

全光纤电流传感器温度补偿研究进展

王志 初凤红 吴建平

上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090

摘要 对于全光纤电流传感器,如何进行温度补偿一直是国内外研究的难点和重点。进行合理的温度补偿也是将全光纤电流传感器推向实用的必要措施。先用实例和数据说明温度对全光纤电流传感器性能的影响,再在分析全光纤电流传感器结构和原理基础上,分别阐述了各因素受温度影响的机理并给出了最新的研究进展,最后从效果和实用化两方面分析了各种温度补偿方法的优劣,最终可以得出:单一控制某个因素对全光纤电流传感器性能的影响是不理想的,控制多个影响因子并在最终的输出端进行数据处理的方法能达到更理想的温度补偿效果,使全光纤电流传感器的输出更精确、更稳定。

关键词 光纤光学;全光纤电流传感器;温度补偿;精度;稳定性

中图分类号 TM45 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.120005

Progress in All-Fiber Current Sensor Temperature Compensation

Wang Zhi Chu Fenghong Wu Jianping

*College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China*

Abstract For the all optical fiber current sensor, how to carry on the temperature compensation has been the difficulty and focus of research at home and abroad, and it is also the only way to make these sensors to the utility. Examples and data are first used to show the temperature effect on the performance of all fiber current sensor. Then, based on analyzing all fiber optical current sensor principle and structure, the mechanism of each factor which is affected by temperature is illustrated and the latest progress is given. Finally, the effects and the practical advantages and disadvantages of each method are analyzed. Ultimately, it can be drawn: by using a single method to control factors on the performance of all-optical current sensor is not ideal, but through the control of multiple factors and carrying on data processing in the final output are better ways to achieve better temperature compensation effect, so that the output of the entire fiber-optic current sensor is more accurate and more stable.

Key words fiber optics; all-optical fiber current sensor; temperature compensation; accuracy; stability

OCIS codes 060.2370; 040.5160; 260.1440; 230.1150

1 引言

随着智能电网的逐步建立^[1],全光纤电流传感器(AOFCS)因其优异的性能得到了广泛的应用。然而,在研制和实验过程中,AOFCS的测量准确度对外界温度(-40℃~70℃)十分敏感^[2],在不进行温度补偿时,其比差变化率每10℃将变化1%左右,角差也有相应的变化^[3],并且其环境适应性和运行稳定性也是在实际应用中需要解决的关键问题^[4-7]。从2012年国家电网公司送检的15台光学电流传感器(磁光玻璃式与全光纤式)来看:主要故障中,温度循环测试异常就占到了22%。

进入21世纪以来,随着特种光纤、信号处理和光纤传感相关技术的发展,各电力巨头生产商在市场上纷纷推出了自己的产品,比如:瑞典ABB公司为电解铝行业研制的AOFCS可以测量高达500 kA的电流,测量

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-07-03; 网络出版日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61205081)、上海市科委自然科学基金(11ZR1414400)

作者简介: 王志(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤电流传感器方面的研究。E-mail: wa209z@163.com

导师简介: 初凤红(1979—),女,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术和光纤通信技术的研究。

E-mail: chufenghong@siom.ac.cn

精度达到 0.1% 并且温度敏感性小于 $\pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$, 传感头运行的温度范围也达到了 $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$; 加拿大 Nxt-Phase 公司生产的全光纤电流传感器已在多个变电站投入实运行^[8]。目前, 在我国已见报道的 AOFCS 多采用由 Sagnac 干涉仪改进形成的 In-line Sagnac 干涉仪结构。

2 全光纤电流传感器温度补偿机理研究

AOFCS 是将光纤缠绕在被测通电导体周围, 利用光纤的偏振特性, 通过测量光纤中的法拉第旋转角间接地测量电流, 传光与传感部分都使用光纤, 因而又称为功能型光学电流传感器^[9]。在纵向磁场作用下, 法拉第旋转角 θ 表示为:

$$\theta = \int H dl = VNI, \quad (1)$$

式中 V 是仅与光纤材料有关的 Verdet 常数, H 为磁场强度, L 为光纤处于磁场作用下的长度, N 为光纤绕通电导体圈数, I 为流过光纤环电流的强度。一套 AOFCS 系统一般由光源、起偏器、 $\lambda/4$ 波片、传感光纤圈、检偏器和信号检测与处理电路等部分组成。

针对 AOFCS 的温度敏感性, 科研人员做了大量研究^[10-11]。由文献[12-13]可知: $\lambda/4$ 波片和传感光纤圈是影响光纤电流传感器测量精度的两个关键器件, 通过改善波片结构和抑制传感光纤中残余线性双折射的方法可显著提高 AOFCS 的测量精度, 而整个光纤传感头中受温度影响最严重的器件就是 $\lambda/4$ 波片和传感光纤圈^[3]。

早在 1998 年, Hyun Seo Kang 等^[14]就通过简单地调整光纤环中额外的弯曲致圆双折射实现温度稳定。在 3 h 的温度稳定性测试中, 这种具有弯曲控制结构的传感器的输出波动在 1.2% 范围内, 而没有加入控制的传感器的输出漂移可达 $\pm 29\%$ 。同年, 张新亮等^[15]在光路中引入温度检测元件对 Verdet 常数扰动实现温度补偿, 使得长期稳定性优于 0.3%。2002 年, Bohnert^[6]提出了一种针对温度与振动不敏感的光纤电流传感器, 即在传感线圈的外部包裹一层硅树脂, 并且其外壳用熔融硅制成, 在构成的密闭气室中填充氮气以隔离外界温度的变化, 其传感头结构如图 1 所示。

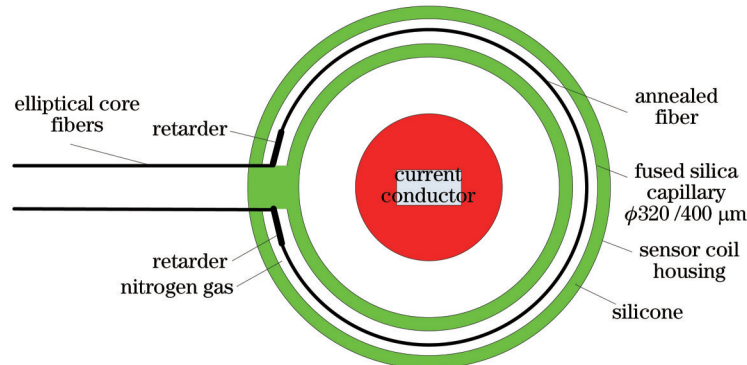


图 1 温度、振动不敏感传感头结构图

Fig.1 Structure diagram of sensor which is insensitive to temperature and vibration

实验结果表明: 在 $-35^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 范围内, 该互感器的温度不敏感性保持在 0.2% 以内, 但此种方案机械加工难度大、生产成本高。2010 年, 裴焕斗^[16]采用绝缘性好、热变形较低的环氧树脂制成柱形圆环线圈, $\lambda/4$ 波片及感应 LB 光纤被松绕在环氧树脂圆环中, 上述元件整体被放入温控箱中, 利用幅值解调输出的测量值与温度变化呈单调递减趋势的特点, 采用拟合的方法将温度对测量结果的影响考虑进来, 结果表明: 在每个温度点恒温 4 h 后, 幅值解调的输出值基本能够达到稳定; 对于每一个温度循环中的测量数据, 温漂约为 $\pm 0.6\%$, 并且与 HB 传输光纤的位置无关。

2.1 光源部分温度补偿方法

温度对 LD 光源的影响主要反映在抽运部分的热敏电阻上, 而 AOFCS 的测量结果与光源输出的光功率和光波长有关^[17-19]。光源的传统温度控制系统^[20]在高压复杂环境下的温度稳定性并不理想, 文献[21]在半导体制冷器(TEC)的帕尔效应和热敏电阻特性基础上, 总结得出目前光源的驱动方式有两种:

1) 传统超辐射发光二极管(SLD)光源补偿方法, 即“恒流源+温控”方案。该法可使光源达到较好的稳定

效果,但因温度的滞后效应导致光源维稳周期长,不利于快速修正;

2) 光控方案:分开控制,即先稳定光功率,然后再稳定光波长,使得 SLD 光源光功率的稳定不再仅仅依赖于温度的稳定。

作者通过对热敏电阻的检测来自动调节和驱动 TEC 的电流和方向,从而实现对光源发光芯片进行加热和制冷,保持光源良好的输出特性。曹辉等^[22]为减小高压电网中光纤电流传感器 SLD 的光源温度特性对测量准确度的影响,搭建了温度采集电桥得到与温度近似成线性关系的输出差分信号,其整体结构图如图 2 所示。

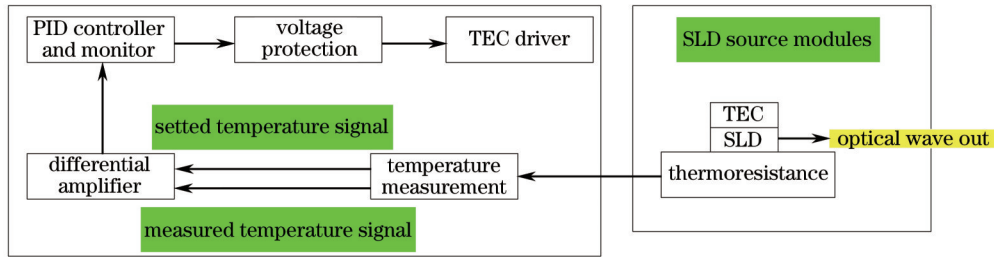


图 2 带温度采集电桥系统整体结构图

Fig.2 Structure diagram of entire system with temperature acquisition bridge

采用模拟器件电路驱动 TEC 对 SLD 光源进行温度控制来保证 AOFCS 在高压环境下测量的实时性、准确性和可靠性。在室温范围(15 °C ~ 30 °C)内对光源进行 25 °C 的恒温控制,整体的误差比在 0.2% 范围内。其测量结果对比图如图 3 所示。

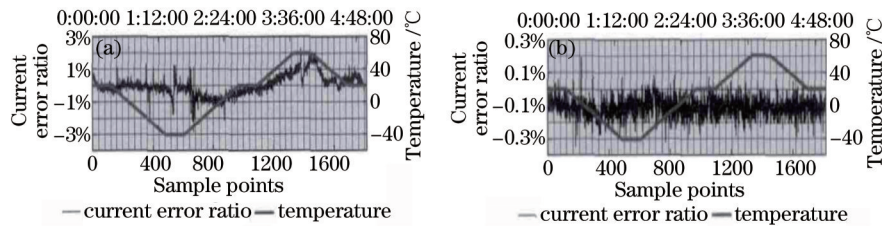


图 3 一段时间内无光源温控(a)、有光源温控(b)系统测量结果

Fig.3 Measurement results without temperature control by light source (a) and with temperature control by light source (b) in a period of time

2.2 $\lambda/4$ 波片温度补偿方法

$\lambda/4$ 波片相位延迟变化会影响 AOFCS 的测量精度和稳定性^[18]。在全温(-40 °C~60 °C)下,波片的相位延迟变化最高可达 27°,这会造成 AOFCS 检测输出比例系数的变化达 $\pm 4.5\%$ 、比例因子误差达 0.5%。设 $\lambda/4$ 波片位相延迟角与 90°之差为 δ ,则系统比例因子误差可表示为与 δ 有关的方程,即:

$$e_{\text{nsf}}(\delta) = \cos \delta - 1. \quad (2)$$

文献[23-24]指出,在制作光纤 $\lambda/4$ 波片时选择几何芯双折射光纤要比应力双折射光纤的温度稳定性好,用几何芯保偏光纤制备光纤 $\lambda/4$ 波片可以获得较好的温度稳定性。张鑫^[25]采用椭圆芯保偏光纤制作波片来减小相位延迟,其端面示意图如图 4 所示。

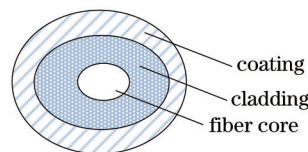


图 4 椭芯光纤端面示意图

Fig.4 Schematic of end face of with fiber elliptical core

若椭芯光纤的拍长为 7~9 mm,则只需截取四分之一拍长椭芯光纤制作波片,此时波片的相位延迟角度随温度的变化为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial T} = (-2.05 \pm 0.1) \times 10^{-2} / ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

即在 -40 °C~60 °C 温度范围内波片的相位延迟变化约为 2°。王夏宵等^[26]利用 $\lambda/4$ 波片的温度特性测量传感

头温度,实现了Verdet常数的在线补偿。此后,作者在此基础上,把光电探测器输出分别导入两个通道——闭环检测通道和电压跟随通道,分别构成闭环检测子系统和温度补偿子系统,其原理图如图5所示。

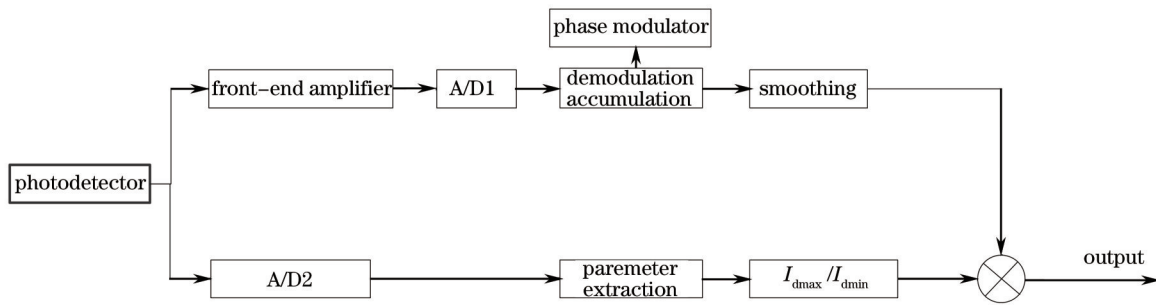


图5 $\lambda/4$ 波片温度误差补偿电路原理图

Fig.5 Schematic of $\lambda/4$ waveplate temperature error compensation circuit

光电探测器输出信号通过A/D2转换器把输出信号转换成数字信号,然后送入信号处理单元,根据时序关系解调提取用于检测 $\lambda/4$ 波片温度补偿所需的参数 I_{dmin} 和 I_{dmax} ,并用 I_{dmax}/I_{dmin} 值对闭环系统输出结果进行修正,从而达到温度补偿的目的。

文献[27]通过分析波片位相差温度稳定性对传感器测量准确度造成影响的机理导出了波片温度误差模型,利用A/D2转换器提取波片温度误差补偿因子并在数字信号处理器(DSP)中对输出结果进行修正,从而实现波片温度误差补偿,其原理图如图6所示。

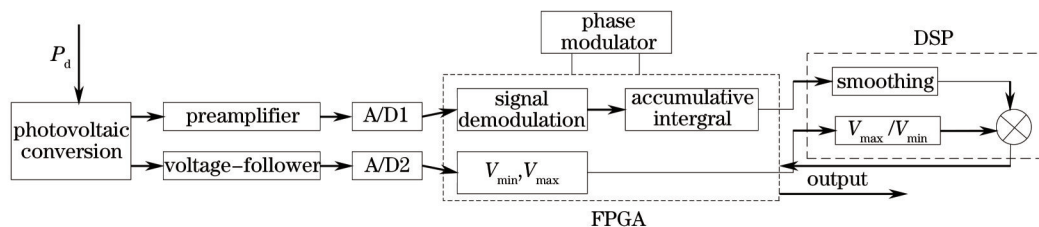


图6 $\lambda/4$ 波片温度误差补偿原理图

Fig.6 Schematic of $\lambda/4$ waveplate temperature error compensation

实验结果表明,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,传感器测量的电流比变化量从 $\pm 0.75\%$ 降低至 $\pm 0.25\%$ 。随后,作者借助琼斯矩阵提出了一种适用于光纤 $\lambda/4$ 波片的相位延迟温度特性测量方法^[28],证明:椭芯光纤 $\lambda/4$ 波片的相位延迟与温度之间呈负系数的线性关系,若将该关系用于AOFCS变比温度误差自补偿技术中,在全温条件下,传感器的变比误差在 $\pm 0.2\%$ 以内。并且光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟的温度系数越小,传感器变比温度误差的自补偿极限精度越高,初值可选范围就越大、对制作工艺的要求也越低。

光纤 $\lambda/4$ 波片温度性能落后是造成国内AOFCS性能相比于国外有较大差距的主要原因之一,因此研制低温度系数的椭芯保偏光纤对于提升AOFCS的环境适应性是有重要意义的。

2.3 改进光纤线圈结构进行温度补偿的方法

温度的变化会直接导致传感线圈中双折射的变化,影响系统输出^[29-30];同时带来附加相移使得AOFCS产生偏置误差^[31]。为解决该问题,国内外学者提出了许多针对Sagnac光纤电流传感器的改进方案,如采用扭转光纤、椭圆双折射光纤、退火二氧化硅光纤线圈、镜反射式光纤电流传感器^[32]、对称型光纤电流传感器^[33]等,但以上方案存在造价昂贵、结构复杂、对材料、工艺要求严格等问题。

文献[34]为减小双折射,用长圆孔支架将石英骨架固定在传感头上。2010年,中国科学院西安光学精密机械研究所穆杰等设计了一种消除温度漂移的新型AOFCS^[10],光纤线圈结构对比示意图如图7所示。

改进方案所采用双线绕法可近似认为传感光纤线圈均处于相同温度变化,并将位于传感线圈输入端口的一个 $\lambda/4$ 波片耦合角度旋转 90° ,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内基本消除了温度漂移。该传感器结构简单、抗干扰能力强、精度高,为AOFCS传感光纤线圈的设计提供了新思路。

2.4 针对温度对线性双折射影响的补偿方法

当环境温度改变时,因传感光纤与封装材料膨胀系数不同而产生的应力,会导致传感光纤线性双折射

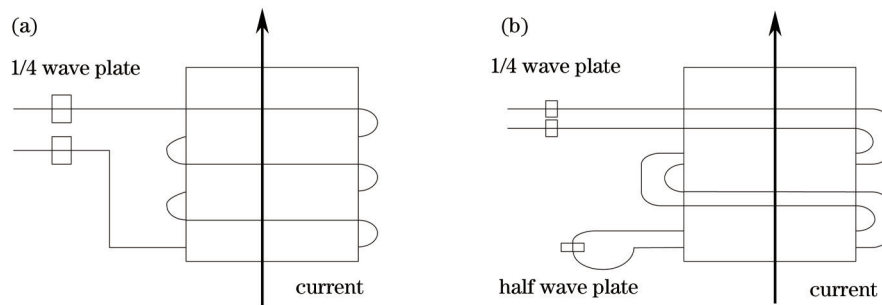


图7 原始方案(a)、改进方案(b)光纤线圈结构

Fig.7 Structure of fiber coil with (a) original scheme and (b) improved scheme

发生变化,进而导致AOFCS出现测量误差^[35]。对传感光纤而言,在相同圆双折射下,温度对AOFCS精度的影响随线性双折射增大而增大;在相同线性双折射下,温度对AOFCS精度的影响随圆双折射增大而减小。

抑制线性双折射主要是通过保证敏感环路的偏振本征模近似为圆偏光实现,姜中英^[12]提出可采取以下措施:一是改善 $\lambda/4$ 波片的材料,使其在温度变化时相位延迟角度的变化不显著;二是在减小传感光纤中的线性双折射的同时加入大量的圆双折射。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验条件下,系统前后比例因子误差(纵坐标)与温度(横坐标)曲线的关系如图8所示,稳定性误差由4.5%减小至小于0.5%。

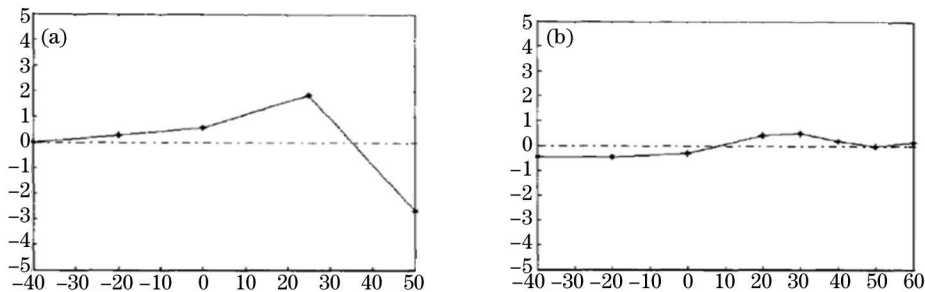


图8 补偿前(a)、补偿后(b)比例因子误差对比图

Fig.8 Comparison diagram of scale factor error before (a) and after (b) compensation

许扬等^[36]采用与传感光纤膨胀率相近的材料对传感光纤进行封装并控制 $\lambda/4$ 波片使其相位延迟尽量在 90° 附近,使得AOFCS的比差变化由 $-3.3\%\sim 4.9\%$ 下降至 $-0.29\%\sim -0.17\%$ 。文献[24]通过在传感光纤中部插入一个角度可调的偏振旋转器,并使发生干涉的两束光在一根光纤中传输,其整体结构如图9所示。

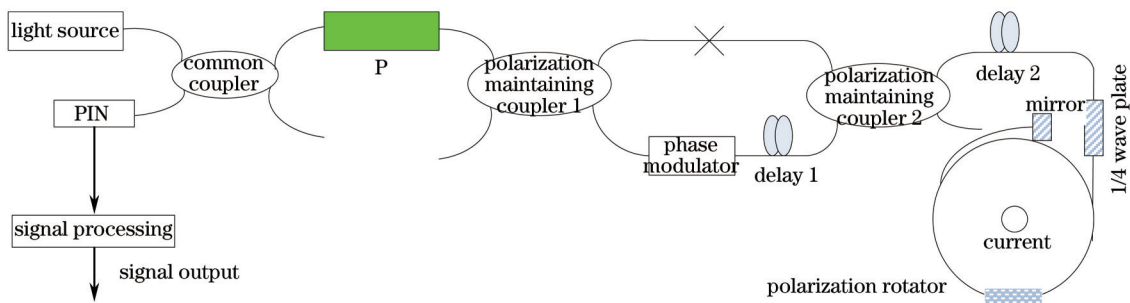


图9 新型Re-OFCs光路结构图

Fig.9 Structure diagram of a new Re-OFCs sensor

结果表明:当线性双折射抑制效果最理想时,传感光纤中的圆偏振光偏振面的前向和后向分别旋转 67° 或者 113° ,并且测量误差控制在 10^{-3} 数量级,新型反射式结构相比一般反射式结构提高了测量灵敏度和系统稳定性。

2.5 采用温度对 $\lambda/4$ 波片相位延迟影响与Verdet常数随温度变化影响互补

张海亮^[37]提出:AOFCS误差与温度相关的因子主要有 $\lambda/4$ 波片的相位延迟和传感光纤的Verdet常数,并且验证了由Bohnert^[6]提出的利用 $\lambda/4$ 波片相位延迟与Verdet常数随温度变化特性的互补技术,结果表明:在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,AOFCS的系统合成误差小于 4×10^{-4} ,满足国家标准中0.2S级测量用的传感器

0.2% 误差容限要求,表明该技术可行。

段俊杰等^[38]从 $\lambda/4$ 波片的熔接角和相位延迟角两方面分析了其对传感光偏振态的影响,传感器的标度因数表示式为:

$$K = \frac{4V(T)N}{\sin \delta(T)\sin 2\theta} = \frac{1}{\sin \delta(T)} \times \frac{V(T)}{V_0} \times \frac{4V_0N}{\sin 2\theta}, \quad (4)$$

若选择合适长度的波片,可使波片影响的比例项 $1/\sin \delta(T)$ 与 Verdet 常数影响的比例项 $V(T)/V_0$ 恰好形成互补,即 Bohnert 提出的技术。

2.6 相位调制器和集成光学调制器温度补偿方法

为补偿相位调制器的相位漂移,目前采用的方法主要有:

1) 对光纤陀螺进行温度漂移实验并将漂移数据存入 FPGA 以建立查找表,再根据不同位置温度值进行输出值修正。此方案中的数字型温度传感器难以兼顾精度与反应速度,并且需要为每只陀螺建立温度漂移数据后才能写入光纤陀螺 FPGA 程序中,实现过程非常繁琐且难以工程化。

2) 采用第二反馈回路的四态方波调制方案,将相隔半周期的两个采样值相减得到陀螺的增益误差量,两个反馈回路则根据该误差量产生合适的相位阶梯和增益补偿。然而当光源光谱形状不对称时,就会引入更大的误差甚至可能导致系统崩溃,该方案过于依赖自身性能。

由文献[39]可知:在室温(25℃)下,调制相位为 Φ 、温度变化 ΔT 时 Y 波导产生的附加相位漂移为:

$$\Delta\Phi = \Phi \times 1.045 \times 10^{-5} \times \Delta T, \quad (5)$$

即由温度变化引起的 Y 波导相位与温度之间呈线性关系,这为利用热敏电阻补偿温度引起 Y 波导附加相位漂移提供了可能性。王英利等^[40]在此基础上提出在 Y 波导驱动电路的运放电路中加入热敏电阻,其电路图如图 10 所示。

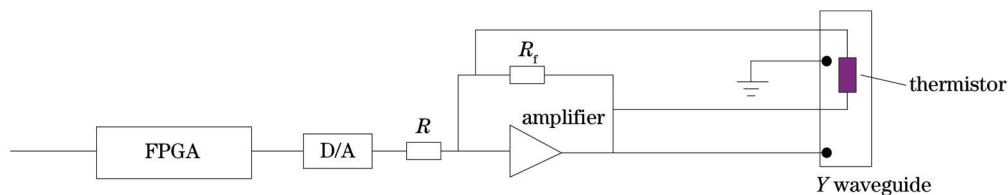


图 10 Y 波导运放电路中由负温度系数热敏电阻构成的温度漂移补偿电路

Fig.10 Temperature drift compensation circuit which is composed of negative temperature coefficient thermistor in Y waveguide operational circuit

利用热敏电阻的温度特性来改变温度变化时 Y 波导驱动电路中运放电路的放大倍数,使得相位调制量改变,从而达到补偿温度并引起 Y 波导附加相位漂移的目的。该方法成本低、工艺简单,且不破坏 Y 波导的良好封装结构,较为实用。实验结果对比如图 11 所示。

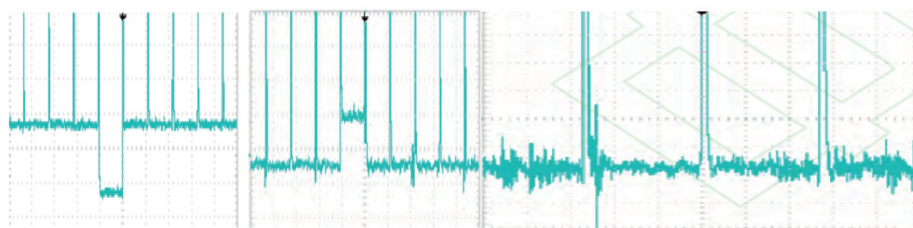


图 11 无温度补偿电路,温度升高(左)、降低(中);有补偿电路全温(右)情况下光纤陀螺静止下复位阶段输出曲线

Fig.11 Output curve of fiber optic gyro in static state and reset phase under three conditions: Left, without temperature compensation circuit but with temperature increment; middle, without temperature compensation circuit and with temperature decreasing; right, with temperature compensation circuit and with full temperature

王巍等^[41]在第二种方案基础上提出:通过控制陀螺主回路产生阶梯波 D/A 转换器的参考电压或反馈回路放大器的增益,从而确保 2π 复位误差的精确控制,最终消除相位调制器调制系数变化对刻度因子及其线性度的影响,实验结果如表 1,2 所示。

表1 改进后刻度因子误差随放大器增益误差的变化

Table 1 Dependence of scale factor error on gain of amplifier after improvement

Gain error amplifier /%	Scale factor error /%
-1	0.01
1	0.02
5	-0.03

表2 改进后刻度因子随输入电流的变化

Table 2 Dependence of scale factor on input current after improvement

Input current /kA	Scale factor error /%
1	-0.03
3	0.04
5	-0.05
7	0.02

实验结果表明:调制系数变化引起的刻度因子误差控制在0.05%以下,也能达到预期目标。

另外,还可以通过以下方式实现温度补偿:对输出数据进行处理,如针对反射式 Sagnac 型光纤电流传感器(RS-FOCT)的分段线性插值补偿^[42]、最小二乘法四次多项式拟合^[43]、多输入的在线训练式 BP 神经网络^[44]、小波神经网络^[45]等;改进光路结构,如图 12 所示^[46];用信号再入代替多匝传感光纤^[47];运用新型光纤如纺高双折射光纤^[48]等,均可以达到很好的实验效果。

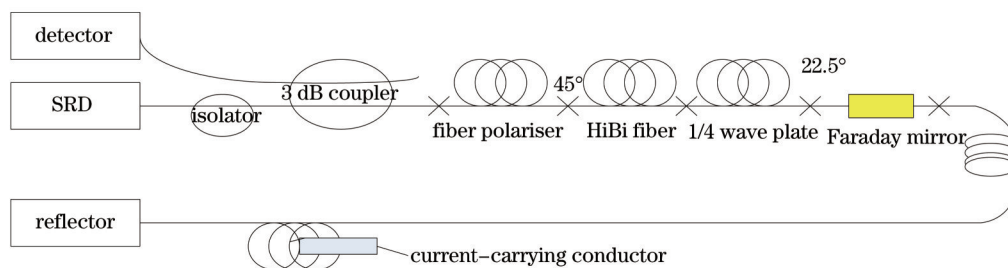


图 12 无源调制式光纤电流传感器结构

Fig.12 Structure diagram of passive modulated optical fiber current sensor

3 结 论

总的来说,对单个影响因子的补偿可以满足国家测量用0.2S级要求,用几何芯保偏光纤比如椭芯光纤制备光纤 $\lambda/4$ 波片可以获得较好的温度稳定性,针对线性双折射主要采用将低双折射光纤加入圆双折射的办法,对Verdet常数进行控制可以获得好的实验效果。

但是,在设计实用化AOFCS过程中,为更好解决温度因素的影响,不仅要考虑外部因素如光源、调制器、电路等的影响,AOFCS内部传感光纤的材料、传感光纤圈的结构的影响也是不容忽视的。因此,在将来的设计中如果要尽可能避免温度对AOFCS精度和稳定度的影响,应综合考虑多个因素的影响并配以数据校正的方法。

参 考 文 献

- 1 Tao Bangsheng. The application of the optical technology in smart grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(5): 82-84.
陶邦胜. 光学技术在智能电网中的应用[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(5): 82-84.
- 2 Huang Jianhua, Wang Jia. Key technology of optical current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 94-97.
黄建华, 王 佳. 光学电流互感器的关键技术[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 94-97.
- 3 Xiao Hao, Liu Boyang, Wan Shiwei, et al.. Temperature error compensation technology of all-fiber optical current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 91-95.
肖 浩, 刘博阳, 湾世伟, 等. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 91-95.

- 4 Blake J, Tantaswadi P, De Carvalho R T. In-line sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
- 5 Wu Gengsheng, Qian Xiaogang, Liao Yanbiao. Experiment of long stability of full-fiber optical fiber current sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1991, 13(5): 50-53.
吴庚生, 钱晓刚, 廖延彪. 全光纤型光纤电流传感器长期稳定性的实验研究[J]. 压电与声光, 1991, 13(5): 50-53.
- 6 Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 267-276.
- 7 Wang Wei, Wang Xuefeng, Xia Junlei. The nonreciprocal errors in fiber optic current sensors[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(8): 1470-1474.
- 8 Sanders G A, Blake J N, Rose A H, *et al.*. Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors at Nxtphase[C]. The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. 31-34.
- 9 Xu Shiqing, Dai Shixun, Zhang Junjie, *et al.*. Recent progress of all-fiber optic current sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(1): 41-45.
徐时清, 戴世勋, 张军杰, 等. 全光纤电流传感器研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(1): 41-45.
- 10 Mu Jie, Wang Jia, Zhao Wei, *et al.*. Vibration and temperature insensitive fiber-optic current transducer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 980-986.
穆杰, 王嘉, 赵卫, 等. 消除振动敏感性与温度漂移的光纤电流互感器[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 980-986.
- 11 Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Wang Haiming. A new type optical fiber current transformer[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 782-784.
娄风伟, 郑绳植, 王海明. 一种新型光纤电流互感器[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 782-784.
- 12 Jiang Zhongying, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, *et al.*. Study of temperature character on fiber-optical current transducer[C]. OFCIO, 2005. 787-792.
姜中英, 张春熹, 冯丽爽, 等. 光纤电流互感器的温度特性研究[C]. 全国光纤通信暨集成光学系列学术会议, 2005. 787-792.
- 13 Liu Xiaolong. Optimization and Implementation of Temperature Stability of All Fiber Optic Current Sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. 23-36.
刘晓隆. 全光纤电流传感器温度稳定性优化设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013. 23-36.
- 14 Hyun Seo Kang, Jong Hun Lee, Kyung Shik Lee. A stabilization method of the sagnac optical fiber current sensor with twist control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10): 1464-1466.
- 15 Zhang Xinliang, Liu Deming, Huang Dexiu. Optical fiber current transducer with function of temperature and polarization compensation[J]. Instrument Technique and Sensors, 1998, (10): 1-3.
张新亮, 刘德明, 黄德修. 具有温度和偏振态补偿功能的光纤电流传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 1998, (10): 1-3.
- 16 Pei Huandou. Research on Signal Processing System of all Fiber Optical Current Transducer[D]. Taiyuan: North University of China, 2010. 91-94.
裴焕斗. 全光纤电流互感器信号处理系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2010. 91-94.
- 17 Short S X, Tselikov A A, Arruda J U D, *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in sagnac interferometer-type current sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1212-1219.
- 18 Hu Yang, Zhang Yajun, Yu Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 839-842.
胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 839-842.
- 19 Teng Lin, Liu Wanshun, Li Guicun, *et al.*. Optical current transducer and its application in protective relaying[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 31-42.
滕林, 刘万顺, 李贵存, 等. 光学电流传感器及其在继电保护中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 31-42.
- 20 Cui Chunyan, Hu Xinning, Zhao Shangwu, *et al.*. Design of driving circuit for fiber-optic sensor light source[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(9): 98-100.
崔春艳, 胡新宁, 赵尚武, 等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 98-100.
- 21 Li Ruichun. Research on Temperature Characteristics of Optic Fiber Current Transducer[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. 31-50.
李瑞春. 光纤电流互感器的温度特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012. 31-50.
- 22 Cao Hui, Yang Yifeng, Liu Shangbo, *et al.*. Temperature control system for SLD optical source of FOCS[J]. Infrared and

- Laser Engineering, 2014, 43(3): 920-926.
曹 辉, 杨一凤, 刘尚波, 等. 用于光纤电流传感器SLD光源的温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 920-926.
- 23 Yan Yingwei. The Study of All Fiber Optic Current Transducer[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012. 14-51.
严颖维. 全光纤电流互感器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012. 14-51.
- 24 Chen Chunyan, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. Error tolerance of fiber quarter waveplate in fiber optic current transformer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012, (5): 12-15.
陈春艳, 陈 哲, 余健辉, 等. 全光纤电流互感器中 $\lambda/4$ 波片容差分析[J]. 仪表技术与传感器, 2012, (5): 12-15.
- 25 Zhang Xin. Signal Detection and Processing in Fiber Optical Current Transformer [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012. 49-60.
张 鑫. 光纤电流互感器中信号检测与处理[D]. 济南: 山东大学, 2012. 49-60.
- 26 Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, *et al.*. Research on temperature characteristic of quarter-waveplate and its effect on fiber optical current transformers[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 596-599.
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度特性及其影响研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 596-599.
- 27 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.
- 28 Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Li Chuansheng, *et al.*. Measurement method and experimental research of the temperature dependence of the phase delay of quarter-wave plates[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1205004.
王夏霄, 王 野, 李传生, 等. 光纤 $\lambda/4$ 波片相位延迟温度特性测量方法及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1205004.
- 29 W Iain Madden, W Craig Michie, Andrew Cruden, *et al.*. Temperature compensation for optical current sensors[J]. Optical Engineering, 1999, 38(10): 1699-1707.
- 30 F Zhang, J W Lit. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization maintaining fibers [J]. Appl Opt, 1993, 32(13): 2213-2218.
- 31 Mohr F. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical sagnac interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 27-41.
- 32 Frosio G, Dändliker R. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor[J]. Applied Optics, 1994, 33(25): 6111-6122.
- 33 Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber current transducer for elimination of vibration effect[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(4): 469-472.
焦斌亮, 王朝晖, 郑绳植. 用于消除振动影响的光纤电流传感器结构[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 469-472.
- 34 Jia Ming, Yang Gongliu. Open-close fiber optic current transformer for high-current measurement on line[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012, (4): 1-3.
贾 明, 杨功流. 开合式在线测量大电流的光纤电流互感器[J]. 仪表技术与传感器, 2012, (4): 1-3.
- 35 Forman P R, Jahoda F C. Linear birefringence effects on fiber-optic current sensors[J]. Appl Opt, 1988, 27(15): 3088-3096.
- 36 Xu Yang, Lu Yuping, Bu Qiangsheng, *et al.*. Analysis for effect of fiber-optic current transformer on protection accuracy and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 119-124.
许 扬, 陆于平, 卜强生, 等. 光纤电流互感器对保护精度和可靠性的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 119-124.
- 37 Zhang Hailiang. Error Research on In-line Fiber Optic Current Sensor[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. 49-51.
张海亮. 反射式全光纤电流互感器误差研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012. 49-51.
- 38 Duan Junjie, Wu Yanji, Yang Yi, *et al.*. Study and optimum design of quarter-waveplate in all fiber optical current transducer[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(5): 28-32.
段俊杰, 吴衍记, 杨 恽, 等. $\lambda/4$ 波片对全光纤电流传感器的影响与优化[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5): 28-32.
- 39 Song Zhe, Liu Liren, Zhou Yu, *et al.*. Effect of the polarization direction of incident light on electro-optic modulator for light propagating near the optic axis in LiNbO₃[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(3): 319-322.
宋 哲, 刘立人, 周 煜, 等. 入射光偏振方向对LiNbO₃晶体近光轴电光调制的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 319-322.
- 40 Wang Yingli, Xu Jintao, Liu Shangbo, *et al.*. The compensation of Y wave-guide temperature drifts by thermal resistor [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(s1): 0113002.

- 王英利, 徐金涛, 刘尚波, 等. 热敏电阻用于补偿Y波导温度漂移[J]. 光子学报, 2014, 43(s1): 0113002.
- 41 Wang Wei, Wu Weining, Wang Xuefeng. Effect of modulator modulation coefficient on measuring accuracy of fiber optic current sensor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 64-68.
王 巍, 吴维宁, 王学锋. 调制器调制系数对光纤电流互感器测量精度的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 64-68.
- 42 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiuxiao, *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.
- 43 Ma Tianbing, Zhao Yaojun, Zhang Hui, *et al.*. Research of temperature compensation of optical fiber current sensor based on matlab[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 9: 62-64.
马天兵, 赵耀军, 张 辉, 等. 基于Matlab的光纤电流传感器温度补偿研究[J]. 工矿自动化, 2009, 9: 62-64.
- 44 Antonio C Zimmermann, Marcio Besen, Leonardo S Encinas, *et al.*. Improving optical fiber current sensor accuracy using artificial neural networks to compensate temperature and minor Non-Ideal effects[C]. SPIE, 2011, 7753: 77535Q.
- 45 Hao Jinhui. Research on Sagnac Type Fiber Optical Current Sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. 38-49.
郝金会. Sagnac式光纤电流互感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. 38-49.
- 46 Wang Yuekun, Wang Zhengping, Sun Shuai. Effect of temperature characteristic of Faraday rotator on passively demodulated all-optical fiber current transformers[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 206-210.
王玥坤, 王政平, 孙 帅. 法拉第旋光器温度特性对无源解调全光纤电流互感器的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 206-210.
- 47 Wang Mahua. Re-entrant fiber-optic current transformer and signal detection[J]. Journal of Southeast University, 2009, 39: 37-41.
王马华. 再入式光纤电流互感器及信号检测[J]. 东南大学学报, 2009, 39: 37-41.
- 48 Nai Peng, Yong Huang, Shuangbao Wang, *et al.*. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(17): 1668-1671.