{ A}$, 线性双折射为 $1^\circ/\text{cm}$, 入射起偏角为 45° , 光程长度分别为 20 cm 、 30 cm 、 40 cm 、 50 cm 和 100 cm 。得到的输出特性仿真结果如图4所示。

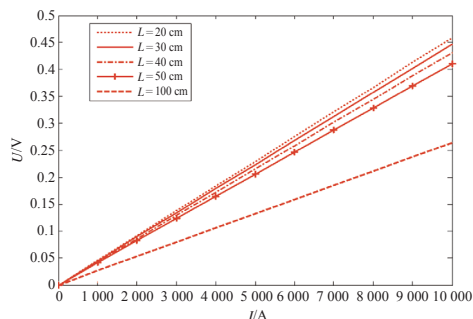


图4 不同光程长度对输出结果的影响

从图4可以发现, 当光程长度固定时, 输出电压与所测电流成线性上升的关系; 当光程长度发生改变时, 明显地改变了输出曲线的斜率, 并且随着光程长度的增加输出特性曲线的斜率变小。当光程长度从 20 cm 变化到 40 cm 时, 输出特性曲线的斜率变化范围不大; 当光程长度从 40 cm 变化到 100 cm 时, 曲线的斜率发生较大的变化, 故选择旋光元件时, 其长度应在 $20 \sim 40\text{ cm}$ 之间。为了节省材料, 旋光元件的长度选择接近 20 cm 时较合理。

3. 线性双折射对系统输出特性曲线的影响

令待测电流 $I = 0 \sim 10\ 000\text{ A}$, 入射起偏角为 45° , 光程长度为 40 cm , 线性双折射分别为 $0.1^\circ/\text{cm}$ 、 $0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $1^\circ/\text{cm}$ 、 $1.5^\circ/\text{cm}$ 和 $2^\circ/\text{cm}$ 。得到的输出特性仿真结果如图5所示。

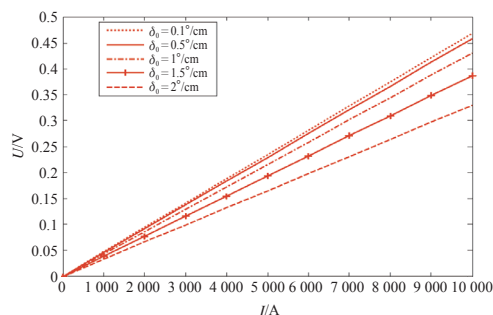


图5 不同线性双折射对输出结果的影响

从图5分析可得, 当线性双折射固定时, 输出电压与所测电流成线性上升的关系; 当线性双折

射发生改变时,明显地改变了输出曲线的斜率,并且随着线性双折射的增加输出特性曲线的斜率变小。当线性双折射从 $0.1^\circ/\text{cm}$ 变化到 $2^\circ/\text{cm}$ 时,输出特性曲线的斜率发生了明显的变化,即线性双折射增大,输出特性曲线的斜率减小,这会导致输出结果的变化范围减小。当所测电流发生微小变化时,线性双折射越大,输出电压值的变化越不明显,给测量带来了不利影响。因此,线性双折射越小越好,选择光学元件时,应选择线性双折射接近零时较合理。

4. 不同入射起偏角时输出与线性双折射的关系

令待测电流 $I=5\ 000\text{ A}$,线性双折射为 $0\sim 4^\circ/\text{cm}$,光程长度为 40 cm ,入射起偏角分别为 75° 、 60° 、 0° 、 45° 、 90° 、 30° 和 15° 。得到的不同入射起偏角时输出与线性双折射关系的仿真结果如图6所示。

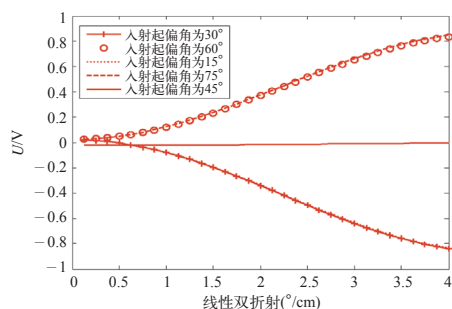


图6 不同入射起偏角时输出与线性双折射的关系

从图6可知,当入射起偏角为 0° 、 45° 和 90° 时,输出电压与线性双折射的关系为一条接近为零的水平直线,即入射起偏角为 0° 、 45° 和 90° 时,线性双折射对输出结果的影响几乎可以忽略不计。当入射起偏角在 $45^\circ\sim 90^\circ$ 之间、线性双折射在 $0\sim 0.5^\circ/\text{cm}$ 之间变化时,曲线接近水平;当线性双折射在 $0.5\sim 3.5^\circ/\text{cm}$ 之间变化时,曲线单调上升;当线性双折射在 $3.5^\circ/\text{cm}$ 以后变化时,曲线接近饱和。当入射起偏角在 $45^\circ\sim 0^\circ$ 之间且线性双折射在 $0\sim 0.5^\circ/\text{cm}$ 之间变化时,曲线接近水平;当线性双折射在 $0.5\sim 3.5^\circ/\text{cm}$ 之间变化时,曲线单调下降;当线性双折射在 $3.5^\circ/\text{cm}$ 以后变化时,曲线接近饱和。由此可知,选择实验条件时,应该选择线性双折射接近 $0^\circ/\text{cm}$,入射起偏角为 0° 、 45° 和 90° 处较合理。

5. 不同线性双折射时输出与入射起偏角的关系

令待测电流 $I=5\ 000\text{ A}$,光程长度为 40 cm ,入射起偏角 $\theta=0\sim 90^\circ$,线性双折射分别为 $0.1^\circ/\text{cm}$ 、 $0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $1^\circ/\text{cm}$ 、 $1.5^\circ/\text{cm}$ 和 $2^\circ/\text{cm}$ 。得到的不同线性双折射时输出与入射起偏角关系的仿真结果如图7所示。

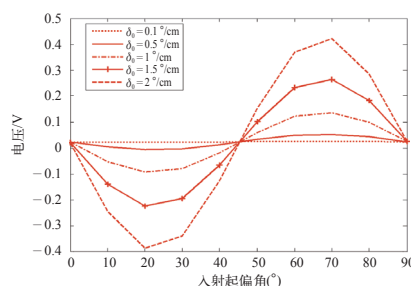


图7 不同线性双折射时输出与入射起偏角关系

从图7分析可得:不同线性双折射时,输出电压与入射起偏角成类似于正弦的规律变化,其变化幅度与线性双折射有关。线性双折射越大,其变化幅度越大。在线性双折射接近为零时,输出电压与入射起偏角为幅值接近零的水平直线。另外,入射起偏角在 $20^\circ\sim 70^\circ$ 附近曲线得到其峰值,在 0° 、 45° 和 90° 时曲线的幅值为零。由此,在实验条件取线性双折射接近零,入射起偏角为 0° 、 45° 和 90° 时,系统的性能最好。

6. 单位长度线性双折射与温度关系

首先折射率与应力和温度的关系^[8]为

$$n(\lambda_0, T, \xi) = n(\lambda_0, T_0) + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \xi} \xi \quad (22)$$

式中, $n(\lambda_0, T_0)$ 为光学玻璃传感头为 $1.31\ \mu\text{m}$ 、环境温度 293 K 时的折射率; $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为此波长下光学玻璃的折射率温度系数; $\frac{\partial n}{\partial \xi}$ 为此波长下光学玻璃的折射率应力系数。

单位长度输出与温度和应力的关系为

$$\delta_0(T, \xi) = A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T - 293) + \frac{\partial n}{\partial \xi} \xi}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T - 293) + \delta_0' \quad (23)$$

式中, A 为与材料有关的常数, $A=9.138 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{T} \cdot \text{cm}$;

$$n(\lambda_0, T_0) = 1.768\ 97; \quad \frac{\partial n}{\partial T} = 5.734 \times 10^{-6} \text{K}^{-1};$$

$$\frac{\partial n}{\partial \xi} = -0.236 \times 10^{-6} / \mu\text{e}.$$

在无应力状态下 ($\xi = 0$), 单位长度线性双折射与温度关系为

$$\delta_0(T, \xi) = A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T-293)}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T-293) + \delta'_0 \quad (24)$$

式中, δ'_0 为温度在 293 K 时的残余线性双折射值。为了定性地研究其对测量系统的影响, 令 δ'_0 分别为 $-0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $-0.25^\circ/\text{cm}$ 、 $0^\circ/\text{cm}$ 、 $0.25^\circ/\text{cm}$ 和 $0.5^\circ/\text{cm}$, 以反映残余线性双折射大小。

单位长度线性双折射在不同量值的残余线性双折射下随温度变化的仿真结果如图 8 所示。

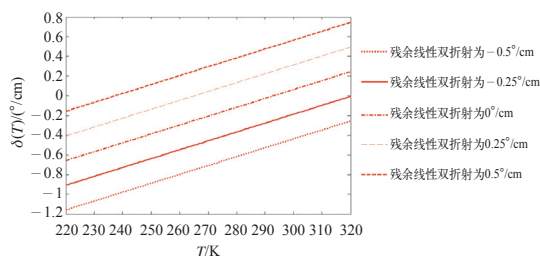


图 8 单位长度线性双折射与温度关系

从图 8 可知, 当残余线性双折射一定时, 单位长度线性双折射与温度呈线性关系, 并且随着温度的上升而上升。由此可知 n_x 的温度系数大于 n_y 的温度系数。当残余应力改变时, 各直线的斜率不会发生变化, 只会改变直线的截距。残余线性双折射的量值对测量系统稳定性有着较大的影响。应尽量选择残余线性双折射小的光学玻璃, 以增加系统的温度稳定性。

将上述单位长度线性双折射表达式代入系统输出表达式, 一般入射起偏角取 45° , 可知考虑温度和应变时, 系统输出表达式为

$$u_{\text{out}} = VI \frac{\sin \left\{ A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T-293) + \frac{\partial n}{\partial \xi} \xi}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T-293) + \delta'_0 \right\} L}{\left[A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T-293) + \frac{\partial n}{\partial \xi} \xi}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T-293) + \delta'_0 \right] L} \quad (25)$$

首先不考虑应力, 即当 $\xi = 0$ 时, 考察系统输出与温度的关系, 此时系统输出表达式为

$$u_{\text{out}} = VI \frac{\sin \left\{ A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T-293)}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T-293) + \delta'_0 \right\} L}{\left[A \left(1 + 3 \frac{\frac{\partial n}{\partial T}(T-293)}{n(\lambda_0, T_0)} \right) (T-293) + \delta'_0 \right] L} \quad (26)$$

令待测电流 $I = 10\ 000\ \text{A}$, 光程长度为 $40\ \text{cm}$, 线性双折射分别为 $-0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $-0.25^\circ/\text{cm}$ 、 $0^\circ/\text{cm}$ 、 $0.25^\circ/\text{cm}$ 和 $0.5^\circ/\text{cm}$, $T = 220 \sim 320\ \text{K}$, 系统输出与温度的关系仿真结果如图 9 所示。

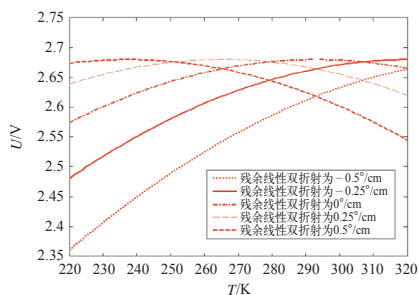


图 9 系统输出与温度关系

从图 9 可知, 当残余线性双折射为负值时, 系统输出随温度单调上升; 当残余线性双折射为 $0^\circ/\text{cm}$ 时, 在 $T = 220 \sim 290\ \text{K}$ 范围内系统输出随温度增大而单调上升, $290\ \text{K}$ 以后系统输出开始随温度上升而下降; 当残余线性双折射为 $0.25^\circ/\text{cm}$ 时, 在 $T = 220 \sim 260\ \text{K}$ 范围内系统输出随温度增大而单调上升, $260\ \text{K}$ 以后系统输出开始随温度上升而下降; 当残余线性双折射为 $0.5^\circ/\text{cm}$ 时, 在 $T = 220 \sim 250\ \text{K}$ 范围内系统输出基本水平, $250\ \text{K}$ 以后系统输出开始随温度上升而下降。随着残余线性双折射的增大, 输出随温度变化曲线的峰值点左移, 即残余线性双折射的量值对测量系统稳定性有着较大的影响; 应尽量选择残余线性双折射小的光学玻璃, 以增加系统的温度稳定性。在环境温度均匀分布且不考虑残余线性双折射的温度特性时, 传感头内由于宏观外应力导致的线性双折射也有相当的量值; 当温度在通常范围内 ($-40 \sim 40\ ^\circ\text{C}$) 变化

时,线性双折射对系统输出的影响可达1%。在温度均匀分布且不考虑残余线性双折射的温度特性时,光学玻璃传感头内的线性双折射主要来自传感头与周围物质相互作用而产生的应力线性双折射,这是高准确度光学电流传感器必须加以考虑的。

接下来分析输出与应力和温度的关系。令待测电流 $I=10\ 000\text{ A}$,光程长度为 40 cm ,残余线性双折射为 $0^\circ/\text{cm}$, $T=220\sim 320\text{ K}$ 时,系统输出与温度和应变的关系仿真结果如图10所示。

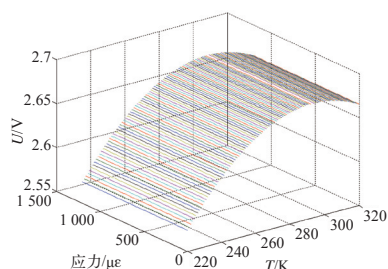


图10 系统输出与温度和应力的关系

从图10可以看出,应力对输出结果的影响基本可忽略,主要是温度的影响。当考虑温度和应力时,根据输出电压的表达式考察输出和应力的关系。

令待测电流 $I=10\ 000\text{ A}$,光程长度为 40 cm ,残余线性双折射分别为 $-0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $-0.25^\circ/\text{cm}$ 、 $0^\circ/\text{cm}$ 、 $0.25^\circ/\text{cm}$ 和 $0.5^\circ/\text{cm}$, $T=313\text{ K}$,系统输出与应力的关系仿真结果如图11所示。

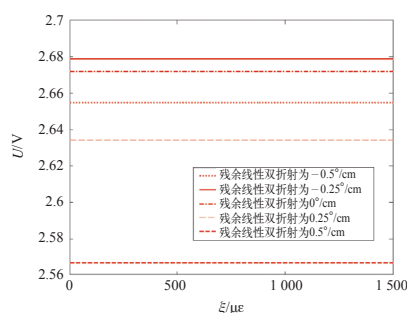


图11 系统输出与应力的关系

从图11可知,当残余线性双折射一定时,输出电压和应力的关系曲线是一条水平直线;当残余线性双折射不同时,则水平直线的幅值发生变化。由此知道应力对输出结果的影响可以忽略不计,此结论与上述分析结果一致。

考虑应力时,令待测电流 $I=10\ 000\text{ A}$,光程长度为 40 cm ,残余线性双折射分别为 $-0.5^\circ/\text{cm}$ 、 $-0.25^\circ/\text{cm}$ 、 $0^\circ/\text{cm}$ 、 $0.25^\circ/\text{cm}$ 和 $0.5^\circ/\text{cm}$, $T=220\sim 320\text{ K}$,系统输出与温度的关系仿真结果如图12所示。

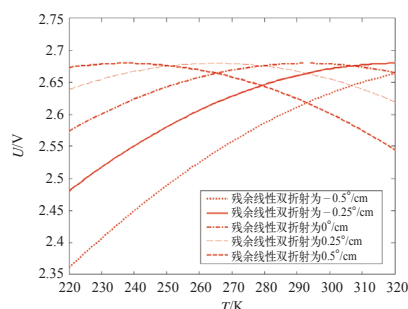


图12 考虑应力时系统输出与温度的关系

从图12可知,当考虑应力时,系统输出与温度的关系与无应力时一样,基本不变。由此可知,应力的影响几乎可以忽略不计,此结论与上述分析结果一致。

结束语

线性双折射远大于法拉第旋转的非理想系统,线性双折射越大,系统输出特性曲线斜率越小,造成所测电流发生微小变化,输出电压值的变化不明显,给测量带来不利影响。选择实验条件时,应该选择线性双折射接近 $0^\circ/\text{cm}$,同时还会以 $\sin^2(\frac{\delta_0 L}{2})$ 的形式影响入射起偏角对输出

曲线截距影响的程度,输出曲线的截距随起偏角改变呈类似正弦样变化,当入射起偏角为 0° 、 45° 或 90° 时,曲线截距为零。当光程长度发生改变时,明显地改变了输出曲线的斜率,并且随着光程长度的增加,输出特性曲线的斜率变小,选择旋光元件时其长度应在 $20\sim 40\text{ cm}$ 之间,为了节省材料,旋光元件的长度选择接近 20 cm 时较合理。

残余线性双折射的量值对测量系统稳定性有着较大的影响;应尽量选择残余线性双折射小的光学玻璃以增加系统的温度稳定性。同时,由于折射率应力系数以 10^{-7} 计量,故应力对输出结果的影响几乎可以忽略不计。

参考文献

[1] Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W, et al. Recent progress in optical current sensing techniques [C]. Rev. Sci Instrum, 1995, 66 (5) : 3097-3111.

[2] Cease T W, Johnston P. A magneto-optic current transducer [J]. IEEE Transactions on Power, 1990, 15 (2) : 548-553.

[3] 刘晔, 王采堂, 苏彦民. 光学电流互感器线性双折射效应的补偿研究——神经网络方法 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1999 (5) : 25-28.

[4] 刘晔, 王采堂, 苏彦民, 等. 电力系统适用光学电流互感器的研究新进展 [J]. 电力系统自动化,

2000, 24 (17) : 60-64.

[5] 王政平, 李庆波, 刘晓瑜, 等. 线性双折射对光学玻璃电流传感器输出特性影响的理论分析 [J]. 光子学报, 2004 (7) : 819-822.

[6] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[7] 王政平, 吴强, 李庆波, 等. 线性双折射温度特性对光学电流互感器影响的理论分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005 (2) : 273-276.

[8] 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响 [J]. 光子学报, 1997 (12) : 1714-1717.

(收稿日期: 2015-03-13) **EA**

(上接第50页)

表2 各种断线情况下 R_2 上的电压值

断线情况	R_2 上电压值/V
无断线	$V_{20} \approx 3.68$
区间①断线	$V_{21} \approx 3.47$
区间②断线	$V_{22} \approx 3.36$
区间③断线	$V_{23} \approx 3.09$
区间④断线	$V_{24} \approx 1.50$

结束语

本文提出了一种三相四线制低压供电系统中性线断线检测方法, 在原有小信号注入法的基础上, 通过设置断线点定位单元将中性线分为若干区间, 从而实现了断线区间定位。该方法与原有实现断线点定位的方法相比, 保留了小信号注入法不受供电系统本身运行状态影响的优点, 直接从断线本身入手, 可以在三相负载平衡的情况下有效判断断线情况。而且与分布式检测方法相比, 判据信息采集极其简便, 仅需根据判据信息采集电阻上电压值的大小即可得出有无断线及断线点所在区间的判断。并且可以根据实际情况灵活布置断线点定位单元, 具有更强的灵活性。该方法为中性线断线故障的及时发现和之后的检修

提供了方便。

参考文献

[1] 王勇, 李志勇, 王永忠. 实现三相四线制供电系统中性线断线保护智能装置的研究 [J]. 低压电器, 2011 (5) : 18-22.

[2] 逯霞. 再议断N线与中性点偏移的关系 [J]. 电气应用, 2010, 29 (15) : 32-33.

[3] 朱雪凌, 王云年, 周国安. 三相四线制低压配电系统中零线断线过电压保护 [J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25 (1) : 33-35.

[4] 张玉良. 中性线断线与单相电压偏差保护 [J]. 电气应用, 2006, 25 (7) : 26-27.

[5] 金良勇. 电力局零线断线智能监测保护系统的实施及运用 [J]. 企业技术开发, 2013, 32 (34) : 69-70.

[6] 雍静, 周浩. 基于谐波的低电压配电网中性线断线检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (19) : 49-57.

[7] 郑楚韬, 陈永杰. 三相四线制系统零线断线检测及保护研究 [J]. 电气技术, 2008 (8) : 83-85.

(收稿日期: 2015-04-23) **EA**