

基于MR3-2磁光玻璃的光学电流传感器响应特性研究

磁光玻璃是光学电流传感器重要环节。采用MR3-2磁光玻璃作为光学电流传感器的磁光介质，研究其响应特性，将推动光学电流传感器的发展。通过法拉第磁光效应实验平台，对传感器在交流正弦激励下的响应特性进行了实验研究。响应特性包括：响应波形、幅值特性、频率特性和温度特性。通过实验研究得到：采用此种新型磁光介质的光学电流传感器具有优良的响应波形和幅值特性，而其频率特性不甚理想。在不同温度范围内，响应幅值随温度的变化率基本一致。

林 森/国网重庆市电力公司江北供电分公司 杜茗茗/国网重庆市电力公司检修分公司 王士彬/国网重庆市电力公司南岸供电分公司

0 引言

随着电力系统的发展，系统容量不断增加，电网运行电压等级也越来越高。电流互感器作为电力系统中进行电能计量和继电保护的重要设备，其准确度及可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行密切相关。传统的电磁式电流互感器存在着诸多缺点，越来越难适应电力系统发展的需求。例如：绝缘复杂，体积大；磁饱和；铁磁谐振；存在磁滞。虽然研究人员也在不断改进，但这并不能从根本上改变传统电磁式电流互感器的缺点。

因此，研究人员将目光转向新型电流传感器的研究，光学电流传感器便是在此背景下产生的^[1-4]。光学电流传感器的种类很多，原理也各有不同。本文研究基于法拉第磁光效应的光学电流传感器。传统磁光玻璃具有费尔德（Verdet）系数小（灵敏度低）、应力双折射和温度敏感性等缺点，严重制约了光学电流

传感器的发展。本文采用MR3-2新型磁光玻璃作为磁光介质，其具有Verdet系数大（普通重火石磁光玻璃的10倍左右）、加工过程消除了应力双折射和温度敏感性较小等优点。对其响应特性进行系统的实验研究，将有助于光学电流传感器的发展。本文基于实验数据，发现采用此种新型磁光介质的光学电流传感器具有优良的响应波形和幅值特性，而其频率特性不甚理想。在不同温度范围内，响应幅值随温度的变化率基本一致。

1 基本原理

当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光介质时，线偏振光的偏振面就会随着平行于光线方向的磁场发生旋转。旋转的这个角度称之为法拉第旋转角，用 β 表示。这就是法拉第磁光效应。法拉第磁光效应原理示意图如图1所示。

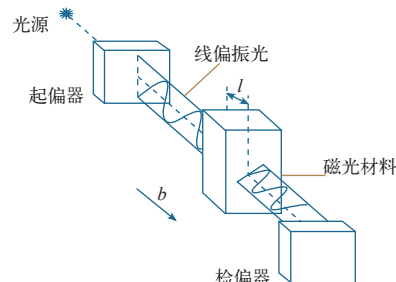


图1 法拉第磁光效应原理示意图

如果磁场是由交流电流引起的，那么 β 又可进一步表示为

$$\beta = \beta_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中， β_0 为法拉第旋转角的调制幅度。

又



林 森/工程师

关键词/Keywords

MR3-2磁光玻璃 ·
响应波形 ·
幅值特性 ·
频率特性 ·
温度特性 ·

$$\beta_0 = VBl \quad (2)$$

式中, V 为磁光材料的Verdet常数; B 为电流引起的磁场大小; l 为偏振光透射磁光介质的光程, 即磁光介质的厚度。

另外, 根据马吕斯定律

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha \quad (3)$$

式中, I_1 为入射线偏振光的光强; I_2 为透射光的光强(不计检偏器对透射光的吸收); α 为起偏镜与检偏镜透光轴之间的夹角。

在交流电流引起磁场调制后, 马吕斯定律进一步表示为

$$I_2 = I_1 \cos^2 (\alpha + \beta) \quad (4)$$

根据式(4)得知: 通过测量 I_2 , 可以间接测得式(1)中的交流电流 $i(t) = \sin(\omega t)$ 。这就是此种光学电流传感器的基本原理。

另外, 在 α 取特殊值的情况下将式(4)展开得到

$$\begin{cases} \alpha = 3\pi/4, 7\pi/4; I_2 = \frac{1}{2}I_1(1 + \sin 2\beta) \\ \alpha = \pi/4, 5\pi/4; I_2 = \frac{1}{2}I_1(1 - \sin 2\beta) \end{cases} \quad (5)$$

即 α 的不同取值将引起响应波形的变化。

2 实验平台

基于法拉第磁光效应, 设计了如图2所示的光学电流传感器实验平台。

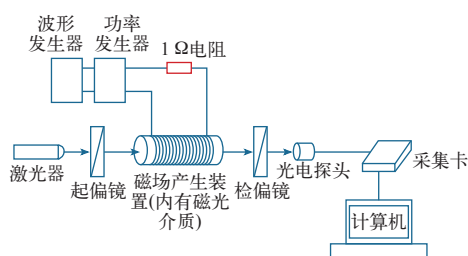


图2 实验平台示意图

从图2可以看出: 基于法拉第磁光效应的光学电流传感器实验平台主要由光学装置、磁场产生装置及磁光介质、光电转换装置和信号采集装置组成。其中, 磁场产生装置为螺线管。激励电流由信号发生器经功率放大器后产生。磁光介质采用MR3-2磁光玻璃, 放置于螺线管内。磁场作

用下, 通过磁光介质发生旋转的线偏振光经过检偏镜后由光电转换装置将光强信号转换为电压信号。电压信号放大后, 通过采集卡将信号采集到计算机上。为减小磁场干扰, 光电转换装置、信号采集单元均采取了一定的屏蔽措施。同时, 为防止整流电路中谐波对响应信号的影响, 所有需要直流电源的器件均采用蓄电池供电。

3 实验数据分析

3.1 响应波形

根据式(5)可以看出: α 的不同取值将引起响应波形的变化。文献[5]对 α 为几个特殊角度情况下的响应波形进行了仿真。根据文献[5]的结果, 实验时设定 $\alpha = \pi/4$ 和 $\alpha = 3\pi/4$ 。在交流正弦激励电流大小为2 A, 频率为75 Hz, 磁光玻璃厚度为3 mm, $\alpha = 3\pi/4$ 下的激励和响应波形如图3所示。由于激光器存在高频成分, 为避免其对响应波形的影响, 对激励和响应均进行低通数字滤波; 另外, 由于响应中必定存在直流成分, 为了更加直观地反映响应的交流成分, 采用高通数字滤波。最终, 采用同样截止频率的带通数字滤波, 对激励和响应同时滤波, 得到在激励电流大小为2 A, 频率为75 Hz, 磁光玻璃厚度为3 mm下的波形如图4、图5所示。

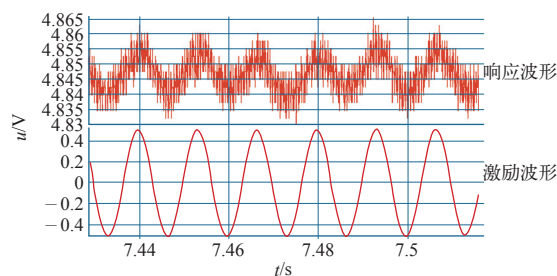


图3 $\alpha = 3\pi/4$ 下的激励与响应波形

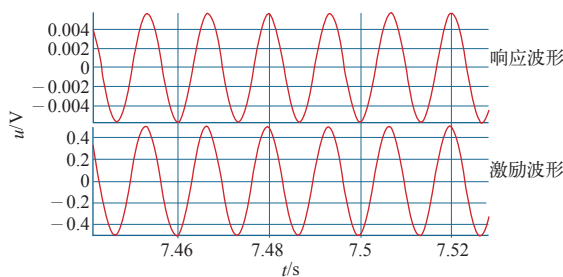
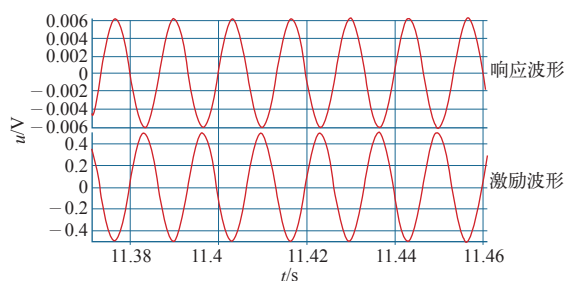


图4 $\alpha = 3\pi/4$ 下的激励与响应波形


 图5 $\alpha = \pi/4$ 下的激励与响应波形

从图4和图5可以看出,实验所得的波形与式(5)及文献[5]仿真结果吻合,即:在 $\alpha = 3\pi/4$ 时,响应为正弦交流信号,频率与激励信号频率一致,几乎没有相位差。 $\alpha = \pi/4$ 时,响应为正弦交流信号,频率与激励信号频率一致,存在大小几乎为 π 的相位差。

从图3可以看出:由于实验磁场产生装置的磁场强度较小,系统信噪比较低。通过增大磁场产生装置的磁场强度可以提高系统信噪比。

3.2 响应幅值特性

根据式(2)可以看出:增大磁光介质的厚度 l 可以增大法拉第旋转角的调制幅度 β_0 ,进而提高响应的幅值。在响应幅值特性实验中,交流正弦激励的频率为75 Hz,激励大小从0.5 A到4.0 A变化,在保证入射光强一定的情况下,对3 mm和5 mm的MR3-2磁光玻璃分别进行实验,得到其响应的幅值特性曲线如图6所示。

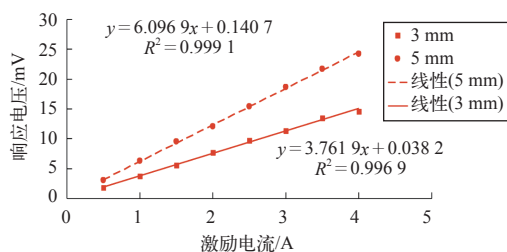


图6 响应的幅值特性

从图6中可以看出:在同样幅值的激励下,5 mm磁光玻璃的响应幅值比3 mm磁光玻璃的响应幅值大。这与式(2)是吻合的。设定 $l_1 = 5$ mm, $l_2 = 3$ mm,由于磁光玻璃幅值特性曲线的 R^2 值几乎等于1,可以认为幅值特性曲线是一直线。因此,可以用直线的斜率来衡量其响应幅值的大小。5 mm

磁光玻璃幅值特性曲线的斜率为 $A_1 = 6.0969$, 3 mm磁光玻璃幅值特性曲线的斜率为 $A_2 = 3.7619$, 则

$$\frac{l_1}{l_2} \approx \frac{A_1}{A_2} \quad (6)$$

由此可见,增加磁光玻璃的厚度,即增加磁光介质的光程,也是提高响应幅值(即提高响应的灵敏度和系统信噪比)的有效途径。

在此实验中,可以算得在激励电流大小为4 A情况下5 mm磁光玻璃的 β_0 值。根据通电螺线管磁场计算公式得到激励电流大小为4 A时磁场装置的磁场强度为

$$B = \frac{NI\mu_0}{L} = \frac{630 \times 4 \times 4\pi \times 10^{-7}}{0.441} = 7.18 \text{ mT} \quad (7)$$

根据式(2)可得

$$\beta_0 = (95.7 \times 7.18 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3}) \text{ rad} = 3.42 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

3.3 频率特性分析

频率特性也是衡量传感器性能的重要指标。由于实验装置的限制,设定交流正弦激励电流的频率为5 Hz、10 Hz、30 Hz、75 Hz、100 Hz、200 Hz、400 Hz和500 Hz,激励的大小为2 A。在保证入射光强一定的情况下,采用3 mm磁光玻璃进行实验,得到其响应的幅频和相频特性曲线分别如图7、图8所示。

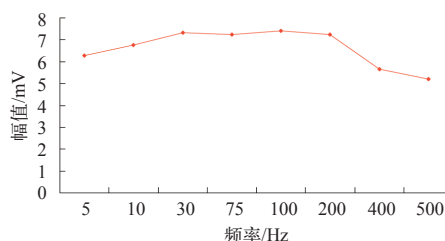


图7 响应的幅频特性

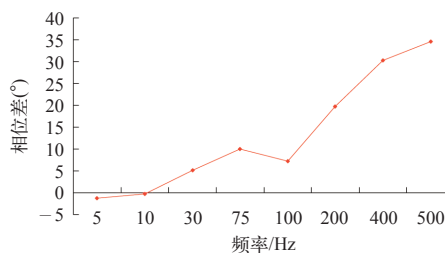


图8 响应的相频特性

从图7中可以看出：3 dB幅值衰减频率为500 Hz。

图8中，正值表示响应信号滞后激励的角度。从图8中可以看出：随着激励信号频率的增加，激励信号与响应信号的相位差将增大。

即：响应的幅频和相频特性均不甚理想。

3.4 温度特性分析

顺磁性物质的Verdet系数与温度有关系，由于实验中采用的MR3-2磁光玻璃为顺磁性，温度引起的Verdet系数的变化将直接导致响应的灵敏度和响应幅值的变化。对不同温度下响应的幅值特性进行研究，可以得到此种光学电流传感器的温度特性。为了保证磁光介质的温度与温控箱箱体温度尽可能一致，在温控箱温度达到设定值后，继续加热保持10 min，以保证充分的热平衡，使磁光介质的温度与设定值尽量一致。之后，关闭温控箱的加热装置，以免加热装置的振动对实验产生影响。由于温控箱具有很好的密闭性，以及在箱体上做了保温处理，可以认为实验进行过程中的温度与设定的温度值基本相同。

在温度特性实验中，交流正弦激励电流的频率为75 Hz，激励的大小从0.5 A到4.0 A变化，入射光强恒定，采用厚度为5 mm的磁光玻璃，得到不同温度下的响应幅值特性曲线。18 °C、40 °C、70 °C和90 °C下的响应幅值特性曲线如图9所示。

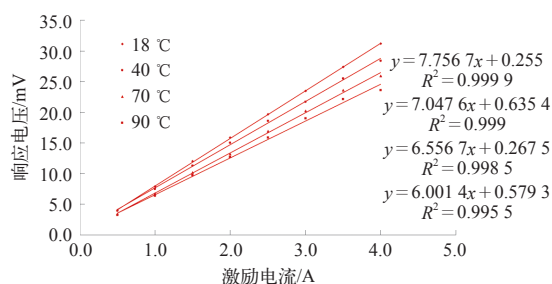


图9 不同温度下磁光玻璃的幅值特性

图9中4条曲线和曲线的拟合公式从上到下分别对应18 °C、40 °C、70 °C和90 °C。由式(4)可以知道：在入射光强为一恒定值的前提下，响应幅值的大小只与 β_0 相关。由于磁光玻璃幅值特性曲线的 R^2 值几乎等于1，可以认为幅值特性曲线是

一直线。因此，可以用直线的斜率来衡量其响应幅值的大小。由于磁场强度 B 在几个温度点下变化率相同，光程 l 在几个温度点下同为5 mm。根据式(2)得知：引起不同温度下幅值特性曲线斜率变化的唯一因素就是Verdet系数。

1934年，Van Vleck等基于量子理论，得到顺磁性物质的Verdet常数，计算公式为

$$V = (K/T)(Nn_{\text{eff}}^2/g) \sum_n [C_n/(v^2 - v_n^2)^2] \quad (8)$$

式中， $K = 4\pi\mu_B v^2/3ch$ ， k 为波尔兹曼常数； g 为Lande分裂系数； $n_{\text{eff}} = g[J(J+1)]^{1/2}$ ， J 为总的角动量子数； N 为单位体积内顺磁离子数； C_n 为跃迁几率； T 为绝对温度。

式(8)表明：顺磁性物质的Verdet常数与单位体积内顺磁离子数以及有效波尔磁子数 n_{eff} 的二次方成正比，且随着温度的升高，Verdet常数减小。

从式(8)可以看出：顺磁性磁光介质的Verdet常数随温度的升高而减小。其原因是随温度的升高，电子热振动的振幅增大，对在外加磁场引起的磁矩振幅变化的阻碍作用增大，使磁光玻璃表现出较弱的顺磁性^[6]。

从图9中得知，随着温度的升高，幅值特性曲线的斜率在减小，也就是Verdet系数在减小，这与上述理论是吻合的。另外，从图9中得到，从18 °C到90 °C，幅值特性曲线的斜率从7.7567变化为6.0014，设定 A 为18 °C到90 °C斜率的变化率，得到

$$A = \frac{6.0014 - 7.7567}{7.7567} = -0.2263 = -22.63\% \quad (9)$$

A 值为负表示随着温度的升高，响应幅值将减小。为了进一步分析温度对于响应幅值的影响程度，设定以18 °C下的响应幅值为基准，根据实验数据可以得到18~40 °C，响应幅值随温度的变化率为-0.276%，即温度每升高1 °C，同样激励电流大小下，响应的幅值较18 °C时减小-0.276%。同样，得到18~70 °C，响应幅值随温度的变化率为-0.292%；得到18~90 °C，响应幅值随温度的变化率为-0.278%。由此可知：在不同温度范围内，响应幅值随温度的变化率基本一致，不存在特别敏感的温度区域。但是，采用MR3-2新型磁

光玻璃的作为磁光介质，温度每升高1℃，响应幅值将减小将近0.3%，说明此种光学电流传感器对温度是非常敏感的，实际运用中如果不加恒温装置，测量准确度受环境温度的影响非常大。

4 结束语

通过基于法拉第磁光效应的光学电流传感器实验平台，采用MR3-2新型磁光玻璃作为光学电流传感器的传感介质，得到了相关响应特性。实验结果表明：

1) 在 $\alpha = 3\pi/4$ 时，响应为正弦交流信号，频率与激励信号频率一致，几乎没有相位差。 $\alpha = \pi/4$ 时，响应为正弦交流信号，频率与激励信号频率一致，存在大小几乎为 π 的相位差。

2) $\beta_0 \in [0, 3.42 \times 10^{-4} \text{ rad}]$ 情况下，响应幅值特性曲线的线性度均在99%以上。增加磁光玻璃的厚度，即增加磁光介质的光程，是提高响应幅值（即提高响应的灵敏度和系统信噪比）的有效途径。

3) 此种光学电流传感器具有温度敏感性。在18~90℃温度范围内，响应幅值随温度的变化率基本一致，不存在温度敏感区域；响应幅值随温度的变化率大约为-0.3%。

参考文献

- [1] Cease T W, Paul Johnston. A magneto-optic current transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5 (2) : 548-555.
- [2] McClelland T D. 345 kV Substation optical current measurement system for revenue metering and protective relaying [J]. IEEE Transactions on power Delivery, 1991.
- [3] Bull J D, Jaeger N A F, Rahmatian F. A new hybrid current sensor for high-voltage applications

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1) : 32-38.

- [4] Cease T W, Johnston P A. Magneto-optic current transducer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5 (2) : 548-555.
- [5] 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.
- [6] 底楠, 赵建林, 姜亚军, 等. 顺磁性铽玻璃法拉第效应温度特性实验研究 [J]. 光子学报, 2006, 35 (11) : 1645-1648.
- [7] 刘公强, 刘湘林. 磁光调制和法拉第旋转测量 [J]. 光学学报, 1984 (7) .
- [8] 郑颖君, 徐志玲. 一种新的旋光度测量方法的研究 [J]. 中国计量学院学报, 1999 (1) : 54-59.
- [9] 于文斌, 等. 光学电流互感器的性能分析与试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38 (3) : 353-356.
- [10] 李永安, 等. 磁光调制的模拟与特性分析 [J]. 西北大学学报, 2007, 37 (5) : 719-723.
- [11] 郑颖君, 侯宇. 旋光度测量原理的研究 [J]. 计量学报, 2000, 21 (14) : 268-272.
- [12] 李永安, 等. 正弦波与方波磁光调制的比较分析 [J]. 光子学报, 2007, 36 (6) .
- [13] 张宁泉, 等. 交变磁场下法拉第效应研究 [J]. 光学学报, 1995, (4) : 486-491.
- [14] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] B. B. 阿法纳西耶夫. 电流互感器 [M]. 陆安业, 译. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [16] 刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.

(收稿日期: 2015-08-15) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告