

# 全光纤电流传感器中传感光纤的温度特性研究

周东平<sup>1</sup>, 董毅<sup>1</sup>, 黄勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

<sup>2</sup>上海康阔光传感技术股份有限公司, 上海 201210

**摘要** 从传感光纤的高双折射螺距和光纤结构两方面分析不同螺距下光纤内光的偏振态差异及其受温度变化的影响,对比了 PANDA 光纤、椭圆芯光纤、保偏微结构光纤的温度特性。结果表明,在全光纤电流传感器(FOCS)中,当传感光纤的螺距  $L_T$  是光纤对应的未螺旋状态下拍长  $L_p$  的 2 倍时,温度特性最差。 $L_T$  减小,光纤偏振保持能力减弱,抗物理干扰能力变差。当  $L_T \approx L_p$  时,传感光纤既有较好的温度特性,也有较强的抗外界物理干扰能力。不同结构的传感光纤,传感器比差的范围不同,其中基于微结构保偏光纤的传感光纤,在  $-40 \sim +70$  °C 全温度下未经补偿,传感器比差变化范围最低,仅为  $\pm 0.32\%$ 。

**关键词** 光纤光学; 电流传感光纤; 温度特性; 磁光效应; 偏振转换

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.020604

## Study of Temperature Characteristics of the Current Sensing Fiber in Fiber Optic Current Sensor Applications

Zhou Dongping<sup>1</sup>, Dong Yi<sup>1</sup>, Huang Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China;

<sup>2</sup>Comcore Optical Sensing Technologies, Co., Ltd., Shanghai 201210, China

**Abstract** We analyze states of polarization in the fiber with different pitches and the influence of the environmental temperature on the fiber from the high-birefringence pitch and the structure of the sensing fiber. We compare the temperature characteristics of PANDA fiber, elliptical core fiber, and polarization-maintaining (PM) microstructure fiber, and make the conclusion that for a given fiber optic current sensor (FOCS), when the pitch of the sensing fiber  $L_T$  is twice as long as the beat length  $L_p$  of the fiber in non-helical state, the temperature characteristic is the worst; when  $L_T$  decreases, polarization-maintaining ability and anti-physical-interference ability weaken; when  $L_T \approx L_p$ , the sensing fiber has good temperature characteristics and strong anti-physical-interference ability. The sensing fibers with different structures have different ratio errors. Without compensation at the temperature of  $-40 \sim +70$  °C, the sensing fiber based on PM microstructure fiber has a minimum value of ratio error  $\pm 0.32\%$ .

**Key words** fiber optics; current sensing fiber; temperature characteristic; magneto-optical effect; polarization transformation

**OCIS codes** 060.2370; 230.2240; 060.2420

## 1 引言

全光纤电流传感器(FOCS)是智能电网建设中重要的核心设备,它具有传统式互感器无法比拟的

优势,能真实再现电网的实时电流信息,无爆炸等安全隐患,绿色环保。作为全新一代的电学电流传感器,它的出现为特高压输电及电力自动化奠定了基础,推动了电力网的稳定实时控制技术的发展。

**收稿日期:** 2017-06-21; **收到修改稿日期:** 2017-07-10

**作者简介:** 周东平(1984—),男,硕士研究生,主要从事全光纤电流传感器方面的研究。

E-mail: zhoudongping@gmail.com

**导师简介:** 董毅(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光信息传输与控制等方面的研究。

E-mail: yidong@sjtu.edu.cn

传感光纤环作为 FOCS 系统中的核心部件,深受国内外很多企业和科研单位人员的关注<sup>[1-4]</sup>。其中温度特性是传感光纤环的一个重要指标,是指传感光纤环在所处的环境温度变化过程中,传感信号量随温度变化的偏移量大小。目前大部分厂家在 FOCS 系统都具有温度补偿功能,温度特性较好的传感光纤环能简化温度补偿的过程,反之则会给温度补偿带来很大的困难甚至无法通过温度补偿满足应用的相关要求。由于电流传感器在高电压的应用中针对绝缘性有严格的要求,若采用常规的温度探测器,则无法获得传感光纤环所处的环境温度,只能采用 FOCS 进行温度探测,这将大大增加电流传感器系统的复杂性及系统成本。若不使用 FOCS,则需通过其他手段对传感光纤环所处的环境温度进行估值,但估值与实际温度存在一定的误差,故这种情况下需对传感光纤环的自身温度特性提出更苛刻的要求。因此研究传感光纤环温度特性具有重要的现实意义。

本文分析了传感光纤环温度特性的影响因素,并从螺距和光纤结构两方面研究了全光纤电流传感器中传感光纤的温度特性,以期为不同具体环境、不同温度特性要求下电流传感光纤的选用提供参考。

## 2 影响温度特性的因素

FOCS 的传感光纤均为高双折射光纤,温度变化时,不同材质的线膨胀系数将导致光纤内部产生应力变化,这种应力变化使光纤自身的拍长发生变化,而在光纤电流传感过程中,拍长的变化会直接影响传感光纤内椭圆偏振光的相位,从而使传感信号发生偏差。

将一小段保线偏振光纤用作 1/4 光纤波片,长度为该光纤拍长的 1/4。当线偏振光以 45° 注入时,理想状态下输出光为圆偏振光,在 FOCS 应用中,对 1/4 波片进行优化,可实现对传感光纤的温度补偿<sup>[5]</sup>;实际上在传感光纤内传输的是椭圆偏振光,这也是目前国内外诸多 FOCS 解决方案中普遍使用的方法。但影响 1/4 波片性能的因素很多,如切割光纤波片的长度以及熔接时的对轴角度等,考虑到熔接机中的电极棒属于耗材,还需要考虑熔接时的放电强度变化以及操作人员的细微差别。其中任意一个参数的微小偏差,都会导致输出至传感光纤中光的偏振态不一致,进而使每个光纤电流传感器的温度特性也不一致。

FOCS 的温度特性易受 1/4 波片制作工艺的影

响,因此对 1/4 波片制作工艺的要求十分苛刻。在制作传统的 1/4 波片工艺中遇到巨大阻碍的情况下,中国科学院院士黄宏嘉提出使用一段螺距渐变的光纤段(变螺距段,PT)来代替传统的 1/4 波片,用耦合模的方式使光纤内光的偏振态实现从线偏振光到椭圆偏振光的渐进演化<sup>[6-8]</sup>。这种结构的特点是波片与传感光纤一次工艺成型,具有高度一致性,避免了 1/4 波片个体差异引入的不确定性<sup>[9]</sup>。

用于 FOCS 的传感光纤是螺旋高双折射保椭圆偏振光纤,而该光纤非螺旋的状态时为保线偏振光纤。对于理想的单模光纤,偏振光在传输过程中能够保持自身的偏振态,但普通光纤即使被视为对称结构,实际应用中也会受弯曲、振动等因素的影响,使偏振光在其传输过程中偏振态不再稳定。保偏(PM)光纤通过在光纤结构中加入不同材质形成不同应力区或者采用特殊几何结构设计,以产生更强烈的双折射效应,来抵御外部微小应力对传输偏振态的影响。将保线偏振光纤预制棒在光纤拉丝过程中高速旋转,形成螺旋高双折射结构,传输光会在光纤内部产生圆双折射,因其左旋偏振光和右旋偏振光的相速度相差巨大,实际具有保椭圆偏振的效果。

### 2.1 螺距对于温度特性的影响

螺旋结构的传感光纤对应的未螺旋结构光纤的拍长随温度变化而变化。文献[10-11]推导出传感光纤的电流感应度公式为

$$S = \frac{4L_p^2/L_T^2}{1 + 4L_p^2/L_T^2}, \quad (1)$$

式中  $S$  为电流传感光纤的传感感应度,  $L_p$  为光纤对应的未螺旋状态下的拍长,  $L_T$  为传感光纤的螺距。 $S$  随  $L_T$  的减小而增大并趋向于 1,敏感度的变化率与拍长  $L_p$  的关系为

$$\frac{\partial S}{\partial L_p} = \frac{8L_p L_T^2}{(4L_p^2 + L_T^2)^2}. \quad (2)$$

当  $L_T = 2L_p$  时,(2)式达到最大值,也就是说当传感光纤的螺距是其对应的未螺旋状态下拍长的 2 倍时,随温度变化的感应度变化率最大。因此设计螺距时要避开  $L_T = 2L_p$ ,此时  $S = 0.5$ 。由于电流传感光纤的成本较高,所以传感效率较低的光纤需要用更长的光纤来提高传感效率,因而提高了系统的成本。故  $S$  值不宜过低,设计的螺距一般小于  $2L_p$ 。

设计螺距的另一个问题是传感光纤的保椭圆偏振的能力,即在光信号由线偏振光经过变螺距段后转换成椭圆偏振光,然后在均匀螺距的传感光纤中传输,考察光的偏振态是否稳定,能否抵抗外界物理

干扰的能力。由(1)式可以看出,当 $L_T$ 无穷小时, $S$ 可以达到最大值1,但当 $L_T$ 无穷大时,光纤退化为一个关于中心各向对称的均匀结构,同时失去了与其对应的未螺旋结构下的偏振保持能力。

使用 HP 8509B 型偏振态分析仪检验传感光纤中光波偏振态的稳定性,观察其在庞加莱球球面上的对应位置。若对传感光纤加以抖动时对应位置不发生变化,说明其偏振态稳定且不受外界干扰的影响。在偏振态稳定的前提下, $L_T$ 的最小实用值接近 $L_p$ ,若进一步缩短 $L_T$ 即可观察到偏振态出现不稳定现象。在 $L_T \approx L_p$ 的情况下,感应度 $S = 0.8$ ,此

时输出光的偏振隔离度(PER)约为 2.3 dB,对应的椭圆度为 0.58。因此可认为这是电流传感光纤的螺距的优化值,即 $L_T \approx L_p$ 。

传感光纤的温度测试方式如图 1 所示。在传感光纤温度测试的过程中,整个 FOCS 系统中仅有传感光纤环被置于型号为 ESPEC SET-Z-032L 的环境试验箱内,传感光纤环内通过电流导线,通入由电流源产生的电流。在温度变化过程中,光纤电流传感器产生的传感信号经过信号处理单元后传至个人计算机,与电流源的信号作对比,从而获取传感光纤环的温度特性。

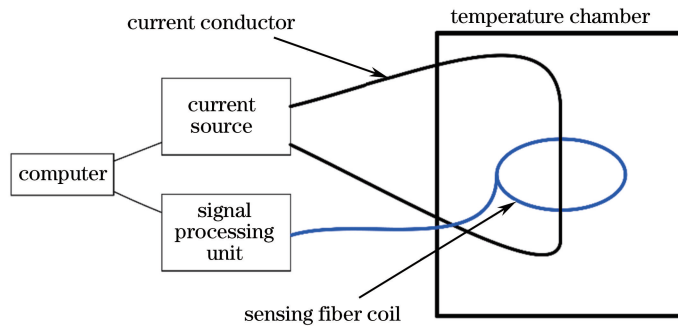


图 1 传感光纤的温度特性测试方法

Fig. 1 Schematic of testing temperature characteristic of sensing fiber

对采用不同螺距的椭圆芯传感光纤进行温度特性的测试,结果如图 2 所示。其中图 2(a)使用的传感光纤的螺距为 $L_T = 2L_p$ ,比差整体的变化范围较大;图 2(b)使用的传感光纤的螺距为 $L_T \approx L_p$ ,整个变温过程中比差随温度变化的线性度较好,这样的

温度特性较利于后期的温度补偿;图 2(c)使用的传感光纤的螺距为 $L_T \approx 0.5L_p$ ,整个温度变化范围内比差出现了波动的现象,且噪声也比较大,给后期的温度补偿带来困难。因此 $L_T \approx L_p$ 是较优化的螺距。

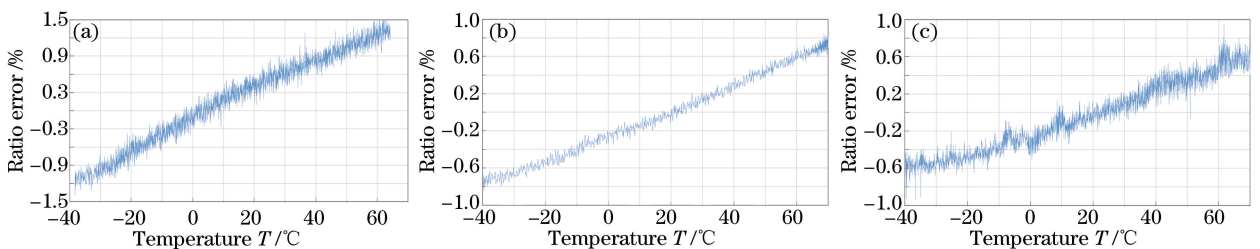


图 2 基于不同螺距的传感光纤的温度特性。(a)  $L_T \approx 2L_p$ ; (b)  $L_T \approx L_p$ ; (c)  $L_T \approx 0.5L_p$

Fig. 2 Temperature characteristics of sensing fibers with different pitches of

(a)  $L_T \approx 2L_p$ , (b)  $L_T \approx L_p$ , and (c)  $L_T \approx 0.5L_p$

如图 3 所示,通过偏振态分析仪观察传感光纤输出光的偏振态在庞加莱球球面上的投影,并同时光纤加以物理扰动。结果发现:当 $L_T = 2L_p$ 和 $L_T \approx L_p$ 时,投影的位置不受扰动的影响,而当 $L_T \approx 0.5L_p$ 时,投影位置受扰动影响发生了明显的变化。

## 2.2 不同结构光纤的温度特性

选用常用的 PANDA 光纤、椭圆芯光纤、保偏

微结构光纤作为研究对象,研究不同结构光纤的温度特性,3 种不同光纤的截面图如图 4 所示。由文献[6]关于变螺距段长度优化值的推论可知,其优化长度大于 $50L_p$ 。考虑到光纤的稳定性,拉丝过程中旋转加速不能过快,因此选择对应拍长较长的光纤。同样地,使用 $L_p$ 值较大的光纤,在变螺距段中电流传感感应度 $S$ 随长度的变化率也较小。故选用 PANDA 光纤,即未螺旋状态下 $L_p$ 值较大的光纤,

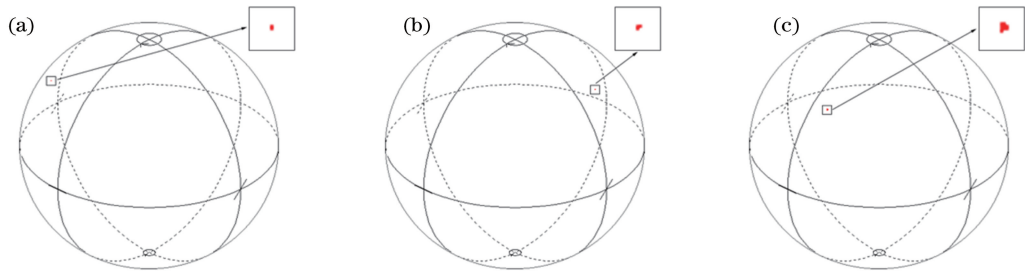


图3 不同  $L_T$  的光纤在物理扰动下的偏振态。(a)  $L_T \approx 2L_p$ ; (b)  $L_T \approx L_p$ ; (c)  $L_T \approx 0.5L_p$

Fig. 3 States of polarization in fibers with different  $L_T$  under physical disturbance. (a)  $L_T \approx 2L_p$ ; (b)  $L_T \approx L_p$ ; (c)  $L_T \approx 0.5L_p$

其对应的温度-比差特性如图5所示,全温度范围内比差的变化约为 $\pm 1.3\%$ 。

在传感光纤的研发过程中,采用椭圆芯光纤替代PANDA光纤,其包层中没有应力区,纤芯呈椭

圆形,由几何双折射和应力双折射并存的形式实现偏振保持,因此它自身结构中的材料差异性要比PANDA光纤小得多,图6是其对应的温度-比差特性图。全温度范围内比差的变化约为 $\pm 0.7\%$ 。

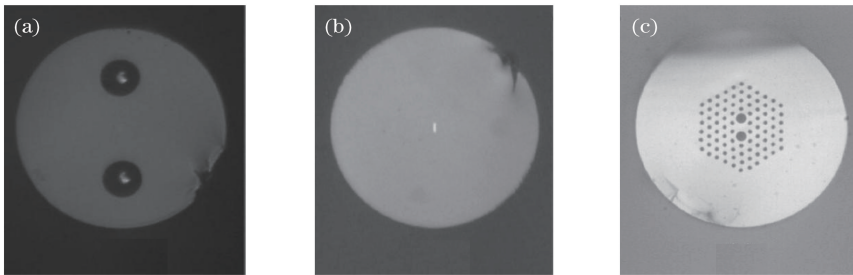


图4 不同光纤的端面。(a) PANDA 光纤;(b)椭圆芯光纤;(c)保偏微结构光纤

Fig. 4 End views of (a) PANDA fiber, (b) elliptical-core fiber, and (c) PM microstructure fiber

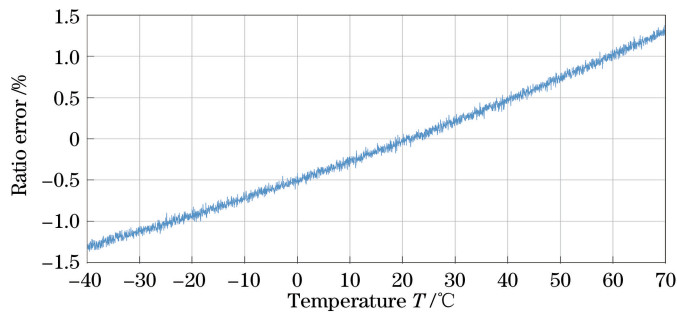


图5 基于PANDA光纤的电流传感光纤温度-比差特性图

Fig. 5 Temperature-ratio-error characteristic of sensing fiber based on PANDA fiber

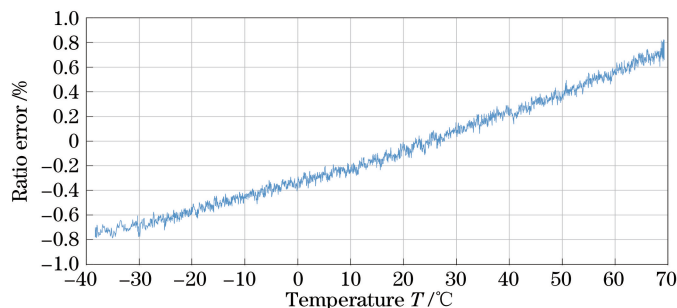


图6 基于椭圆芯光纤的电流传感光纤温度-比差特性图

Fig. 6 Temperature-ratio-error characteristic of sensing fiber based on elliptical-core fiber

保偏微结构光纤利用光子带隙效应使光在其内部传输<sup>[12]</sup>,该光纤由带有周期性排列空气孔的单一石英材料构成。单一的材料使其在温度变化过程中不会引入因内部材料不同导致线膨胀系数

不同而产生的应力,这是理想的电流传感光纤。图7为保偏微结构电流传感光纤所对应的温度-比差特性图。全温度范围内比差的变化约为 $\pm 0.32\%$ 。

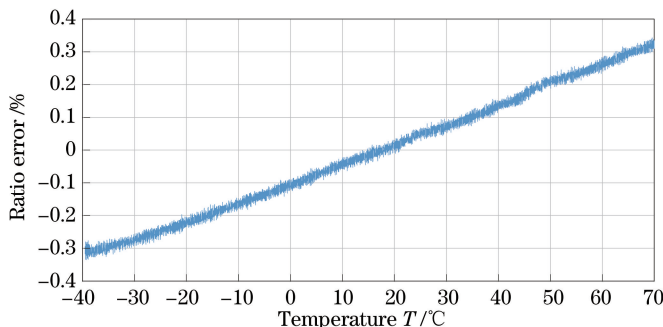


图7 基于保偏微结构光纤的电流传感光纤温度-比差特性图

Fig. 7 Temperature-ratio-error characteristic of sensing fiber based on PM microstructure fiber

### 3 结 论

从螺距和光纤结构的两方面分析了全光纤电流传感器传感光纤的温度特性。在螺距方面,当 $L_T = 2L_p$ 时,温度特性最差。随着 $L_T$ 的减小,温度特性逐步改善,但若 $L_T$ 持续减小,将导致光纤偏振保持能力减弱,抗物理干扰能力变差,因此需对 $L_T$ 进行优化。当 $L_T$ 接近 $L_p$ 时,传感光纤既有较好的温度特性,也有较强的抗外界物理干扰能力, $L_T \approx L_p$ 为最优的螺距值。在光纤结构方面,对比分析了PANDA光纤、椭圆芯光纤、保偏微结构光纤的温度特性,结果发现基于微结构保偏光纤的传感光纤,在 $-40 \sim +70$  °C全温度下未经补偿,传感器比差变化范围仅为 $\pm 0.32\%$ 。应用过程中,可根据具体的环境或对温度特性要求的不同程度来选用不同种类的电流传感光纤。

### 参 考 文 献

[1] Wang Z P, Kang C, Zhang X Y, *et al.* Progress in all-fiber optic current transformer technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(3): 36-40.  
王政平, 康崇, 张雪原, 等. 全光纤光学电流互感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 36-40.

[2] Peng N, Huang Y, Wang S B, *et al.* Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(17): 1668-1671.

[3] Li Z Y, Meng Y C, Hao X Y. Spun high birefringence all-fiber current transformers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020601.

李卓岩, 孟义朝, 郝祥雨. 旋转高双折射全光纤型电流互感器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020601.

[4] Cheng S, Guo Z Z, Zhang G Q, *et al.* Temperature characteristic of fiber optic current sensor[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3843-3848.  
程嵩, 郭志忠, 张国庆, 等. 全光纤电流互感器的温度特性[J]. 高压电技术, 2015, 41(11): 3843-3848.

[5] 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.

[6] Huang H. Passive fiber-optic polarization control element: US5096312[P]. 1992-03-17.

[7] Huang H. Passive fiber-optic polarization control: US4943132[P]. 1990-07-24.

[8] Zhu X S, Jain R. Detailed analysis of evolution of the state of polarization in all-fiber polarization transformers[J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10261-10277.

[9] Rose A H, Feat N, Etzel S M. Wavelength and temperature performance of polarization-transforming fiber[J]. Applied Optics, 2003, 42(34): 6897-6904.

[10] Laming R I, Payne D N. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(12): 2084-2094.

[11] Li L, Qian J, Payne D. Current sensors using highly birefringent bow-tie fibres[J]. Electronics Letters, 1986, 22(21): 1142-1144.

[12] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.

[13] Barczak K. Application of photonic crystal fiber in optic fiber current sensor[J]. Acta Physica Polonica A, 2012, 122(5): 793-795.