

利用泰勒展开式的光学电流互感器 补偿方法和仿真研究

刘晔, 惠培智, 褚俊龙, 谭雄师
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种全新的补偿光学电流互感器线性双折射效应的方法, 即通过泰勒展开式得到光学电流互感器输出波形中线性双折射效应与波形形状之间的关系, 分析了线性双折射效应对输出波形的影响, 论述了线性双折射效应的具体补偿方法, 推导了基于泰勒展开式求解线性双折射效应的具体过程, 并对该方法进行了验证. 该方法避免了对线性双折射效应 δ 的复杂建模, 利用数学计算直接求取 δ 的值, 计算过程相对简单而且计算量小. 仿真实验表明, 该方法具有很强的精确性和实用性, 通过先分析线性双折射效应而后产生对光学电流互感器补偿的方法, 既提高了系统的长期稳定性, 又保证了补偿的实时性.

关键词: 光学电流互感器; 线性双折射; 泰勒展开; 补偿

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0022-05

Theory and Simulation for Optical Current Transformer Compensation via Taylor Expansion

LIU Ye, HUI Peizhi, CHU Junlong, TAN Xiongshi
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel method to compensate linear birefringence effect of the optical current transformer is proposed. Analyzing the optical current transformer model and the Taylor expansion, the relationship between the optical current transformer output waveform and linear birefringence effect is obtained. The linear birefringence effect on the output waveform and the specific compensation for the linear birefringence effect are discussed. The feasible steps for solving linear birefringence effect via Taylor expansion are presented, where a simple mathematical calculation is chosen to directly derive the linear birefringence effect δ without complicated procedure in modeling. The simulation shows long-term stability and real-time compensation of the improved system.

Keywords: optical current transformer; linear birefringence; Taylor expansion; compensation

光学电流互感器(OCT)是一种以法拉第磁光效应为基础、以光纤为测量和传输介质的电流测量装置,它通过测量偏振光光波穿越磁光材料时偏正面发生旋转的角度来确定被测电流的大小^[1]. 在高压大电流测量的条件下,使用 OCT 较之传统的 CT 具有明显的优越性,绝缘性能好,不会产生磁饱和现

象,线性度好,结构紧凑,体积小,重量轻,价格便宜,无爆炸危险等,在电力系统中有广阔的应用前景^[2-3]. 但是,现在的技术无法直接快速精确地测量偏振光的偏转角,而是需要通过测量偏振光的光强来间接测量. 由于偏振光的光强不仅与偏转角有关,而且与光源强度和线性双折射有关,光源强度和线

性双折射的稳定性会受到温度、压力和振动等影响,使得测量精度和测量灵敏度明显下降,这一直是光学电流互感器性能提升的瓶颈^[4-6]。

线性双折射的影响会造成输出信号的波形发生畸变,而且不同的线性双折射对应于不同程度的波形畸变。根据参数识别理论,本文在波形识别思路的基础上,提出将系统模型利用泰勒级数展开,利用数学计算直接求取线性双折射效应 δ 的值。该方法计算过程相对比较简单,计算量少,而且精度可以大大提高,从而进一步提高了光学电流互感器的稳定性,降低了线性双折射对测量结果的影响。

1 理论基础

光学电流互感器原理主要基于法拉第磁光效应。法拉第磁光效应是指:当一束偏振光通过平行于传播方向的强磁场时,其偏振面发生旋转,旋转角为

$$\theta = \mu \int_L H dl = VN i_h$$

式中: μ 为磁光材料的磁导率; H 为磁场强度; L 为偏振光沿着磁场方向所经过的路径长度; V 为光纤材料的 Verdet 常数; N 为光纤围绕电流导体的匝数; i_h 为穿过光纤环的电流强度。

光源产生的平面光经过起偏器后成为线偏振光,其琼斯矢量为 $\mathbf{X}_m = [\mathbf{U}_m \quad \mathbf{0}]^T$, 其中 $\mathbf{U}_m$ 为光源矢量表达。在不考虑线性双折射在内的各种干扰的情况下,法拉第旋转性质的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

在平行磁场作用下,输出的光信号为

$$\mathbf{U} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{X}_m = \mathbf{U}_m \begin{bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{bmatrix}$$

设线检偏器与起偏器的夹角为 α , 则线检偏器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin\alpha \cos\alpha \\ \sin\alpha \cos\alpha & \sin^2\alpha \end{bmatrix}$$

则经检偏器后输出的光信号为

$$\mathbf{U}_{out} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{U} =$$

$$\mathbf{U}_m \begin{bmatrix} \cos^2\alpha \cos\theta - \sin\theta \sin\alpha \cos\alpha \\ \sin\alpha \cos\alpha \cos\theta - \sin\theta \sin^2\alpha \end{bmatrix}$$

最后经光电转换器检测到的光强为

$$I = \mathbf{U}_{out}^* \cdot \mathbf{U}_{out} = \frac{I_m}{2} [1 + \cos 2(\alpha + \theta)]$$

式中: I_m 为输入光光强。为了使得传感器的灵敏度最大,取起偏器与检偏器的夹角为 45° , 此时有 $I =$

$$\frac{I_m}{2} (1 - \sin 2\theta), \text{ 其中交流分量为 } I_{AC} = \frac{I_m}{2} \sin 2\theta \text{ [2,7-8]。}$$

考虑到磁光材料的线性双折射效应, 光纤法拉第旋转性质的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}$$

式中

$$A = \cos\left(\frac{\Delta}{2}\right) + j \frac{\delta}{\Delta} \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right)$$

$$B = \frac{2\theta}{\Delta} \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right); \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 = \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + \theta^2$$

将 $\mathbf{J}$ 重新代入上述计算过程, 得到线性双折射效应下的输出光强为

$$I = \frac{I_m}{2} \left(1 - 2\theta \frac{\sin\Delta}{\Delta}\right)$$

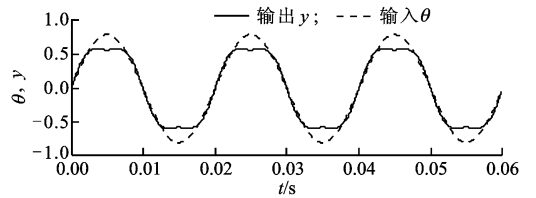
光信号经光电转化和放大后, 再将其中的直流分量和交流分量分离开, 并将交流分量与直流分量相比, 得到

$$y = 2\theta \frac{\sin\Delta}{\Delta} \quad (1)$$

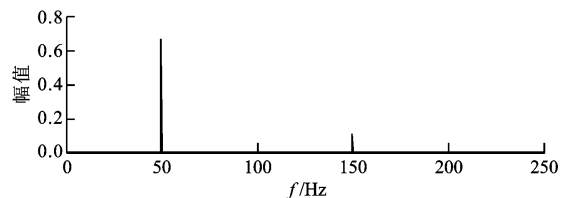
式(1)的结果与系统最初输入光强无关, 与待测信息和线性双折射的影响有关。

2 系统特性分析

基于式(1), 对传感器的输出特性进行仿真分析。设定在 $\alpha = \pi/4$ 时, 输入电流对应的偏转角 $\theta(t) = \frac{\pi}{4} \sin(100\pi t)$, $\delta = \pi/2$, 由此得到响应波形和响应输出的频谱如图 1 所示。由图可见, 响应波形与输入波形没有相位差, 响应波形中引入了 3 次、5 次等奇数次谐波。



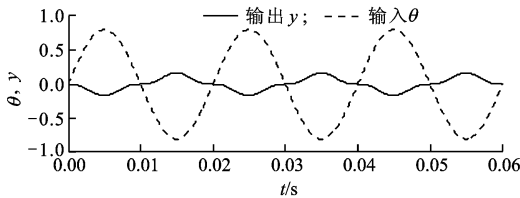
(a) $\delta = \pi/2, \alpha = \pi/4$ 时的波形



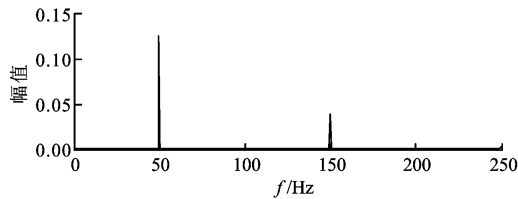
(b) 输出波形 FFT 变化

图 1 $\delta = \pi/2$ 时光纤传感器的输出响应

在 $\delta=\pi$ 、其他输入不变的情况下,得到响应波形和响应频谱如图 2 所示. 由图可见,当线性双折射效应增大后,响应输出的基波明显减小,而且波形也发生明显畸变,谐波分量的比例增加.



(a) $\delta=\pi, \alpha=\pi/4$ 时的波形



(b) 输出波形 FFT 变化

图 2 $\delta=\pi$ 时光纤传感器的输出响应

在不同的输入和线性双折射效应的影响下,取系统输出波形的基波分量绘制等高线,如图 3 所示. 结果表明:线性双折射效应会降低系统的灵敏度,这是由于线性双折射使得平面偏振光变成了椭圆偏振光;在 δ 较大的情况下,交流输出分量几乎接近 0;在直流分量不变的情况下,交流分量的减小造成系统检测交流分量的灵敏度下降^[9].

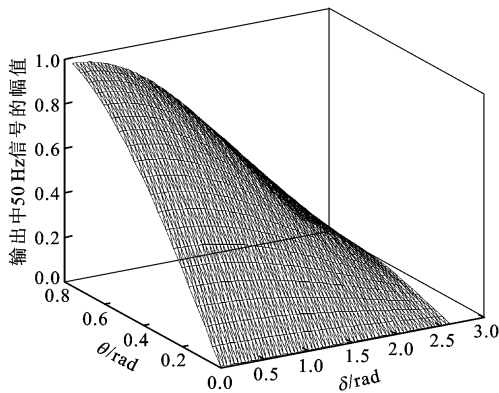


图 3 不同 θ 和 δ 下的响应输出

3 系统补偿方案

由于线性双折射随环境参数变化而造成光纤电流传感器的系统参数 δ 跟随变化,使得系统模型不能长期稳定. 为了让光纤电流传感器长期工作在稳

定可靠的状态下,首要的任务就是参数识别和模型校正.

3.1 基于参数识别的系统补偿

基于系统对应不同的线性双折射输出波形不同这一特性,根据参数识别原理对线性双折射效应进行计算,再利用计算结果 δ_{out} 对采样电流的数据进行补偿计算,补偿原理如图 4 所示^[10].

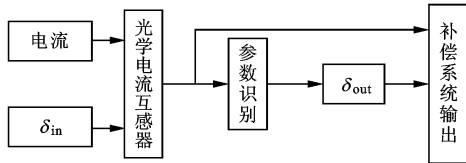


图 4 线性双折射效应的补偿原理

波形识别的思想是不再按照传统的方法把每个采样值作为孤立的数据对待,而是把一组采样值(比如被测信号一个周期的采样值)看成一个整体,利用各个采样点之间的关系和数值特性来分析计算出结果. 所以只有在完成一定次数(一个周期)的采样后才能进行一次补偿计算,这就要求被计算的变量具有一定的稳定性,即在多次采样期间保持不变或者变化非常微小可以忽略不计. 线性双折射受环境温度变化和光纤应力变化等因素的影响,这些因素在实际中变化都非常缓慢,使得线性双折射 δ 可满足上述计算方法的特性要求.

由于输入点电流一般为正弦波,输出波形是对称的,故在一个周期中,只要取前 1/4 周期的波形就足以体现整个波形的特性. 参数识别计算可以取 $\pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12$ 和 $\pi/2$ 时刻 6 个点作为输入,如图 5 所示.

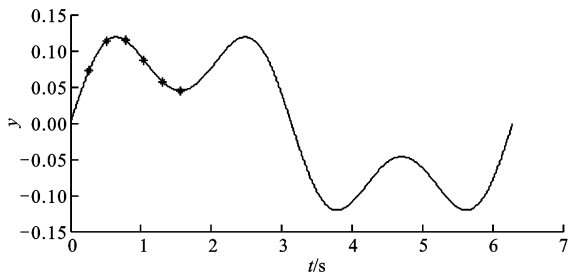


图 5 补偿计算输入取值方法

该方法在输入电流峰值不变的情况下,利用泰勒展开式表示输入与输出波形之间的关系,经过推导提取出线性双折射效应与输出波形中各点之间的关系表达式,从而实现对线性双折射效应的计算.

3.2 基于泰勒级数的系统补偿

基于泰勒级数展开式

$$\sin x \approx x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!}$$

则有

$$\frac{\sin \Delta}{\Delta} \approx 1 - \frac{\Delta^2}{3!} + \frac{\Delta^4}{5!} - \frac{\Delta^6}{7!} + \frac{\Delta^8}{9!}$$

代入全光纤电流互感器系统计算表达式中

$$y = \frac{I_{AC}}{I_{in}} = \theta \frac{\sin \Delta}{\Delta} \approx \frac{2}{2 \ 835} \theta^9 + \left(\frac{2\delta^2}{2 \ 835} - \frac{4}{315} \right) \theta^7 + \left(\frac{\delta^4}{3 \ 780} - \frac{\delta^2}{105} + \frac{2}{15} \right) \theta^5 + \left(\frac{\delta^6}{22 \ 680} - \frac{\delta^4}{420} + \frac{\delta^2}{15} - \frac{2}{3} \right) \theta^3 + \left(\frac{\delta^8}{362 \ 880} - \frac{\delta^6}{5 \ 040} + \frac{\delta^4}{120} - \frac{\delta^2}{6} + 1 \right) \theta = k_9 \theta^9 + k_7 \theta^7 + k_5 \theta^5 + k_3 \theta^3 + k_1 \theta^1 \quad (2)$$

式中

$$k_9 = \frac{2}{2 \ 835}$$

$$k_7 = \frac{2\delta^2}{2 \ 835} - \frac{4}{315}$$

$$k_5 = \frac{\delta^4}{3 \ 780} - \frac{\delta^2}{105} + \frac{2}{15}$$

$$k_3 = \frac{\delta^6}{22 \ 680} - \frac{\delta^4}{420} + \frac{\delta^2}{15} - \frac{2}{3}$$

$$k_1 = \frac{\delta^8}{362 \ 880} - \frac{\delta^6}{5 \ 040} + \frac{\delta^4}{120} - \frac{\delta^2}{6} + 1$$

则对应于 θ 为 $\pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12$ 和 $\pi/2$ 的 5 个点满足如下关系

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= k_9 s_1^9 \theta_m^9 + k_7 s_1^7 \theta_m^7 + k_5 s_1^5 \theta_m^5 + k_3 s_1^3 \theta_m^3 + k_1 s_1 \theta_m \\ y_2 &= k_9 s_2^9 \theta_m^9 + k_7 s_2^7 \theta_m^7 + k_5 s_2^5 \theta_m^5 + k_3 s_2^3 \theta_m^3 + k_1 s_2 \theta_m \\ y_3 &= k_9 s_3^9 \theta_m^9 + k_7 s_3^7 \theta_m^7 + k_5 s_3^5 \theta_m^5 + k_3 s_3^3 \theta_m^3 + k_1 s_3 \theta_m \\ y_4 &= k_9 s_4^9 \theta_m^9 + k_7 s_4^7 \theta_m^7 + k_5 s_4^5 \theta_m^5 + k_3 s_4^3 \theta_m^3 + k_1 s_4 \theta_m \\ y_5 &= k_9 s_5^9 \theta_m^9 + k_7 s_5^7 \theta_m^7 + k_5 s_5^5 \theta_m^5 + k_3 s_5^3 \theta_m^3 + k_1 s_5 \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $s_1 = \sin \frac{\pi}{6}; s_2 = \sin \frac{\pi}{4}; s_3 = \sin \frac{\pi}{3}; s_4 = \sin \frac{5\pi}{12};$

$s_5 = \sin \frac{\pi}{2}; \theta_1 = s_1 \theta_m, \theta_m$ 为输入交流电流峰值对应的法拉第旋转角, θ_m 为未知量; $\theta_2 = s_2 \theta_m; \theta_3 = s_3 \theta_m; \theta_4 = s_4 \theta_m; \theta_5 = s_5 \theta_m; y_1, y_2, y_3, y_4$ 和 y_5 为经过线性双折射影响后测量得到的交流分量与直流分量的比值。

将式(3)化解,有

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_1}{s_1^9} - \frac{y_2}{s_2^9} &= k_7 \left(\frac{1}{s_1^7} - \frac{1}{s_2^7} \right) \theta_m^7 + k_5 \left(\frac{1}{s_1^5} - \frac{1}{s_2^5} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{1}{s_1^3} - \frac{1}{s_2^3} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right) \theta_m \\ \frac{y_1}{s_1^9} - \frac{y_3}{s_3^9} &= k_7 \left(\frac{1}{s_1^7} - \frac{1}{s_3^7} \right) \theta_m^7 + k_5 \left(\frac{1}{s_1^5} - \frac{1}{s_3^5} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{1}{s_1^3} - \frac{1}{s_3^3} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_3} \right) \theta_m \\ \frac{y_1}{s_1^9} - \frac{y_4}{s_4^9} &= k_7 \left(\frac{1}{s_1^7} - \frac{1}{s_4^7} \right) \theta_m^7 + k_5 \left(\frac{1}{s_1^5} - \frac{1}{s_4^5} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{1}{s_1^3} - \frac{1}{s_4^3} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_4} \right) \theta_m \\ \frac{y_1}{s_1^9} - \frac{y_5}{s_5^9} &= k_7 \left(\frac{1}{s_1^7} - \frac{1}{s_5^7} \right) \theta_m^7 + k_5 \left(\frac{1}{s_1^5} - \frac{1}{s_5^5} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{1}{s_1^3} - \frac{1}{s_5^3} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_5} \right) \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为了方便表达,将式(4)简化表达为

$$\left. \begin{aligned} y_{12} &= k_7 s_{122} \theta_m^7 + k_5 s_{124} \theta_m^5 + k_3 s_{126} \theta_m^3 + k_1 s_{128} \theta_m \\ y_{13} &= k_7 s_{132} \theta_m^7 + k_5 s_{134} \theta_m^5 + k_3 s_{136} \theta_m^3 + k_1 s_{138} \theta_m \\ y_{14} &= k_7 s_{142} \theta_m^7 + k_5 s_{144} \theta_m^5 + k_3 s_{146} \theta_m^3 + k_1 s_{148} \theta_m \\ y_{15} &= k_7 s_{152} \theta_m^7 + k_5 s_{154} \theta_m^5 + k_3 s_{156} \theta_m^3 + k_1 s_{158} \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $y_{1i} = \frac{y_1}{s_1^9} - \frac{y_i}{s_i^9}; s_{1ij} = \frac{1}{s_1^j} - \frac{1}{s_i^j}, i=2,3,4,5, j=2,$

4,6,8. 将式(5)再次化简,消掉 θ_m^7 项,则有

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_{12}}{s_{122}} - \frac{y_{13}}{s_{132}} &= k_5 \left(\frac{s_{124}}{s_{122}} - \frac{s_{134}}{s_{132}} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{s_{126}}{s_{122}} - \frac{s_{136}}{s_{132}} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{s_{128}}{s_{122}} - \frac{s_{138}}{s_{132}} \right) \theta_m \\ \frac{y_{12}}{s_{122}} - \frac{y_{14}}{s_{142}} &= k_5 \left(\frac{s_{124}}{s_{122}} - \frac{s_{144}}{s_{142}} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{s_{126}}{s_{122}} - \frac{s_{146}}{s_{142}} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{s_{128}}{s_{122}} - \frac{s_{148}}{s_{142}} \right) \theta_m \\ \frac{y_{12}}{s_{122}} - \frac{y_{15}}{s_{152}} &= k_5 \left(\frac{s_{124}}{s_{122}} - \frac{s_{154}}{s_{152}} \right) \theta_m^5 + k_3 \left(\frac{s_{126}}{s_{122}} - \frac{s_{156}}{s_{152}} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{s_{128}}{s_{122}} - \frac{s_{158}}{s_{152}} \right) \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(16)简化表达为

$$\left. \begin{aligned} y_{23} &= k_5 s_{234} \theta_m^5 + k_3 s_{236} \theta_m^3 + k_1 s_{238} \theta_m \\ y_{24} &= k_5 s_{244} \theta_m^5 + k_3 s_{246} \theta_m^3 + k_1 s_{248} \theta_m \\ y_{25} &= k_5 s_{254} \theta_m^5 + k_3 s_{256} \theta_m^3 + k_1 s_{258} \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $y_{2i} = \frac{y_{12}}{s_{122}} - \frac{y_{1i}}{s_{1i2}}; s_{2ij} = \frac{s_{12j}}{s_{122}} - \frac{s_{1ij}}{s_{1i2}}, i=3,4,5, j=$

4,6,8. 将式(7)中的 θ_m^5 消除后,得到

$$\left. \begin{aligned} \frac{y_{23}}{s_{234}} - \frac{y_{24}}{s_{244}} &= k_3 \left(\frac{s_{236}}{s_{234}} - \frac{s_{246}}{s_{244}} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{s_{238}}{s_{234}} - \frac{s_{248}}{s_{244}} \right) \theta_m \\ \frac{y_{23}}{s_{234}} - \frac{y_{25}}{s_{254}} &= k_3 \left(\frac{s_{236}}{s_{234}} - \frac{s_{256}}{s_{254}} \right) \theta_m^3 + k_1 \left(\frac{s_{238}}{s_{234}} - \frac{s_{258}}{s_{254}} \right) \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

简化表达为

$$\left. \begin{aligned} y_{34} &= k_3 s_{346} \theta_m^3 + k_1 s_{348} \theta_m \\ y_{35} &= k_3 s_{356} \theta_m^3 + k_1 s_{358} \theta_m \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $y_{3i} = \frac{y_{23}}{s_{234}} - \frac{y_{2i}}{s_{2i4}}, s_{3ij} = \frac{s_{23j}}{s_{234}} - \frac{s_{2ij}}{s_{2i4}}, i=4, 5, j=6,$

8. 则有

$$\frac{y_{34}}{s_{346}} - \frac{y_{35}}{s_{356}} = k_1 \left(\frac{s_{348}}{s_{346}} - \frac{s_{358}}{s_{356}} \right) \theta_m \quad (10)$$

令 $\frac{y_{34}}{s_{346}} - \frac{y_{35}}{s_{356}} = y_{45}, \frac{s_{348}}{s_{346}} - \frac{s_{358}}{s_{356}} = s_{458}$, 式(10)可简

化表达为 $y_{45} = k_1 s_{458} \theta_m$, 则得到 $\theta_m = \frac{y_{45}}{k_1 s_{458}}$, 代入式(9), 可以得到

$$k = \frac{k_3}{k_1^3} = \left(y_{34} - \frac{s_{348} y_{45}}{s_{458}} \right) \left(\frac{s_{458}^3}{s_{346} y_{45}^3} \right) \quad (11)$$

根据式(2), 可知

$$k = \frac{k_3}{k_1^3} = \left(\frac{\delta^6}{22\,680} - \frac{\delta^4}{420} + \frac{\delta^2}{15} - \frac{2}{3} \right) / \left(\frac{\delta^8}{362\,880} - \frac{\delta^6}{5\,040} + \frac{\delta^4}{120} - \frac{\delta^2}{6} + 1 \right)^3 \quad (12)$$

根据式(12)在 0 到 π 之间的曲线(见图 6)可知, 上述函数在区间 $[0, \pi]$ 上具有单调性, 即由式(11)求得的 k 值, 在区间 $[0, \pi]$ 上有唯一的解。此时, 线性双折射 δ 与 k 的关系为一条曲线, 而且这条特性的曲线与输入电流的峰值没有关系。

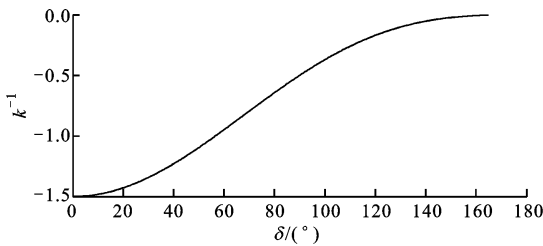


图6 线性双折射 δ 与 $1/k$ 的关系

虽然式(12)的反函数求解比较难, 但利用折半逼近的方法, 可以很快地根据式(11)计算得到的 k 求解出 δ , 计算结果与标准值之间的误差如图 7 所示。

3.3 误差分析

(1) 误差值的正负取决于折半逼近的方向, 是由程序的特点决定的, 与光学电流互感器系统特性没有关系, 误差的大小在一定程度上取决于折半逼近程序设计的目标误差。

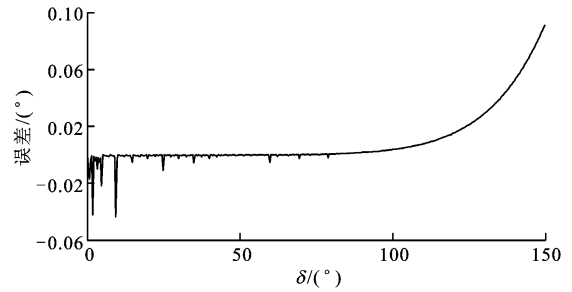


图7 计算结果误差曲线

(2) 在 $[0^\circ, 150^\circ]$ 范围内可以比较精确地得到线性双折射 δ 的值, 在 δ 小于 100° 时, 误差基本在 0 附近, 此时产生的误差主要是由折半逼近程序求解计算精度带来的。

(3) 随着 δ 接近 180° , 误差逐渐增大。根本原因是当线性双折射对法拉第磁光效应有削弱作用, δ 接近 180° 使得能够测量到的旋转角 y_1, y_2, y_3, y_4 和 y_5 在相同电流作用下变得非常小, 此时在泰勒级数中可以忽略的微小项对计算结果的影响变大, 从而造成计算误差在 δ 接近 180° 时增大。

4 结 论

(1) 线性双折射效应是限制光学电流互感器实用化的关键因素, 而线性双折射对光学电流互感器的作用是相当复杂的, 受到众多因素的影响, 要建立起完整的相互关系是非常困难的。本文避免由机理建模, 而是从线性双折射效应的现象中直接提取影响参数值, 从而大大提高了光学电流互感器的稳定性。

(2) 利用线性双折射效应的相对稳定性, 提出直接求解线性双折射效应后对光学电流互感器进行补偿的方法。采用泰勒级数近似展开式进行计算, 计算速度快、精度高, 易于计算机编程实现。数值实验证明, 线性双折射效应 δ 在较大范围内发生变化时都可较精确地求解, 可以满足工程实用的要求。

(3) 利用泰勒展开式实现线性双折射效应的补偿虽然是一种可行的方案, 但其计算对数值精度的要求较高, 这一问题还需要更进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 刘晔, 陈江波, 束秀梅, 等. 光源调制全光纤电流互感器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 436-439. LIU Ye, CHEN Jiangbo, SHU Xiumei, et al. Fiber optical current transformers based on modulated light source [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 436-439.
- [2] 韦兆碧. 聚磁式光学电流互感器的数字补偿研究[D].

- 西安:西安交通大学,2008.
- [3] 刘晔,王采堂,韦兆碧,等. 三相光学电流传感器的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(2):127-130.
LIU Ye, WANG Caitang, WEI Zhaobi, et al. Experimental research on three-phase optical current transducer system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002,36(2): 127-130.
- [4] 李红斌,刘延冰. 光学电流互感器温度补偿方法[J]. 仪表技术与传感器,2004(4):32-33.
LI Hongbin, LIU Yanbing. Temperature compensatory methods of optical current transformer [J]. Instrument Technique and Sensor,2004(4):32-33.
- [5] 刘晔,王采堂,苏彦民,等. 三相光学电流互感器的双折射效应研究[J]. 西安交通大学学报,2000,34(2):24-27.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin, et al. Birefringence of three-phase optical current transducer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000,34(2):24-27.
- [6] WANG Zheng Ping, LIU Xiao Yu, ZHANG Yi Min. Theoretical analysis of the effects of linear birefringence upon optical glass current transformers with different optical designs[J]. Measurement,2007,40:811-815.
- [7] 刘晔,王采堂,苏彦民. 三相光学电流互感器基础理论研究[J]. 高电压技术,1999,25(4):84-88.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin. The foundational theory of three-phase optical current transducer system [J]. High Voltage Engineering, 1999,25(4): 84-88.
- [8] 刘晔,王采堂,苏彦民,等. 三相光学电流互感器系统的建模[J]. 西安交通大学学报,1999,33(12):23-25.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin. Modeling of three-phase optical current transducer system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999,33(12):23-25.
- [9] 林森,杜林,王士彬,等. 基于法拉第磁光效应的光学电流传感器电气特性研究[J]. 传感技术学报,2010,23(4):490-495.
LIN Sen, DU Lin, WANG Shibin, et al. Study electrical property of the optical current sensor based on Faraday magneto-optical effect [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010,23(4):490-495.
- [10] 刘晔,王采堂,苏彦民. 基于BP网络的三相光学电流互感器的补偿[J]. 西安交通大学学报,2000,34(6):1-5.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin. BP neural network for linear birefringence of three-phase optical current transducer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000,34(6):1-5.

(编辑 杜秀杰)