

一种环形结构单光路检测型光纤电流传感器

张昊

福建江夏学院电子信息科学学院, 福建 福州 350007

摘要 针对传统单光路检测型光纤电流传感器电流灵敏度低的缺点,提出一种新颖的环形结构单光路检测型光纤电流传感器。该光纤电流传感器利用单偏振单模耦合器构建光纤环形腔结构,取代了传统单光路检测型光纤电流传感器中的起偏器和检偏器。这一设计不仅保留了单光路检测型光纤电流传感器所具有的结构简单、成本低廉等优点,还具备环形腔结构光纤电流传感器可实现传感信息的多次循环放大的特点,提高了系统的电流灵敏度。理论分析与实验表明,这种光纤电流传感器的电流灵敏度可随循环次数 K 的增加而增加,设计具备可行性。

关键词 光纤光学; 光纤电流传感器; 单光路检测; 电流灵敏度; 光纤环形腔; 单偏振单模耦合器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060604

A Fiber Current Sensor Based on Single Light Path Detection and Loop Scheme

Zhang Hao

Department of Electronic Information Science, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract We propose a novel fiber current sensor based on single light path detection and fiber loop scheme in order to solve the problem of low current sensitivity of traditional single light path detection fiber current sensors. Fiber loop scheme of this fiber current sensor is built by single-polarization single-mode couplers, which replaces the polarizer and the analyzer in traditional single light path detection fiber current sensors. This design not only keeps the advantages of simple structure and low cost, but also improves the current sensitivity of fiber current sensor via repeated cycle amplification, which inherits from the loop scheme. Both theory and experiment show that the system current sensitivity increases with cycle number K and the new fiber current sensor is feasible.

Key words fiber optics; fiber current sensors; single light path detection; current sensitivity; fiber loop scheme; single-polarization single-mode coupler

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 230.1150

1 引言

电流传感器是电网中的重要监测设备,对于保障电网安全运行具有巨大作用。目前常用的电流传感器多是基于磁电式原理设计,具有结构简单、技术成熟、性能稳定等优点。但是随着电网容量提高,磁电式电流传感器也表现出许多不足,如需要使用铁芯、体积大、质量大、存在磁饱和效应、容易爆炸、安全性低^[1]。鉴于这种情况,发展无磁饱和效应、更加安全、更加轻量化的新型电流传感器具有重要的意义。

作为光学电流传感器一个重要发展分支的全光纤电流传感器,具有电气绝缘性好、体积小、质量小、安全性好等优点,受到光电子领域研究人员广泛的关注^[2-6]。光纤电流传感器在结构上采用光纤作为敏感元件绕于被测导线的周围,在原理上利用法拉第磁旋光效应探测通电导线周围产生的磁场。法拉第磁旋光角正比于磁场沿闭合传输路径的积分,即正比于穿过传输路径的电流,通过测量磁旋光角即可得到电流强度^[7-8]。由于光纤电流传感器采用的都是光纤器件,相比于其他的光学电流传感器,其在光学集成性、制造装配灵活性以及价格上具有明显的

收稿日期: 2017-11-22; 收到修改稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51607040)、福建省自然科学基金项目(2016J01751)

作者简介: 张昊(1981—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: dream13027@sina.com

优势。

虽然光纤电流传感器是利用光信号偏振态的变化进行测量,但是考虑到直接对光进行偏振检测成本较高且精度有限,光纤电流传感器在光信号输出端通常采用将光偏振信息转换为光强信号的方式进行检测,典型的方法有单光路检测法和双光路检测法^[7-8]。单光路检测法结构简单,只采用一个光电探测器,成本较低,缺点是对起偏器和检偏器的稳定性要求较高,易受外界干扰。相比之下,双光路检测法需要使用沃拉斯顿棱镜(Wollaston Prism)和两个光电探测器,系统复杂,成本较高,但对于外界干扰抵抗能力比单光路检测法强,因此在实际中应用较多^[7]。无论是单光路检测还是双光路检测的光纤电流传感器,都存在一个关键性问题——电流灵敏度低,这是因为光纤材料的菲尔德常数很低^[9]。增加传感光纤匝数虽然可以提高电流灵敏度,但也容易增加系统的不稳定性^[10-11]。

尽管目前单光路检测法在光纤电流传感器研究中的应用不多,但是其在结构和成本上具有的优势是不争的事实。因此,本文在传统的单光路检测光纤电流传感器的基础上提出一种基于光纤环形腔结构和单偏振单模耦合器(SPSM coupler)的新型光纤电流传感器。该光纤电流传感器利用 SPSM 耦合器构建光纤环形腔结构并取代原有的起偏器和检偏器,在增强系统稳定性的同时实现了传感信息的多次循环放大,提高了系统的电流灵敏度。

2 结构和原理

典型的环形腔光纤电流传感器结构如图 1^[12-13]所示。该设计利用光信号在光纤环形腔中多次循环,使光信号多次通过传感光纤,从而实现法拉第旋光

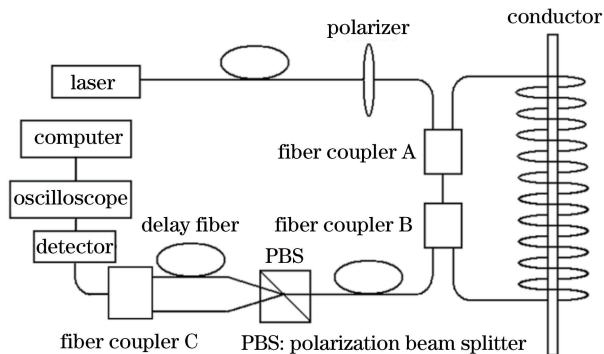


图 1 环形腔光纤电流传感器

Fig. 1 Configuration of fiber current sensor based on fiber loop scheme

光角的放大。尽管可以增大法拉第效应,但该结构中引入的耦合器、起偏器和沃拉斯顿棱镜容易受到外界影响,不利于系统稳定。

本文提出的环形结构单光路检测型光纤电流传感器结构如图 2 所示。这里引入了单偏振单模耦合器(SPSM 耦合器 A、SPSM 耦合器 B)取代原结构中的耦合器 A 和 B。由于 SPSM 器件只允许沿给定轴的光导通^[14],因此,当信号光通过 SPSM 耦合器 A 和 B 时将被转化为沿给定轴的线偏振光。此时,SPSM 耦合器 A 和 B 实际上相当于起偏器。信号光在环形腔结构内循环的过程中通过光纤环传感头时,受到电磁场引起的法拉第旋光效应作用,偏振状态发生改变,偏振面发生旋转。当光信号再次经过 SPSM 耦合器 A 和 B 时,在 SPSM 器件的作用下,只有沿给定轴的光可以通过,其他不沿该轴的光信号将被截止,这一转换过程类似马吕斯效应,此时 SPSM 耦合器 A 和 B 实际上相当于检偏器,受到电磁旋光作用影响,光信号的强度将随电流强度发生改变,如图 3 所示。

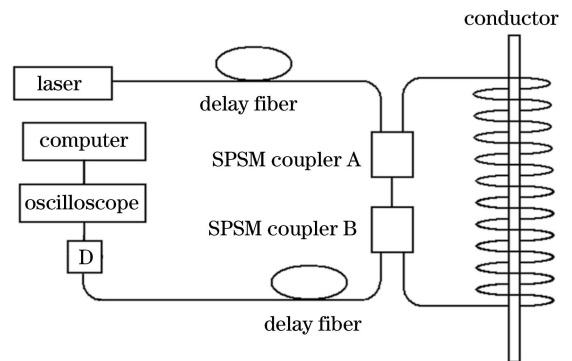


图 2 环形结构单光路检测型光纤电流传感器

Fig. 2 Configuration of fiber current sensor based on single light path detection and fiber loop scheme

光信号在环形腔结构中多次循环,每一次通过传感头都会在电磁场影响下使光强发生一定程度的下降,因此光强的变化中将包含电流强度信息。每次循环,在 SPSM 耦合器 B 处,将有一小部分的光信号通过耦合器的一个连接端口输出到一个光电探测器。在脉冲光源输出的 1 个周期内,探测器将接收到多次循环输出光信号,构成的一个脉冲系列。结构中的 SPSM 耦合器比普通耦合器具有更好的偏振稳定性,同时延迟光纤可采用保偏光纤提高系统稳定性。

假设脉冲光源输出的单个脉冲强度为 I_0 ,则光信号在环形腔结构内单次循环的光强变化可以参考

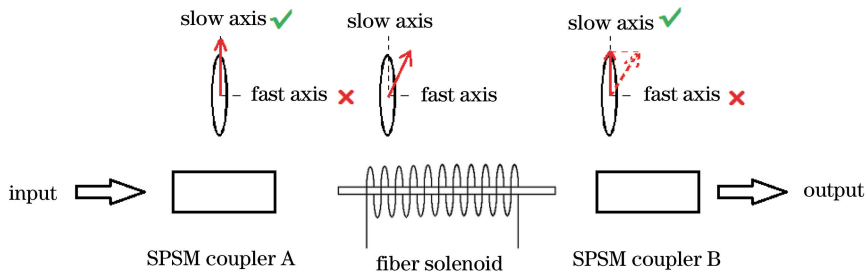


图3 光信号偏振在 SPSM 耦合器间的演变过程, SPSM 器件只允许沿慢轴光通过

Fig. 3 Evolution process of light polarization between the SPSM couplers, which only allows light polarized along the slow axis to pass through

单光路检测型光纤电流传感器的输出规律^[15], 输入信号受结构内固有双折射和法拉第效应影响, 光信号按余弦投影在通光轴上, 并且输出光强度还需考虑环形腔损耗。因此, 从 SPSM 耦合器 B 的端口输出强度为

$$J = I_0 \cos^2(\theta + \Omega) \exp(-\alpha), \quad (1)$$

式中: θ 为环形腔光路中存在的非电磁场引起的固有偏振面旋转角; Ω 为电磁场引起法拉第旋光效应产生的偏振面旋转角; α 为环形腔结构的损耗系数。假设信号光在环形腔结构内循环 K 次, 则此时输出光强为

$$J_K = I_0 \cos^{2K}(\theta + \Omega) \exp(-\alpha + K). \quad (2)$$

考虑到信号光在腔内循环的损耗随光纤环的不同而变化, 因此将(2)式进行归一化, 消去环形腔结构的插入损耗, 可以得到

$$\Delta J = \frac{J_{\text{on}} - J_{\text{off}}}{J_{\text{off}}} = \frac{\cos^{2K}(\theta + \Omega) - \cos^{2K}\theta}{\cos^{2K}\theta}, \quad (3)$$

式中: J_{on} 为存在电磁场情况下的输出光强; J_{off} 为不受电磁场作用时的输出光强。(3)式可通过二项式定理展开, 近似后可得到

$$\Delta J = \left[\frac{\cos(\theta + \Omega)}{\cos\theta} \right]^{2K} - 1 \approx -2K\Omega \tan\theta - 2KVNI \tan\theta, \quad (4)$$

式中: V 为光纤的费尔德常数; N 为光纤传感头的匝数; I 为电流强度。可以看到归一化的输出光强 ΔJ 与循环次数 K 以及电流强度 I 呈近似正比的关系。系统的电流灵敏度可表示为

$$k = |2KVNI \tan\theta|. \quad (5)$$

从(5)式可以看到, 只需要有足够多的循环次数或光纤传感头的匝数就可以得到较大的电流灵敏度。

3 实验和讨论

光纤电流传感器的电流响应实验结构如图4所示, 采用半导体激光器作为脉冲光源(上海翰宇公

司, 型号: MS3400-1550, 波长 1550 nm, 频率为 10 kHz, 峰值功率 10 W); 光纤传感头为 200 匝的普通单模光纤环, 直径为 10 cm; 两个 2×1 的 SPSM 耦合器(深圳深建通信科技有限公司, 型号: PMFC-1 * 2-1550, 耦合比为 80% : 20%); 探测器为 Thorlabs 的 DET01CFC 光电探测器, 结构中的延迟光纤采用保偏光纤以提高系统的抗干扰能力。实验测量直流电流, 电流从 0 到 900 A。

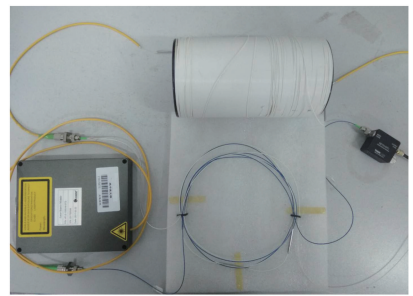


图4 实验结构图

Fig. 4 Experiment setup

图5显示了示波器在电流为 0, 300, 600, 900 A 时采集得到的输出信号。从图5中可以看到, 该光纤电流传感器在不同电流下都有多个峰(0~7峰), 其中第0次峰不通过传感光纤环, 其他1~7次峰通

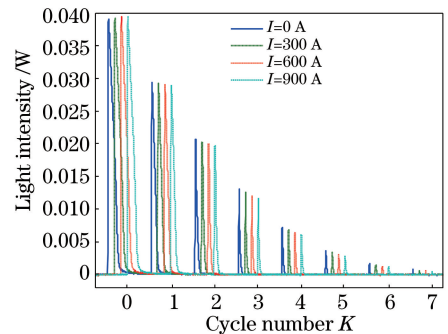


图5 不同电流下示波器采集的输出信号

Fig. 5 Output results under different currents measured by digital oscilloscope

过传感光纤环的循环次数 K 依次增加。随电流增大, 1~7 峰强度逐渐减弱, 这是由于电流导致的法拉第旋光增大了光信号在系统中的损耗。考虑到光源可能发生的波动, 可以用不通过传感光纤环的第 1 峰作为参考, 通过归一化消除光源波动的影响, 即每峰的归一化光强为

$$\hat{I}_K = \left| \frac{I_K - I_0}{I_0} \right|. \quad (6)$$

图 6 依次显示了不同次峰的电与归一化光强的关系。可以看到随电流增大, 每个峰的输出光强逐渐降低, 两者之间有良好的线性关系。并且随循环次数的增加, 光强变化的斜率逐渐增大。这里的光强变化斜率就是系统的电流灵敏系数, 这意味着随循环次数的增加, 系统对电流的灵敏度在逐渐增大, 这一结论符合(5)式的分析结果。

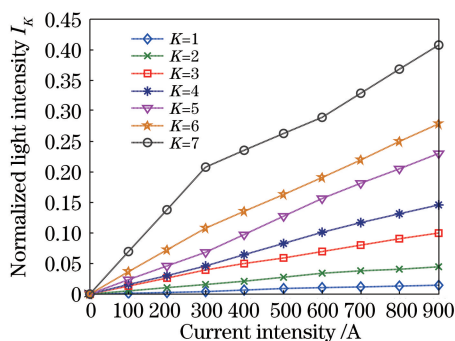


图 6 电流与归一化光强的关系

Fig. 6 Relationship between current intensity and normalized light intensity

图 7 绘制了循环次数与电流灵敏系数的关系。从图 7 可以看出, 电流灵敏系数随循环次数 K 的增加而增加。当 $K=1$ 时, 光信号只通过传感光纤环一次, 可以将其视为单光路检测型光纤电流传感器。从图 6 和图 7 可以看到, $K=1$ 时, 系统的电流灵敏度约为 $0.152 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$; 当 $K=2$ 时, 电流灵敏

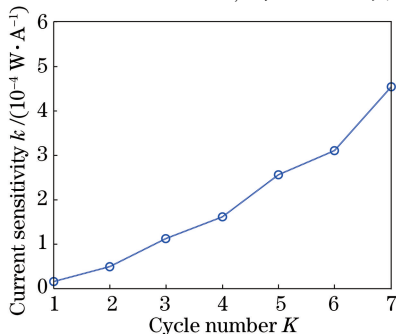


图 7 循环次数 K 与电流灵敏度 k 的关系

Fig. 7 Relationship between round number K and current sensitivity k

度约为 $0.48 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$; 当 $K=5$ 时, 电流灵敏度约为 $2.55 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ 。随 K 的增加, 电流灵敏系数逐渐增加。并且, 当循环次数 K 小于 6 时, 电流灵敏系数随循环次数变化之间的线性关系较为明显, 而当循环次数 K 大于 6 后, 趋于非线性。这主要是由于随循环次数增加光强衰减严重, 误差增大造成的。

4 结 论

在传统单光路检测型光纤电流传感器的基础上, 提出了一种新颖的环形结构单光路检测型光纤电流传感器。该光纤电流传感器利用单偏振单模耦合器构建光纤环形腔可以实现电流灵敏度的提高, 并且避免在结构中使用起偏器、检偏器等器件, 简化了结构, 提高了稳定性。通过理论分析和实验研究论证了对该光纤电流传感器的可行性。

参 考 文 献

- [1] Zhang J C, Liu X B, Zhang F, *et al.* Development of high-voltage electronic transducers and their application in power system [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 106-110.
张建超, 刘晓波, 张飞, 等. 电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 106-110.
- [2] Xu S Q, Dai S X, Zhang J J, *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.
- [3] Wang Z P, Kang C, Zhang X Y, *et al.* Progress in all-fiber optical 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.
- [4] Du J B, Tao Y M, Liu Y P, *et al.* Highly sensitive and reconfigurable fiber optic current sensor by optical recirculating in a fiber loop [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17980-17988.
- [5] Zhou D P, Dong Y. Ant-interference of current sensing fiber in all-fiber current sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006002.
周东平, 董毅. 全光纤电流传感器中电流传感光纤的

- 抗干扰研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1006002.
- [6] Li Z Y, Meng Y Z, Hao X Y. Research of spun highly birefringence fiber optic-type current transformers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020601.
李卓岩, 孟义朝, 郝祥雨. 旋转高双折射光纤型电流互感器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020601.
- [7] Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W, *et al.* Recent progress in optical current sensing techniques [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(5): 3097-3111.
- [8] Silva R M, Martins H, Nascimento I, *et al.* Optical current sensors for high power systems: a review[J]. Applied Sciences, 2012, 2(3): 602-628.
- [9] Tan C Z, Arndt J. Wavelength dependence of the Faraday effect in glassy SiO₂ [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1999, 60(10): 1689-1692.
- [10] 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.
- [11] Zhang H, Qiu Y S, Huang Z T, *et al.* Temperature and vibration robustness of reflecting all-fiber current sensor using common single-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(22): 3709-3715.
- [12] Zhang H, Qiu Y S, Li H, *et al.* High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture [J]. Optics Express, 2012, 20(17): 18591-18599.
- [13] Sun B C, Shen T. Performance analysis for fiber current sensor and design for loop ring-down structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010602.
孙滨超, 沈涛. 光纤电流传感器性能分析及环形衰荡结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010602.
- [14] Yue Y, Kai G, Wang Z, *et al.* Broadband single-polarization single-mode photonic crystal fiber coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(19): 2032-2034.
- [15] Liao Y B. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 191-192.
廖延彪. 光纤光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 191-192.