

文章编号:1004-4213(2010)01-0057-5

一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器

王嘉^{1,2}, 侯宏录¹, 徐金涛²

(1 西安工业大学, 西安 71000)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:为了消除震动对 Sagnac 式电流传感器测量结果的影响,提出一种光路改进方法来消除传感器对震动的敏感性,其基本原理是抵消 Sagnac 效应而不影响法拉第磁光效应.利用琼斯矩阵对改进后的光路结构进行了偏振态分析,理论分析和实验结果吻合,表明改进后的传感器其输出与震动无关.耦合半波片后 Sagnac 式光纤电流传感器的震动敏感性被消除了,为 Sagnac 式光纤电流传感器的工程化实现提供了一种可行的方法.

关键词:光纤电流传感器;Sagnac 效应;震动敏感性

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0057

0 引言

随着电力系统中电网电压等级的不断提高、容量不断增加,对电流传感器的要求越来越高.传统电磁式电流传感器由于存在着绝缘安全困难等问题,无法满足高压、超高压电网的电流测量和保护的需要.借鉴光纤陀螺信号处理技术^[1-2],将 Sagnac 式光纤传感器应用于高压、超高压电网的电流测量领域,具有体积小、重量轻、无潜在的爆炸危险等优点,克服了电磁式电流传感器在超高压情况下存在的绝缘困难的问题.因而作为在高压大电流场合取代传统电磁式电流传感器的一种换代产品而备受关注.

但是这种 Sagnac 式光纤电流传感器未进入实际应用阶段.原因之一是这种 Sagnac 式光纤电流传感器既能敏感电流又能敏感 Sagnac 效应,因而传感器输出变化无法分辨是外界环境影响还是高压导线中电流本身的变化.对震动的敏感影响了电流传感器的测量准确性,阻碍了实际应用.本文对 Sagnac 式光纤电流传感器的光路结构进行了改进,消除其对震动的敏感性.并利用琼斯矩阵对其进行了偏振态分析,为 Sagnac 式光纤电流传感器的工程化实现提供了一种可行的方法.

1 Sagnac 式光纤电流传感器基本原理

Sagnac 式光纤电流互感器结构如图 1^[3-4].光源发出的光经过 Y 波导起偏部分起偏为线偏光,分成

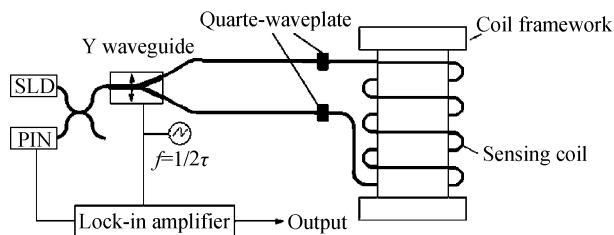


图 1 Sagnac 式光纤电流传感器
Fig. 1 Sagnac fiber current sensor

两路注入到保偏光纤中的一个模态中,分别被四分之一波片转换成圆偏振光(两束光旋向相同)沿相反方向进入传感光纤,由于法拉第磁光效应的存在,其两束圆偏振光的偏振面发生旋转,然后再次经过另一四分之一波片重新转换成线偏振光返回 Y 波导起偏部分发生干涉.穿过线圈骨架的导线中无电流传导时,两束光波在传感光纤中以圆偏振态传播时光速一致,均为 V_0 ,此时两束光波在 Y 波导起偏部分干涉时无相位差.当导体中有电流流过时,根据安培环路定理可知,在通电导体附近产生了感生磁场.而法拉第磁光效应的一种表现形式是沿磁场方向传播的圆偏振光的光速发生变化,变成 $V_1 > V_0$ 或 $V_2 < V_0$ (有 $V_1 - V_0 = V_0 - V_2$),圆偏振光光速变成 V_1 还是 V_2 与圆偏振光的旋向(左右)以及光传播方向(与磁场方向相同与否)有关.两束光波在传感光纤内传播方向相反,因此以圆偏振态传播时一束光速为 V_1 ,另一束光速为 V_2 ,因为 $V_1 > V_2$,所以两束光波在 Y 波导起偏部分干涉时存在相位差.由法拉第磁光效应产生的相位差 $\Phi_F = 2\phi_F = 2VHI = VII/\pi r$.由此可知,相位差与电流大小成正比.又因两束光波先后经过了相同的光路,但传播方向相反,因此干涉光强只与非互易性相位差有关.通过测量

某一时刻的干涉光强,求出相位差,进而可得到该时刻相应的电流大小.

取 Y 波导起偏部分的透光轴为参考坐标系的 x 轴. 设激光器发出的光为 $E_0 = \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \end{bmatrix}$, 要求使用低偏的激光器, 知 $I_0 \approx 2 |E_X|^2$.

分别对各主要光路器件建立理想化的琼斯矩阵^[5-7]

1) Y 波导起偏部分的琼斯矩阵表达式为

$$L_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) Y 波导相位调制部分的琼斯矩阵表达式为

$$L_{T_1} = \begin{bmatrix} e^{i\Psi(t-\tau)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_{T_2} = \begin{bmatrix} e^{i\Psi(t)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L'_{T_1} = \begin{bmatrix} e^{-i\Psi(t-\tau)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$L'_{T_2} = \begin{bmatrix} e^{-i\Psi(t)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\Psi(t-\tau)$ 和 $\Psi(t)$ 分别为 $(t-\tau)$ 和 t 时刻 Y 波导上调制臂的调制相位; $-\Psi(t-\tau)$ 和 $-\Psi(t)$ 分别为 $(t-\tau)$ 和 t 时刻 Y 波导下调制臂的调制相位.

3) 四分之一波片的琼斯矩阵表达式为

$$L_{\lambda/4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4) 方向因子为

$$L_o = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

经过传感光纤线圈后光束的传播方向与未经过时相反,故需要考虑方向因子.

5) 传感线圈的琼斯矩阵表达式为

对于上光束

$$L_{C_1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_F & \sin \phi_F \\ -\sin \phi_F & \cos \phi_F \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于下光束

$$L_{C_2} = \begin{bmatrix} \cos \phi_F & -\sin \phi_F \\ \sin \phi_F & \cos \phi_F \end{bmatrix} \quad (9)$$

则理想条件下,两束光波到达探测器的光矢量为

$$E_1 = \frac{1}{4} L_P L_{T_2} L_{\lambda/4} L_O L_{C_1} L_{\lambda/4} L_{T_1} L_P E_0 \quad (10)$$

$$E_2 = \frac{1}{4} L_P L'_{T_2} L_{\lambda/4} L_O L_{C_2} L_{\lambda/4} L'_{T_1} L_P E_0 \quad (11)$$

式中,系数 $\frac{1}{4}$ 是由耦合器和 Y 波导引入的光强衰减.

探测器响应为

$$I = |E_1 + E_2|^2 \quad (12)$$

计算得知

$$I = \frac{1}{16} \{ \cos[\Phi_F + 2\Psi(t-\tau) - 2\Psi(t)] + 1 \} I_0 \quad (13)$$

式中, Φ_F 为法拉第磁光效应产生的相位差, $\Phi_F = 2\phi_F$.

2 震动对电流测量结果影响的分析

这种 Sagnac 式光纤电流传感器既具有电流传感器的特点又具有 Sagnac 式传感器的特点,也就是说,这种传感器既对电流敏感又对 Sagnac 效应敏感. Sagnac 效应是指,当光束在一个环形通道中前进时,如果这个环形通道是转动的,沿着通道转动的方向前进所需要的时间比沿着通道转动相反的方向前进所需要的时间长,这样两束光会产生光程差,光程差大小与环形通道转速成正比. 由此可知, Sagnac 式传感器是一种角速度传感器,对震动或转动非常敏感. 而高压线路分布在室外,由于刮风或震动,高压导线会晃动,从而引起电流传感器传感部分震动, Sagnac 式光纤电流传感器传感部分敏感到震动,其输出电压随之发生变化.

考虑震动敏感性时,传感线圈的琼斯矩阵表达式为:

对于上光束

$$L'_{C_1} = e^{-i\frac{\alpha}{2}} \begin{bmatrix} \cos \phi_F & \sin \phi_F \\ -\sin \phi_F & \cos \phi_F \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于下光束

$$L'_{C_2} = e^{i\frac{\alpha}{2}} \begin{bmatrix} \cos \phi_F & -\sin \phi_F \\ \sin \phi_F & \cos \phi_F \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, α 是两束干涉光通过传感线圈时,由于 Sagnac 效应产生的相位差.

对应的探测器响应为

$$I' = \frac{1}{16} (\cos[\Phi_F + \alpha + 2\Psi(t-\tau) - 2\Psi(t)] + 1) I_0 \quad (16)$$

可见,由 Sagnac 效应产生的相位差和由法拉第磁光效应产生的相位差同为非互易性相位差,难以消除. 因为这种缺陷的存在, Sagnac 式传感器无法分辨其输出变化是由于外界环境影响还是由于高压导线中电流本身的变化影响,因此,严重影响了电流传感器的测量准确性,限制了其实际应用.

3 Sagnac 式光纤电流传感器的一种去震动敏感性的方法

为解决上述问题,本文提出了一种 Sagnac 式光

纤电流传感器的改进结构,使其对 Sagnac 效应不敏感,进而对震动不敏感.在原 Sagnac 式光纤电流传感器的结构基础上,在传感光纤中部耦合半波片,将四分之一波片 2 耦合角度转过 90° ,并将传感光纤双线同向绕制在线圈骨架上,见图 2.

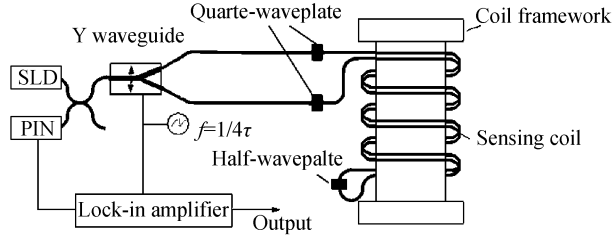


图 2 Sagnac 式光纤电流传感器的改进结构
Fig. 2 Improved Sagnac fiber current sensor

改进后,传感部分对电流敏感而对 Sagnac 效应不敏感.因为 Sagnac 效应使光程变长或还是变短的由光波传播方向和光路转动方向是否相同决定,与光波的偏振状态无关,而改进后的光纤线圈为双线绕制,当发生震动或转动时,以半波片为分界,光纤光路的光传播方向相反,光波在前一半传感光纤中传播方向与转动方向相同(相反)时,在后一半传感光纤中的传播方向则与转动方向相反(相同).这样以半波片为分界,光波在前一半传感光纤中因 Sagnac 效应而光程变长,在后一半传感光纤中则因 Sagnac 效应而光程变短,半波片耦合在传感光纤中点, Sagnac 效应恰好完全抵消.而法拉第磁光效应的一种表现形式是沿磁场方向传播的圆偏振光的光速发生变化(变得比无法拉第效应时的光速快或慢),圆偏振光光速变快还是变慢与圆偏振光的旋向(左右)以及光传播方向(与磁场方向相同与否)都有关系.当圆偏振光经过半波片时,旋向发生变化,同时光传播方向(与磁场方向是相同与否)也发生变化,因为法拉第效应光波继续以这个快或慢的光速传播.法拉第效应在半波片前后叠加,不抵消.消除了 Sagnac 效应的影响后,传感器中的两束光波的光程差只与电流大小有关,相遇时的相位差也只与电流大小有关,相位差与电流大小成正比,测出某一时刻的相位差就可以知道该时刻相应的电流大小.参见图 3,震动时产生 Sagnac 效应,光波在传感光纤 a 中光程变短,在传感光纤 b 中则光程变长,半波片耦合在传感光纤中点, Sagnac 效应恰好完全抵消;电流流过时产生法拉第效应,光波在传感光纤 a 中为右旋圆偏振光,与磁场 H 方向相同,光速加快;在传感光纤 b 中为左旋圆偏振光(经半波片转换),与磁场 H 方向相反,光速加快.法拉第效应效果叠加.因此,改进后的光纤电流传感器消除了 Sagnac 效应的影响,对震动或转动不敏感.

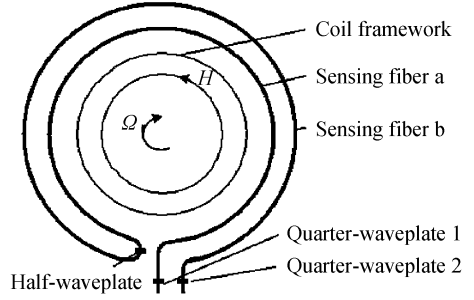


图 3 传感部分结构
Fig. 3 Improved sensing coil

利用琼斯矩阵对改进后的光路结构进行分析.四分之一波片 1 的琼斯矩阵表达式为

$$L_{\lambda/4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

四分之一波片 2 的琼斯矩阵表达式为

$$L'_{\lambda/4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

传感光纤 a 部分的琼斯矩阵表达式为:

对于上光束

$$L_{a_1} = e^{-i\frac{\phi_F}{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi_F}{2} & \sin \frac{\phi_F}{2} \\ -\sin \frac{\phi_F}{2} & \cos \frac{\phi_F}{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

对于下光束

$$L_{a_2} = e^{i\frac{\phi_F}{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi_F}{2} & -\sin \frac{\phi_F}{2} \\ \sin \frac{\phi_F}{2} & \cos \frac{\phi_F}{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

传感光纤 b 部分的琼斯矩阵表达式为:

对于上光束

$$L_{b_1} = e^{i\frac{\phi_F}{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi_F}{2} & -\sin \frac{\phi_F}{2} \\ \sin \frac{\phi_F}{2} & \cos \frac{\phi_F}{2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

对于下光束

$$L_{b_2} = e^{-i\frac{\phi_F}{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi_F}{2} & \sin \frac{\phi_F}{2} \\ -\sin \frac{\phi_F}{2} & \cos \frac{\phi_F}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

半波片的琼斯矩阵表达式为

$$L_{\lambda/2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

则两束光波到达探测器的光矢量分别为

$$E_1^r = \frac{1}{4} L_P L_{T_2} L_O L'_{\lambda/4} L_{b_1} L_{\lambda/2} L_{a_1} L_{\lambda/4} L_{T_1} L_P E_0 \quad (24)$$

$$E_2^r = \frac{1}{4} L_P L'_{T_2} L_{\lambda/4} L_{b_2} L_{\lambda/2} L_{a_2} L'_{\lambda/4} L_{T_1} L_P E_0 \quad (25)$$

式中,系数 $1/2\sqrt{2}$ 是由耦合器和 Y 波导相位调制部分(Y.波导)引入的光强衰减.

此时探测器响应为

$$I = \frac{1}{16} (\cos[\Phi_F + 2\Psi(t-\tau) - 2\Psi(t)] + 1) I_0 \quad (26)$$

与改进前 Sagnac 式光纤电流传感器不考虑震动时的探测器响应一致. 可见改进后的光路结构对震动不敏感, 达到了去震动敏感性的目的.

4 实验分析

进行震动实验, 在有震动输入无电流输入的条件下对改进前的 Sagnac 式光纤电流传感器原型和改进后 Sagnac 式光纤电流传感器的输出信号进行比较, 如图 4. 该实验在西安光学精密机械研究所瞬态室进行. 其中, 图(a)是改进前 Sagnac 式光纤电流传感器原型的输出信号波形; 图(b)是改进后的传感器的输出信号波形. 显然, Sagnac 式光纤电流传感器原型在有震动输入无电流输入的条件下有明显的输出, 而改进后的 Sagnac 式光纤电流传感器在有震动输入无电流输入的条件下无明显的输出. 可见 Sagnac 式光纤电流传感器原型对电流和震动均敏感, 对震动输入的响应叠加在电流响应的输出中难于分辨, 影响了传感器的电流测量准确度; 而改进后的 Sagnac 式光纤电流传感器仅对电流敏感, 对震动不敏感, 在电流输入的响应中没有叠加震动响应, 不

影响电流测量的准确度. 在传感光纤中部耦合入半波片的改进方法提高了 Sagnac 式光纤电流传感器的抗震性能, 为 Sagnac 式光纤电流传感器的工程化实现提供了一种可行的方法.

5 结论

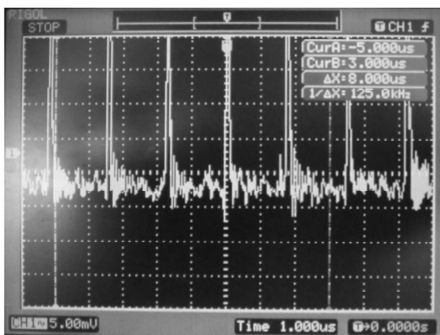
提出了一种消除 Sagnac 式光纤电流传感器对震动的敏感性的措施: 在传感光纤中部耦合半波片, 将一个四分之一波片耦合角度转过 90° , 并将传感光纤双线同向绕制在线圈骨架上. 此时以半波片为分界, 光波在两段传感光纤中的 Sagnac 效应抵消. 而法拉第磁光效应叠加. 因此, 改进后的光纤电流传感器对震动不敏感, 仅对待测导体中的电流敏感. 利用琼斯矩阵对改进后的光路结构进行了偏振态分析, 其结果和实验验证吻合, 表明改进后的传感器其输出与震动无关. 耦合半波片后 Sagnac 式光纤电流传感器的震动敏感性被消除了. 为 Sagnac 式光纤电流传感器的工程化实现提供了一种可行的方法.

参考文献

- [1] ZHAO Xue-hui. Software and hardware design of data process system on all-fiber-optical current transducer[D]. Taiyuan: North University of China, 2008.
赵学荟. 全光纤电流互感器数据处理系统的软硬件设计[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- [2] WANG Wei. Noise analysis and digital closed-loop control system design for FOG [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
王维. 光纤陀螺噪音分析与数字闭环控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [3] SHAN Wei. Design of a fiber-optic interferometer current sensor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2004.
单伟. 干涉式光纤电流传感器的设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.
- [4] NICATI P A, ROBERT P H. Stabilized sagnac optical fiber current sensor using one phase and two amplitude modulations [C]. the 8th Optical Fiber Sensors Conference, 1991.
- [5] WANG Xia-xiao, ZHANG Chun-xi, ZHANG Chao-yang, et al. Study of polarization errors of all fiber optical current transformers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, (02): 320-323.
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 全光纤电流互感器的偏振误差研究[J]. 光子学报, 2007, (02): 320-323.
- [6] SHAYNE X S, AL EXANDR A T, de ARRUDAAND J U, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(7): 1212-1219.
- [7] SHAYNE X S, de ARRUDA J U, AL EXANDR A, et al. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the In-line Sagnac interferometer current senso [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(10): 1844-1850.



(a) The output of the original Sagnac fiber current sensor



(b) The output of the improved Sagnac fiber current sensor

图 4 无电流输入有震动输入的条件下 Sagnac 式光纤电流传感器原型和改进后的输出波形比较

Fig. 4 The contrast with the output of the original Sagnac fiber current sensor and the improved Sagnac fiber current sensor

Sagnac Fiber-Optic Current Sensor Without Vibration Sensitivity

WANG Jia^{1,2}, Hou Hong-lu¹, XU Jin-tao²

(1 *Xi'an Technological University, Xi'an 710068, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China*)

Abstract: To eliminate the vibration sensitivity, a light path improved method is proposed, which makes discharge of Sagnac effect with Sagnac effect itself and do not disturb Farady effect at all. Then the polarization states of the lights spreading in the improved light path are analyzed with Jones matrix. The experiment results are in good agreement with the theoretical analysis results, which shows that the output of the improved sensor has nothing to do with vibration. After the coupling of the half-waveplate in sensing fiber, the vibration sensitivity of Sagnac fiber-optic current sensor has been eliminated. A feasible method for the practical use of Sagnac fiber-optic current sensor is provided.

Key words: Fiber-optic current sensor; Sagnac effect; Vibration sensitivity



WANG Jia was born in 1982. She is studying for her M. S. degree at Xi'an Technological University, and her research interests focus on fiber-optic current sensors.



HOU Hong-lu was born in 1960. He received the Ph. D. degree in system engineering from Northwest Polytechnical University (NPU) in 2007. He is a professor, and his research interest are opto-electronic technology of aviation, measurement & control technology, modeling, simulating and evaluation of fighting effectiveness for complicated system.