

文章编号: 1001-5078 (2006) 07-0596-03

光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度特性及其影响研究

王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 邬战军
(北京航空航天大学仪器科学与光学工程学院, 北京 100083)

摘要: $\lambda/4$ 波片是通过截取适当长度的保偏光纤制作的, 它的相位延迟会随温度的变化而改变。利用这一特性, 可以补偿由于 $\lambda/4$ 波片相位延迟变化造成的互感器尺度因子变化, 同时也可以测量光纤电流互感器传感头的温度, 补偿维尔德 (Verdet) 常数的温度影响, 提高光纤电流互感器的测量精度。

关键词: 全光纤电流互感器; $\lambda/4$ 波片; 维尔德常数; 温度补偿

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Research on Temperature Characteristic of Quarter-waveplate and its Effect on Fiber Optical Current Transformers

WANG Xia-xiao, ZHANG Chun-xi, ZHANG Chao-yang, WU Zhan-jun
(Beijing University of Aeronautics & Astronautics, School of Instrument Science
& Optoelectronic Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: The quarter-waveplate can be made by cutting a fit section of PM fiber with the change of temperature, the retarders of the quarter-waveplate change also. Using this characteristic the factor of FOT can be compensated, and by measuring the temperature of the sensor coil, the Verdet constant can be compensated. The FOT's measurement precision will be improved.

Key words: fiber optical current transformers; quarter-waveplate; Verdet constant; temperature compensation

1 前言

光纤电流互感器 (fiber optical current transformers) 是一种新型的基于磁光法拉第 (Faraday) 效应高压电流测试设备。在全光纤电流互感器中, 最为关键的两个器件分别为 $\lambda/4$ 波片和传感光纤。 $\lambda/4$ 波片本身误差并不会造成光纤电流互感器的测量误差, 但是, 由于 $\lambda/4$ 波片的相位延迟及对轴角度的变化, 会造成光纤电流互感器的输入输出之间的尺度因子的变化, 而影响系统的测试精度。

In-line Sagnac 型光纤电流互感器^[1-2]是一种新型的全光纤电流互感器。由于采用共光路设计, 具有更好的互易性, 优良的抗干扰能力。在 In-line Sagnac 型光纤电流互感器基础上, 分析了 $\lambda/4$ 波片对系统检测精度的影响, 并利用 $\lambda/4$ 波片的温度特性提出了尺度因子和维尔德 (Verdet) 常数的温度补

偿方案。

2 基本原理

In-line Sagnac 型电流互感器结构如图 1 所示^[1-2], 其基本原理为: 由光源发出的光经过耦合器后由光纤偏振器起偏, 形成线偏振光。线偏振光以 45° 注入保偏光纤后, 被平均注入保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输。当这两束正交模式的光经过 $\lambda/4$ 波片后, 分别转变为左旋和右旋的圆偏振光, 进入传感光纤。在传感光纤中由于传输电流产生磁场的法拉第效应, 这两束圆偏振光以不同的速度传输。在由传感光纤端面的镜面反射后, 两束圆偏振光的偏振模式互换 (即左旋光变为右旋光, 右旋光变为左旋

作者简介: 王夏霄 (1977 -), 北京航空航天大学光电技术研究所博士后, 主要研究方向为光纤传感技术。

收稿日期: 2005-11-04

光),再次穿过传导光纤,并再次和电流产生的磁场相互作用,使产生的相位加倍。这两束光再次通过 /4波片后,恢复为线偏振光,并在光纤偏振器处发生干涉。最后,携带相位信息的光由耦合器耦合进探测器。由于发生干涉的两束光,在光路的传输过程中,分别都通过了保偏光纤的 X轴和 Y轴与传感光纤的左旋和右旋模式,只在时间上略有差别,因此返回探测器的光只携带了由法拉第效应产生的非互易相位差。其表达式为:

$$I_d = (loss) \cdot 0.5 \cdot I_0 \cdot [1 + \cos(\phi_b + \phi)] \quad (1)$$

其中, $\phi = 4NV\ell$ ($loss$)是光路损耗; I_0 为光源输出光强; N 为传感光纤的匝数; V 为维尔德常数; I 为导线中的电流。

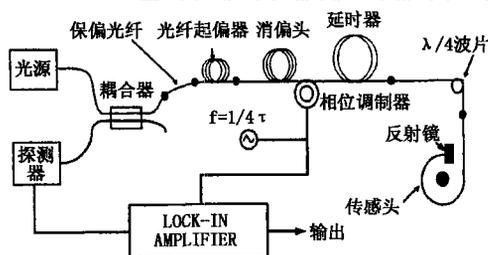


图1 In-line Sagnac型光纤电流互感器

3 理论推导

3.1 /4波片对光纤电流互感器的影响

在 In-line Sagnac型光纤电流互感器中, /4波片以 45°与保偏光纤熔接,其相应的琼斯矩阵表达式为^[3-4]:

$$\cos \frac{\phi}{2} \begin{pmatrix} 1 + itg \frac{\phi}{2} \cos 2\alpha & itg \frac{\phi}{2} \sin 2\alpha \\ itg \frac{\phi}{2} \sin 2\alpha & 1 - itg \frac{\phi}{2} \cos 2\alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, ϕ 为 /4波片的相位延迟,理想值为 90°; α 为 /4波片的对轴角度,理想值为 45°; 则对应的干涉仪输出为:

$$I_d = \frac{E_x^2}{8} [4 + (1 + \sin^2 \alpha \sin^2 \frac{\phi}{2})^2 \cos(4NV\ell - \phi_b) + 2(\sin^2 \alpha \sin^2 \frac{\phi}{2} - 1) \cos(\phi_b) + (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \frac{\phi}{2})^2 \cos(4NV\ell + \phi_b)] \quad (3)$$

令 $h = 1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \frac{\phi}{2}$, 当 /4波片理想且对轴角度为 45°时 $h = 0$ 。对 (3)式展开并忽略 h^2 引起微小误差项得:

$$I_d = K [1 - h \cos(\phi_b) + (1 - h) \cos(4NV\ell - \phi_b)] \quad (4)$$

其中, $K = \frac{E_x^2}{2}$

令 $\phi_b = \pm \frac{\pi}{2}$ 则得

$$I_d = K [1 \pm (1 - h) \sin(4NV\ell)] \quad (5)$$

则得系统的干涉输出为:

$$I_{out} = K(1 - h) \sin(4NV\ell) \quad (6)$$

由 (6)式可以看出,光纤电流互感器的输出直接受 /4波片性能的影响,当 /4波片的相位延迟或对轴角度随温度等外界条件发生变化时,光纤电流互感器的尺度因子特性就会发生变化,从而使互感器比差加大。

3.2 /4波片的温度特性分析

由于保偏光纤双折射的影响,偏振光在保偏光纤中传播时,其两个模式之间的相位延迟为:

$$\phi = \frac{2\pi}{L_p} z \quad (7)$$

式中, L_p 为保偏光纤的拍长。由此式可知,当入射光为线偏振光时,偏振光基模的偏振态变化为:线偏振光 - 椭圆偏振光 - 圆偏振光 - 椭圆偏振光 - 线偏振光。利用这一特性,只要取合适长度的光纤就可以制作光纤 /4波片,其延迟相位为:

$$\phi = \frac{2\pi}{L_p} k \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

由于 /4波片相位延迟随温度的变化会造成光纤电流互感器尺度因子的变化,因此对光纤 /4波片的温度特性进行分析。

由文献 [5]保偏光纤位相差随温度变化成线性关系。即:

$$\phi = \phi_0 L_0 + \phi_0 L_0 C_1 (T - T_0) \quad (9)$$

其中, $\phi_0 = \frac{2\pi}{L_B}$, C_1 为 /4波片的温度线性系数,保偏光纤中 $C_1 = 10^{-3}$, $L_0 = \frac{3}{4} L_B$,由公式推导出:

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = -0.27 \quad (10)$$

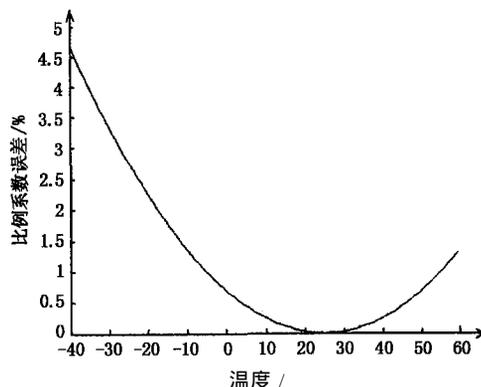


图2 /4波片温度系数引起的尺度因子误差

由光纤 $\lambda/4$ 波片引起的光纤电流互感器的尺度因子变化如图 2 所示。

由图 2 可以看出,由于 $\lambda/4$ 波片的相位延迟变化造成的光纤电流互感器的尺度因子的变化,在 $-40 \sim +60$ 范围内达到 4.5%。这一指标难以满足互感器实际应用的要求。

4 $\lambda/4$ 波片的温度特性的利用

4.1 尺度因子的补偿^[4]

由图 2 可以看出, $\lambda/4$ 波片相位延迟的温度变化直接导致光纤电流互感器的比差增大。为了消除 $\lambda/4$ 波片对尺度因子的影响,对式 (4) 进行分析。

设 $4NVI=0$, 当 $b = \frac{1}{2}$ 时, 由 (4) 式得:

$$I_{dmin} = K \quad (11)$$

同理, 当 $b = 0$ 时, 由 (4) 式得:

$$I_{dmax} = 2K(1-h) \quad (12)$$

则两者相比得:

$$Q = \frac{I_{dmax}}{I_{dmin}} = \frac{2K(1-h)}{K} = 2(1-h) \quad (13)$$

令输出

$$I_{out} = \frac{I_{out}}{I_{dmin}} \quad (14)$$

则可得

$$I_{out} = \frac{K}{2} \sin(4NVI) \quad (15)$$

由 (15) 式可以看出, 通过引入误差补偿方案, 可以消除 $\lambda/4$ 波片对光纤电流互感器尺度因子的影响。

4.2 维尔德 (Verdet) 常数的温度补偿

磁光法拉第效应又称为磁致旋光效应, 在一般材料中, 法拉第旋角与材料的长度、磁场强度成正比。其尺度因子维尔德常数与物质的性质、光的频率有关。在实际应用中, 由于物质的性质随温度变化, 所以维尔德常数也与温度有关, 且在温度条件下满足^[6]:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{d}{dT} \left(\frac{dn}{d} \right) \quad (16)$$

由于光纤电流互感器要求在室外条件下工作, 温度变化引起的维尔德常数的变化将直接导致互感器尺度因子的改变, 因此需要对互感器的尺度因子建立温度效应模型, 进行修正。在建立传感头温度模型时, 关键是测量光纤电流互感器传感头的温度。

利用传统的电子式测量方案是不可行的, 因为这将破坏光纤电流互感器的绝缘特性。另外增加一套非接触测量传感头温度的装置, 虽然不会破坏互感器的绝缘特性, 但是会造成成本增加。

如前文所示 $\lambda/4$ 波片的相位延迟受温度影响, 而干涉仪输出 I_{dmax} , 由式 (12) 所示受 $\lambda/4$ 波片的相位延迟影响。利用这一特性, 可以测量光纤电流互感器传感头的温度, 实现维尔德常数的在线补偿。

$\lambda/4$ 波片相位延迟的温度变化引起的 I_{dmax} 输出曲线如图 3 所示。

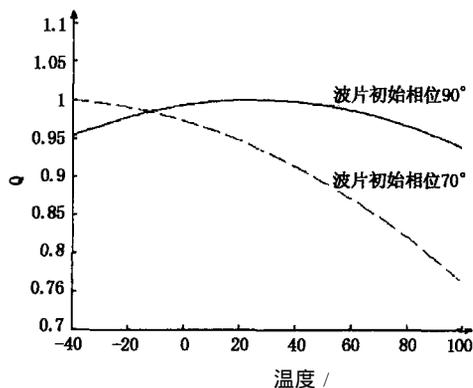


图 3 $\lambda/4$ 波片温度特性引起的干涉仪输出

由图 3 可以看出, 当 $\lambda/4$ 波片相位延迟在温度条件下其相位延迟为 90° 时, 输出 I_{dmax} 曲线非单调, 无法实现温度测量。利用使 $\lambda/4$ 波片初始相位延迟偏离 90° , 使其在测量的温度范围内不会经过 90° 点, 这样 I_{dmax} 曲线为单调曲线, 可以实现传感头的温度测量。

利用 $\lambda/4$ 波片的温度特性测量传感头温度, 实现了自不增加光纤电流互感器光路元器件基础上的温度非接触测量, 具有绝缘性好和实时测量的优点, 从而使维尔德常数的在线补偿成为可能。

5 实验数据

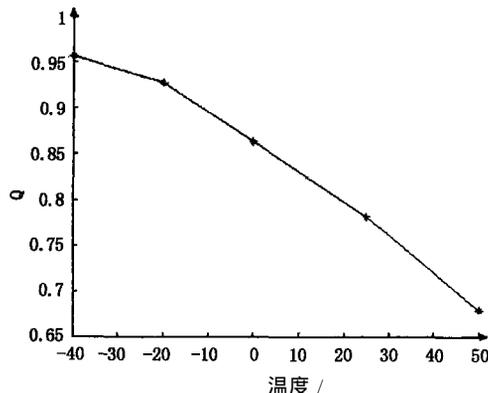


图 4 干涉仪输出实验数据

(下转第 603 页)

号衰减到 60%时,有效遮蔽面积不在增大,趋于定值。处理上述三图有效遮蔽面积时,遮蔽有效的透过率阈值均设为 60%,即红外辐射信号透过率低于 60%的认为遮蔽有效。由三图对比可看出,加衰减片测量处理得到的有效遮蔽面积约为关闭 1/2光源阵列面积的两倍,约为关闭 1/4阵列面积的 4倍;如果以其中一图作为比较对象,另外两图的测量结果对其相对误差在 20%范围以内。

当有效遮蔽面积处理的透过率阈值取 40%,幕布的真值为 98.9m^2 (经正投影变换后的面积,以下的‘真值’概念均同),有效遮蔽面积计算的平均值为 85m^2 ,测量的相对误差为 14.1%,结果如图 6 所示。

变换红外光源梯形阵列,各边距离均缩短为图 2的 1/2,有效遮蔽面积处理的透过率阈值取 50%,测量得到的平均值为 80.8m^2 ,幕布的真值为 98.9m^2 ,测量的相对误差为 18.3%,结果如图 7 所示。用幕布进行烟幕有效遮蔽面积精度检测试验时,由于风吹和人为的其它因素,幕布发生抖动或倾斜,面积真值要小于 98.9m^2 ,因此本组烟幕有效遮蔽面积的测量精度实际更高。

(上接第 598页)

为对这一方案进行验证,搭建了一台光纤电流互感器原理样机。采用拍长为 3mm 保偏光纤制作光纤 $\lambda/4$ 波片,截取长度选择 $3/4$ 拍长,测得其消光比约为 2dB。采集干涉仪在温度为 -40、-20、0、25 和 50 的输出,参照式 (13)对输出数据进行处理,则得 Q 随温度变化的曲线如图 4 所示。

由实验数据可以看出,Q 随温度变化趋势同理论值基本一致,表明通过 Q 值的测量可以得到传感头的温度。可以实现光纤电流互感器的在线补偿。

6 结论

$\lambda/4$ 波片是光纤电流互感器的关键器件之一。由于 $\lambda/4$ 波片的温度特性,会造成光纤电流互感器的尺度因子在温度条件下发生变化。利用 $\lambda/4$ 波片的温度特性可以对互感器的尺度因子进行修正,从而提高光纤电流互感器的测试精度。同时,利用 $\lambda/4$ 波片的温度特性也可以实现传感头温度的非接触测量,实现维尔德常数的在线补偿。

与图 7 试验条件基本相同,改变幕布的尺寸,其真值为 51.18m^2 ,试验得到的有效遮蔽面积计算的平均值为 52.16m^2 ,测量的相对误差为 2%。

上述试验结果表明,烟幕有效遮蔽面积的测量精度优于 20%,证明烟幕遮蔽有效遮蔽面积的数据处理模型和算法是合理、正确的。

5 结束语

在外场对红外烟幕遮蔽效果测量与评估涉及到的因素很多,如何科学的评价其遮蔽效果,需要随着烟幕的研究而不断深入。本文报道的红外烟幕遮蔽效果测量系统已经成功应用于某试验靶场。

参考文献:

- [1] 周遵守,潘功配,李毅,等. 赤磷对改进型 HC发烟剂性能影响的试验研究 [J]. 含能材料, 2002, 10(3).
- [2] 刘庆冉,黄顺祥,胡非,等. 傅里叶变换红外 (FTIR)光谱仪在抗红外发烟材料的选择和评价中的应用 [J]. 光谱实验室, 2004, 21(1).
- [3] 朱辰光,潘功配,关华,等. 红外烟幕遮蔽率测试方法研究 [J]. 红外技术, 2004, 26(4).
- [4] 徐代升,李钟敏,杨英科. 用红外成像技术外场研究红外烟幕的遮蔽性能 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1).

参考文献:

- [1] J Blake, P Tantaswadi, R T de Carvalho In-line Sagnac Interferometer Current Sensor [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, 11(1): 116 - 121.
- [2] Guido Frosia Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor [J]. Appl Opt, 1994, 33(25): 6111 - 6122.
- [3] K Bohert, P Cabus, J Nehring Temperature and vibration Insensitive Fiber-optic Current Sensor [J]. J. Lightwave Technol, 2002, 20(2): 267 - 276.
- [4] Shayne X Short, Alexandr A Tselikov, Josiel U de Arandaand, et al Imperfect Quarter-Waveplate Compensation in Sagnac Interferometer-Type Current Sensors [J]. J. Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1212 - 1219.
- [5] Yang Yuan-hong Temperature sensor based on PNR in Sagnac Interferometer [J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(5): 259 - 261.
- [6] 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.