



DOI: 10.12086/oe.2019.180363

用于测量雷电流的全光纤电流传感器

黄瑞涛, 段艳涛*, 石立华, 刘 波

陆军工程大学电磁环境效应与光电工程重点实验室, 江苏 南京 210007



摘要: 雷电流测量是研究雷电的一个重要部分。为此, 本文研究了一种用于测量雷电流的全光纤电流传感器。首先, 介绍了光纤电流传感器的基本原理及结构组成; 其次, 在实验室中对该传感器的响应速度、测量精度及测量范围等性能指标进行了测试。结果表明, 该传感器的响应速度为微秒级, 可测量范围在 1 kA~100 kA, 动态范围大于 40 dB, 测量误差小于 5%, 测量波形与标准的 Pearson 电流探头测试波形相比一致性较好, 该研究为雷电流测量提供了一种新方法。

关键词: 全光纤电流传感器; 雷电流; 数字闭环干涉技术

中图分类号: TM452; TP212

文献标志码: A

引用格式: 黄瑞涛, 段艳涛, 石立华, 等. 用于测量雷电流的全光纤电流传感器[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180363

All-fiber optical current transformer for measuring lightning current

Huang Ruitao, Duan Yantao*, Shi Lihua, Liu Bo

National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract: It is an important part for studying lightning to measure lightning current. Consequently, this paper studied an all-fiber optical current transformer for measuring lightning currents. Firstly, the basic principle and structure of the all-fiber optical current transformer were introduced. Then, the performances including the response speed, measurement accuracy and measurement range were tested in the laboratory. The results show that the response speed of the sensor is in microsecond. The measurable range is over 1 kA~100 kA. The dynamic range is greater than 40 dB and the measurement error is less than 5%. The measurement waveform of all-fiber optical current transformer coincides with that of standard Pearson current probe. The paper provides a new method for lightning current measurement.

Keywords: all-fiber optical current transformer; lightning current; digital closed-loop interference technology

Citation: Huang R T, Duan Y T, Shi L H, *et al.* All-fiber optical current transformer for measuring lightning current[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180363

1 引言

雷电流时域波形为一个快脉冲, 传统测量雷电流

的方法多利用电磁感应原理为基础进行测量, 常用的传感器有罗氏线圈和同轴分流器, 另外还有通过一些

收稿日期: 2018-07-11; 收到修改稿日期: 2018-11-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0104300)

作者简介: 黄瑞涛(1994-), 男, 硕士, 主要从事雷电电磁效应及防护的研究。E-mail: 190485346@qq.com

通信作者: 段艳涛(1980-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事电磁防护与电磁仿真的研究。E-mail: dcmchdyt@126.com

传感器测量电流产生的磁场来反演被测电流的间接测试方法^[1-4]。此类电流传感器绝缘困难, 体积大, 重量重, 同时不可避免受传统电学测电流方法的限制, 易出现磁饱和等缺点。在一些特定情况下, 如高塔雷电流测量方面, 文献[5]采用磁场反演雷电流的方式进行了高塔雷电流的间接测量, 但是反演模型的可靠性需要验证, 且需要与直接测得的雷电流进行对比。文献[6-7]采用大型无磁芯柔性罗氏线圈进行直接雷电流测量, 但其线圈本身自积分条件不足, 存在低频失真, 并且在几百米的高塔上安装直径 2 m 线圈的操作复杂且具有一定危险性。光纤电流传感器的前端测量部分为光纤, 质量轻且安装方便, 受外界干扰小, 适合于高塔等特殊环境的雷电流测量。

光纤传感技术^[8]是伴随着光纤通讯技术而发展起来的一种新型传感技术, 其传感方式以光纤为媒质、光为载体, 感知和传输信号。全光纤电流传感器 (all-fiber optical current transformer, AFOCT) 相对传统的电磁式传感器具有许多优点, 如动态范围大、体积小、抗电磁干扰能力强、安全性高、绝缘性好、重量轻, 以及可测交直流信号等。AFOCT 符合电力系统数字化、智能化和网络化发展的需求, 成为数字化变电站电流信号采集装置的首选^[9-12]。现在国内外对于光纤电流传感器研究最多的就是其在电力系统上的应用, 并且取得了不少成果。但是, 由于电力系统上应用的光纤电流传感器普遍带宽窄^[13-14], 无法满足测量雷电流等快脉冲电流的需求, 因此必须提高光纤电流传感器带宽才能将其应用于雷电流的测量。

相对而言, 光纤电流传感器在雷电流测量研究方面成果较少。1995 年, Ye 等人^[15]开始研究将光纤电流传感器用于测量雷电流, 接下来几年里, SGM Kramer 等人又将光纤传感器应用于雷电检测与定位方面。2012 年开始, 美国 NASA Langley 研究中心的 Nguyen

等^[16-17]人致力于用光纤电流传感器测量飞机遭遇雷击后的表面电流大小, 取得较好效果, 实验样机已经生产出并用于实际测量。国内, 有学者研究基于光纤电流传感器的雷电流相关测量技术^[18]。

全光纤电流传感器是基于法拉第磁光效应, 将电流转换成传感光纤内光束偏振态变化的装置, 其具有结构简单、精度高等优点, 一直是国内外实用化研究的重点。全光纤电流传感器根据信号检测方法不同分为偏振调制型和相位调制型。偏振调制型光纤电流传感器通过检测出射光的偏振态旋转角度来确定待测电流的大小, 这种方法的原理和装置都比较简单, 但是在检测时使用小角度近似的方法, 在测量大电流时, 将会产生很大的误差。这种方法带宽只受探测器响应速度的影响, 因此可以用于测量较快的脉冲, 如测量局部放电火花等。相位调制型又分为开环型和闭环型, 在测量大电流时, 系统存在非线性效应, 并且在提高系统检测精度上存在一定难度。

本文采用闭环调制型的光纤电流传感器方案, 通过典型雷电流的测量试验, 表明该方案测量动态范围大, 且具有较好的线性度和精度。

2 AFOCT 的基本原理和技术指标

2.1 基本原理

AFOCT 的基本原理是法拉第磁光效应和安培定律, 图 1 为其基本组成结构^[19]。可以看出, 从光源发出的无偏光经过耦合器后, 再经光纤起偏器, 光纤起偏器将无偏光起偏为线偏振光。起偏器与相位调制器以 45° 熔接, 线偏振光以 45° 方向注入保偏光纤, 线偏振光正交分解为两束线偏振光, 分别沿保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输。这两个正交模式的线偏振光经过 $\lambda/4$ 波片后, 分别变为左旋和右旋圆偏振光, 进入传感光纤环中传播。载流导线中传输的电流产生磁场, 两束不

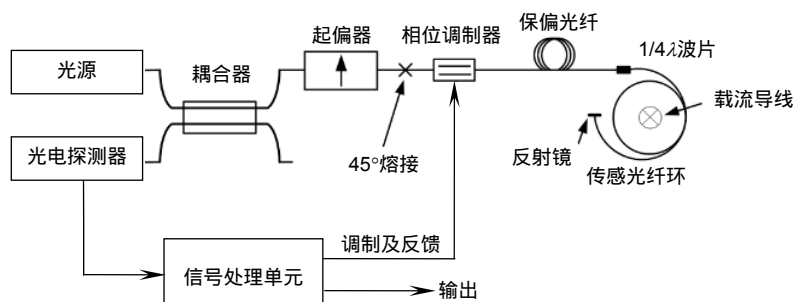


图 1 AFOCT 的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of AFOCT

同的圆偏振光在传感光纤受法拉第磁光效应产生相位差,在传感光纤端部经反射镜反射后,两束圆偏振光的偏振模式互换(即左旋光变为右旋光,右旋光变为左旋光),再次通过传感光纤环并经法拉第效应,由于法拉第磁光效应的非互易性,两束圆偏振光经历了两次法拉第效应,产生的相位差加倍。

图中各器件参数为光源波长 1310 nm,功率 1 mW;耦合器的分光比 50%:50%,工作波长 1310 nm;相位调制器带宽为 50 MHz;保偏光纤类型为熊猫保偏光纤;光电探测器指标参数:电流响应度 0.9 A/W,暗电流 0.5 nA;传感光纤环的光纤类型为保圆光纤。

实际产生的相位差 φ_f 为^[14]

$$\varphi_f = 4NVI, \quad (1)$$

式中: N 为传感光纤环数, V 为光纤维尔德常数; I 为载流导线中通过的电流。

这两束圆偏振再次通过 $\lambda/4$ 波片后,变为线偏振光返回,两束相位不同的线偏振光在起偏器处发生干涉。携带由法拉第效应产生的非互易相位差信息的干涉光,通过光纤耦合器进入光电探测器,接收到的光功率 P_d 可表示为^[14]

$$P_d = KP_0(1 + \cos\varphi_f), \quad (2)$$

式中: K 为光路损耗系数, P_0 为光源输出光强。干涉输出光强的表达式为余弦函数,因此系统工作点线性度不好,而且测量小信号灵敏度低。为了解决上述问题,检测系统采用方波调制,在同一束传输的光之间人为地引入相位差,使工作点偏移到其它位置,从而改善光纤电流传感器检测的灵敏度,并且可以测量电流的正负方向,在叠加 $\pm\pi/2$ 的情况下式(2)变为^[14]

$$P_d = KP_0(1 + \cos\varphi_f) = KP_0(1 \mp \sin\varphi_f)。 \quad (3)$$

由式(3)可知仅在接近零相位的地方线性度好,在非零相位的地方线性度不好,并且测量动态范围小。为解决该问题,采用闭环检测方案,通过相位调制器,在其非互易的相位偏置上叠加一个相位差^[11]。即在同一束传输光波之间人为地引入一个与 Faraday 相移 φ_f 大小相等、方向相反的相位差 θ_f ,用以抵消 Faraday 相移,式(3)变为^[14]

$$P_d = KP_0(1 \mp \sin(\varphi_f + \theta_f))。 \quad (4)$$

当 $\theta_f + \varphi_f \rightarrow 0$ 时,系统工作在零相位状态,因此 $\theta_f \approx -\varphi_f$,系统输出 φ_f ,进而得到 Faraday 相移 θ_f 。经过光电探测器的光电转换以及后续的 A/D 转换,得到数字量的方波交流信号,在方波的前半周期和后半周期各采 N 个点作累加,然后相减,结果为解调输出。

由输出光强信号与待测电流产生的相位差 φ_f 的关

系,对输出光强信号做一定计算得到相位差,进而根据式(1)得到导线中流过的电流值。

在检测电流产生的相位差 φ_f 时,采用了光纤陀螺中较成熟的全数字闭环反馈的信号检测方案^[20]。该方案具有动态范围大、检测精度高的优点。

2.2 技术指标

电流传感器在性能上有要求,主要体现在测量范围、测量精度及波形失真方面。

受器件本身的限制,传感器模拟量输出为 ± 10 V,因此其测量范围是有限的。光纤电流传感器的灵敏度及测量范围受匝数 N 的影响, N 越大,其灵敏度越高,信噪比越高,但是其测量范围随着 N 的增大而减小。根据传感光纤的长度不同,其可环绕的匝数也不同,匝数太多会造成传感光纤过度弯曲,影响测量精度。光纤电流传感器的灵敏度在整个系统设计完成时已经确定,该系统在 1 匝的情况下标准灵敏度为 24 kA/V,即灵敏度 k (kA/V)与匝数 N 的关系为

$$k = 24 / N, \quad (5)$$

测量波形产生失真的主要原因是频率响应不足,光纤电流传感器在低频部分响应很好,低频可至直流。但是其高频响应不足,这是光纤电流传感器用于测量雷电流需要解决的一个难题。

光纤电流传感器的带宽取决于整个系统中各个模块带宽的最小值,由传感器原理可知,前端光纤测量部分对带宽影响很小,限制带宽的主要是后端信号处理部分。信号处理采用全数字闭环反馈的信号检测方案,利用方波调制和阶梯波反馈的方式,将光强信号解调成所需要的电流信号。系统带宽受调制频率的限制,而调制频率与系统光纤长度有关^[17]。

3 测试结果及讨论

采用所研制的全光纤电流传感器对典型雷电流进行测量,测试波形主要有雷电流 A 波波形^[21]和 8/20 μ s 雷电流波形,它们由两个输出等级可调的脉冲电流发生器产生。

3.1 雷电流 A 波波形测量

实验室现有雷电流 A 波发生器,可产生 0.5 kA~17 kA 等级雷电流 A 波波形,峰值时间 6.4 μ s,半峰值宽度 69 μ s。利用该装置可研究光纤电流传感器对较小峰值电流的测量能力。

实验连接如图 2 所示,其中 Pearson 电流线圈测量的结果作为标准,用于对比研究光纤电流传感器测

得波形的精度。光纤电流传感器的传感光纤环绕载流导线为柔性闭环安装,3 m 长的传感光纤可绕 1~6 匝,根据不同需求可以绕不同匝数。传感光纤尾部通过卡钳固定连接至反射镜,携带相位信息的光通过一段保偏光纤后传输到后端信号采集与处理部分,由光电探测器探测干涉光的光强信息,通过解调光强与相位之间的关系,进而得到被测电流值。传感器前端为全光纤,即不受周围电磁环境干扰,又不影响周围电磁环境,后端信号处理电路放置于金属盒中,用于屏蔽外界电磁干扰。

图 3 为一次典型的测量波形,从图中可以看出,光纤电流传感器测得波形与 Pearson 电流线圈测得波形相比,二者峰值接近,波形上升沿一致,而下降沿略有差别,两个传感器的低频响应不完全一致,从原理上看,光纤电流传感器的低频响应优于柔性安装的 Pearson 线圈。在一定条件下,可以认为光纤电流传感器是一个线性系统。对于一个线性系统,其输入和输出在时域满足卷积关系,在频域满足相乘关系。从信号传输系统的角度看,光纤电流传感器系统的输入为雷电流 A 波发生器产生的电流信号,而输出为其输出

的电压信号,因此系统函数是确定的。认为 Pearson 电流线圈的结果为标准值,即为系统输入信号,光纤电流传感器的结果为输出信号,对两个信号做 FFT 的结果如图 4(a),可以看出二者在频谱上有差别,将两个 FFT 后的结果相除,即为系统函数,见图 4(b)。由系统函数可以粗略看出,系统函数在低频时较为平坦,说明传感器低频响应良好,而在频率大于 100 kHz 以后,系统函数震荡严重,说明高频响应较差。

光纤电流传感器测得波形较为平滑,但是由于光源及电路存在噪声,输出波形存在本底噪声,在测量小峰值电流时噪声影响较为明显。

图 5 为测量 1 kA 电流时不同匝数下传感器测得波形及无电流时的噪声波形。从图中可以看出噪声的幅值约±20 mV,不同匝数下,传感器的噪声幅值基本相同。匝数越多,传感器灵敏度越高,对于小电流的探测能力越好。

光纤电流传感器精度要求为 5%,不同匝数下对于不同等级的电流测量误差曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,在测量 0.8 kA~12 kA 较小电流时,测量误差均小于 5%,满足精度要求。



图 2 雷电流 A 波波形测量

Fig. 2 Lightning measurement for current component A

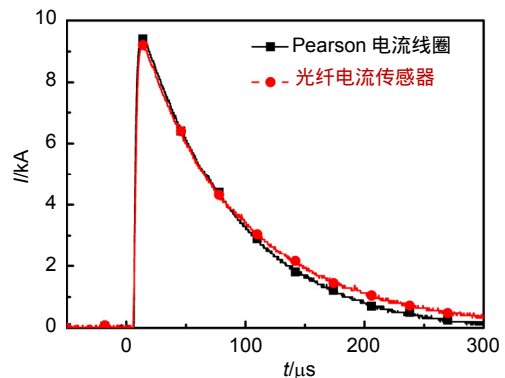


图 3 雷电流 A 波波形测量结果对比

Fig. 3 Comparison for measured results of lightning current component A

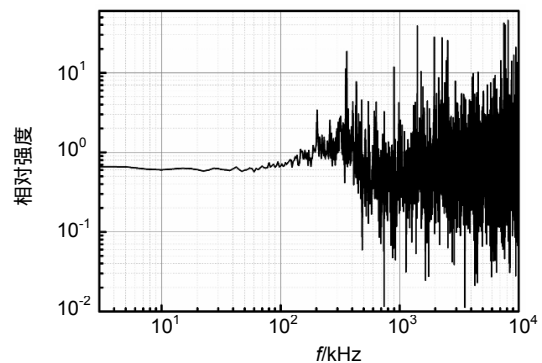
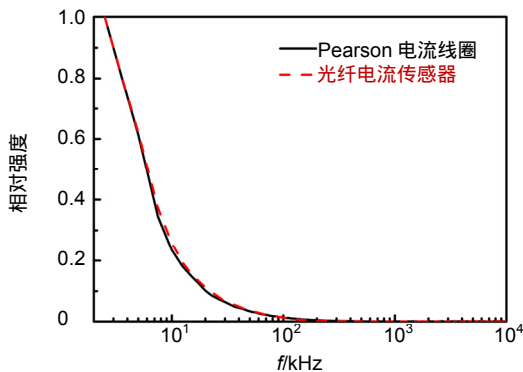


图 4 传感器测量雷电流 A 波的频谱及系统函数。(a) 频谱; (b) 系统函数

Fig. 4 The spectrum and system function of lightning current component A. (a) Spectrum; (b) System function

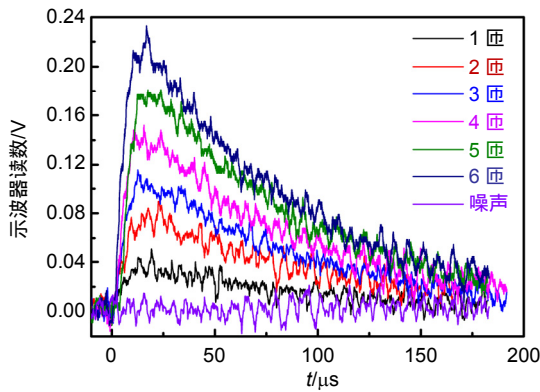


图 5 不同匝数的传感器测量波形

Fig. 5 Measurement waveforms of sensor in different loops number

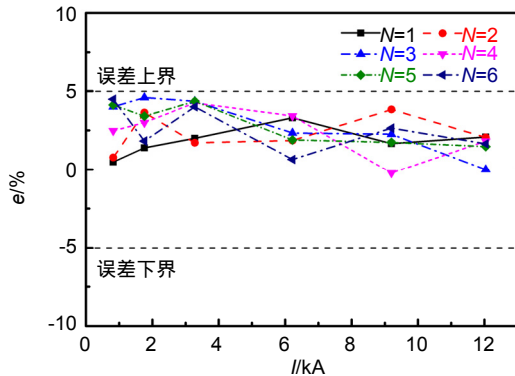


图 6 测量雷电流 A 波的误差曲线

Fig. 6 The error curve of measuring lightning current component A

3.2 雷电流 8/20 μs 波形测量

雷电流 A 波发生器最高可产生幅值 17 kA 的雷电流,为了验证光纤电流传感器对于大电流的探测能力,使用实验室中可产生峰值 200 kA 雷电流的脉冲电流发生器进行测试。

传感器连接如图 7 所示,光纤电流传感器与 Pearson 电流线圈绕在载流导线上, Pearson 电流线圈测得电流波形作为标准,用来对比分析光纤电流传感器输出波形的测量精度。

测试结果如图 8 所示。由测试结果可知,光纤电流传感器测得波形与 Pearson 电流线圈测得波形基本一致,并且峰值只有很小的差异。这说明在测量 100 kA 雷电流时,光纤电流传感器输出波形及精度满足要求。光纤电流传感器测量波形相对 Pearson 电流线圈测得波形有延时,这是由于光纤电流传感器的光路及信号线总长度大于 Pearson 电流线圈的信号线长度,同时光纤电流传感器的信号处理电路运算时间会导致一部分纯延时。

图 9 为传感器在不同匝数不同等级电流下的测量误差曲线,从图中可以看出,光纤电流传感器测量 11 kA~100 kA 电流时,误差均小于 5%。同时图 9 粗略地反映出不同匝数的测量范围上限,匝数越大,最大可测量电流越小,与匝数呈反比关系。



图 7 雷电流 8/20 μs 波形测量

Fig. 7 Lightning measurement for current 8/20 μs waveform

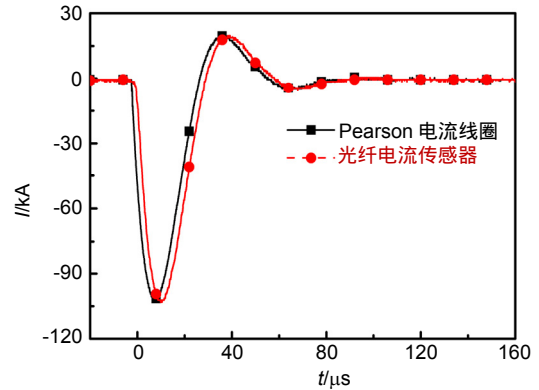


图 8 测量 8/20 μs 波形结果对比

Fig. 8 Comparison for measured result of lightning current 8/20 μs waveform

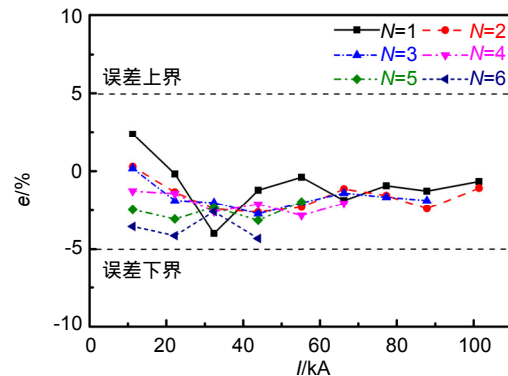


图 9 测量 8/20 μs 雷电流波形的误差曲线

Fig. 9 The error curve of measuring lightning current 8/20 μs waveform

4 结论

本文研究了一种全光纤型的雷电流传感器。该传感器基于安培定律和法拉第磁光效应，通过电流产生的磁场与光的相互作用，得到电流值。传感器经实验室测试，得到如下结论：

1) 采用雷电流 A 波发生器对光纤电流传感器的性能进行了测试，结果表明：光纤电流传感器测量波形与 Pearson 电流线圈测量波形一致性较好，其响应速度为微秒级，最小可测电流小于 1 kA，满足指标要求。

2) 采用 200 kA 的雷电流发生器对光纤电流传感器进行测试，结果表明：其可测量 100 kA 等级的雷电流，且精度满足要求。不同匝数下传感器测量范围上限与匝数成反比，即匝数越大，测量范围上限越低。

3) 光纤电流传感器可测量 1 kA~100 kA 等级范围的雷电流，动态范围大于 40 dB，测量误差小于 5%，满足精度要求。

该研究为雷电流测量提供了一种新方法，为下一步装备的雷电流效应试验提供了技术支持。

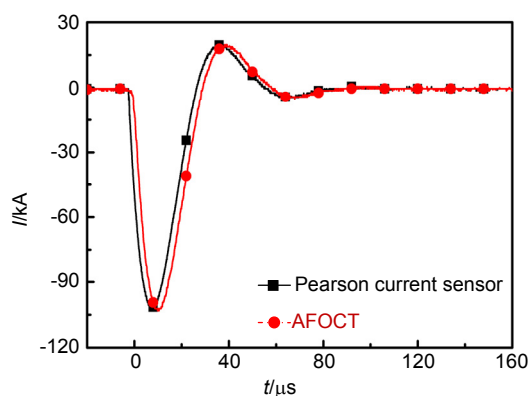
参考文献

- Pellinen D G, Di Capua M S, Sampayan S E, et al. Rogowski coil for measuring fast, high-level pulsed currents[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1980, **51**(11): 1535–1540.
- Chen J L, Yao X L, Sun W, et al. The development of two typical Rogowski coils[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, **30**(7): 14–16.
陈景亮, 姚学玲, 孙伟, 等. 两种典型 Rogowski 线圈的研制[J]. *高电压技术*, 2004, **30**(7): 14–16.
- Moreno M V R, Robles G, Albarracín R, et al. Study on the self-integration of a Rogowski coil used in the measurement of partial discharges pulses[J]. *Electrical Engineering*, 2017, **99**(3): 817–826.
- Baranov M I, Kniaziev V V, Rudakov S V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to ± 220 kA[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, **61**(4): 501–505.
- Zhou B H, Liu P S, He W, et al. Indirect measurement of cloud-to-ground lightning current[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2012, **13**(6): 604–610.
周璧华, 刘培山, 何伟, 等. 地闪雷电流间接测量技术[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **13**(6): 604–610.
- Fu Y P, Gao C, Yang B, et al. Research on Zifeng tower lightning current full wave measurement[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, **33**(5): 24–29.
付亚鹏, 高成, 杨波, 等. 紫峰大厦雷电流全波测量研究[J]. *微波学报*, 2017, **33**(5): 24–29.
- Yang B, Fu Y P, Li Y X, et al. Optically powered lightning current measurement system for high-tower observation[J]. *IEEE Access*, 2018, **6**: 17022–17028.
- Liu Y, Su Y M, Wang C T. The state and development of optical fiber current transducer[J]. *Journal of Applied Optics*, 1998, **19**(5): 21–25.
刘晔, 苏彦明, 王彩堂. 光纤(光学)电流传感器的现状及发展[J]. *应用光学*, 1998, **19**(5): 21–25.
- Wang W, Zhang Z X, Yang Y S. The fiber optical current transformer (FOCT) technology and its engineering application[J]. *Distribution and Utilization*, 2009, **26**(1): 45–48.
王巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. *供用电*, 2009, **26**(1): 45–48.
- Huang X W, Dong Y L, Dong L L. Unconventional mutual inductor of digital substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, **37**(8): 89–92.
黄学卫, 董玉玲, 董丽丽. 数字化变电站中的非常规互感器[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, **37**(8): 89–92.
- Wang X X, Zhang C X, Zhang C Y, et al. A new All digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, **30**(16): 77–80.
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. *电力系统自动化*, 2006, **30**(16): 77–80.
- Li J H, Xu L, Luo S N, et al. Application of electronic transformer in digital substation[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2007, **26**(S1): 44–47.
李九虎, 须雷, 罗苏南, 等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. *江苏电机工程*, 2007, **26**(S1): 44–47.
- Zhang C Y, Zhang C X, Wang X X, et al. Frequency characteristics of reflecting fiber-optic current transducer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(7): 88–92.
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式光纤电流传感器频率特性计算和测试[J]. *光电工程*, 2007, **34**(7): 88–92.
- Zhang C Y, Zhang C X, Wang X X, et al. Calculation and test of phase difference of fiber optic current transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(1): 152–156.
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 闭环全光纤电流互感器相位差的计算与测试[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(1): 152–156.
- Ye M, Li K, Wang J G, et al. Fiber optic lightning current sensor[J]. *Proceedings of SPIE*[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1995: 269–271.
- Nguyen T X, Ely J J, Szatkowski G G, et al. Fiber-optic sensor for aircraft lightning current measurement[C]//*Proceedings of 2012 International Conference on Lightning Protection*, 2012: 1–7.
- Nguyen T X, Ely J J, Szatkowski G N. A fiber-optic current sensor for lightning measurement applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9480**: 94800X.
- Wang J. Research of direct lightning measurement with optical fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
王婧. 光纤直接雷电流测量技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 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.
- Zhang G C. *The Principles and Technologies of fiber-Optic Gyroscope*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- COSTIND. Electromagnetic compatibility requirements for systems: GJB 1389-92[S]. Beijing: COSTIND, 1992.
国防科学技术工业委员会. 系统电磁兼容性要求: GJB 1389-92[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1992.

All-fiber optical current transformer for measuring lightning current

Huang Ruitao, Duan Yantao*, Shi Lihua, Liu Bo

National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering,
Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China



Comparison for measured result of lightning current 8/20 μ s waveform

Overview: It is an important part for studying lightning to measure lightning current. The time domain waveform of lightning current is a fast pulse. The traditional method of measuring lightning current is based on the principle of electromagnetic induction. The traditional current sensor is bulky, heavy and difficult to insulate. It is inevitably limited by the traditional measurement method, such as magnetic saturation. All-fiber optical current transformer (AFOCT) has many advantages over traditional electromagnetic sensors, such as large dynamic range, small size, strong anti-electromagnetic interference capability, high safety, good insulation and light weight. Consequently, this paper studied an AFOCT for measuring lightning currents. Firstly, the basic principle and structure of the AFOCT are introduced. The current transformer is based on Faraday magneto-optical effect and Ampere's law. It adopts reflecting optical path system and closed-loop detection scheme. The scheme has the advantages of large dynamic range and high detection precision. Secondly, the performance including the response speed, measurement accuracy and measurement range was tested in the laboratory. The typical lightning current is measured by the AFOCT. The tested current includes the waveform of lightning current component A and the lightning current 8/20 μ s waveform. The waveform of lightning current component A is specified in the national military standard GJB1389A, and it is also used by the US military standard widely. It is the waveform required for lightning protection test of equipment. The waveform of lightning current 8/20 μ s has relevant regulations in IEC standards and national standards, and it is mainly used for injection testing of lightning protection devices. Therefore, these two waveforms were used in the test, and they are respectively generated by two pulse current generators with adjustable output levels. The results of measuring the waveform of lightning current component A by the AFOCT are used to obtain the sensor's ability to detect small currents. The results of measuring the waveform of lightning current 8/20 μ s by the AFOCT are used to obtain the sensor's ability detect large currents and the upper limit of the range in different turns. Through the testing of the AFOCT, the measurement accuracy and dynamic range of the sensor are obtained. The results show that the response speed of the sensor is in microsecond. The measurable range is over 1 kA~100 kA. The dynamic range is greater than 40 dB and the measurement error is less than 5%. The measurement waveform of all-fiber optical current transformer coincides with that of standard Pearson current probe. The paper provides a new method for lightning current measurement.

Citation: Huang R T, Duan Y T, Shi L H, *et al.* All-fiber optical current transformer for measuring lightning current[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180363

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFF0104300)

* E-mail: dcmchdyt@126.com