

全光纤电流传感器中电流传感光纤的抗干扰研究

周东平¹, 董毅²

¹上海交通大学电子工程系, 上海 200240;

²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

摘要 针对带变螺距段传感光纤的全光纤电流传感器, 提出两种抗干扰结构: 基本结构, 即将变螺距段与传感光纤一起成束并将反射镜置于变螺距段中点位置; “8”字型结构, 将变螺距段绕成“8”字型。分析两种结构的抗干扰原理, 实验检验电流导体在传感光纤环内、外不同位置时传感器读数的差异。实验结果表明, 两种结构均可抗 0.5 m 以上的 1000 A 级别的外界电流干扰, 但前者仅适用于电流导体与传感光纤环相对位置固定不变的应用场合, 后者可适用于诸多电流导体与传感光纤环相对位置不固定的应用场合。在不同的应用场合下两种结构的抗干扰性能均具有实用性。

关键词 光纤光学; 传感器; 电流传感光纤; 抗干扰; 磁光效应; 偏振转换

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1006002

Anti-Interference of Current Sensing Fiber in All-Fiber Current Sensors

Zhou Dongping¹, Dong Yi²

¹Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Two anti-interference structures of sensing fibers with variable pitch parts in fiber optic current sensors are proposed. One is fundamental structure, where the variable pitch part is bunched with the sensor fiber and the reflector is placed in the midpoint of the variable pitch part. The other is "8"-shape anti-interference structure, where the variable pitch part is wound into an "8" shape. The anti-interference principles of the two structures are analyzed. The differences of sensor readings are tested when the current conductor is at different points inside and outside the sensor fiber coil. The experimental results show that the external 1000 A level current disturbance can be resisted away from 0.5 m for both structures. However, the former only is applied to the applications where the relative positions of the current conductor and the sensor fiber coil are unchanged, while the latter can be applied to the many applications where the relative positions of the current conductor and the sensor fiber coil are not fixed. The anti-interference performances of both structures under different applications are practicable.

Key words fiber optics; sensors; current sensing fiber; anti-interference; 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,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,绿色环保,无爆炸等安全隐患。作为全新一代的电子式电流传感器,它的出现为特高压输电及电力自动化奠定了坚实基础,并将积极推动电力网的稳定实时控制技术的发展。

在电流传感器系统中,传感光纤环作为核心部件,被国内外研究者进行了诸多研究^[1-4]。主流光纤电流

收稿日期: 2017-04-18; **收到修改稿日期:** 2017-06-01

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中传感光纤的设计及工艺优化,传感器性能测试软件开发等方面的研究。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(通信联系人)

传感中的一个重要环节就是如何将光源输出的线偏振光经过作为传输光纤的保线偏振光纤后转化成椭圆偏振光,再输入至保椭圆偏振的传感光纤。目前国内外多数应用中都使用 1/4 波片结构来实现偏振态转换(PT)功能。但是 1/4 波片对工艺的要求非常高,其制作过程中,切割光纤时的长度、熔接时的对轴角度和放电强度等任意一个参数的微小偏差,都会导致输出至传感光纤中的光的偏振态不一致,进而导致每个光纤电流传感器的性能不一致。

针对波片制作工艺遇到的阻碍,20 世纪 90 年代初,中科院黄宏嘉院士提出使用一段螺距渐变的光纤段(以下简称变螺距段或 PT)来代替 1/4 波片,用耦合模的方式实现光纤内光的偏振态从线偏振光到椭圆偏振光的渐进演化^[5-7]。但带来的问题是这段变螺距段光纤的自身长度远长于 1/4 波片,且其自身也具有传感特性,在形成闭环的过程中无法忽略其长度,在整个传感回路中成为干扰项。这一弊端可通过增加电流传感光纤长度,即降低变螺距段在整个传感光纤中的比例,来减弱干扰。但由于传感光纤价格高昂,该做法会大大提高系统成本,因此有必要在不增加传感光纤长度的情况下,通过等效缩短变螺距段的长度来尽可能抑制干扰。

本文分析了带变螺距段传感光纤的基本结构和“8”字型结构,理论分析了其抗干扰原理,实验测试了电流导体在传感光纤环内、外不同位置时传感器读数的差异。实验结果表明,“8”字型结构的抗干扰适用范围更广。

2 抗干扰的实现原理

在螺旋高双折射结构的传感光纤中,其传感电流的灵敏度的大小与其螺距大小有关,具体描述为^[8-9]

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

式中 S 为传感光纤的电流传感灵敏度, L_T 为目标螺距, L_p 为等效无螺旋光纤的拍长。

图 1 为带变螺距段的传感光纤环的基本结构,即将变螺距段与传感光纤一起成束,并将反射镜置于变螺距段的中点位置,图中 MON 段是变螺距段,其中 M 点的灵敏度为 0, N 点的灵敏度与之后的均匀螺距的灵敏度一致,且从 M 到 N 点的传感能力单调递增。若导体在光纤环正中央,则整个光纤环所处位置的磁场强度一致。线性增加 M 至 N 点的传感灵敏度,并将反射镜置于 M 和 N 点的中点 O ,这样可使 MO 段多余传感量恰好与 ON 段缺失的相抵消。此时包含变螺距段在内的传感光纤束从 M 到 N 点的整体灵敏度分布如图 2 所示。

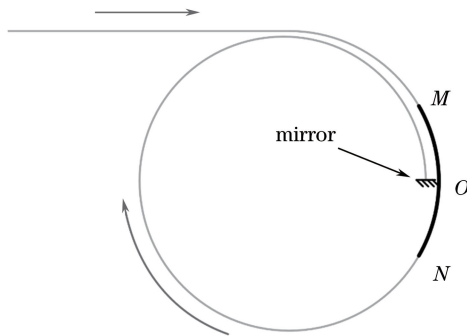


图 1 带变螺距段的传感光纤环的基本结构

Fig. 1 Basic structure of sensing fiber coil with variable pitch part

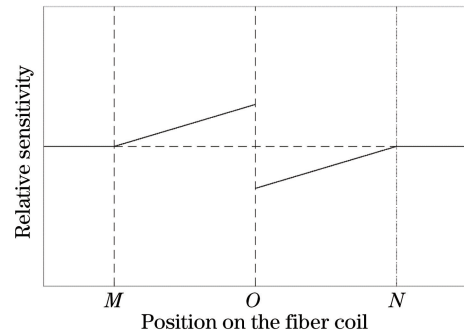


图 2 由 M 至 N 的传感灵敏度分布

Fig. 2 Distribution of sensitivity from point M to N

在螺旋光纤中,螺距越小,对应传感电流的灵敏度越高。令变螺距段的长度为 L ,使电流传感灵敏度在这段长度上线性增加,最终的目标螺距为 L_T ,假设 H 点是变螺距段上的一点,其到起始点 M 的距离为 x ,令 H 点的电流传感灵敏度为 $S(x)$,由于灵敏度线性增加,假设 $S(x) = kx$,结合(1)式, N 点的灵敏度为

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

进而可得

$$k = \frac{4L_p^2/L_T^2}{(1 + 4L_p^2/L_T^2)L}. \quad (3)$$

再假设 H 点的螺距为 $P(x)$, 根据灵敏度公式, H 点的灵敏度为

$$S(x) = kx = \frac{4L_p^2/P^2(x)}{[1 + 4L_p^2/P^2(x)]L}x, \quad (4)$$

式中

$$P(x) = 2L_p \sqrt{\frac{1}{kx} - 1} = 2L_p \sqrt{\frac{(L_T^2 + 4L_p^2)L}{4L_p^2x} - 1}. \quad (5)$$

文献[5]指出, 变螺距段长度的优化值应为无螺旋结构光纤拍长的 100 倍。而在本实验中发现, 综合考虑电流传感灵敏度和保椭圆偏振能量, 均匀螺距段的螺距应取与无螺旋结构光纤的拍长相仿的长度。即(5)式中, $L_T = L_p$, $L = 100L_p$, 因此

$$P(x) = 2L_p \sqrt{\frac{125L_p}{4x} - 1}. \quad (6)$$

在传感光纤的生产过程中, 应遵循(6)式进行变螺距段的螺距控制。

图 3 为 3 种不同拍长光纤经过优化后的变螺距段演化过程。以 30 cm/s 的拉丝速度为例, 拉丝过程中的旋转速度与变螺距段各个位置上的关系如图 4 所示。

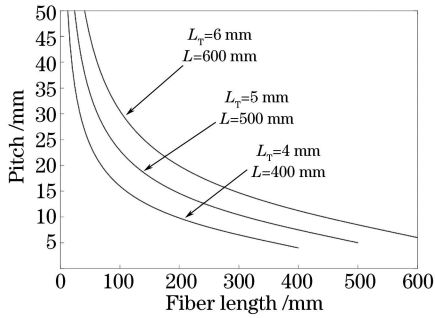


图 3 针对不同拍长光纤的变螺距段螺距控制
Fig. 3 Pitch control of the variable pitch part for fibers with different beat lengths

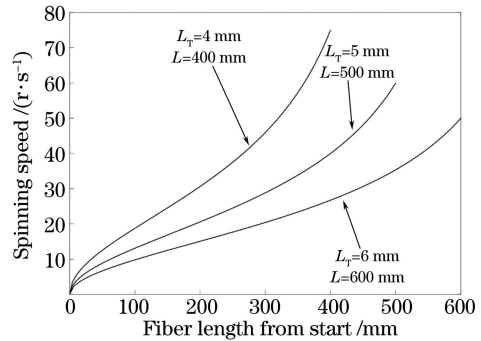


图 4 不同拍长光纤变螺距段的螺旋速率控制
Fig. 4 Spinning speed control of the variable pitch part for fibers with different beat lengths

3 抗干扰实验

抗干扰实验分为两部分, 1) 检验电流导体在传感光纤环内不同位置时传感器读数的差异, 2) 测试大电流导体在传感光纤环外对系统的干扰。

实验中设置传感光纤环直径为 30 cm, 含变螺距段在内的传感光纤总长约 20 m, 在环内绕 20 圈, 通电导体分别置于环内 5 个不同位置(见图 5), 检验不同位置下相对于中心位置时传感器读数的误差。电流大小设定为 1200 A, 由于光纤环骨架的存在, 即使导体贴近光纤环内侧时与光纤本身仍有约 1 cm 的距离。

抗干扰实验结果见表 1。当导体靠近变螺距段时, 传感器读数比导体位于传感光纤环中心位置时高

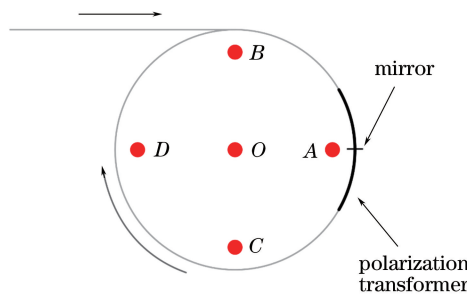


图 5 抗干扰实验中电流传感光纤环内的不同测试位置

Fig. 5 Different testing positions inside the current sensing fiber coil in the anti-interference test

0.37%；而位于变螺距段两侧时，传感器读数相对于中心位置的误差约为 0.23%；处于变螺距段相对一侧时，传感器读数则较中心位置约低 0.1%。轻微扰动处于传感光纤环中心位置的导体，读数基本不变，扰动幅度加大后，读数发生明显变化。

表 1 抗干扰实验结果(相对于中心点的误差)

Table 1 Results of the anti-interference test (errors compared with the center)

Position	Current/A	Error /%
A	1208.61	0.370
B	1206.89	0.228
C	1201.31	-0.236
D	1203.01	-0.096
O	1204.15	

关闭环内导线的电流，将通 1000 A 的导体在传感光纤环外周围各方位进行干扰发现，距传感光纤环超过 0.5 m，传感器均无电流读数。

4 优化结构的抗干扰原理与实验

在很多应用中，例如对导体位置要求相对较自由的传感光缆柔性安装模式，因导体位置变化产生的误差不能超过 0.4%。若要保证此条件，须进一步提升传感光纤体系的抗干扰能力。

从进一步缩小变螺距段的等效长度和增强其内部抵消效应的方向出发，采用“8”字型结构，使变螺距段独立于传感光纤环之外，一方面能够增加与被测导体之间的距离，另一方面其自身的结构经过环绕之后具有更短的等效长度以及更好的传感抵消效果。基本原理如图 6 所示。保线偏振的传输光纤由信号处理单元引出后，在变螺距段处将其预先绕成两个等半径的圆形并加以固定，先从 O 点出发顺时针经过 M 点再回到 O 点，再逆时针绕圈经过 N 点再次回到 O 点；将剩余的均匀螺距段绕成传感光纤环后，再将最终的反射镜重合至 O 点。该结构中均匀螺距段的光纤形成完全闭合的环路，而变螺距段则独立于传感光纤环之外，形成一个“8”字型的结构体。

带“8”字型的传感光纤环的装配方式如图 7 所示，通电导体与“8”字型结构平面平行，且与 M-O-N 方向一致，目的是让磁场方向与“8”字型结构平面平行，且强度基本一致，并以图 8 所示的方向穿过。

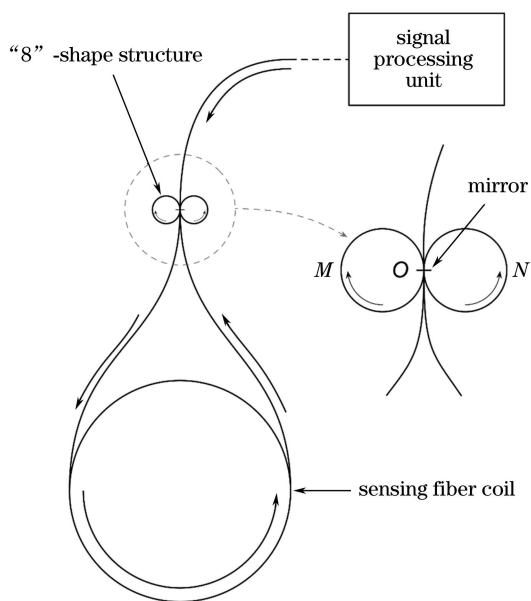


图 6 “8”字型抗干扰结构基本原理图
Fig. 6 Schematic of the "8"-shape anti-interference structure

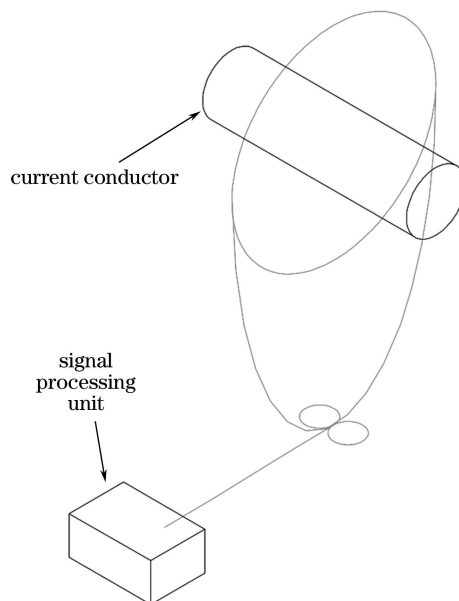


图 7 带“8”字型抗干扰结构的 FOCS 的装配
Fig. 7 Deployment of the FOCS with "8"-shape anti-interference structure

此时观察变螺距段中的前 1/4, 即由 O 点顺时针至 M 点的部分, 若定义均匀段的传感灵敏度为 S , 则该部分的灵敏度由 0 线性增加至 $S/4$, 假设“8”字型结构所处位置的磁场强度为 B , 则作用在 O 点至 M 点光纤上的有效磁场强度则由 $B\sin 0$ 变化至 $B\sin(\pi/2)$ 再到 $B\sin 0$, 若定义这部分的传感效应为负方向, 则再经过 M 点回到 O 点光纤上产生的传感效应为正方向。

整个“8”字型结构上产生的传感效应如图 9 所示, 顺时针和逆时针旋转两圈累积的角度为 4π , 光纤上各点的相对传感量 S_R 的函数描述为

$$S_R(\theta) = \begin{cases} -\frac{\theta}{4\pi}BS\sin\theta, & \theta \in (0, 2\pi] \\ \frac{\theta}{4\pi}BS\sin\theta, & \theta \in (2\pi, 4\pi] \end{cases}, \quad (7)$$

而由于

$$\int_0^{4\pi} S_R(\theta)d\theta = 0, \quad (8)$$

即整个变螺距段上的传感效应积分为 0, 故其自身产生的传感量恰好抵消。而在使用直径更细的传感光纤时, 因为可以承受更小的弯曲半径, 故可以采用多个“8”字型结构重叠的方式, 使其等效长度更短, 扩展得出 $(0, 4n\pi]$, $n \in \mathbb{Z}^+$ 下的 $S_R(\theta)$ 满足

$$\int_0^{4n\pi} S_R(\theta)d\theta = 0, \quad n \in \mathbb{Z}^+. \quad (9)$$

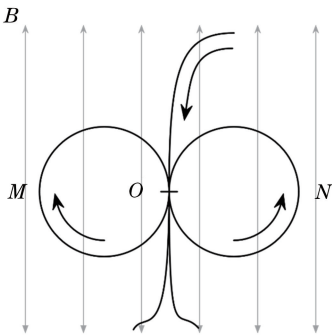


图 8 通电导体产生的磁场中的“8”字型抗干扰结构
Fig. 8 "8"-shape anti-interference structure in the magnetic field generated by the conductor

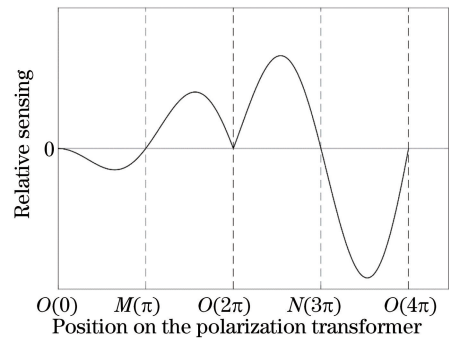


图 9 “8”字型抗干扰结构中的相对传感量分布
Fig. 9 Distribution of the relative sensing along the "8"-shape anti-interference structure

在传感光纤环内放置电流导体并通以 1200 A 电流, 如图 7 所示, 在变换导体不同位置的过程中未观察到电流测量值的变化。

在环外的干扰实验中, 关闭了环内导线的电流, 将通 1000 A 的导体在整个传感光纤环外周围的各个方位上进行干扰, 发现在离传感光纤环 0.5 m 以上的情况下, 导体在各个方向上进行干扰都观测不到电流读数。由于均匀螺距段的部分形成了闭环, 该部分不会对外界电流有感应, 所以仅针对“8”字型结构的部分进行抗干扰测试, 结果相同。

5 结 论

对光纤电流传感器中灵敏度单调线性递增的变螺距段的干扰原理进行了分析, 提出了两种不同形式的抗干扰结构。1) 将变螺距段与传感光纤一起成束并将反射镜置于变螺距段的中点位置, 该结构易实现, 适用于电流导体与传感光纤环相对位置固定不变的应用场合, 并可抗 0.5 m 以上的 1000 A 级别的外界电流干扰。2) 将变螺距段绕成“8”字型结构, 适用于诸多电流导体与传感光纤环相对位置不固定的应用场合, 如柔性缠绕的装配模式, 经常性需要拆除装配的实验型应用, 以及便携式电流测量的相关应用, 导体在环内的位置变化不会对测量精度造成影响, 对于外部干扰, 同样可抗 0.5 m 以上的 1000 A 级别的外界电流干扰。因此这两种不同的结构在不同的应用场合下的抗干扰性能可认为均具有实用性。

致谢 本文全部实验均在上海康阔光传感技术股份有限公司基于其自主研发的设备和光纤完成,衷心感谢上海康阔的黄勇博士对实验过程和本文的撰写提出大量的宝贵意见!

参 考 文 献

- [1] Wang Zhengping, Kang Chong, Zhang Xueyuan, *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 Zhuoyan, Meng Yichao, Hao Xiangyu. 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] Gubin V P, Isaev V A, Morshnev S K, *et al.* Use of spun optical fibres in current sensors[J]. *Quantum Electronics*, 2006, 36(3): 287-291.
- [5] Huang H. Passive fiber-optic polarization control element: US5096312[P]. 1992-03-17.
- [6] Huang H. Passive fiber-optic polarization control: US4943132[P]. 1990-07-24.
- [7] Zhu X, Jain R. Detailed analysis of evolution of the state of polarization in all-fiber polarization transformers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10262-10277.
- [8] Li L, Qian J R, Payne D N. Current sensors using highly birefringent bow-tie fibres[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(21): 1142-1144.
- [9] 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.