

光纤 1/4 波片相位延迟温度特性测量方法及 实验研究

王夏霄¹ 王 野^{1*} 李传生² 秦 祎¹ 王爱民³ 彭志强³

¹ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191
² 国网智能电网研究院电力电子研究所, 北京 100191
³ 湖北三江航天洪峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000

摘要 光纤 1/4 波片是全光纤电流互感器(FOCT)的关键器件,为减小变温环境下光纤波片对互感器变比的影响,需要更精确地测试波片相位延迟随温度变化规律。基于光强测量法提出了一种适用于光纤 1/4 波片的相位延迟温度特性测量方法,借助琼斯矩阵,建立了测试系统的数学模型,并对波片的温度性能进行了实际测试。实验结果表明:椭圆芯光纤 1/4 波片的相位延迟与温度之间呈负系数的线性关系,且国内光纤 1/4 波片相位延迟温度系数远大于国外相关研究单位对应波片的温度系数。将该方法应用于 FOCT 变比温度误差自补偿技术,在 -40 ℃ ~ 60 ℃ 范围内,互感器的变比误差在 ±0.2% 以内。另外,光纤 1/4 波片相位延迟的温度系数越小,互感器变比温度误差的自补偿极限精度越高,初值可选范围越大。

关键词 光纤光学; 光纤电流互感器; 光纤波片; 椭圆芯保偏光纤

中图分类号 TM933.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1205004

Measurement Method and Experimental Research of the Temperature Dependence of the Phase Delay of Quarter-Wave Plates

Wang Xiaoxiao¹ Wang Ye¹ Li Chuansheng² Qin Yi¹ Wang Aimin³ Peng Zhiqiang³

¹ School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
² Power Electronic Institution, State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing, 100191, China
³ Hong Feng Control Company Limited of San Jiang Astronautics, Xiaogan, Hubei 432000, China

Abstract The fiber quarter-wave plates are an important part of fiber-optic current transformers (FOCT). In order to decrease the error caused by the quarter-wave plates on the ratio under the varying temperature environments, more accurate relationship between the temperature and the phase delay of fiber quarter-wave plates is required. Based on the intensity method, a measuring way of the temperature dependence of the phase delay of quarter-wave plates is put forward. It is applied to measure fiber quarter-wave plates in real time and continuously. A mathematical model of the test systems is established by using Jones matrix, and the temperature characteristics of the quarter-wave retarder are tested. The experimental results show that: the relationship between the temperature and the phase delay is linear, and the temperature coefficient of inland quarter-wave plates is much larger than that of the abroad ones; in the temperature self compensation technology of ratio error of FOCT, the smaller the temperature coefficient of the phase delay of quarter-wave plates is, the higher the self compensation limit precision is and the wider the original phase retardation is.

Key words fiber optics; fiber-optic current transformer; fiber-optic plate; elliptical core polarization maintaining fiber

OCIS codes 060.2310; 060.5060; 060.2300; 060.2340

收稿日期: 2013-07-11; 收到修改稿日期: 2013-08-24

作者简介: 王夏霄(1977—),男,博士,讲师,主要从事光纤陀螺及光纤电力传感技术等方面的研究。

E-mail: wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangyes111@sina.com

1 引 言

全光纤电流互感器(FOCT)具有测量精度高、频响范围宽、动态范围大、绝缘性能好等优点,目前已成为智能变电站建设的关键设备^[1-2]。作为FOCT的关键器件,光纤1/4波片相位延迟随温度变化将造成变比误差,影响互感器的测量准确度,这是制约全光纤电流互感器工程应用的最主要因素之一^[3-4]。为减小变温环境下光纤1/4波片的影响,通常采用温度稳定性更好的椭圆芯保偏光纤作为波片光纤^[5];同时,利用光纤1/4波片相位延迟的温度特性补偿传感光纤Verdet常数温度相关性造成的变比误差^[5-6]。要实现该技术,有必要对光纤1/4波片的相位延迟进行测试,研究其温度特性,这对于定量分析波片的影响,研究波片光纤的选型以及互感器变比误差补偿精度的提高都有重要意义。

目前,国内学者已对波片相位延迟的测量方法进行了非常广泛的研究,提出了光强法^[7-8]、补偿法^[9]、光谱扫描法^[10]和光弹法^[11]等,其中光强法具有测试光路简单、调试方便、误差元件少等优点,是一种简单、实用的测试方法^[7]。一般情况下,光强法采用分立器件测量晶体波片的相位延迟,且需要旋转测量^[12-13]。但在FOCT中,1/4波片是长度仅为1~3 mm的保偏光纤,很难利用分立元件进行测量。

本文提出了一种基于光强法的全光纤光路结构,非常适用于光纤1/4波片相位延迟的特性研究,且方便在变温条件下进行实时、连续测量。分析了光纤1/4波片相位延迟测试系统的工作原理,借助琼斯矩阵建立了测试系统的数学模型,并对用于FOCT的椭圆芯光纤波片的温度性能进行了实际测试,最后介绍了该方法在FOCT变比温度误差补偿技术中的应用。

2 光纤1/4波片相位延迟测量方法

2.1 基本原理

如图1所示,超辐射发光二极管(SLD)发出的光经偏振器起偏变为线偏光,被测光纤1/4波片以角度 α 与偏振器的输出尾纤对轴熔接,于是偏振器产生的线偏光在1/4波片中被分解为两束正交的线偏光,分别沿其快轴和慢轴传输,1/4波片的另一端与偏振分束器(PBS)的输入尾纤以角度 β 对轴熔接,波片中传输的两束线偏振光又分别分解为两束正交的线偏光,这样在PBS的输入尾纤中共有4束线偏光,其中两束在快轴发生干涉,另外两束在慢轴

发生干涉,分别测量PBS两输出尾纤的干涉光强,即可解算出1/4波片的相位延迟。

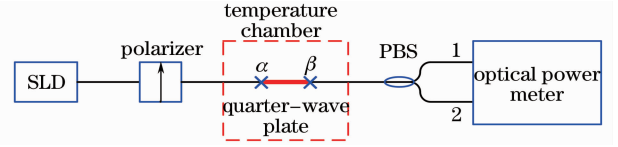


图1 光纤1/4波片相位延迟测试系统框图
Fig. 1 Configuration of the testing system of quarter-wave plate

2.2 理论分析

光纤1/4波片温度性能测试系统偏振器、熔接角 α 、 β 的1/4波片、光纤1/4波片、PBS1、PBS2、SLD光源的琼斯矩阵分别为

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

$$L_r = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_r) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$L_{ps1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$L_{ps2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 δ_r 为光纤1/4波片引起的相位延迟角度。

根据各光学器件的琼斯矩阵模型,可以得到PBS两输出端口光场的琼斯矢量:

$$E_{out1,2} = L_{ps1,2} L_r L_p E_{in}, \quad (6)$$

相应的干涉光强分别为

$$I_{out1,2} = \langle E_{out1,2}^H \cdot E_{out1,2} \rangle, \quad (7)$$

根据(1)~(7)式可得

$$I_1 = \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta - 2 \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \cos \delta_r, \quad (8)$$

$$I_2 = \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta + 2 \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \cos \delta_r, \quad (9)$$

令

$$\eta = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = K_1 + K_2 \cos \delta_r, \quad (10)$$

式中 $K_1 = -\cos 2\alpha \cos 2\beta$, $K_2 = \sin 2\alpha \sin 2\beta$ 。根据PBS输入尾纤快、慢轴与两输出尾纤之间的对应关系可以确定 I_1 、 I_2 与两输出尾纤的对应关系,比值 η 与1/4波片相位延迟 δ_r 为一一对应关系,通过测定 η 即可得到 δ_r 。同时,(10)式的运算还消除了光功率

波动的影响。理想情况下, $\delta_r = \pi/2$, 恰好位于干涉光强曲线的正交工作点上, 保证了测试系统对波片相位延迟变化的检测灵敏度。另外, K_2 表示比值 η 相对于相位延迟 δ_r 变化的灵敏度, K_2 越大, η 随 δ_r 变化越明显, 当 $\alpha = \beta = 45^\circ$ 或 135° 时, K_2 最大, $K_2 = 1, K_1 = 0$, 此时

$$\delta_r = \arccos \eta. \quad (11)$$

3 实验研究

3.1 椭芯光纤波片温度特性实验

分别选用两个生产厂商 A、B 提供的椭芯光纤制作 3 个波片, 长度分别为 3.09、2.53、3.09 mm, 其中前两个波片采用 A 厂商提供的光纤, 后者采用 B 厂商提供的光纤。波片与偏振器和 PBS 尾纤成 45° 自动熔接, 记录保偏熔接机给出的对轴角度。将 1/4 波片置于高低温实验箱内, 使用多通道光功率计采集 PBS 两输出尾纤的出光功率, 利用热敏电阻测量波片周围的温度(测温精度优于 0.1°C)。光功率与温度同步采集, 采样间隔为 2 s, 同时根据(10)

式实时计算被测波片的相位延迟。

图 2 给出了变温环境下光纤波片相位延迟的测试结果, 对其进行最小二乘拟合, 相应的线性度分别为 0.9971、0.9980、0.9997。因此, 椭芯光纤 1/4 波片相位延迟角度与温度之间呈线性关系, 相位延迟随温度的升高而减小, 符合波片相位延迟角与温度之间关系的一般模型^[14]:

$$\delta_r = \Delta\beta_0 L_0 [1 + C(T - T_0)], \quad (12)$$

式中 $\Delta\beta_0$ 为室温下椭芯光纤快、慢轴传播常数之差, L_0 为光纤波片的长度, T 为外界环境温度, T_0 为室温, C 为椭芯光纤波片相位延迟的温度系数。根据图 2 中拟合直线的斜率, 可得到: $C_a = C_b = -6.86 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, $C_c = -6.02 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。国外椭芯光纤波片的温度系数为 $C = -2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ^[12-13], 相比于国外相关研究单位, 本文使用的椭芯光纤的温度性能还有待进一步的提高。另外, 对于用不同厂家椭芯光纤制作的光纤波片, 由于生产工艺的差异, 其相位延迟的温度系数也会有所不同。

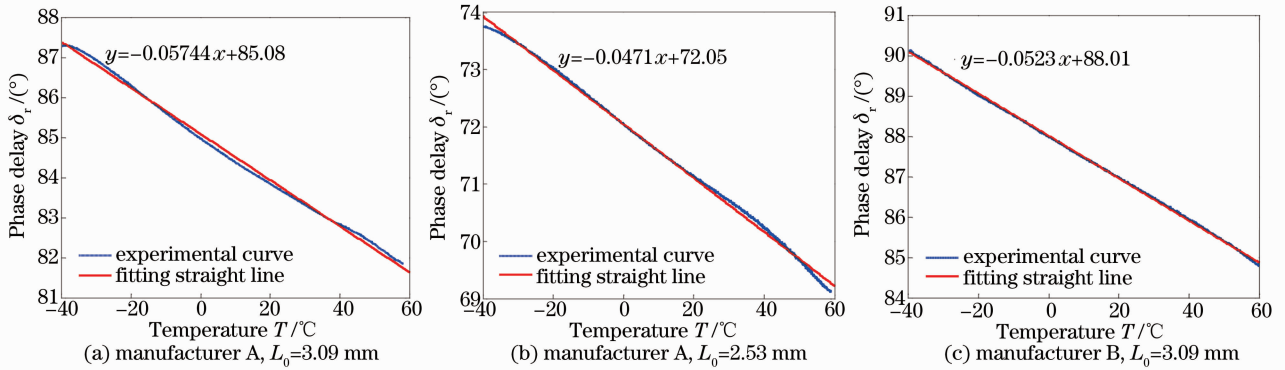


图 2 椭芯光纤波片相位延迟角度随温度的变化曲线

Fig. 2 Phase retardation of elliptical-core optical fiber quarter-wave plate versus temperature

3.2 在 FOCT 变比温度误差补偿中的应用

在 FOCT 中, 传感光纤的 Verdet 常数和光纤 1/4 波片的相位延迟随温度变化将造成变比误差。对于石英光纤, Verdet 常数随温度的变化关系一般为^[14-15]

$$\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt} = 0.7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}, \quad (13)$$

式中 V_0 为 20°C 时传感光纤的 Verdet 常数。Verdet 常数具有正温度系数, 随着温度的升高, Verdet 常数增大, 互感器的变比也相应地增大。根据 3.1 节的实验结果, 光纤 1/4 波片的相位延迟随温度的升高而减小, 如果在变温过程中波片的相位延迟始终大于 90° , 则互感器的变比将随温度的升

高而减小。因此, 可以确定一个常温下的相位延迟角度 δ_{r_0} , 使得变温环境下波片和 Verdet 常数对互感器变比的影响恰好相反, 二者相互补偿以减小互感器的变比温度误差, 这就是 FOCT 的变比温度误差自补偿技术^[5-6]。

利用厂商 B 提供的椭芯光纤制作 1/4 波片, 经理论计算, 当 20°C 条件下波片相位延迟角 $\delta_{r_0} = 93.6^\circ$ 时, 在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内, 互感器的变比误差最小, 为 0.12%; 为保证补偿后 FOCT 的变比误差小于 0.2%, δ_{r_0} 的取值范围为 $92.3^\circ \sim 94.3^\circ$ 。

在互感器样机中制作一个室温下相位延迟为 93.5° 的波片, 并将传感头置于高低温实验箱进行温度测试, 测试结果如图 3 所示。FOCT 样机的变比

误差在±0.2%以内,满足 IEC60044-8 标准 0.2 级电流互感器的测量准确度要求。

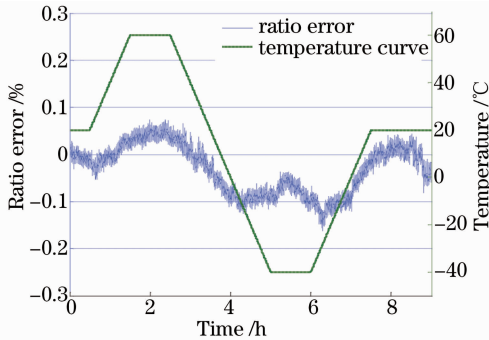


图 3 FOCT 变比温度误差测试结果

Fig. 3 Scale factor error versus temperature for FOCT

另外,对于国外相关研究单位的椭芯光纤波片,其相位延迟温度系数仅为 $-2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,此时,为保证变比误差在±0.2%以内,波片相位延迟的取值范围可放大到 $95^\circ \sim 104.8^\circ$,且当 $\delta_{i_0} = 100.2^\circ$ 时,变比误差仅为0.019%。光纤1/4波片相位延迟的温度系数越小,互感器变比温度误差的自补偿极限精度越高,初值可选范围越大,对制作工艺的要求也越低。除传感光纤外,光纤1/4波片温度性能的差异也是造成国内FOCT温度性能相比于国外有较大差距的主要原因之一,研制低温度系数的椭芯光纤对于提升FOCT的温度环境适应性具有重要意义,需要引起足够的重视。

4 结 论

本文提出了一种适用于光纤1/4波片的相位延迟温度特性的测量方法,实验测得了FOCT中椭芯光纤波片相位延迟的温度系数,结果表明目前国内椭芯光纤1/4波片的温度性能与国外相关研究单位相比仍有较大差距。在FOCT变比温度误差的自补偿技术中,光纤1/4波片相位延迟的温度系数越小,互感器变比温度误差自补偿能达到的极限精度越高,对波片制作工艺的要求也越低。利用本文提出的测试方法,选择温度稳定性更好的波片光纤,对于降低互感器的变比温度误差,提升FOCT的温度环境适应性具有重要的意义。另外,研制低温度系数的椭芯光纤也将是进一步研究的主要方向。

参 考 文 献

1 Wang Wei, Zhang Zhixian, Yang Yisong. The fiber optical current transformer (FOCT) technology and its engineering application[J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(1): 45-48.
王 巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电, 2009, 26(1): 45-48.

2 J Blake, P Tantaswadi, R T de Carvalho. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
3 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al.. Temperature compensation methods of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 55-59.
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度误差补偿[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 55-59.
4 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al.. Analysis and compensation of ratio temperature error for Sagnac fiber-optic current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 102-106.
李传生, 张春熹, 王夏霄, 等. Sagnac型光纤电流互感器变比温度误差分析与补偿[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 102-106.
5 S X Short, A A Tselikov, J U de Arruda, et al.. Imperfect quarter-wave plate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors [J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1212-1219.
6 K Bohnert, P Gabus, J Nehring, et al.. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(2): 267-276.
7 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Zhiyong, et al.. On the intensity method for measuring waveplate phase delay [J]. Astronomical Research & Technology, 2008, 5(1): 74-82.
孙英姿, 王东光, 张志勇, 等. 波片相位延迟的光强测量法研究[J]. 天文研究与技术, 2008, 5(1): 74-82.
8 Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 360-362.
赵秋玲, 吴福全. 光相位延迟量的归一化偏振调制测量[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 360-362.
9 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi, et al.. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared wave plate[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 685-688.
孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 685-688.
10 Hou Junfeng, Yu Jia, Wang Dongguang, et al.. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408007.
侯俊峰, 于 佳, 王东光, 等. 自校准法测量波片相位延迟[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408007.
11 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1684-1686.
胡建明, 曾爱军, 王向朝. 基于光弹调制技术的波片相位延迟量测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1684-1686.
12 Li Fanyue, Han Jie, Zeng Aijun, et al.. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0208003.
李凡月, 韩 杰, 曾爱军, 等. 基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟量测量方法[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208003.
13 Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, et al.. Phase retardation measurement with least square fitting method [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812001.
侯俊峰, 王东光, 邓元勇, 等. 基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812001.
14 P A Williams, A H Rose, G W Day, et al.. Temperature dependence of the Verdet constant in several diamagnetic glasses [J]. Appl Opt, 1991, 30(10): 1176-1178.
15 Yuanhong Yang. Temperature sensor based on PNR in Sagnac interferometer[J]. Chin Opt Lett, 2004, 2(5): 259-261.