

基于圆柱螺旋光纤的杂散电流传感器研究

邢方方¹, 许少毅^{2*}

(1. 徐州工业职业技术学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221005;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对杂散电流传感器的温度敏感性问题,采用圆柱螺旋光纤构建传感器的矩形敏感环路。基于几何旋光效应推导矩形敏感环路的琼斯矩阵,结合传感器的光路结构,建立传感器的输出表达式;利用遗传算法优化矩形敏感环路的结构参数,确定结构参数的最优值。在此基础上,对传感器进行温度实验。结果表明,当矩形敏感环路的长边为1024mm、螺旋个数为35,短边为876mm、螺旋个数为28时,传感器的测量误差不大于0.4%。

关键词:杂散电流传感器;几何旋光效应;优化。

中图分类号:TN915.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2018)03-0025-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.007

Study of stray current sensor based on cylindrical spiral fiber

XING Fangfang¹, XU Shaoyi^{2*}

(1. School of Mechatronic Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou Jiangsu 221005, China; 2. School of Mechatronic Engineering, University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: In order to solve the temperature sensitivity problem of stray current sensor, this paper proposes a rectangle sensitive loop based on a cylindrical spiral fiber. Firstly, the paper derives the Jones matrix of the rectangle sensor head based on the geometric rotation effect, combines with the structure of sensor, obtains the output representation of sensor. Then, it applies the genetic algorithm to optimize the characteristic parameters of sensitive loop, which can be used to determine the optimization results. On these bases, the paper conducts the temperature experiments to test the performance of sensor. According to the results, the optimization results of the rectangle sensitive loop are that the length and the number of curve spirals are 1024mm and 35 in the long side while the two parameters are 876mm and 28 in the short side, the measurement error of the sensor is not greater than 0.4%.

Key words: stray current sensor; geometric rotation effect; optimization

0 引言

近30年来,基于法拉第旋光效应的光纤电流传感器(OFCS)一直是研究热点^[1],其主要优点包括动态范围大、抗电磁干扰、本征绝缘和带宽高等^[2],已经应用于高压变电站的电力传输计量^[3]、电解铝行业的过程控制及保护^[4]与城市轨道交通系统中埋地金属管道的腐蚀防护^[5]等。其中,埋地金属管道(如输油管道、

输水管道和天然气管道)的传输电流通常被称为杂散电流。由于杂散电流的大小与埋地金属管道的腐蚀状态密切相关,通过对杂散电流进行测量可为埋地金属管线的腐蚀状态评估提供新手段^[5,6]。

由于地铁系统通常将走行轨作为机车牵引电流的回路通道,当走行轨与地之间绝缘不充分时,必然会有部分牵引电流泄漏至大地形成杂散电流,包括一次杂散电流和二次杂散电流。一次杂散电流可由地铁排流网系统收集,最终返回牵引变电所负母极,对埋地金属管道没有影响。而未被地铁排流网系统收集的杂散电流会形成二次杂散电流,如果流入埋地金属管

收稿日期:2017-07-08。

基金项目:国家自然科学基金(51607178)资助。

作者简介:邢方方(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为光机电系统精密测量与控制。

*通信作者:许少毅(E-mail:shaoyi@cumt.edu.cn)。

邢方方, 许少毅: 基于圆柱螺旋光纤的杂散电流传感器研究

道将会导致管道的电解腐蚀。OFCS 作为一种无源和耐腐蚀的传感器, 是实现二次杂散电流测量的选项之一, 根据检测信号的不同, OFCS 可分为偏振调制式^[1,2]和相位调制式^[3,4]两种。与相位调制式 OFCS 相比, 偏振调制式 OFCS 具有光学结构简单和成本低等优势, 已经被应用于二次杂散电流的测量, 称为杂散电流传感器^[1]。在实际应用中, 杂散电流传感器的主要问题是存在温度敏感性, 即温度扰动诱导的线性双折射会严重削弱传感器性能。目前有两种有效的抑制方法: 第一种方法是应用退火光纤作为传感光纤^[7], 但退火光纤容易损坏; 另一种方法是采用旋转高双折射光纤作为传感光纤^[8,9], 但这类光纤存在制造成本高^[10]等问题。基于此, 本文提出一种基于全边圆柱螺旋光纤的杂散电流传感器, 在敏感环路中, 传感光纤沿着预先规划的圆柱螺旋路径绕制, 据此产生圆双折射以抑制线性双折射。

1 杂散电流传感器的输出模型

杂散电流传感器由一个超辐射发光二极管光源、起偏器、耦合器、敏感环路、偏振控制器、偏振分束器和光学功率计组成^[1], 敏感环路由传感光纤、多层螺旋管和反射镜组成, 反射镜电镀在传感光纤的末端。首先, 光源的输出光波通过起偏器形成线偏振光, 线偏振光通过耦合器进入敏感环路。然后, 线偏振光在敏感环路的传感光纤中传播, 其偏振面由于杂散电流在螺旋管内激发的磁场作用而发生旋转, 线偏振光由反射镜反射后再次通过传感光纤, 由于法拉第旋光效应的非互易性, 法拉第旋转角加倍。最后, 从敏感环路输出的线偏振光耦合进入偏振控制器中, 由偏振控制器将偏振面调制 45°, 调制光进入偏振分束器并分成两束正交光信号, 由光学功率计进行检测并通过 RS232 接口将检测结果发送到计算机进行分析处理。

敏感环路的结构如图 1 所示, 两个多层螺旋管通过导线串联, 分别在区域 AB 和 EF 中安装。区域 AB、CD、EF 和 GH 内的传感光纤分别沿各区域的圆柱螺旋路径绕制, 采用这种绕制方式制作而成的传感光纤被称为全边圆柱螺旋光纤。线性双折射、圆双折射和磁场在区域 AB 和 EF 的圆柱螺旋光纤上具有相同的分布规律; 而区域 CD 和 GH 的圆柱螺旋光纤只分布线性双折射和圆双折射。

对于正向和反向传播的光束, 圆柱螺旋光纤的琼斯矩阵分别定义为 J_{fc} 和 J_{bv} 。对于区域 CD 的圆柱螺旋光纤, 圆柱支杆长度和螺旋个数不同于区域 AB, 并且

该区域的圆柱螺旋光纤与杂散电流激发的磁场无关, 对于正向和反向传播的光束, 该区域圆柱螺旋光纤的琼斯矩阵定义为 J_{fv} 和 J_{bv} 。区域 EF 内圆柱螺旋光纤的琼斯矩阵和区域 AB 一样, 区域 GH 内圆柱螺旋光纤的琼斯矩阵和区域 CD 一样。因此, 敏感环路的琼斯矩阵 J_s 为:

$$J_s = J_{bv} J_{fv} J_{bv} J_{fv} \cdots J_{bv} J_{bv} J_{bv} J_{bv} \cdot J_m \cdot J_{fv} J_{fv} J_{fv} J_{fv} \cdots J_{fv} J_{fv} J_{fv} J_{fv} \quad (1)$$

其中, J_m 为反射镜的琼斯矩阵。当杂散电流等于 0A 时, 敏感环路的琼斯矩阵定义为 J_{s0} , 是式(2)的特殊情况, 偏振分束器输出信号的琼斯矢量定义为 E_s 。当杂散电流不等于 0A 时, 偏振分束器输出信号的琼斯矢量定义为 E_d 。因此, E_s 和 E_d 分别为 $E_s = J_{pc} \cdot J_{s0} \cdot J_p \cdot E_i$ 和 $E_d = J_{pc} \cdot J_s \cdot J_p \cdot E_i$, 其中, J_p 为起偏器的琼斯矩阵, J_{pc} 为偏振控制器的琼斯矩阵, E_i 为光源输出光波琼斯矢量。

基于此, 本文对输出信号进行了正交化处理, 传感器的输出(AO)为:

$$AO = \frac{(P_{dx} - P_{sx}) - (P_{dy} - P_{sy})}{P_{sx} + P_{sy}} \quad (2)$$

其中, 杂散电流不等于 0A 时, 偏振分束器输出信号的正交分量对应的功率值分别定义为 P_{dx} 和 P_{dy} , $P_{dx} = E_d(1) \cdot E_d(1)^*$, $P_{dy} = E_d(2) \cdot E_d(2)^*$, 其中 $E(1)$ 和 $E(2)$ 分别表示输出信号一对正交分量的振幅; 杂散电流等于 0A 时, 偏振分束器输出信号的正交分量对应的功率值分别定义为 P_{sx} 和 P_{sy} , $P_{sx} = E_s(1) \cdot E_s(1)^*$, $P_{sy} = E_s(2) \cdot E_s(2)^*$; 此外, J_m 为反射镜的琼斯矩阵。

2 敏感环路的参数优化

图 1 中, 敏感环路的未知结构参数主要包括 Len 、 Len' 、 κ 和 κ' 。其中, Len 和 Len' 分别表示矩形敏感环路的长边长度和短边长度, κ 和 κ' 分别表示长边的螺旋个数和短边的螺旋个数。区域 AB 和 CD 的螺旋长度 h 和 h' 分别等于 Len/κ 和 Len'/κ' 。地铁杂散电流的测量精度要求目前还没有形成国家标准, 根据法拉第电解定律可知, 埋地金属管道的腐蚀量大约是 2354.5g/年。在实践中, 当腐蚀量达到 2345.1g/年时, 埋

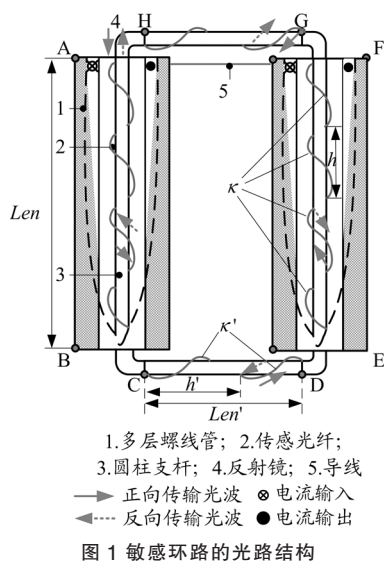


图 1 敏感环路的光路结构

地金属管道的腐蚀状况可以准确评估, 换言之, 杂散电流的测量精度应该控制在 $\pm 0.4\%$ ^[13]。

如果线性双折射完全被所产生的圆双折射抑制, 则传感器的期望输出(DO)为:

$$DO = \frac{(P_{ldk} - P_{lsx}) - (P_{ldy} - P_{lsy})}{P_{lsx} + P_{lsy}} \quad (3)$$

其中, 当线性双折射完全被抑制且杂散电流不等于 0A 时, 偏振分束器输出信号的正交分量对应的功率值分别定义为 P_{ldk} 和 P_{ldy} , $P_{ldk} = E_{ld}(1) \cdot E_{ld}(1)^*$, $P_{ldy} = E_{ld}(2) \cdot E_{ld}(2)^*$; 当线性双折射完全被抑制且杂散电流等于 0A 时, 偏振分束器输出信号的正交分量对应的功率值分别定义为 P_{lsx} 和 P_{lsy} , $P_{lsx} = E_{ls}(1) \cdot E_{ls}(1)^*$, $P_{lsy} = E_{ls}(2) \cdot E_{ls}(2)^*$; $E_{ls} = J_{pc} \cdot J_0 \cdot J_p \cdot E_i$, $E_{ld} = J_{pc} \cdot J_l \cdot J_p \cdot E_i$; 输出误差(OE)由式(4)计算得到:

$$OE = \left| \frac{AO - DO}{DO} \right| \times 100\% \quad (4)$$

在此基础上, 本文利用遗传算法(GA)来确定未知结构参数的最优值。在 GA 中, 种群中的个体代表未知结构参数的可能解, 鉴于杂散电流传感器应用于地铁现场时通常集成在地铁回流系统的排流装置中, 其结构尺寸需要进行约束。因此, 种群中个体通过一组 32 位 0 或 1 的字符串进行表征; 在每个个体中, 前 6 位、第 7 至 12 位、第 13 至 22 位和最后 10 位分别对应未知结构参数 κ 、 κ' 、 Len 和 Len' ; 群体中设置 80 个个体, 采用适应度函数来评估个体的适应度, 并将 OE 设置为适应度函数; GA 的初始种群随机产生, 迭代进化至预先设定的代数后停止。在每一个进化周期中, 核心操作包括选择、交叉和变异; 通过选择操作, 具有更高适应度的个体最有可能被选为下一代, 使用轮盘赌策略实施选择操作; 交叉操作以一定的概率相互交换两个个体之间的部分染色体, 形成新的个体; 变异操作有助于防止 GA 陷入局部最优中。上述 3 个操作将在 GA 过程中迭代执行。

GA 的评估过程如图 2 所示, 在第 200 代时, 个体的最优适应度为 0.1644%, 未知结构参数的最优结果为: $Len = 1024\text{mm}$ 、 $Len' = 876\text{mm}$ 、 $\kappa = 35$ 和 $\kappa' = 28$ 。在温度诱导线性双折射(TLB)为 $0^\circ \sim 1000^\circ$ 的范围内, 传感器的输出误差分布如图 3 所示, OE 均不超过 0.4%, 说明未知结构参数具有准确的最优取值。下一步, 我们将基于未知结构参数的最优值

制作杂散电流传感器, 据此进行温度实验测试杂散电流传感器的性能。

3 温度实验

我们对基于全边圆柱螺旋光纤的杂散电流传感器(本文所述传感器)和敏感环路的杂散电流传感器(作为参考)的性能进行测试, 参考传感器的敏感环路结构如图 4(a)所示。这两个传感器除了传感光纤的安装

方式不同外, 其它设计参数均一致。传感光纤均采用低双折射单模光纤, 传感光纤的绕制圈数设置为一圈, 忽略传感光纤的固有线性双折射。对于参考传感器, 由于传感光纤没有扭转, 圆双折射近似为零。经过测试发现, 在 20°C 时, 参考传感器的灵敏度约为 $0.0416/\text{A}$, 如图 4(b)所示; 在 20°C 时, 本文所述传感器的灵敏度约为 $0.0424/\text{A}$, 如图 4(c)所示。另外, 从测量误差曲线可以发现, 最大误差出现在低于 5.0A 的低电流区域, 参考传感器的最大误差约为 0.46% , 而所述传感器的误差约为 0.37% 。以上结果表明, 在进行低电流测量时, 所述传感器的精度比参考传感器的精度高。

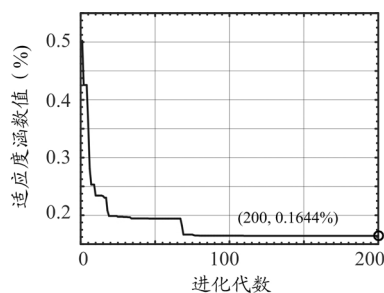


图2 GA的评估过程

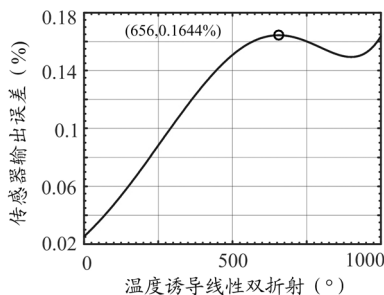
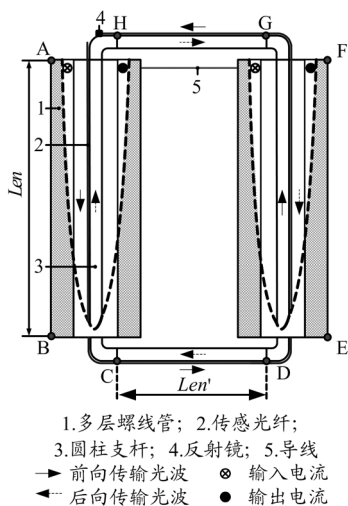
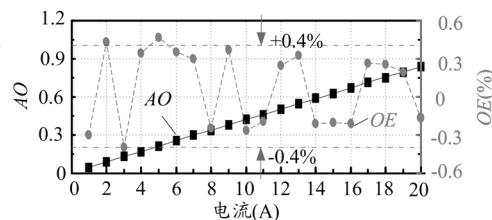


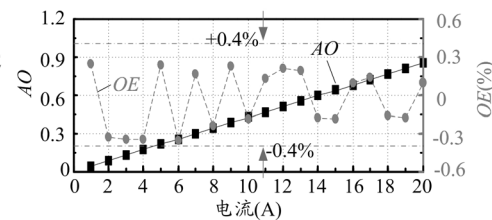
图3 传感器输出误差分布



(a) 参考传感器的敏感环路结构



(b) 参考传感器的测试结果



(c) 所述传感器的测试结果

图4 参考传感器的敏感环路结构以及在 20°C 时的测试结果

本文对上述两个传感器进行温度实验,光源的中心波长为 1550nm,3dB 谱宽约为 56nm;起偏器的消光比约为 35dB;耦合器的耦合比为 50:50。实验温度范围为 0℃~30℃,采用铂电阻作为温度传感器,在 0℃~30℃的范围内铂电阻的检测精度约为 0.2%。采用数字万用表的测量结果作为实验电流的标准值,数字万用表的直流测试精度为 0.05%,测量上限为 12A,直流电压的测试精度约为 0.012%,测量下限为 120mV,如果实验电流大于 12A,采用规格为 25A/250mV 的分流器。在敏感环路中,区域 AB 和 EF 内的圆柱支杆长度约为 1024mm,螺旋个数约为 35;而区域 CD 和 GH 内这两个参数分别为 876mm 和 28。

本文共进行两次温度试验,结果如图 5 所示。在第一个温度实验中,实验电流的标准值是 5.0A,参考传感器测量的电流为 4.905~5.389A,最大测量误差为 7.77%;所述传感器测量的电流为 4.992~5.013A,相应的测量误差为 0.17%~0.26%。在第二个温度实验中,标准值为 20.0A,参考传感器测量的电流在 19.737~21.355A 之间,最大误差为 6.78%;所述传感器测量的电流在 19.955~20.057A 之间,相应的误差范围为 0.23%~0.29%。根据上述实验结果可知,所述传感器的测量误差均不超过 0.4%,由此证明,在不同温度条件下所述传感器能满足地铁杂散电流的测量精度要求。

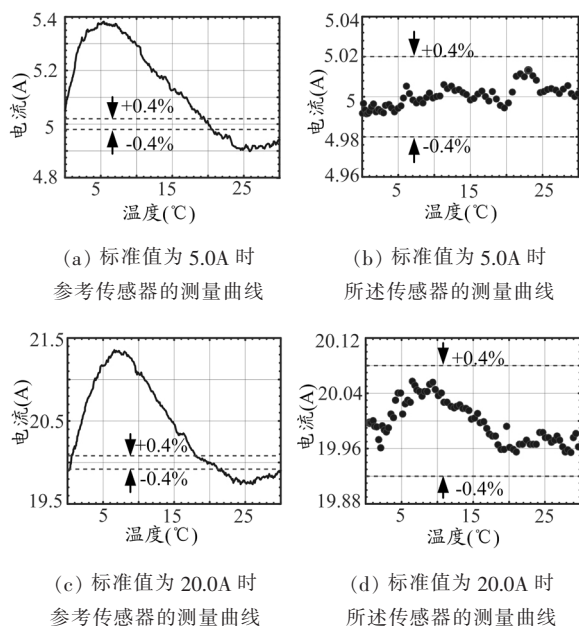


图 5 温度实验结果

4 结束语

本文提出基于全边圆柱螺旋光纤的杂散电流传

感器,基于几何旋光效应推导敏感环路的琼斯矩阵,建立杂散电流传感器的输出表达式,在 TLB 为 0°~1000°的范围内,应用 GA 对敏感环路的结构参数进行优化,优化结果包括: $Len=1024\text{mm}$ 、 $Len'=876\text{mm}$ 、 $\kappa=35$ 和 $\kappa'=28$,通过温度实验对所述传感器的性能进行测试,测试结果表明,所述传感器的测量误差不大于 0.4%,可以适用于地铁杂散电流测量。本文取得的研究成果还可以为相位调制式和偏振调制式 OFCS 的温度诱导线性双折射抑制和消除提供参考。

参考文献:

- [1] XU S Y, LI W, XING F F, et al. Polarimetric current sensor based on polarization division multiplexing detection[J]. Opt. Express, 2014, 22(10): 11985–11994.
- [2] WEI P, CHENG C, LIU T T. A photonic transducer-based optical current sensor using back-propagation neural network [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(14): 1513–1516.
- [3] WANG L H, WEI G J, JI J F, et al. Statistical modeling of fiber optic current transducer[J]. Measurement, 2016, 92(10): 288–294.
- [4] BOHNERT K, BRÄNDLE H, BRUNZEL M G, et al. Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry [J]. IEEE Trans. Ind. App., 2007, 43(1): 180–187.
- [5] CUI G, LI Z L, YANG C, et al. The influence of DC stray current on pipeline corrosion[J]. Pet. Sci., 2016, 13(1): 135–145.
- [6] XU S Y, LI W, WANG Y Q. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2013, 62(8): 3569–3580.
- [7] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. J. Lightwave Technol., 2002, 20(2): 267–276.
- [8] PENG N, HUANG Y, WANG S B, et al. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(17): 1668–1671.
- [9] MÜLLER G M, GU X, YANG L, et al. Inherent temperature compensation of fiber-optic current sensors employing spun highly birefringent fiber [J]. Opt. Express, 2016, 24(10): 11164–11173.
- [10] SEGURA M, VUKOVIC N, WHITE N, et al. Low birefringence measurement and temperature dependence in meter-long optical fibers [J]. J. Lightwave Technol., 2015, 33(12): 2697–2702.
- [11] PERCIANTE C D, FERRARI J A. Cancellation of bending-induced birefringence in single-mode fibers: application to Faraday sensors[J]. Appl. Opt., 2006, 45(9): 1951–1956.
- [12] FRINS E M, DULTZ W. Rotation of the polarization plane in optical fibers[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(1): 144–147.
- [13] XU S Y, LI W. Research on stray current corrosion evaluation of buried metallic pipeline in an urban rail transit system [J]. Int. J. Electrochem. Sc., 2015, 10(7): 5950–5960.