

激光与光电子学进展

全光纤微电流传感器研究进展

吴健华^{1,2}, 张晓锋¹, 陈亮^{1*}, 彭程^{1,3}, 吴本祥¹¹海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033;²92853 部队, 辽宁 葫芦岛 125106;³国防科技大学信息通信学院, 湖北 武汉 430033

摘要 采用全光纤电流传感器实现微弱电流检测, 可以拓展光纤传感技术在微弱磁场检测领域的应用。在分析全光纤微电流传感器的基本原理和主要光路结构的基础上, 从增加光路循环次数、提高传感光纤性能、降低系统噪声三个方面, 综述了全光纤微电流传感的最新研究成果及存在问题, 并展望了全光纤微电流传感器未来发展趋势。

关键词 传感器; 光纤传感; 全光纤电流传感器; 微电流测量; 灵敏度

中图分类号 TM452+.94

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1700005

Research Progress of All-Fiber Optic Micro-Current Sensor

Wu Jianhua^{1,2}, Zhang Xiaofeng¹, Chen Liang^{1*}, Peng Cheng^{1,3}, Wu Benxiang¹¹College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;²No. 92853 Troops, Huludao 125106, Liaoning, China;³College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430033, Hubei, China

Abstract All-fiber optic current sensor is applied for micro-current detection, which can expand the application of optical fiber sensing technology in weak magnetic field detection. On the basis of analyzing the basic principle and main optical path structure of the all-fiber microcurrent sensor, the latest research results of the all-fiber microcurrent sensor are reviewed from three aspects: increasing the number of optical circuit cycles, improving the performance of the sensing fiber, and reducing the system noise. And the future development trend of all-fiber microcurrent sensor is prospected.

Key words sensors; fiber sensing; all-fiber optic current sensor; micro-current measurement; sensitivity

1 引言

电流传感器是电力系统的基础部件, 在电流测量与保护中发挥着重要的作用。全光纤电流传感器(AFOCS)得益于光纤材料的绝缘特性以及宽动态响应特性, 同时相对于传统电磁式电流互感器, 在体积、重量、安全环保以及动态范围等方面存在优势, 因此, 在航空、金属冶金、超高压电力系统、脉冲电流测量等方面都有着重要的应用^[1-4]。

全光纤电流传感器在大电流测量领域的研究已经成熟, 但是在微电流传感方面进展缓慢。主要原因有三点: 1) 灵敏度问题。以当前应用最为广泛的反射式 Sagnac 干涉光路结构为例, 对于石英硅光纤, Verdet 常数约为 1.1×10^{-6} rad/A (波长为 1310 nm), 系统的灵

敏度为 4.4×10^{-9} rad/(cycle·mA), 如此小的数值已在系统噪声极限以下^[5], 因此, 无法进行测量。增加光纤环的圈数可以增大法拉第旋转角, 但传感光纤通常采用旋光纤(spun 光纤), 成本高昂, 不适于大规模工程化应用。同时, 在线性双折射的作用下, 光纤环的圈数存在最优值, 当光纤环超过最优圈数后, 测量的灵敏度随圈数的增加而降低^[6]。2) 准确度问题。由于测量的法拉第旋转角微小, 因此, 环境因素的干扰^[7-9](如温度和振动)对系统的影响将进一步加大, 影响系统测量的准确性。3) 稳定性问题。由于全光纤电流传感包含光学器件以及电子元件, 工作区域包括一次侧和二次侧, 因此, 全光纤电流传感器易发生突变型故障。同时, 光学器件老化对系统比值误差的影响, 易超过系统允许的误差范围。在灵敏度、准确度以及稳定性的制

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2021-12-28

通信作者: *15038513@alu.hdu.edu.cn

约下,全光纤微电流传感器研究进展缓慢。

随着电力行业的发展,当前存在着一些微电流测量的应用场景,迫切需要全光纤电流传感来解决其他传感器无法实现的大口径、宽动态、抗电磁干扰以及电绝缘等问题,如地铁的杂散电流测量^[10]、局部放电检测^[11]以及船舶的泄漏电流测量^[12]等,因此,研制全光纤微电流传感器具有迫切的应用需求。同时,微弱磁场检测问题制约着光纤传感的进一步发展,实现光纤微弱电流传感,对拓展光纤传感在弱磁场领域的应用也具有重要的理论意义。

本文在全光纤电流传感原理及基本光路结构的基础上,综述了全光纤微电流传感各实现方式的最新研究进展,分析了实现过程中存在的问题,并指明了下一步研究方向,为研究微弱电流全光纤传感提供有力支撑。

2 基本原理及主要光路结构

2.1 基本原理

全光纤电流传感器的基本原理是法拉第效应,即线偏振光沿着外加磁场方向或者磁化强度方向,通过介质时偏振面发生旋转的现象,如图 1^[13]所示。

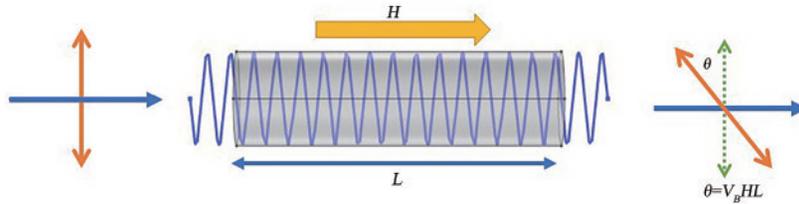


图 1 法拉第效应示意图^[13]

Fig. 1 Schematic diagram of Faraday effect^[13]

经计算,法拉第旋转角^[14]表示为

$$\theta = \frac{\pi L}{\lambda} (n_+ - n_-) = V_B B L, \quad (1)$$

式中: L 为沿磁场方向的光学介质长度; λ 为光波长; n_+ 为右旋圆偏振光; n_- 为左旋圆偏振光; B 为介质中的磁感应强度; V_B 为 Verdet 常数,与光源波长、工作温度以及介质的材料相关^[15],单位是 $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。

当磁场由电流产生,且光纤环缠绕通电导线形成闭合回路时,根据安培环路定理,得到

$$\theta = N V_H I, \quad (2)$$

式中: N 为光纤的缠绕匝数; I 为通电导体的电流; V_H

为 Verdet 常数,此时的单位为 rad/A 。由式(2)可知,法拉第旋转角与通电电流成正比,因此,通过测量法拉第旋转角,即可求得待测电流信息。

2.2 主要光路结构

全光纤电流传感器依据数据处理方式的不同,分为偏振式结构和干涉式结构。其中,干涉式结构分为环形 Sagnac 干涉结构和反射式 Sagnac 干涉结构。

2.2.1 偏振式结构

偏振式结构全光纤电流传感器由光源、起偏器、检偏器、探测器以及数据处理系统组成。光路结构如图 2^[16]所示。

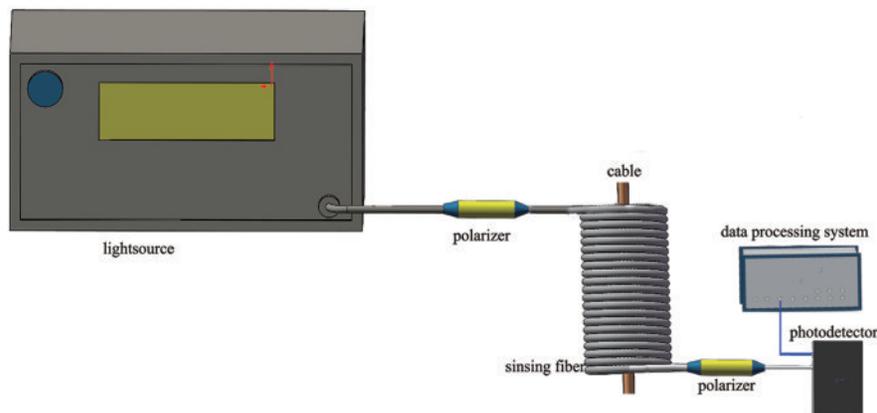


图 2 偏振式结构 AFOCS 示意图^[16]

Fig. 2 Schematic diagram of AFOCS with polarized structure^[16]

偏振式结构以马吕斯定理为工作原理,即线偏振光通过检偏器后,透射光的强度(不考虑吸收)为原光强与线偏振光矢量振动方向和检偏器的偏振方向夹角余弦平方的乘积。采用此种单光路输出结构时,经计算当起偏器与检偏器夹角为 45° 时,系统灵敏度最

高^[16],此时,探测器接收的光强为

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} P_0 [1 - \sin(2\theta)], \quad (3)$$

式中: P_{out} 为探测器接收光强; P_0 为光源经过起偏器后的光强; θ 为法拉第旋转角。在此结构的基础上:

采用双路检测方法可降低温度敏感性^[17],并能有效减少振动的影响^[18];增加反射单元,形成反射式偏振结构可以提高电流测量精度^[19];引入反馈单元,通过反馈式结构能够实现法拉第效应的自动补偿测量^[20]。由于偏振式结构存在抗干扰能力弱的缺点,因此在电流测量领域应用逐渐减少。目前以偏振式结构为基础,具有一定发展空间的光路结构主要有三种:1) 再入式光路结构,用于提升系统灵敏度^[21];2) 双传感头的结构方式,用于补偿温度和 Verdet 常数的改变^[22];3) 集成光学结构,用于降低系统对保偏光纤的需

求^[23]。这种集成光学结构的方法,虽然在测量直流时精度低于干涉式全光纤电流传感器,但是传感头和光电转换单元之间应用的是单模光纤,在降低成本的同时,工程现场安装、调试简单便捷,同时传感头与光电转换模块间距可以更大。

2.2.2 环形 Sagnac 干涉结构

环形 Sagnac 干涉结构全光纤电流传感器首先由瑞士的 Nicati 等^[24]提出,但受限于当时的光纤制作工艺,采用空间光路结构实现。目前主流的全光纤光路结构如图 3^[25]所示。

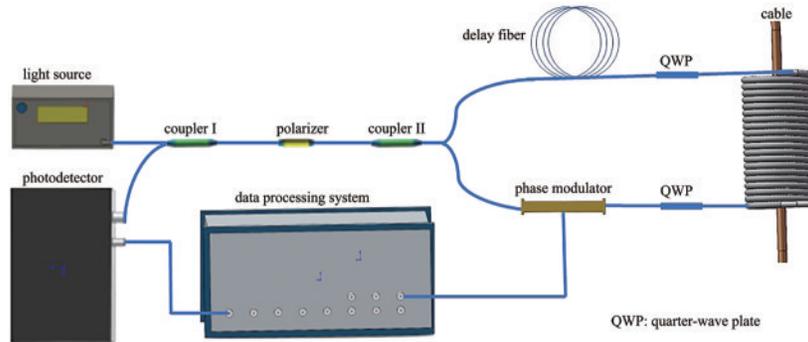


图 3 环形 Sagnac 干涉结构 AFOCS 示意图^[25]

Fig. 3 Schematic diagram of AFOCS with annular Sagnac interferometric structure^[25]

基本原理可以描述为:宽谱光源经起偏器变为线偏振光后,通过耦合器 II 分成两束光分别沿相反方向进入环路结构,并分别由 1/4 波片转换为两束圆偏振光。当传感光纤缠绕的通电电缆通以电流时,在法拉第效应的作用下,光束偏振面旋转了一定角度(法拉第旋转角),携带着角度信息的两束光在耦合器 II 处汇合并发生干涉。探测器接收的光强信息为

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_0 [1 + \cos(2\theta)] \quad (4)$$

为提升系统的抗干扰能力,采用相位调制器进行调制,通过相应的解调算法实现法拉第旋转角的精确

测量^[26]。通过对比式(3)、(4)可知,光电探测器接收的光强信息都与 2 倍的法拉第旋转角相关,因此,采用环形 Sagnac 干涉结构,未提升法拉第旋转角的测量能力,但通过相位调制器,应用调制解调算法,能够提高输出信号信噪比,提升系统的抗干扰能力。环形 Sagnac 光路结构抗干扰能力较弱,对振动敏感。

2.2.3 反射式 Sagnac 干涉结构

反射式 Sagnac 干涉结构全光纤电流传感器是由美国德克萨斯大学的 Blake 等^[5, 27]于 20 世纪 90 年代提出,是在环形 Sagnac 干涉结构基础上发展而成的,基本结构如图 4 所示。

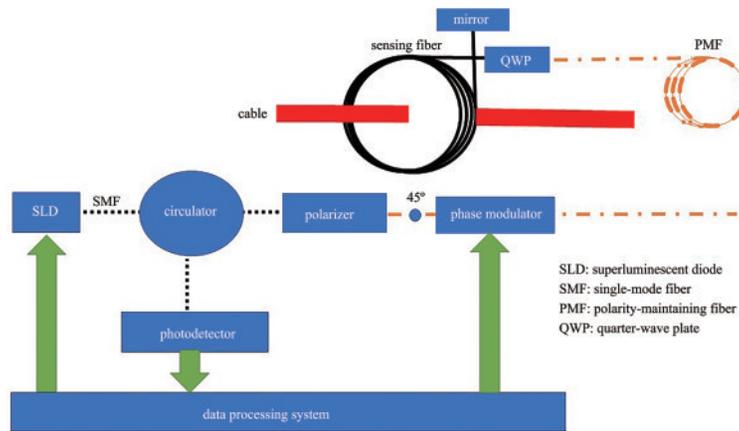


图 4 反射式 Sagnac 干涉结构 AFOCS 示意图^[5]

Fig. 4 Schematic diagram of AFOCS with reflective Sagnac interference structure^[5]

图 4 中:虚线表示单模光纤,主要用于光束能量的传输;点划线为保偏光纤,用于保持系统光的偏振态;传感光纤为旋光纤,是一种特制的光纤,能够抑制线性双折射的影响。基本原理可以描述为:宽谱光源发出的光经环形器后在起偏器作用下变为线偏振光,通过 45°熔接点后转换为大小相等、偏振方向相互垂直的两束线偏振光,经过 1/4 波片后,两束线偏振光分别转换为左旋以及右旋圆偏振光进入传感光纤。由于存在法拉第效应,两束圆偏振光的偏振面在待测电流磁场的作用下发生偏转,旋转角度为 2 倍法拉第旋转角。经反射镜反射后,两束圆偏振光的偏振态发生转变(左旋圆偏振光转化为右旋圆偏振光,右旋圆偏振光转化为左旋圆偏振光),由于法拉第效应的非互易性,再次通过传感光纤后法拉第旋转角度加倍。此后,两束圆偏振光经 1/4 波片转换为线偏振光,通过 45°熔接点并在起偏器处发生干涉,最终探测到的光强为

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_0 [1 + \cos(4\theta)] \quad (5)$$

与环形 Sagnac 干涉结构一致,反射式 Sagnac 干涉结构引入相位调制器提升了系统的灵敏度以及抗干扰能力,而保偏光纤延迟线用于调整相位调制器的调制频率。通过对比式(3)~(5)可知,相对于偏振式结构以及环形 Sagnac 干涉结构,反射式 Sagnac 干涉结构实现了法拉第旋转角加倍,同时减少了器件数量,并能够减少温度、振动等因素的影响^[5]。目前,反射式 Sagnac 干涉结构主要通过改进各组成部件以提升系统性能。如采用 SLD 光源替代 LED 光源^[28]、采用集成相位调制器代替 LiNbO₃^[29-30]、法拉第旋转镜替代平面反射镜^[31]等。

3 全光纤微电流传感研究进展

当综合考虑光路结构及数据处理算法时,测量的法拉第旋转角与待测电流间的关系为

$$\theta = knSNVI + \xi, \quad (6)$$

式中: k 为乘性噪声,与光学器件的不完善、保偏光纤

对轴熔接时存在的角度偏差相关; ξ 为加性噪声,与光路噪声以及电子器件噪声有关; n 表示光路结构因子,对于偏振式结构^[16]和环形 Sagnac 干涉结构^[25], $n=2$,对于反射式 Sagnac 干涉结构^[5], $n=4$; N 为光纤环圈数; V 是光纤 Verdet 常数; I 是待测电流值。 S 是光纤归一化灵敏度^[32],定义为

$$S = \frac{4L_P^2/L_T^2}{1 + 4L_P^2/L_T^2}, \quad (7)$$

式中: L_P 为光纤未旋制时线性双折射的拍长; L_T 为旋光纤的节距(螺距)。将式(7)代入式(6),则法拉第旋转角表示为

$$\theta = kn \frac{4L_P^2/L_T^2}{1 + 4L_P^2/L_T^2} NVI + \xi. \quad (8)$$

由式(8)可知:为实现微弱电流检测,需要增大 n 、 N 、 S 、 V 、 k 中的一个参数,或者多个参数;与此同时,需要通过数据处理算法减小 ξ , 实现法拉第旋转角的有效探测和分辨。

根据式(6)和式(8)可知,实现全光纤微电流传感的方法主要有三种:1) 增加光路循环次数;2) 改进光纤材质;3) 降低系统噪声。其中,前两种方法提升了微电流传感的灵敏度,最后一种方法提高了微电流传感的信噪比。

3.1 增加光路循环次数

增加光路循环次数主要是通过增加传感光纤的圈数 N , 或者改进光路结构因子 n 实现。受限于成本及双折射效应的影响,增加光纤环的圈数通常采用螺线管等效方法,而改进光路结构,主要采用再入式光路结构。

3.1.1 螺线管等效方法

设螺线管单位长度的匝数为 n_1 , 当通电电流为 I 时,轴线上的磁感应强度为 $B_1 = \mu_0 n_1 I$, 即磁感应强度增大 n_1 倍。因此,当光纤环圈数固定时,采用螺线管结构,法拉第旋转角相应增大 n_1 倍。当不考虑光路损耗时,螺线管等效的基本原理示意图如图 5(a)^[33]所示,采用螺线管时传感光纤环结构如图 5(b)所示。图

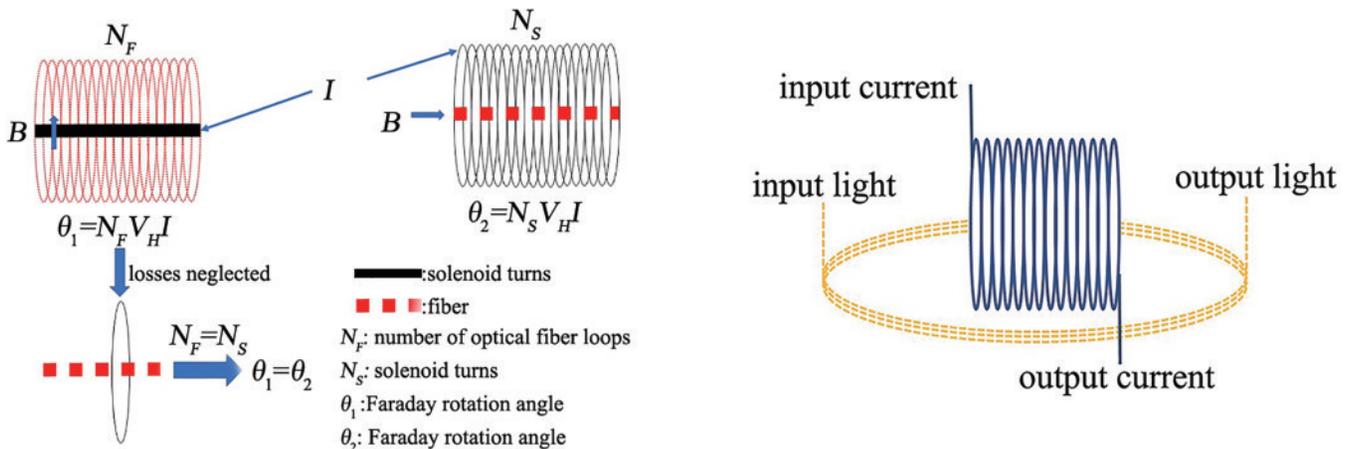


图 5 螺线管传感环原理及结构^[33]。(a)螺线管等效原理;(b)螺线管等效传感环结构

Fig. 5 Principle and structure of solenoid sensor ring^[33]. (a) Solenoid equivalence principle; (b) sensing ring structure with solenoid equivalent

中虚线表示光纤,实线表示螺线管结构。

Dong 等^[34]采用螺线管 320 匝、光纤环 27 圈,实现了 0.5 A 电流的测量;Gubin 等^[35]采用反射式 Sagnac 干涉结构,采用螺线管 370 匝、光纤环 27 圈,实现了最小探测电流为 0.1 A 的电流检测;Huang 等^[33]采用掺 Tb 光纤作为传感光纤(工作波长为 1310 nm 时,Verdet 常数为 19.5 $\mu\text{rad}/\text{A}$,约为普通石英光纤的 20 倍),当螺线管为 507 匝时,应用电频谱分析仪对信号进行分析,最小探测直流信号达到 0.1 mA(Sagnac 光路结构)。

螺线管等效方法在理论上具有可行性,在实验室条件下实现了微弱电流测量,但无法应用在工程实践中,主要原因有两点:1) 对于高压、超高压电力网络,

受限于线缆孔径、散热、机械安装等问题,通电电缆无法形成螺线管结构;2) 采用螺线管等效模型,在原理等效上忽略了光纤损耗的影响,但在实际应用中光纤损耗需要考虑,特别是特种光纤,其光纤的损耗无法忽略^[33]。

3.1.2 改进光路结构

采用再入式光路结构,光束多次通过同一光纤环路,等效于增加光纤环的圈数。再入式结构主要通过反射镜^[36]、耦合器^[37]或者光开关^[38]等方式构成循环腔体结构。目前,采用反射镜的再入式光学结构能够实现 1 mA(50 匝螺线管)电流探测,光路结构如图 6^[39]所示。

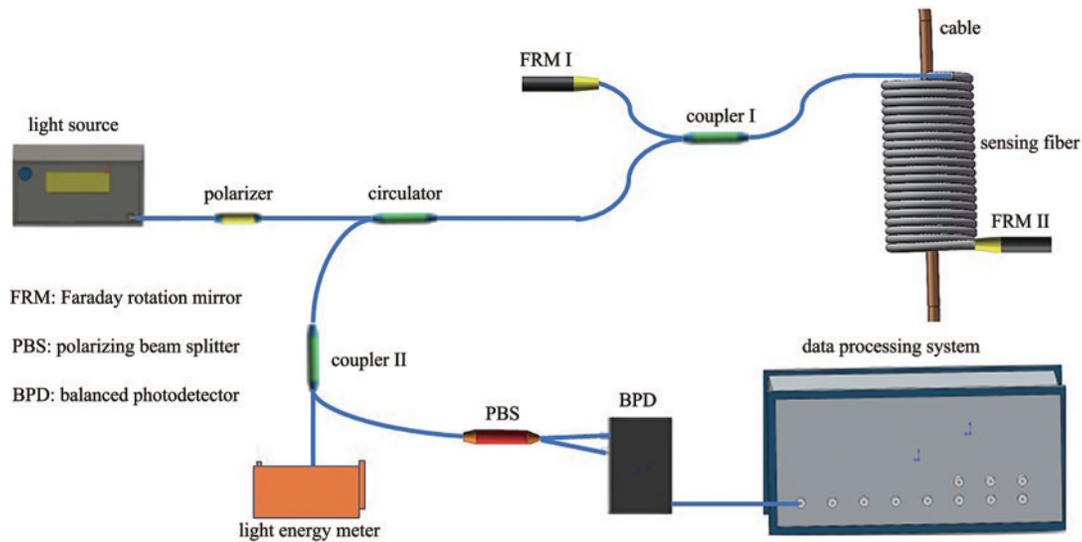


图 6 基于反射镜的再入式光路结构^[39]

Fig. 6 Re-entry optical structure with mirror^[39]

基于反射镜形成的再入式光学结构,由于法拉第反射镜存在 3 dB 的衰减,因此,系统的能量损失较大,同时,由于系统输出光束为一系列衰减振荡波,因此,如何有效实现波形的提取也是一个难题。

采用光开关的再入式结构可以解决波形提取的问

题。光束在由光开关构成的再入式结构中多次循环,当达到设定时间时,开启光开关则输出为最终需要光束,通过光开关开启时间可以计算循环次数。采用光开关形式的再入式结构,可以实现最小探测电流 10 mA 的微电流测量,光路结构如图 7^[40]所示。

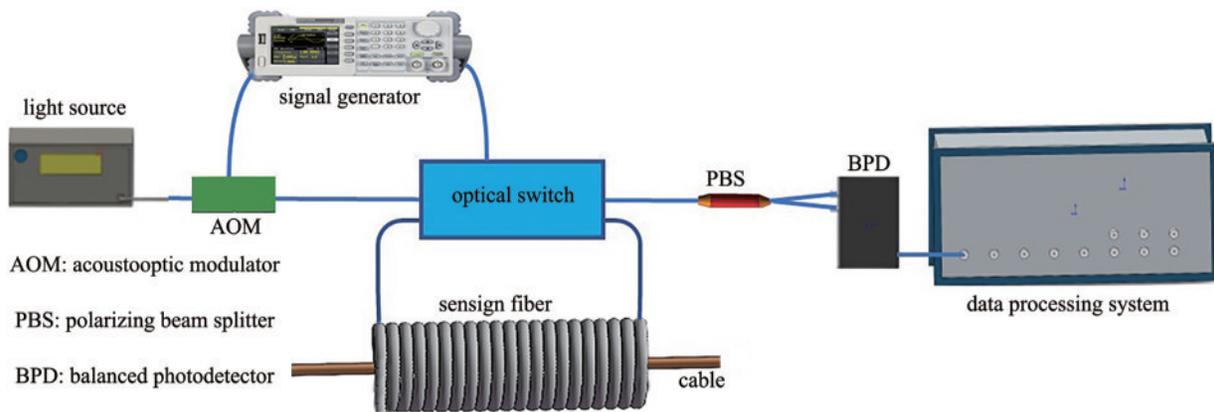


图 7 基于光开关的再入式结构^[40]

Fig. 7 Re-entry optical structure with optical switch^[40]

对于再入式光学结构,光束在再入式结构衰荡的过程中,多次通过待测电流产生的磁场。在光束能量衰减的过程中,所携带的法拉第旋转角逐步增大,因此,可以提升系统的灵敏度,目前面临的主要问题是:1) 采用偏振式光学结构,系统的抗干扰能力较弱;2) 能量衰减大,光束能量随着循环次数的增加呈指数衰减;3) 探测器动态范围有限,致使光束在循环腔内循环次数受限。

3.2 提高传感光纤性能

提高传感光纤性能,主要通过改进光纤材质来提

高 Verdet 常数,或者调整旋光纤参数,提升光纤的归一化灵敏度(也就是提高 S)。

3.2.1 提升 Verdet 常数

在磁光玻璃型电流传感器中,研究人员已经采用高 Verdet 常数材料进行了一定的探索,如采用 Ga:YIG 作为传感材料的磁光玻璃型电流传感器,灵敏度为 3 (°)/A,是全光纤电流传感器的 40 倍^[41]。而对于光纤传感单元,主要通过掺杂金属来提升 Verdet 常数,如掺 Tb 光纤的 Verdet 常数达 19.5 μrad/A^[35](波长为 1310 nm)。不同材料的 Verdet 常数如表 1^[42]所示。

表 1 不同材料的 Verdet 常数值^[42]

Table 1 Verdet constant values of different materials^[42]

Name	Form	Verdet constant / (rad·T ⁻¹ ·m ⁻¹)	Refractive index	Attenuation / (dB·cm ⁻¹)
Fused silica	Fiber	0.54 @1523 nm	1.44 @1550 nm	5.0×10 ⁻⁶ @1-1.5 μm
65%-terbium doped silicate	Fiber	32.1 @1053 nm		0.024@1310 nm
Yttrium iron garnet(Y3Fe5O12)	Bulk	380 @780 nm	2.15 @1550 nm	6.6 @780 nm
Kigre M18	Bulk	22.4 @1064 nm	1.67 @1064 nm	0.022@1064 nm
DD2	Fiber	8.6 @1550 nm	2.2 @1550 nm	N/A
Schott SH59	Fiber	3.3×10 ⁻⁵ @633 nm	1.94 @633 nm	4.665×10 ⁻² @633 nm
Schott F7	Fiber	1.1×10 ⁻⁵ @633 nm	1.62 @633 nm	4.7×10 ⁻³ @633 nm
MolTech MOS10	Bulk	26@1060 nm	1.74 @587.5 nm	4.34×10 ⁻³ @1060 nm
XOAT MR4	Bulk	37.2@1064 nm	1.75 @656.3 nm	8.7×10 ⁻³ @1064 nm

通过改进 Verdet 常数,可以从根本上解决全光纤电流传感器灵敏度低的问题,但在实施过程中存在两个问题:1) 光纤制备问题。受限于光纤制备水平,高 Verdet 常数光纤通常伴随着损耗以及机械韧性的问题,如掺铽光纤损耗达 0.08 dB/cm^[35],在现有的工艺水平下很难解决损耗问题。2) 高 Verdet 的材料通常为顺磁性材料,受温度变化影响较大,导致系统温漂过大影响实际应用效果。

3.2.2 调整传感光纤旋制参数

旋光纤未旋制时的线拍长及节距影响着全光纤电流传感器的灵敏度,关系如式(7)所示。同时,旋光纤在线性双折射和圆双折射作用下,表现为椭圆双折射。椭圆双折射拍长^[32]为

$$L_p' = \frac{L_p L_T}{\sqrt{L_p^2 + L_T^2} - 2L_p} \quad (9)$$

文献[32]研究了光纤的归一化灵敏度和椭圆双折射与光纤旋制参数的关系,确定了光纤的归一化灵敏度与温度稳定性所对应的光纤参数存在矛盾,需要综合考虑设计光纤的参数。文献[43]计算了旋光纤的参数与系统的尺度因子间关系,当采用开环数据解调时,全光纤电流传感器的尺度因子为

$$F_t = \frac{R}{\sqrt{I_m J(\psi_m) \sin(4F)}} = \frac{(2T)^2 + \delta^2 \cos\left[\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}\right]}{\delta^2 + (2T)^2}, \quad (10)$$

式中: $T = 2\pi/L_T$; $\delta = 2\pi/L_p$ 。采用闭环数据解调,全光纤电流传感器的尺度因子为

$$F_t = \frac{(2T)^2 + \delta^2 \frac{\sin\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}}{\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}}}{(2T)^2 + \delta^2 \cos\left[\sqrt{\delta^2 + (2T)^2}\right]} \quad (11)$$

因此,系统的尺度因子与光纤的参数相关,而光纤参数对系统尺度因子的影响随着解调算法的不同而有所区别。

俄罗斯电力科学院的 Gubin 等^[44],对旋光纤的性质进行了理论分析以及实验研究,在理论上说明了旋光纤可以补偿光纤弯曲引入的双折射效应,但是需要满足条件 $L_T < L_p$, 且 $20L_p < L_{ind}$, 其中 L_{ind} 为弯曲引入线性双折射的拍长。文献[45]研究表明,当 $L_p \approx L_T$ 时,系统具有较好的温度特性以及抗干扰能力。

目前生产旋光纤的公司主要有英国的 Fibercore 公司^[46]、法国的 Ixblue 公司^[47]以及我国的长飞光纤光缆股份有限公司^[48]。生产光纤的参数关系大致满足 $L_p \approx 2L_T$ 。因此,光纤的设计参数可以进一步优化。

调节传感光纤的参数,涉及到光纤的制作工艺问题,也面临着制备工期长、成本高的问题,同时灵敏度、温度稳定性以及尺度因子等各个参数相互制约,需要综合考虑全光纤微电流传感器的性能要求,最终确定设计参数。

3.3 降低系统噪声

作为光电转换器件,全光纤电流传感器受温度、湿

度、光电器件老化、机械形变等因素及各种寄生效应的影响,因此,不可避免地存在较大的白噪声,对于微弱电流检测来说,电子器件噪声抑制水平直接影响着系统的微弱电流探测能力。根据光路到电路的处理过程,将噪声分为光学噪声、探测器噪声以及外界环境引起的噪声^[49-52]。其中:光学噪声由光源与光路不完备器件产生,包括光子噪声、相对强度噪声、热相位噪声以及器件不完备引起的测量角度偏差;探测器噪声是光电转换过程(光电探测器)以及后期的数据处理过程产生,包括散粒噪声、热噪声、探测器的相对强度噪声和量化噪声;外界环境引起的噪声包括振动引入的噪声以及环境温度变化引入的噪声。由于全光纤电流传感器噪声具有白噪声的统计特性^[53],因此,噪声分布在全频域范围内。当进行微弱电流测量时,由于噪声与信号相当,甚至信号淹没在噪声之中,因此,影响着微弱电流检测能力。由于外界环境引入的噪声,最终在形式上表现为光学的线性双折射的改变以及电子信号的随机噪声,因此,降低系统噪声可以分为降低光学噪声以及降低电子噪声两类。

3.3.1 降低光学噪声

由于器件制作工艺的影响,各光学器件都存在着一一定的不完备现象,改变了光束固有偏振态,影响了干涉的对比度以及电流测量的灵敏度。抑制光学噪声主要有三种方式:1) 改变器件结构的方法。如 Short 等^[43]最早通过对光纤的线性双折射的不完备进行理论分析,并提出采用螺旋光纤的结构来抑制线性双折射的影响,其基本原理是通过引入圆双折射抑制线性双折射,基本结构如图 8 所示。

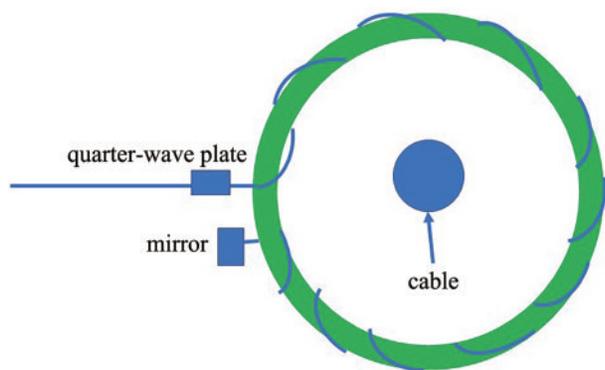


图 8 螺旋结构传感光纤环^[43]

Fig. 8 Helical structure sensing fiber loop^[43]

Wang 等^[54]针对传感光纤环的偏心以及不闭合问题进行了理论分析,提出当传感光纤不闭合时,电流导线存在最优位置可以降低偏心、不闭合对系统的影响。2) 抑制光学噪声的方法。通过理论分析,确定光学器件的容差范围,选用优质光学器件抑制光学噪声。如:李瑞春等^[55]研究了起偏器的不完备特性,提出起偏器尾纤与相位调制器的对轴角在 $44^\circ \sim 46^\circ$ 之间,起偏器的消光比大于 27 dB 时,才可以忽略起偏器不完备的

影响;Yu 等^[56]研究了系统偏振串扰对尺度因子的影响,指出相位调制器尾纤与保偏延迟线偏振串扰不能超过 -30 dB;王夏霄等^[57]研究了延迟光纤的偏振串音误差,确定保偏延迟线的误差主要来自变温下的偏振串音,且常温下偏振串音不同,变温条件下其允许的偏振串音变化范围也相应不同。3) 通过数据处理的方法降低光学噪声。如:Short 等^[58]针对 $1/4$ 波片的不完备进行了理论分析,采用数据处理方法降低了 $1/4$ 波片的不完善对尺度因子的影响;Pang 等^[59]针对正弦调制信号时输出信号的影响因素进行了分析,提出采用谐波相除法进行数据处理的方法,可以消除光纤转换效率、传输损失、光源功率及调制器调制相位的影响。

3.3.2 抑制电子噪声

对于干涉式电流传感器,主要采用调制解调的方法来提高系统灵敏度。根据调制信号波形特点,可以分为正弦波调制^[60]以及方波调制^[65]。针对不同调制波形,解调方法有所区别:正弦波调制时,通常采用一次谐波法解调^[5]以及谐波相除法解调^[60];方波调制时,根据是否有反馈信号,可以将解调方法分为闭环解调^[61]及开环解调^[62]。采用调制解调方案输出为相位信息,因此,通常经过卡尔曼滤波,再进行数据拟合的方法,消除系统噪声^[63]。由于在微电流测量中,法拉第旋转角微小,因此,为避免“死区”^[64],需要避免闭环的数据处理方案。

针对偏振式光学结构,由于数据处理主要针对能量直接处理,因此,通常采用“差除和”的数据解算方式,以消除能量波动的影响,提高系统的精度。目前数据处理方法主要有小波变换^[65]、自适应滤波^[66-67]、改进卡尔曼滤波算法^[68-71]、粒子滤波算法^[72]以及神经网络的数据处理算法^[73]。针对大电流测量领域,采用上述数据处理算法,在一定的应用背景下可以达到实用化要求,但无微电流测量的相关案例。

应用数据处理的方法在一定程度上提高了系统的信噪比,但由于器件老化、温度变化对光学系统性能的影响,数据处理结果可能偏离真实值,从而引入更大的系统误差。

4 全光纤微电流传感研究展望

4.1 建立评价体系

当前全光纤电流传感器应用标准仍采用电子式电流互感器的标准^[74],由于全光纤微电流传感器测量电流为微弱电流,因此,相应的国家标准需要重新拟定。同时,在建立评价体系时,需要综合考虑全光纤微电流传感器的灵敏度、准确度以及稳定性等指标,建立综合评价体系,确定新的、合乎实际需要的应用标准。

4.2 光路集成化

光路集成化是光学系统的一个重要发展方向。通过集成化光路结构,可以降低系统的熔接过程中的偏差,减少器件连接过程中的损耗以及串扰,提升系统的

灵敏度以及精度。同时可以降低光路系统故障率,提升系统稳定性。

4.3 器件智能化

作为标准测量器件,如何精确区分自身故障以及测量线路故障,是全光纤微电流传感器的一个重要研究方向。相对于电流传感器的突变型故障,由于光学器件的性能随时间衰退,影响系统的准确度而造成的渐变型故障更加难于预测,因此,全光纤电流传感器自身的智能化故障诊断显得尤为重要。应用大数据以智能算法,通过数据预测的方法,实现器件智能化故障自检,是一种可选方案。

4.4 降低成本

全光纤微电流传感器应用的一个重要阻碍就是成本问题,光学器件精度提高的同时,带来了成本相应增加。特种光纤(旋光纤)成本居高不下,给全光纤微电流传感器的发展带来了一定的影响。因此,改进光学器件的制造工艺,降低生产成本,对未来降低全光纤微电流传感器的成本至关重要。

5 结束语

全光纤电流传感器在新一代智能电网中有着广阔的发展前景,而全光纤微电流传感器是全光纤电流传感器在微弱电流测量领域的重要补充。在建立全光纤微电流传感评价体系的基础上,实现系统灵敏度、精度以及稳定性的提升,降低系统的应用成本,全光纤微电流传感器才能有更加广阔的发展空间。

参 考 文 献

- [1] Mihailovic P, Petricevic S. Fiber optic sensors based on the faraday effect[J]. *Sensors*, 2021, 21(19): 6564.
- [2] Wang R L, Xu S Y, Li W, et al. Optical fiber current sensor research: review and outlook[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(9): 1-22.
- [3] Wu J H, Zhang X F. Recent progress of all fiber optic current transformers[C]//2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA), September 25-27, 2020, Hefei, China. New York: IEEE Press, 2020: 134-143.
- [4] 刘闯闯, 朱学华, 苏浩. 高灵敏度全光纤电流传感器研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(2): 175-181.
Liu C C, Zhu X H, Su H. Research progress of high sensitivity all fiber optic current sensor[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 175-181.
- [5] Blake J, Tantaswadi P, de Carvalho R T. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 116-121.
- [6] 肖智宏, 程嵩, 张国庆, 等. 全光纤电流互感器灵敏度特性研究[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(1): 212-216.
Xiao Z H, Cheng S, Zhang G Q, et al. Research on sensitivity characteristic of fiber optic current transformer [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(1): 212-216.
- [7] He X M, Wang G C, Gao W, et al. The effect analysis of impact on a fiber optic current sensor[J]. *Optik*, 2021, 238: 166724.
- [8] Müller G M, Frank A, Yang L, et al. Temperature compensation of interferometric and polarimetric fiber-optic current sensors with spun highly birefringent fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4507-4513.
- [9] Lenner M, Frank A, Yang L, et al. Long-term reliability of fiber-optic current sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 823-832.
- [10] Xu S Y, Xing F F, Li W, et al. A stray current sensor based on an all-side cylindrical spiral fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 6800814.
- [11] Xin G F, Zhu J, Luo C M, et al. Polarization error analysis of an all-optical fibre small current sensor for partial discharge[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15(5): 2199-2210.
- [12] Wu J H, Zhang X F, Chen L, et al. Research on measurement technology of ship leakage current by all-fiber optic current sensor[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 160268-160276.
- [13] 刘公强. 磁光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
Liu G Q. *Magneto-optics*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2001.
- [14] 蔡伟, 邢俊晖, 杨志勇, 等. 基于磁光耦合的法拉第效应机理分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 062601.
Cai W, Xing J H, Yang Z Y, et al. Mechanism analysis of faraday effect based on magneto-optic coupling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 062601.
- [15] 蔡伟, 邢俊晖, 杨志勇. 磁光材料 Verdet 常数贡献性的讨论[J]. *物理学报*, 2017, 66(18): 187801.
Cai W, Xing J H, Yang Z Y. Contributions to Verdet constant of magneto-optical materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 187801.
- [16] 刘延冰, 余春雨, 李红斌. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11-14.
Liu Y B, Yu C Y, Li H B. *Principle, technology and application of electronic transformer*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 11-14.
- [17] Lizet J, Valette S, Langeac D. Reduction of temperature and vibration sensitivity of a polarimetric current sensor [J]. *Electronics Letters*, 1983, 19(15): 578-579.
- [18] Fang X J, Wang A B, May R G, et al. A reciprocal-compensated fiber-optic electric current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(10): 1882-1890.
- [19] Briffod F, Thevenaz L, Nicati P A. Polarimetric Current sensor using an in-line Faraday rotator[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, E83-c(3): 331-335.
- [20] Beltran H C, Flores J L, Ferrari J A, et al. Optical current sensor by self-compensating the Faraday effect[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8154: 815414.
- [21] Zhang H, Jiang J Z, Zhang Y, et al. A loop all-fiber current sensor based on single-polarization single-mode couplers[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2674.
- [22] Huang Y H, Xia L, Pang F B, et al. Self-compensative

- fiber optic current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(7): 2187-2193.
- [23] Müller G M, Yang L, Frank A, et al. Simple fiber-optic current sensor with integrated-optics polarization splitter for interrogation[C]//*Imaging and Applied Optics 2014*, July 13-17, 2014, Seattle, Washington. Washington, D. C.: OSA, 2014: AM4A.3.
- [24] Nicati P A, Robert P. Stabilised current sensor using Sagnac interferometer[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1988, 21(8): 791-796.
- [25] Frosio G, Hug K, Dändliker R. All-fiber sagnac current sensor[J]. *Opto*, 1992:560-564.
- [26] Nicati P A, Robert P. Stabilized Sagnac optical fiber current sensor using one phase and two amplitude modulations[C]//*8th Optical Fiber Sensors Conference*, January 29-31, 1992, Monterey, CA, USA. New York: IEEE Press, 1992: 402-405.
- [27] Blake J N, Tantaswadi P, Carvalho R T D. All-fiber in-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995: 315-319.
- [28] Lenner M, Yang L, Frank A, et al. Long-term reliability of semiconductor light sources for fiber-optic current sensors[C]//*Advanced Photonics*, July 27-31, 2014, Barcelona, Spain. Washington, D. C.: OSA, 2014: SeW3C.6.
- [29] Wang X X, Wang X C, Feng X J. Digital closed loop fiber-optic current sensor based on integrated optical phase modulator[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 300/301: 427-431.
- [30] Zhang C Y, Wang C H, Chen S. Theory and experimental research of a Y-phase-modulator based optical fiber current sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8199: 81990Z.
- [31] Drexler P, Fiala P. Utilization of faraday mirror in fiber optic current sensors[J]. *Radioengineering*, 2008, 17(4): 101-107.
- [32] 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.
- [33] Huang D N, Srinivasan S, Bowers J E. Compact Tb doped fiber optic current sensor with high sensitivity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29993-29999.
- [34] Dong X P, Chu B C B, Kong K H, et al. Phase drift compensation for electric current sensor employing a twisted fiber or a spun highly birefringent fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(5): 803-809.
- [35] Gubin V P, Isaev V A, Morshnev S K, et al. All-fiber optical sensor of electrical current with a SPUN fiber sensing element[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6251: 62510P.
- [36] Liu F, Ye Q, Geng J X, et al. Study of fiber-optic current sensing based on degree of polarization measurement[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(5): 267-269.
- [37] 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.
- [38] Liu Y P, Ma L, Du J B, et al. Fiber optic current sensor with high sensitivity based on recirculating-loop configuration using standard SMF[C]//*Asia Communications and Photonics Conference 2016*, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington, D.C.: OSA, 2016: AF1B.4.
- [39] Zhang H Y, Dong Y K, Leeson J, et al. High sensitivity optical fiber current sensor based on polarization diversity and a Faraday rotation mirror cavity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(6): 924-929.
- [40] 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.
- [41] Rose A H, Deeter M N, Day G W. Submicroampere per root Hz, high bandwidth current sensor based on the faraday effect in Ga:YIG[C]//*8th Optical Fiber Sensors Conference*, January 29-31, 1992, Monterey, CA, USA. New York: IEEE Press, 1992: 394-397.
- [42] Chen G Y, Newson T P, Brambilla G. Optical microfibers for fast current sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 802-807.
- [43] Short S X, de Arruda J U, Tselikov A A, et al. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(10): 1844-1850.
- [44] 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.
- [45] 周东平, 董毅, 黄勇. 全光纤电流传感器中传感光纤的温度特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020604.
- Zhou D P, Dong Y, Huang Y. Study of temperature characteristics of the current sensing fiber in fiber optic current sensor applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020604.
- [46] FIBERCORE[EB/OL]. [2021-03-06]. <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/spun-hibi-fiber/shb125073125>.
- [47] iXblue[EB/OL]. [2021-06-08]. <https://photonics.ixblue.com/store/optical-sensors-fibers/spun-fibers>.
- [48] Newport[EB/OL]. [2021-06-08]. <https://www.newport.com.cn/f/spun-high-and-low-birefringence-fibers>.
- [49] 胡蓓, 肖浩, 李建光, 等. 光纤电流互感器的噪声分析与信噪比优化设计[J]. *高电压技术*, 2017, 43(2): 654-660.
- Hu B, Xiao H, Li J G, et al. Noise analysis and SNR optimization design of fiber optical current transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 654-660.
- [50] 李汉钊, 钱伟文, 刘路, 等. 谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0901002.
- Li H Z, Qian W W, Liu L, et al. Analysis and optimization of angle random walk of resonant fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0901002.
- [51] 刘霜, 李汉钊, 刘路, 等. 激光器频率噪声功率谱密度

- 测试技术及在谐振式光纤陀螺中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306010.
- Liu S, Li H Z, Liu L, et al. Laser frequency noise power spectral density measurement technology and its application to resonant optical fiber gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306010.
- [52] 郝义伟, 孔新新, 才啟胜, 等. 环形器噪声对激光干涉测量系统影响分析[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912003. Hao Y W, Kong X X, Cai Q S, et al. Analysis of effect of circulator noise on laser interferometry system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0912003.
- [53] 肖智宏, 罗苏南, 宋璇坤, 等. 电子式互感器原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 104-111. Xiao Z H, Luo S N, S X K, et al. Principle and practical technology of electronic transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 104-111.
- [54] Wang X X, Zhang Y N, Yu J, et al. Influence of conductor eccentricity on Faraday phase shift errors of portable fiber-optic current transformer[J]. Optik, 2016, 127(20): 8505-8512.
- [55] 李瑞春, 赵静, 李德昌. 起偏器对反射式光纤电流互感器的影响分析[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 216-219. Li R C, Zhao J, Li D C. Impact of polarizer on reflecting fiber-optic current transducer[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 216-219.
- [56] Yu J, Zhang C X, Li C S, et al. Influence of polarization-dependent crosstalk on scale factor in the in-line Sagnac interferometer current sensor[J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 117101.
- [57] 王夏霄, 秦祎, 王野, 等. 光纤电流传感器的延迟光纤偏振串音误差[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2930-2936. Wang X X, Qin Y, Wang Y, et al. Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2930-2936.
- [58] Short S X, Tselikov A A, de Arruda J U, et al. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1212-1219.
- [59] Pang F B, Liu Y, Yuan Y B, et al. Influencing factors analysis on the detector output signal of fiber optic current transformer with sine modulation[J]. Measurement, 2020, 151: 107151.
- [60] Pang F B, Huang Q, Liu Y, et al. Fault mechanism of fiber optical current transformer based on signal processing method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1282014.
- [61] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46. Zhang C Y, Zhang C X, Wang X X, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46.
- [62] 李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1648-1653. Li J Z, Li Z R, Zhang D H, et al. Open-loop detection of fiber optic current transducer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1648-1653.
- [63] Zhao J, Shi L, Sun X H. Design and performance study of a temperature compensated ± 1100 kV UHVDC all fiber current transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 20165133.
- [64] 王马华, 崔一平, 张彤. 数字闭环光纤电流互感器死区形成机理分析[J]. 传感技术学报, 2009, 22(1): 24-28. Wang M H, Cui Y P, Zhang T. Analysis on the mechanism of dead band phenomena in digital closed-loop fiber optic current transformers[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(1): 24-28.
- [65] 王廷云, 罗承沐, 段联, 等. 光纤电流传感器小波信号处理系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(9): 51-53. Wang T Y, Luo C M, Duan L, et al. Wavelet signal processing system in fiber optic current sensors[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(9): 51-53.
- [66] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 100-105. Li Y S, Zhang G Q, Yu W B, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 100-105.
- [67] 李岩松, 刘君. 自适应光学电流互感器的信号处理方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 53-56. Li Y S, Liu J. Signal processing method for adaptive optical current transducer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 53-56.
- [68] 李岩松, 于文斌, 张国庆, 等. 平方根 Kalman 自适应滤波及其在 OCT 中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 53-56, 73. Li Y S, Yu W B, Zhang G Q, et al. Square root Kalman adaptive filter and its applications on OCT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 53-56, 73.
- [69] 王妍艳, 李岩松. 光学电流互感器 Sigma 点卡尔曼滤波去噪方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(31): 9348-9351. Wang Y Y, Li Y S. The research on the Sigma point Kalman filter algorithm in filtering noise in the optical current transducer(OCT) [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(31): 9348-9351.
- [70] 李岩松, 欧阳进, 刘君, 等. 基于 Allan 方差的磁光玻璃型光学电流互感器噪声分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 126-129, 137. Li Y S, Ouyang J, Liu J, et al. Analysis on noise of magneto-optical glass type optical current transformer based on Allan variance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 126-129, 137.
- [71] 李岩松, 李霞, 欧阳进, 等. 基于序贯卡尔曼滤波的 OCT 信号处理方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21): 16-21. Li Y S, Li X, Ouyang J, et al. Research of signal processing of OCT based on sequential Kalman filter[J].

- Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53 (21): 16-21.
- [72] 向勇, 李岩松. 基于粒子滤波的光学电流互感器信号处理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 101-104.
- Xiang Y, Li Y S. Research of signal processing of optical current transducer based on particle filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 101-104.
- [73] Zimmermann A C, Besen M, Encinas L S, et al. Improving optical fiber current sensor accuracy using artificial neural networks to compensate temperature and minor non-ideal effects[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7753: 77535Q.
- [74] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 互感器 第 8 部分: 电子式电流互感器: GB/T 20840.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Instrument transformers: part 8: electronic current transformers: GB/T 20840.8—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.