

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210758

基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器设计*

邱志刚, 陈佳琪, 贾春荣, 丁笑旺, 卓越
(华北理工大学电气工程学院 唐山 063210)

摘要: 电流互感器作为一次侧电流的常用计量设备之一,它在电力系统的交流电测量、继电保护、电力设备检修控制等相关领域均具有十分重要的地位。针对传统电流互感器存在的线性度低、抗干扰能力差及精度低等问题,尤其在工频小电流精确测量这一难题方面更是捉襟见肘。鉴于此,本文提出一种基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器。该互感器利用电流经过电阻所产生的焦耳热改变光纤中的光信号特征,从而引起马赫-曾德干涉仪的输出信号变化,然后通过光电探测器完成对干涉仪的光信号捕捉,并将其转换为电信号输出,完成工频小电流检测。结构上通过采用PCB型罗氏线圈作为感应取电装置,并利用MATLAB完成其动态响应分析。另外针对信号采集、传输、处理过程中所出现的噪声信号,设计了基于FPGA技术的信号处理系统,以提高信噪比。最后通过实验对工频小电流进行测量,线性度为0.996 1,检测精度可达到0.14%。实验结果表明提出的光纤电流互感器相较于传统光学电流互感器相比,具有更高的线性度和测量精度,为基于热效应的电流互感器发展提供了新的思路,也为工频小电流的测量提供了一种新的方法。

关键词: 光纤电流互感器;马赫-曾德干涉仪;FPGA;工频电流;热效应

中图分类号: TH741 TM452 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Design on fiber optical current transformer based on Mach-Zehnder interferometer

Di Zhigang, Chen Jiaqi, Jia Chunrong, Ding Xiaowang, Zhuo Yue

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: As one of the common measurement equipment of primary side current, the current transformer plays an important role in AC current measurement, relay protection, power equipment maintenance control and other related fields of the power system. To address the problems of low linearity, poor anti-interference ability and low precision existing in traditional current transformers, it is especially difficult to accurately measure the low power frequency current. In view of this, a fiber optic current transformer based on the Mach-Zehnder interferometer is proposed in this article. The transformer uses the Joule heat generated by the current passing through the resistance to change the optical signal characteristics in the fiber to cause the change of the output signal of the Mach-Zehnder interferometer. Then, the optical signal of the interferometer is captured by the photodetector and converted into electrical signal output to complete the power frequency small current detection. In the structure, the PCB-type Rogowski coil is adopted as the induction device, and its dynamic response analysis is completed by MATLAB. In addition, a signal processing system based on FPGA technology is designed to improve the signal to noise ratio. Finally, the small power frequency current is measured through the experiment. The linear correlation coefficient is 0.996 1, and the detection accuracy can reach 0.14%. The experimental results show that the proposed fiber optic current transformer has higher linearity and measurement accuracy than the traditional optical current transformer, which provides a new idea for the development of current transformers based on thermal effect. It also provides a new method for the measurement of power frequency small current.

Keywords: fiber optic current transformer; Mach-Zehnder interferometer; FPGA; power frequency current; heat effect

收稿日期:2022-11-21 Received Date: 2022-11-21

* 基金项目:河北省科技局科技攻关项目(062035161D-1)、河北省教育厅科学技术研究项目(ZD2021332,ZD20131024)、华北理工大学培育基金(SP201502)项目资助

0 引言

随着电力系统发-输-变-配电等级的不断提高,为保证电气设备安全可靠的运行,对电流、电压等直接反映电网运行状态的电气参数的测量要求也变得更加严格^[1-3]。电流互感器作为将一次侧大电流按比例转化为二次侧小电流以供计量和保护常用的电气设备,承担着电流变换、电气隔离的责任。而传统的电磁式电流互感器随着电网智能化、数字化的发展逐渐暴露出磁饱和、绝缘性差和体积笨重等缺点^[4-5]。在此背景下,基于波动光学和微电子学的电子式电流互感器应运而生,其中光学电流互感器随着光纤材料技术的不断发展逐渐成为国内外学者在电力系统检测领域的重要研究方向之一^[6-8]。

目前常见的光学电流互感器有全光纤型和磁光晶体型,但全光纤型电流互感器由于光纤的双折射难以处理,会对法拉第旋转角造成干扰,因此测量灵敏度相对较低。磁光晶体电流互感器需要 Verdet 常数较高的磁光晶体作为核心制作材料,制作成本较高,而且易碎^[9-10]。除此之外,光学电流互感器在小电流测量上精度很低,最高仅达到 0.2 级,这也限制了其在电网中实际挂网运行^[11-12]。针对以上问题,研究设计了一种以马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)为基础的光纤电流互感器,使其满足对工频电流的测量要求。该电流互感器主要以电流的热效应作为设备的信息耦合机制,设计结构简单,制作成本低。通过实验验证其在工频电流的测量上具备精度高、线性度好,对基于热效应的光学电流互感器发展提供了新的设计思想和理念。

1 光纤电流互感器工作原理

MZI 光纤电流互感器从原理上隶属于无源型电子式电流互感器,但与常见的磁光型和全光纤型电流互感器不同的是,其工作原理依赖于测量臂中的热效应^[13-14]。电流采样器完成对一次侧电流的信息采集后,将电流信号传送到微型电阻,所产生的焦耳热改变 MZI 测量臂周围的温度场,进而影响干涉光的变化并被后续的光电探测器设备捕捉到干涉光的信息变化,从而解调获取被测电流的信息,该 MZI 电流互感器基本运行框图如图 1 所示。

1.1 MZI 工作原理

该光纤电流互感器核心为 MZI,同其他干涉仪相比,MZI 结构简单,极少有激光返回到激光器中,因此产生的不稳定噪声干扰较小,其工作原理如图 2 所示。以高稳

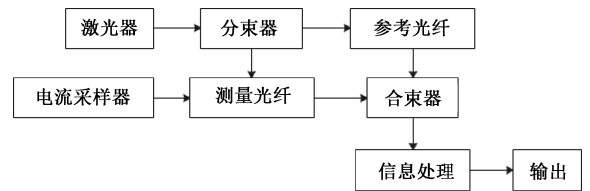


图 1 MZI 电流互感器运行框图

Fig. 1 Operation block diagram of Mach-Zehnder interferometer current transformer

定激光器作为输入信号,发射出的激光束经过分束器分成两束激光重新输出,以两条光纤作为分束后的激光传输通道^[15]。这两条光纤一根为参考臂,一根为测量臂,测量臂外以铜或镍电阻进行缠绕覆盖。当外界物理信号 $S(t)$ 作用到测量臂时,经过测量臂光纤的光束相位会发生变化,进而使得光纤的输出量发生改变,经过测量臂和参考臂的激光最后交汇于合束器,从而发生干涉现象,最后根据干涉光强的变化,达到检测外界信息的目的。

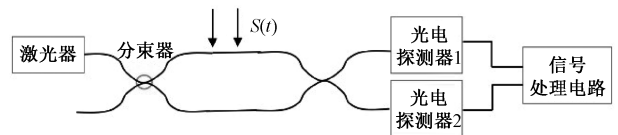


图 2 MZI 工作原理

Fig. 2 Working principle diagram of Mach-Zehnder interferometer

干涉仪中所产生的干涉光强大小可以通过双光束干涉公式表示:

$$P = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos \Delta \varphi \quad (1)$$

式中: P 为干涉光光强,单位为 cd; P_1 和 P_2 分别为通过测量臂和参考臂的光强度, $\Delta \varphi$ 为两相干光之间的相位差。 $\Delta \varphi$ 的大小可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi \Delta n_{eff} L}{\lambda} \quad (2)$$

式中: Δn_{eff} 为测量臂和参考臂之间的有效折射率之差, L 为干涉区域长度, λ 为输入光波长,单位为 nm。从式(2)中可以看出, Δn_{eff} 的改变直接影响到相位差 $\Delta \varphi$ 的大小。温度场对光纤光学性能的改变可以等效为一个作用力 F 施加在测量臂上,从而会引起光纤的折射率 n 和长度 l 发生变化。由 F 引起光纤的相位延迟变化可以表示为:

$$\frac{d\varphi}{dF} = k_0 l \left(\frac{dn}{dF} \right) + k_0 l \left(\frac{dl}{dF} \right) = k_0 l \left(\frac{dn}{dF} + \frac{n}{l} \frac{dl}{dF} \right) \quad (3)$$

式中: φ 为光波相位, F 为等效作用力, k_0 为作用力系数, n 为折射率, l 为应变长度。式(3)中第 1 部分表示折射率 n 引起光波相位的变化,第 2 部分表示热胀冷缩现象引

起光波相位的变化,由于光纤直径尺寸相对变化极为微弱,式(3)中并未考虑。对式(3)整理,用温度变化 ΔT 代替作用力 F 得到:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta T} = \varepsilon_0 l \left(\frac{dn}{dT} \right) + \varepsilon_1 n \left(\frac{dl}{dT} \right) \quad (4)$$

式中: ε_0 为热光系数, ε_1 为热膨胀系数。根据光纤的热光效应和热胀冷缩现象,可知光纤的折射率和长度与温度之间存在公式:

$$dn = \varepsilon_0 n dT \quad (5)$$

$$dl = \varepsilon_1 l dT \quad (6)$$

从式(5)、(6)中可以得出折射率和长度与温度存在

正比关系,式(5)、(6)经过变换可得: $\varepsilon_0 = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$, $\varepsilon_1 = \frac{1}{l}$

$\frac{dl}{dT}$,可以看出热光系数 ε_0 和热膨胀系数 ε_1 与温度不存在关系,属于光纤材料的自身属性,对温度与光纤的折射率之间变化不存在干扰。

1.2 电流-温度调制原理

国标下电流互感器验证公式为:

$$I_{1m}(t) = I_{1m} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos\omega t \right) \quad (7)$$

式中: I_{1m} 为交流电峰值,单位为A; t 为时间,单位为s; τ 为电流暂态分量时间常数; ω 为工频角频率,单位为rad/s。由于一次侧电流较大,通常利用分流器转换为电流信号 I_2 ,再送往电阻,二者关系为:

$$I_{1m} = k_1 I_{2m} \quad (8)$$

根据能量守恒原理,电阻 R 在吸收电流 I 的焦耳热后可建立热平衡公式,如式(9)所示^[16],即牛顿散热公式,其中等式右边第1项为升温部分,第2项为散热部分。

$$I_2^2 R dt = MC dT + \lambda S (T - T_0) dt \quad (9)$$

式中: M 为电阻质量,单位为kg; C 为比热容,单位为 $[W \cdot s / (kg \cdot K)]$; T 为电阻瞬时温度, T_0 为环境温度,单位均为K; λ 为电阻散热系数,单位为 $W / (m \cdot K)$; S 为电阻散热面积,单位为 m^2 ; t 为时间,单位为s。对式(9)进行整理后可得:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I_2^2 R - \lambda S (T - T_0)}{MC} \quad (10)$$

设 $T - T_0 = T_1$,两边求导后可得: $dT = dT_1$,代入式(10)后可得:

$$\frac{dT_1}{dt} + \frac{\lambda S}{MC} T_1 = \frac{R}{MC} I_2^2 \quad (11)$$

联立上述公式可得:

$$\frac{dT_1}{dt} + \frac{\lambda S}{MC} T_1 = \frac{R}{MC} \frac{I_{1m}^2}{(k_1)^2} \left(e^{-\frac{2t}{\tau}} + (\cos\omega t)^2 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos\omega t \right) \quad (12)$$

对式(12)中的 T_1 进行积分求导后可得:

$$T_1 = \frac{R I_{2m}^2}{2\lambda S} + \left[\frac{-R I_{2m}^2}{\lambda S \left(1 - \frac{2\tau_R}{\tau} \right)} - \frac{R I_{2m}^2 + 2R I_{2m}^2 (\tau_R \omega)^2}{\lambda S + \lambda S (\tau_R \omega)^2} + \frac{2R I_{2m}^2 - 2R I_{2m}^2 \frac{\tau_R}{\tau}}{\lambda S \left(1 - \frac{\tau_R}{\tau} \right)^2 + \lambda S (\tau_R \omega)^2} \right] e^{-\frac{t}{\tau_R}} + \frac{R I_{2m}^2}{\lambda S \left(1 - \frac{2\tau_R}{\tau} \right)} e^{-\frac{t}{\tau_R}} + \frac{R I_{2m}^2}{2\lambda S [1 + 4(\tau_R \omega)^2]} [\cos 2\omega t + 2\tau_R \omega \sin 2\omega t] - \frac{2R I_{2m}^2 e^{-\frac{t}{\tau}}}{\lambda S \left(1 - \frac{\tau_R}{\tau} \right)^2 + \lambda S (\tau_R \omega)^2} \left[\left(1 - \frac{\tau_R}{\tau} \right) \cos\omega t + \tau_R \omega \sin\omega t \right] \quad (13)$$

在式(13)中, $\frac{\lambda S}{MC}$ 又等于 $\frac{1}{\tau_R}$, τ_R 为电阻 R 的升温时间常数,单位为s,属于自身材料属性,可以通过选择合适的微纳电阻来降低 τ_R 的大小,以减少动态测量的滞后性,目前市面上利用光刻工艺制造的微型电阻其升温速度已满足互感器动态响应要求。当 t 趋于无穷大时,式(13)化简可得:

$$T_1 = \frac{R}{\lambda S} I_{2m}^2 \quad (14)$$

上述公式即为稳态情况下的信号电流通过电阻的升温公式,可以得出电阻由于电流热效应所产生的温度与电流大小的平方存在线性关系,因此可以用于光纤电流互感器的信号处理中,以完成干涉光强到电流大小的信息解调。

2 结构与仿真分析

2.1 MZI 换光纤电流互感器结构设计

在MZI电流互感器中,对一次侧电流信息的获取作为互感器运行第1步,需要保证电流采样器的准确性和灵敏性。通常采用电阻分流器,但是由于自身功率较大,在长时间运行时会影响测量准确度,因而导致电流互感器的精度低。而罗氏线圈作为有源型电子式电流互感器的一次侧常见感电装置^[17],结构简单,在对一次侧电流信息的获取上具备高灵敏度和线性度。本文提出的光纤电流互感器由于需要从一次侧母线获取信号电流,须接入电流采集装置,并保证采样结果准确的情况下,可长时间稳定运行,因此采用罗氏线圈与微型电阻串联构成回路以承担电阻分流器的作用。考虑到传统罗氏线圈在小电流的信息采集中存在精度不足的问题,电流采样器将

使用 PCB 型罗氏线圈^[18]。线圈的骨架采用高强度、高韧性的 ABS 原材料进行制作,由 PCB 厂家负责打印完成,最大程度上保证电流采样的准确性和灵敏性,打印完成的 PCB 罗氏线圈如图 3 所示。



图3 PCB 罗氏线圈
Fig. 3 PCB Rogowski coil

早期的测温型光纤电流互感器都是将铜、镍等热传导性较好的金属或者电阻和测量光纤直接贴合或者镀膜在光纤外表,但这些方式对镀膜的工艺精度要求高,如果出现镀膜不均匀容易造成灵敏度下降和响应时间的延迟。针对上述问题,提出的光纤电流互感器将干涉仪测量臂光纤均匀的缠绕在电阻外面,同时为了保证测量臂光纤不受外界温度的干扰,还将在测量臂部分加上保温腔体^[19]。

关于保温腔体的结构,除了采用保温材料进行初步隔绝外部环境温度的干扰外,在靠近测量臂的内侧部分设置有独特的真空腔体,防止电阻所产生焦耳热的温度发生热传导溢散。此外,腔体外壳需要选择导热性能较好的材料,这样当外界环境处于剧烈变化或者受温度影响不均匀的情况下,外壳可以及时将热量迅速送开,形成均匀分布的温度场,有利于保温体较好的隔绝外界温度,最大程度上保证测量结果的精确性,避免外界环境因素的干扰。保温腔体的具体结构剖面如图 4 所示。

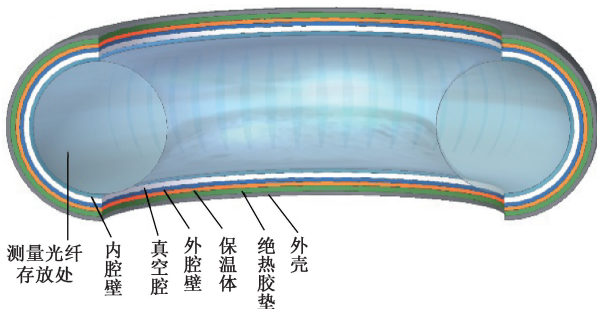


图4 MZI 测量臂保温腔体剖面图

Fig. 4 Sectional view of the thermal insulation cavity of the MZI measuring arm

此外,为了保证电流互感器运行的稳定性,激光源选择具备自动温度调控的高稳定光源,以保证输出功率的稳定性^[20]。发射出的激光束经过光纤分路器分为 1:1 的相干光输出。由于测量臂光纤受温度场影响,其光学性能发生改变,经过它的激光束也受到一定的影响,然后测量光束和参考光束在合束棱镜中发生干涉现象。干涉光光强由光电探测器采集并传输到信号处理系统完成滤波降噪等处理,进一步提高互感器的测量精度,最后输出到示波器等显示装置,达到对工频小电流的检测目的。最终设计完成的 MZI 光纤电流互感器运行结构如图 5 所示。

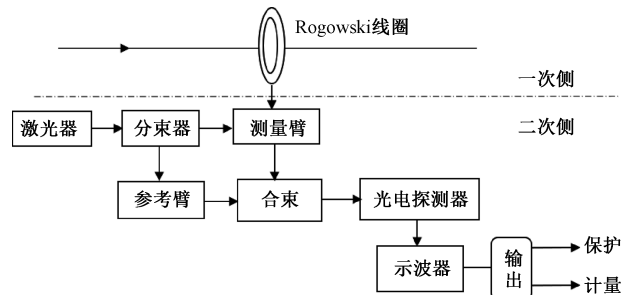


图5 MZI 光纤电流互感器运行结构图

Fig. 5 Operation structure of MZI fiber optic current transformer

2.2 电阻焦耳热有限元分析

采用 COMSOL Multiphysics 5.4 仿真软件完成对微型电阻的建模仿真,圆柱体截面半径 $r = 0.5 \text{ mm}$,高度 $h = 10 \text{ mm}$,材料主要参数设置:导热系数 $400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、恒压热容 $385 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、电阻率 $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。选择固体传热模式,并将物理场设置为电磁热,研究计算选择稳态情况,然后完成构建对象和网格划分,得到如图 6 所示效果图。

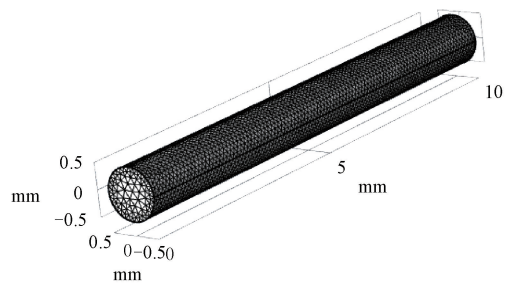


图6 网格划分

Fig. 6 Mesh division diagram

完成模型构建后,添加电流模块到模型组建上,使其充作流经电阻的信号电流。通过改变流经电阻的电流值大小,进行多组重复计算仿真,根据计算仿真数据结果得出电流与温度之间的关系,如图 7 所示。

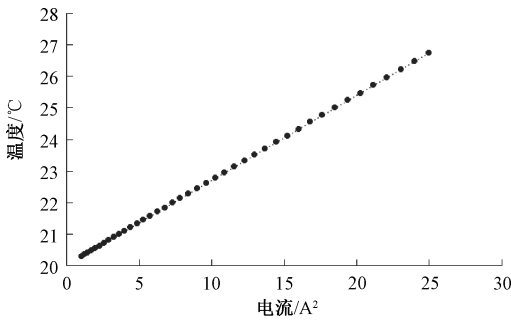


图7 电流与温度关系

Fig. 7 The relationship between current and temperature

由图7分析可得,随着流经电阻的电流值增大,温度也逐渐升高,图中数据拟合式为 $y = 0.2692x + 20.024$,拟合度 $R^2 = 0.9993$,可以较好地满足温升公式(式(13))。从拟合度上分析,COMSOL 仿真数据在 MZI 型电流互感器的数据处理中具备良好的参考性。

2.3 动态响应仿真分析

为解决电流互感器的动态测量问题,需要尽可能保证微型电阻的温度变化跟上瞬时电流的改变,而影响电阻温升变化快慢的主要关键参数是电阻的温升时间常数 τ_R 。

为直观分析 τ_R 对相应时间的影响,此处对式(11)进行整理可以得到:

$$\frac{I_2^2 R}{MC} = \frac{dT'}{dt} + \frac{T'}{\lambda S} \quad (15)$$

式中: $\frac{MC}{\lambda S} = \tau_R$, 即温升时间常数,单位为 s。对式(15)求解后,得出关于电阻温升时间的表达式:

$$T'(t) = \frac{I_2^2 R}{\lambda S} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}}) \quad (16)$$

其中, $\frac{I_2^2 R}{\lambda S} = T_w$, T_w 为电阻的稳态温升。根据式(15)

可以绘制曲线如图8所示。

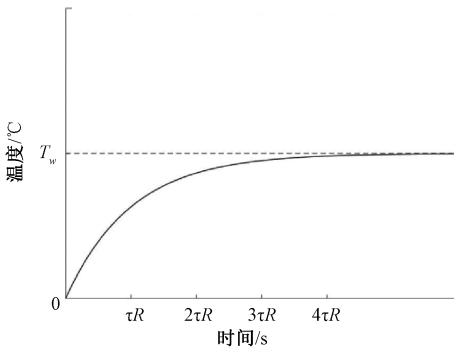
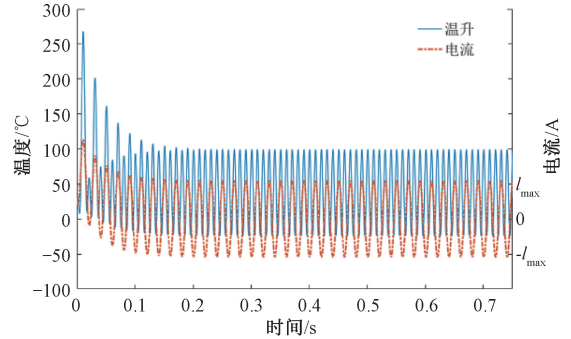


图8 电阻温升曲线

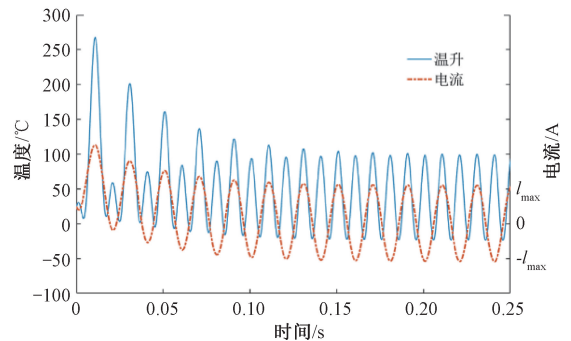
Fig. 8 Resistance temperature rise curve

从图8中可以看出电阻的升温过程大约在 $4\tau_R$ 后达到稳定值,因此为了提高电流互感器的响应速度,可以通过选择温升时间常数较小的电阻来满足测量要求。

为了更加清晰的观测微型电阻跟踪电流的响应情况,采用 MATLAB 对式(13)进行仿真计算。电流频率按照工频电流标准设置为 50 Hz,暂态电流时间常数按照国标设置为 80 ms,稳态温升按照微型电阻材料属性设置为 75°C,电阻的温升时间常数设置为 1 ms,运行程序得到曲线如图9所示。



(a) 整体响应图
(a) Integral response diagram



(b) 局部响应图
(b) Partial response diagram

图9 电阻温升响应曲线

Fig. 9 Resistance temperature rise response curve

从图9中可以看出当电阻的温升系数在 1 ms 时,电阻的温度响应变化速度与电流变化速度基本同步,因此可以较好的完成对电流的动态测量。随着光刻技术的发展,对于微型电阻的制备已更加成熟。2015 年有学者使用 SU-8 2002 和碳纳米管复合材料,通过光刻工艺完成的微型电阻制备已达到微米级别^[21],进一步降低了电阻的温升时间常数,使得对电流测量的动态响应时间进一步缩短。

3 信号处理系统设计与仿真分析

在测量过程中,由于设备在信号采集、传输过程中会受到外界环境因素以及自身电子元器件内部因素的影响从而产生噪声信号,易对电流互感器的灵敏度以及测量精度造成干扰,因此需要设计相应的信号处理系统,完成

滤波去噪工作。相比于常见的 DSP 处理系统, FPGA 由于具备多个门阵列和内存块, 可在保证系统高精度稳定运行的同时, 实现多路并行信号处理, 具有更强大的信号处理优势^[22-23]。因此, 将采用 FPGA 作为信号处理系统的平台核心, 并以 Altera 公司的 EP4CE15F23C8N 芯片作为信号处理系统的主控芯片, 其总体电路设计框图如图 10 所示。

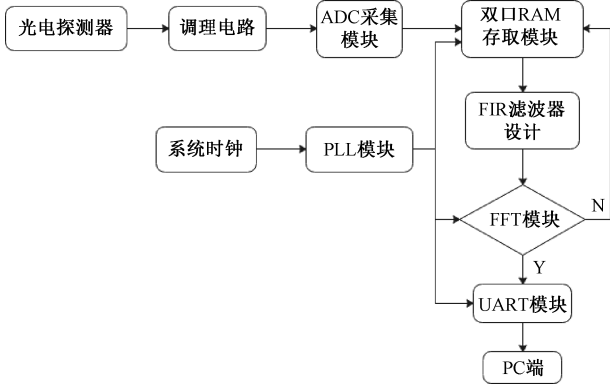


图 10 基于 FPGA 的信号处理系统运行框图

Fig. 10 FPGA-based signal processing system operating block diagram

信号处理系统采用模块化来设计电路逻辑, 主要包括调理电路、ADC 采集模块、PLL 模块、存取模块、FIR 滤波器模块、UART 模块等。其中调理电路主要针对光电转换过程中出现的信噪频谱重叠问题, 通过频率搬移将待测信号进行高频数字调制, 从而完成与噪声信号的隔离, 并将待测信号转化为可供 ADC 模块采集的信号参量, 最后发送到双口 RAM 存取模块进行信息交互。同时由于各个模块所需的时钟信息不同, 系统采用的是相位锁定环路 (phase-locked loop, PLL) 得到时钟的脉冲信息, 利用 PLL 的倍频功能和分频功能相互搭配以提供各个模块所需的时钟频率。

滤波模块作为信号处理系统的核心, 为了更好地满足国标对电流测量装置的要求, 采用高精度、高灵敏性的有限脉冲响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器, 以滤除光电转换环节产生的噪声, 其结构如图 11 所示, 主要包括移位寄存器模块 (shift_register) 和乘加计算模块 (calculator), 其中 $X(n)$ 、 $Y(n)$ 分别为输入、输出数据流, b_m 为连接各级输入、输出的抽头系数。

本系统采用的是 FIR 低通滤波器, 信号处理原理主要是将输入信号与滤波器系数进行卷积的过程, 其中滤波器在时域上原理表达式为:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{n-1} h(i)x(n-i) \quad (17)$$

式中: $x(n-i)$ 为延时 i 个抽头的输入信号, $h(i)$ 为第 i 级抽头系数, $y(n)$ 为滤波后信号。其中各级抽头系数参数

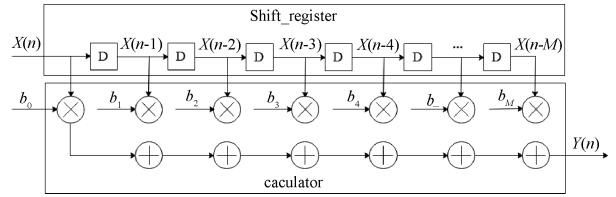


图 11 FIR 滤波器结构示意图

Fig. 11 Diagram of FIR filter structure

采用 MATLAB 中的滤波器设计与分析工具箱 (filter design & analysis TOOL, FDA TOOL) 进行设计得到。

FIR 滤波器设计完成后, 采用 ModelSim 软件完成仿真验证。为了更直观的观察滤波处理结果, 系统采用离散傅里叶变换的快速算法将时域信号转化为频域信号, 得到其幅频特征曲线以方便分析处理信号, 最后通过 UART 模块送往 PC 端进行示波。

ModelSim 的仿真运行结果如图 12 所示。其中前 3 行分别是频率为 70, 60 和 50 Hz 输入信号, 第 4 行为输入的待处理信号, 由前 3 行不同频率的信号波合成。通过对滤波器程序设计, 对待处理信号中超过工频 50 Hz 的信号 (噪声) 实施滤除, 最后只保留 50 Hz 频率的信号波形在末端完成输出。

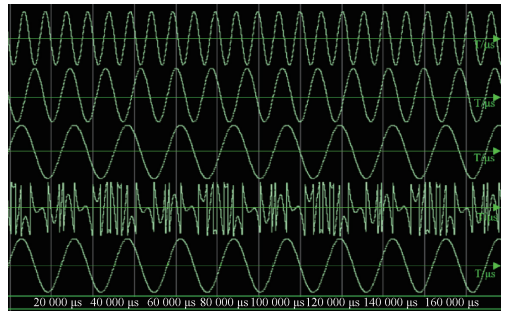
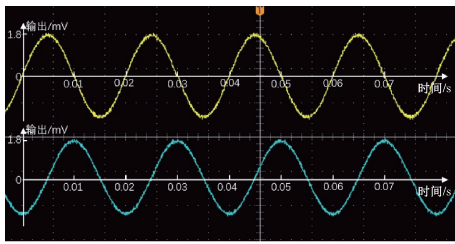


图 12 FIR 数字滤波器仿真结果图

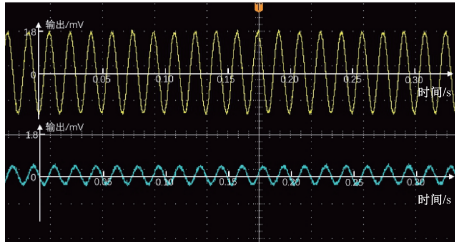
Fig. 12 FIR digital filter simulation result diagram

通过 ModelSim 的仿真结果可得, 经过滤波器后的信号只保留了特定频段的波形, 证明已将干扰噪声滤除, 滤波器设计符合测量要求。当仿真结果满足预期设计要求后, 在 FPGA 开发板完成进一步实物测试。

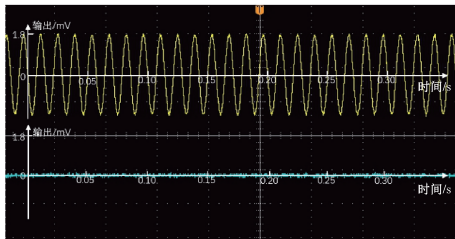
通过下载器在 PC 机与 FPGA 之间建立通讯连接, 然后将 FPGA 与示波器两通道进行相连以方便观察数据。保持电流输入大小不变, 通过改变输入信号的频率, 得到示波器输出的信号图如图 13 所示, 示波器上层信号分别是输入的不同频率待处理信号, 滤波程序按照工频 50 Hz 作为阻带, 下层信号是经过滤波后的信号波形, 用来判断程序是否完成对高频信号 (噪声) 完成滤除。



(a) 输入频率为50 Hz
(a) The input frequency 50 Hz



(b) 输入频率为60 Hz
(b) The input frequency 60 Hz



(c) 输入频率为70 Hz
(c) The input frequency 70 Hz

图 13 示波器显示信号图

Fig. 13 Oscilloscope display signal diagram

通过图 13 可以得出,当待处理信号包含 50 Hz 以上的信号(噪声)时,信号处理系统会对其进行滤除,从结果 B、C 可以看出对于频率越高的信号(噪声)滤波性能越好,满足实际测量需求。

4 实验分析和讨论

4.1 MZI 线性度实验

根据第 3 节的结构设计搭建相应的等效实验测试平台。首先搭建 MZI 的线性度实验平台,所需器材有高稳定光纤半导体激光器、光纤分路器、单模光纤、光纤准直镜、空间光耦合器、CCD 相机和监视器。按实验要求搭建干涉仪测试平台后,通过监视器可以观测到干涉条纹的变化,设置 25°C 对应条纹为 0 刻度参考值,利用加热台对测量臂光纤进行加热,记录不同温度下干涉条纹的移动格数,根据实验数据绘制出点线图如图 14 所示。

由图 14 分析可得,随着温度的升高,干涉条纹也逐渐进行漂移,温度也逐渐升高,对其进行线性拟合后得到公式 $y = 13.899x - 345.95$,拟合系数 $R^2 = 0.9993$,可见搭建的 MZI 的线性度良好,可以很好地满足国标对 0.2 级电流互感器的精确度要求。

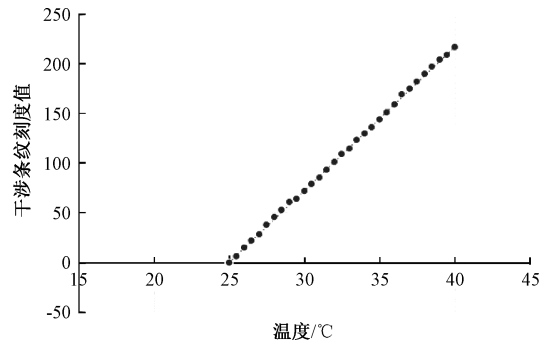


图 14 干涉条纹随温度变化关系图

Fig. 14 Interference fringes as a function of temperature

4.2 MZI 电流互感器工频电流测试实验

通过上面的线性度实验,保证了后续工频实验的准确性。采用工频电压源和变阻器构成等效稳定的工频电流源。将等效电流源和热敏电阻串联后,将测量臂光纤均匀的缠绕在热敏电阻上,然后拆除试验台上的相机和监视器,安装光电探测器和 FPGA 信号处理系统完成对干涉光的检测解析,并输出到 PC 机上进行示波。重新搭建的实验平台如图 15 所示。

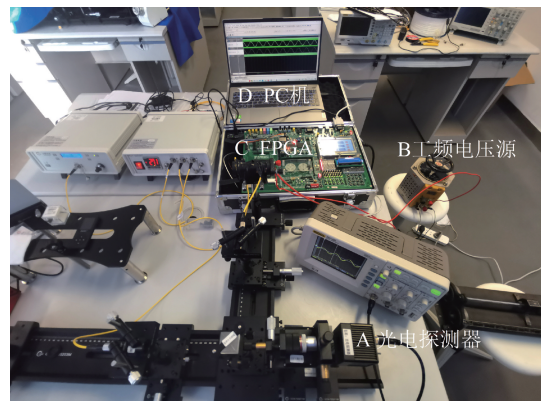


图 15 工频电流测试平台

Fig. 15 Power frequency current test platform

工频电流测试平台搭建好后,接通电源,输出 0~6 A 的工频电流,通过光电探测器采集光信号并转换传输至 FPGA 信号处理系统中完成数据处理,最后通过射频转接线发送到示波器上完成读数。示波器显示信号如图 16 所示。经过计算,通过 FPGA 信号处理系统滤波之后波形的信噪比提高到了 32 dB。

改变输入工频电流的大小,重复试验并记录输出电压信号。得到输入电流大小的平方与示波器输出电压的拟合曲线图,如图 17 所示。拟合公式为 $y = 0.0098x + 1.6951$,相关系数 $R^2 = 0.9961$,具备较好的线性测量度。

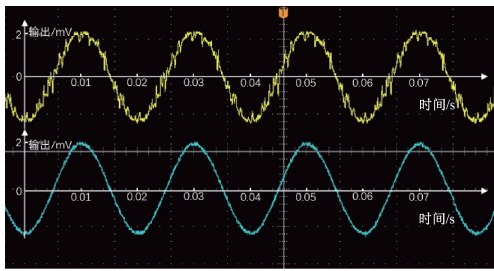


图 16 示波器显示信号

Fig. 16 Oscilloscope display signal

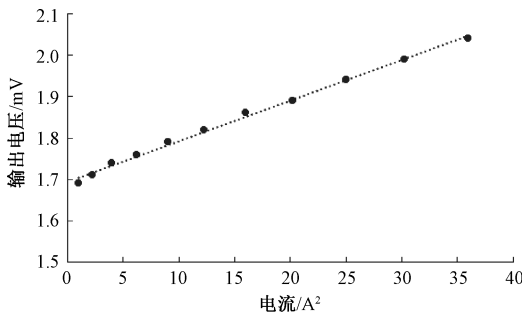


图 17 工频电流的平方与输出电压关系

Fig. 17 The relationship between the square of the power frequency current and the output voltage

为了对比本文所设计的光学电流互感器,采用常见的磁光型光学电流互感器在相同环境下对 0~6 A 工频电流进行上述重复试验,根据测量结果绘制相应点线图,如图 18 所示。拟合公式为 $y=0.07x+0.4842$, 相关系数 $R^2=0.9957$ 。

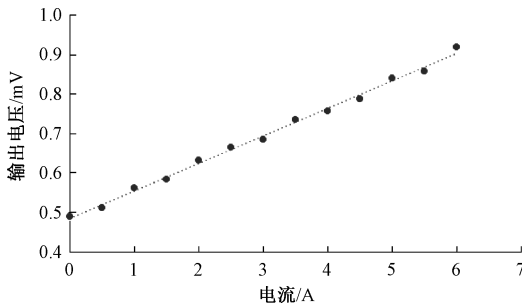


图 18 输入工频交流与电压关系

Fig. 18 Input power frequency AC and voltage relationship

通过对比得出本文设计光纤电流互感器相较于常见光学电流互感器线性度提升了 0.04%^[24-25]。此外,通过计算得到 MZI 电流互感器输出各电压信号对应的电流测量值,考虑到电流源老化问题,利用 DLB-1 型高精度交、直流电流表对实际输入工频电流进行测量,得到如表 1 所示数据。

表 1 电流输入与实际测量值数据

Table 1 Current input and measured value data

实际输入电流/A	电流测量值/A	比差/%
1.014	1.016	0.19
1.519	1.521	0.13
2.025	2.029	0.19
2.480	2.478	-0.08
2.995	2.991	-0.01
3.507	3.511	0.11
3.986	3.983	-0.08
4.500	4.508	0.18
5.012	5.019	0.14
5.550	5.560	0.18
5.990	5.980	-0.17

按照相对误差公式:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{i^2} \times \sum_1^i \left(\frac{I_a - I}{I} \right)^2} \times 100\% \quad (18)$$

式中: i 为实验次数, I_a 为表 1 中的电流测量值,单位为 A; I 为表 1 中的电流输入值,单位为 A,通过计算得到本文设计的光纤 MZI 电流互感器误差为 0.14%,满足国标下对电流互感器 0.2 级的比差测量精度要求。

5 结 论

针对传统电流互感器存在的线性度低、抗干扰力弱及精度低等问题,设计了一种基于 MZI 的光纤电流互感器。通过与 PCB 型罗氏线圈结合实现高效稳定的电流信息采集,同时由于一次侧不存在积分器等电光转换装置,避免了供能问题。同时针对信号采集、传输、处理过程中出现的噪声信号,设计基于 FPGA 技术的信号处理系统,经过滤波去噪后信噪比可达到 32 dB。最后搭建工频交流电测量平台,完成对工频 0~6 A 交流电的测量,实验结果表明,本文提出的光纤电流互感器相较于传统光学电流互感器具备更好的线性度关系,并通过计算得出该电流互感器的测量误差为 0.14%,满足国标对 0.2 级电流互感器比差测量要求,对电流测量技术和测温型电流互感器的发展具有重要参考价值。

参考文献

[1] 朱梦梦, 罗强, 曹敏, 等. 电子式电流互感器传变特性测试与分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 143-149.
ZHU M M, LUO Q, CAO M, et al. Test and analysis of transfer characteristics of electronic current

- transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 143-149.
- [2] 李敏, 靳绍平, 胡琛, 等. 高压电流互感器泄漏电流测量及消除方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 156-163.
- LI M, JIN SH P, HU CH, et al. Research on leakage current measurement and elimination method of high voltage current transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 156-163.
- [3] VACLAV G, PAVEL R, JAN B. DC current sensor using switching-mode excited in-situ current transformer[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 500: 166370.
- [4] 邵庆祝, 谢民, 王同文, 等. 带有自供电功能的电流测量传感器的设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 155-162.
- SHAO Q ZH, XIE M, WANG T W, et al. Design of a current measuring sensor with self-power supply function[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 155-162.
- [5] LU W, DUAN J, SUN Q, et al. Research status and prospective on current transformer saturation recognition[C]. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia), 2019: 2589-2594.
- [6] 齐跃峰, 冯麒, 张瑾, 等. 基于无源相位调制器的光纤电流互感器设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 99-107.
- QI Y F, FENG Q, ZHANG J, et al. Design of fiber-optic current transformer based on passive phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 99-107.
- [7] 刘丰, 马文龙, 郭璇. EVA增敏的光纤光栅径向压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 51-59.
- LIU F, MA W L, GUO X. Study on radial pressure sensing characteristics of EVA sensitivity enhanced fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 51-59.
- [8] 齐跃峰, 贾翠, 许丽媛, 等. 基于少模光纤组合传感器的温度及折射率传感特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 855-860.
- QI Y F, JIA C, XU L Y, et al. Temperature and refractive index sensing properties based on combined sensor for few mode fiber[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 855-860.
- [9] 克帕依吐·吐尔逊, 李明, 汪齐, 等. 石榴石型直流光学电流互感器及其稳定性研究[J]. *电气工程学报*, 2021, 16(2): 149-158.
- KEPAIYITULLA T, LI M, WANG Q, et al. Research on garnet type DC optical current transducer and its operating stability[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(2): 149-158.
- [10] LIU C, SHEN T, WU H B, et al. Applications of magneto-strictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 65: 102634.
- [11] 邸志刚, 贾春荣, 王文轅, 等. 一种用于小电流测量的电子式电流互感器传感头研究与设计[J]. *仪器仪表学报*, 2006(S1): 334-336.
- DI ZH G, JIA CH R, WANG W Y, et al. Research and design of sensor head of electronic current transformer for low amplitude current measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006(S1): 334-336.
- [12] 孙腾飞. 小电流电子式电流互感器研究与设计[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- SUN T F. Research and design of small current electronic current transformer [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [13] LIU T, HUANG J W, DING H, et al. LOFTS: Liquid core capillary based optical fiber fluorescence temperature sensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102879.
- [14] 宋晓利, 白育堃, 任广军, 等. 液体填充光子晶体光纤中周期光栅的温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 138-142.
- SONG X L, BAI Y K, REN G J, et al. Analysis of temperature sensing characteristics of a long-period grating formed in a liquid-filled photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 138-142.
- [15] 杨杜兵, 张家洪, 陈福深, 等. 铌酸锂集成MZI型光波导大电流传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(11): 87-95.
- YANG D B, ZHANG J H, CHEN F SH, et al. Lithium niobate integrated MZI optical waveguide high current sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 87-95.
- [16] 贾丹平, 伞宏力, 苑玮琦, 等. 基于光纤测温法的电流互感器[J]. *电工技术学报*, 2008(10): 47-52.
- JIA D P, SAN H L, YUAN W Q, et al. Current transformer based on optical fiber thermometry [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008(10): 47-52.
- [17] WALDI E P, LESTARI A I, FERNANDEZ R, et al. Rogowski coil sensor in the digitization process to detect

- partial discharge [J]. *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2020, 18(2): 1062-1062.
- [18] 邸志刚, 孙腾飞, 贾春荣. 新型传统 Rogowski 线圈的设计与研究[J]. *电力电子技术*, 2020, 54(3): 36-39.
DI ZH G, SUN T F, JIA CH R. Design and research of new traditional rogowski coil [J]. *Power Electronics*, 2020, 54(3): 36-39.
- [19] 杨汉瑞, 杨燕, 黄蔚梁, 等. 光纤环保温腔体设计及其性能分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 89-97.
YANG H R, YANG Y, HUANG W L, et al. Design and performance analysis of a fiber optic ring heat-off spool[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 89-97.
- [20] 任广军, 姚建铨. 双端泵浦保偏光纤激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(4): 863-865.
REN G J, YAO J Q. Double-end pump polarization-maintaining fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 863-865.
- [21] 赵龙, 段俊萍, 张斌珍, 等. 微型薄膜电阻的制备及研究[J]. *电子器件*, 2015, 38(6): 1240-1244.
ZHAO L, DUAN J P, ZHANG B ZH, et al. Preparation and research of micro film resistor[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2015, 38(6): 1240-1244.
- [22] 任广辉, 王刚毅, 金炎胜. 利用 FPGA 的高性能向导滤波器设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 537-542.
REN G H, WANG G Y, JIN Y SH. High performance FPGA architecture of guided filtering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 537-542.
- [23] 赵思娴, 万敏杰, 钱惟贤, 等. 可见光视频去噪及其 FPGA 硬件实现[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(15): 1868-1879.
ZHAO S X, WAN M J, QIAN W X, et al. Visible light video denoising and FPGA hardware implementation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(15): 1868-1879.
- [24] 李晓明, 何照胜, 徐志超. 磁光式电流互感器模型与测量性能分析[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(7): 61-65.

LI X M, HE ZH SH, XU ZH CH. Analysis on the model and measuring performance of MOCT [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(7): 61-65.

- [25] 李振华, 王尧, 孙婉楨, 等. 光学电流互感器的研究现状分析[J]. *变压器*, 2018, 55(5): 33-38.

LI ZH H, WANG Y, SUN W ZH, et al. Analysis of research status of optical current transformer [J]. *Transformer*, 2018, 55(5): 33-38.

作者简介



邸志刚, 1999 年于河北师范大学获得学士学位, 2005 年于燕山大学获得硕士学位, 2011 年于天津大学获得博士学位, 现为华北理工大学副教授, 主要研究方向为光电检测技术、新型光纤传感研究与应用。
E-mail: dzg0512@126.com

Di Zhigang received his B.Sc. degree from Hebei Normal University in 1999, received his M.Sc. degree from Yanshan University in 2005, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2011. He is currently an associate professor at North China University of Science and Technology. His main research interests include photoelectric detection technology and application of new optical fiber sensing.



陈佳旗, 2020 年于郑州轻工业大学获得学士学位, 现为华北理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光电检测技术及仪器。
E-mail: 2016333718@qq.com

Chen Jiaqi received his B.Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2020. He is currently a master student at North China University of Science and Technology. His main research interests include photoelectric detection technology and instrument.



贾春荣 (通信作者), 1999 年于河北师范大学获得学士学位, 2002 年于燕山大学获得硕士学位, 现为华北理工大学教授, 主要研究方向为光电检测技术研究与应用。
E-mail: jer0107@ncst.edu.cn

Jia Chunrong (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Hebei Normal University in 1999, and received her M.Sc. degree from Yanshan University in 2002. She is currently a professor at North China University of Science and Technology. Her main research interests include research and application of photoelectric detection technology.