

基于多量程控制罗氏线圈标准电流互感器研究

袁亮¹ 张旭乐¹ 张贺¹ 赵盼盼¹ 张凯²

(1. 许继集团有限公司 许昌 461000; 2. 国网商丘供电公司 商丘 476000)

摘要:用于电流互感器准确度校验的标准电流互感器为铁磁式、多引线抽头结构,二次侧存在开路高压危险。在校验时需更换一次导线缠绕匝数和二次出线接线柱。基于罗氏线圈电子式互感器制造技术,通过高精度罗氏线圈和多量程控制系统方案设计,研制了0.05级罗氏线圈标准电流互感器,可满足从5~5 000 A不同量程额定一次电流校验要求。罗氏线圈标准电流互感器实现将一次电流信号转换为标准数字信号,具有无铁芯、质量轻、体积小等优势,同时,还具有高线性度、宽范围测量、频率响应范围宽及开放协议等特点,能够满足数字信号发展的电子互感器准确度校验要求。

关键词:高精度罗氏线圈;标准电流互感器;数字信号;准确度校验

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Research on multiscale control standard current transformer by Rogowski coil

Yuan Liang Zhang Xule Zhang He Zhao Panpan Zhang Kai

(1. XJ Group Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Shangqiu Electric Power Corporation, Shangqiu 47600, China)

Abstract: The standard current transformer using for calibration of current transformer is ferromagnetic and multiple tap structure, which secondary side exists the high voltage danger when in open circuit. It is needed to change high side wire coils and secondary outlet terminal when measuring the accuracy of calibration. Based on the Rogowski coil electronic transformer technology, through high precision Rogowski coils and the design of multiscale control system, this paper developed the standard current transformer of 0.05 level by Rogowski coil, which can meet the accuracy calibration from 5 A-5000 A in different rated primary electricity flow. By using Rogowski coil and high precision digital multirange control system, it can convert current signal into standard digital signal. Rogowski coil has not iron core, and has the advantages such as light quality, small volume, meanwhile, it also has high linearity wide measuring range, wide frequency response range and have open protocols, and it can meet the development of digital signal electronic transformer calibration accuracy requirements.

Keywords: high precision Rogowski coil; standard current transformer; digital signal; the accuracy of calibration

1 引言

电磁式电流互感器为铁芯式结构,存在重量重、铁芯谐振、磁滞饱和、波形畸变^[1-2]及二次测量高压等局限。与电磁式电流互感器相比,电子式电流互感器是采用罗氏线圈做传感头,以光纤作为信号传输媒质,把高压母线电流转换为光信号传输到低压端,并完成对电流线性实时测量的装置,具有隔离性好、测量频带宽、测量范围广、体积小、重量轻等优势^[3]。随着智能化电网技术飞速发展,坚强智能电网成为未来发展方向,电流传感器在电能计量和设备保护中的作用变得十分关键,在电网运行中,电流互感器

是重要的一次设备^[4-6],目前以罗氏线圈为代表的电流互感器已广泛应用于智能输变电领域一次电流的保护和测量。

在2010年前,受罗氏线圈骨架加工工艺及绕线水平限制,线圈转变精度基本为0.5%。随着智能变电站建设推进,促使罗氏线圈研制技术提升,罗氏线圈电流互感器精度为0.2%。本文基于罗氏线圈电子式电流互感器研制技术,通过罗氏线圈研制精度提升技术及多量程控制关键技术,实现罗氏线圈电流互感器从5~5 000 A不同额定一次电流测量精度为0.05%,可用于标准电流互感器校验及计量应用,同时输出为标准数字信号,满足数字化

一次设备校验需求。

2 标准电流互感器测量原理

2.1 铁芯式标准电流互感器

铁芯式标准电流互感器由铁芯、绕组及抽头引线组成,测量原理如图1所示。

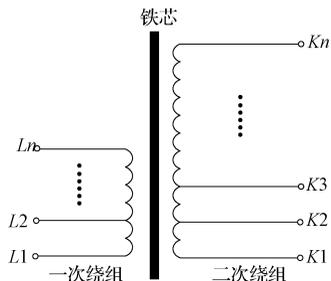


图1 铁芯式标准电流互感器原理

铁芯式标准电流互感器一次绕组通过被测额定一次电流 I , 缠绕匝数为 N_1 , 根据测试档位选取 L_1, L_2, \dots, L_n 不同引线抽头调节一次绕组匝数; 二次绕组输出为 5 A 标准电流信号, 缠绕匝数为 N_2 , 根据测试档位, 选取 K_1, K_2, \dots, K_n 不同引线抽头调节二次绕组匝数并满足 $N_1/N_2=5/I$, 实现不同额定一次电流下, 二次输出为 5 A 标准信号传变。

铁芯式标准电流互感器校验时, 二次侧存在开路高压危险, 同时, 还存在更换一次导线缠绕匝数和二次接线柱等麻烦。

2.2 罗氏线圈标准电流互感器

罗氏线圈是在非导磁骨架材料上, 紧密且均匀地缠绕一定匝数线匝, 将待测电流信号转化为感应电压信号^[7]。罗氏线圈的标准电流互感器由高精度罗氏线圈、多量程控制系统、信号调理及采集系统和通信接口组成, 将不同额定罗氏线圈传变的一次电流转换为标准数字信号, 满足从 5~5 000 A 不同额定一次电流测量, 测量准确级为 0.05 级, 结构如图 2 所示。

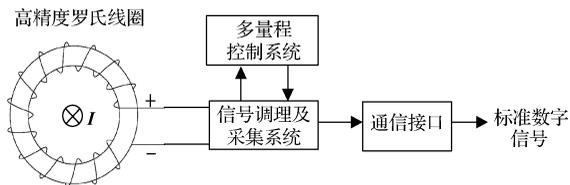


图2 罗氏线圈型标准电流互感器原理

如图 2 所示, 高精度罗氏线圈采用先进骨架加工工艺、绕线技术和多层屏蔽技术, 保证被测额定一次电流信号稳定、可靠传变, 裸线圈传变精度可达 0.1%。

多量程控制系统通过控制信号调理与采集系统, 将不同额定一次电流下罗氏线圈输出的不同感应电压信号

转换为标准数字信号, 实现额定一次电流多量程校验要求。

信号调理及采集系统为基于 FPGA 的数字采集模块, 主要由信号调理、积分单元、A/D 转换单元及采集软件组成, 实现将高精度罗氏线圈转化的模拟电压信号转换为标准数字信号^[8-10]。

通信接口将信号调理及采集系统处理后标准数字信号经过光纤输出到外部接口, 实现额定一次电流标准数字信号采集与传输。

3 多量程控制系统方案研究

基于电磁感应定理, 高精度罗氏线圈在被测额定一次电流 $i(t) = I \times \sin(\omega t + \theta)$ 作用下产生感应电动势 $e(t)$ 为:

$$e(t) = -\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \times \omega I \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; N 为罗氏线圈匝数; h 为罗氏线圈骨架高度; r_2 为罗氏线圈骨架外径; r_1 为罗氏线圈骨架内径。

由式(1)可得, 高精度罗氏线圈在不同额定一次电流 I 作用下产生的感应电动势会随之变化, 为完成不同额定一次电流互感器准确度校验功能, 需通过多量程控制系统设计, 满足在不同额定一次电流 I 作用下, 罗氏线圈标准电流互感器二次输出标准数字量为定值。可通过以下方式实现:

1) 高精度罗氏线圈感应的模拟电压信号 $e(t)$ 先经过高电阻网络调理后, 输出为定值 u_0 , 然后经信号调理及采集系统完成数字信号处理;

2) 高精度罗氏线圈感应的模拟电压信号 $e(t)$ 转换为数字信号后, 通过程序配置运算系数, 完成数字量运算, 输出额定值标准数字信号。

3.1 基于模拟信号调理的多量程控制系统设计

基于模拟信号调理的多量程控制系统设计, 主要对高精度罗氏线圈感应的模拟电压信号进行信号调理, 实现在不同额定一次电流 I 下, 二次输出为标准数字信号, 方案设计原理如图 3 所示。

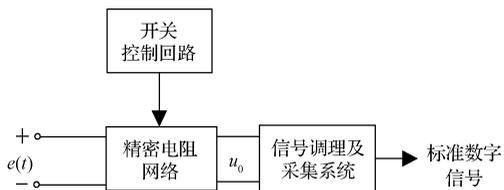


图3 模拟信号调理

如图 3 所示, 高精度罗氏线圈感应的模拟电压信号 $e(t)$, 通过开关控制回路接入到精密电阻网络, 经过信号调理后, 输出恒定电压信号 u_0 , 经信号调理及采集单元处理后, 输出标准数字信号。

1) 精密电阻网络

选取额定电流为 600 A 高精度罗氏线圈, 设其感应电压输出 $e(t) = u_0$ 。根据不同额定一次电流测量档位, 选取不同阻值的高精度电阻, 完成对高精度罗氏线圈模拟电压信号 $e(t)$ 的分压调理, 使输出电压为恒定值 u_0 。忽略高精度罗氏线圈杂散分布电容, 则在测量档位 n 时, 对应于该档位的等效电阻分压原理如图 4 所示。

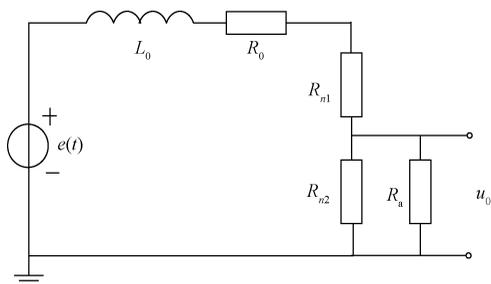


图4 罗氏线圈等效电阻网络分压原理

由式(1)得, 罗氏线圈感应电压信号 $e(t)$ 与被测一次电流 I 成比例, 其中 k 为等效系数, 即:

$$e(t) = k \times I \quad (2)$$

经精密电阻网络后, 根据电路原理得输出电压 u_0 为:

$$u_0 = \frac{R_a \times R_{n2}}{R_a + R_{n2}} \times e(t) \quad (3)$$

式中: $e(t)$ 为罗氏线圈感应电动势; L_0 为罗氏线圈自感; R_0 为罗氏线圈内阻; R_{n1} 为对应档位 n 的高精度定值电阻; R_{n2} 为对应档位 n 的高精度匹配电阻, 其值根据额定一次电流值选定; R_a 为信号调理及采集系统等效电阻。

根据式(3)选取 n 档位下, 精密电阻阻值, 即可满足输出电压为恒定值 u_0 。

2) 开关控制回路

开关控制回路主要由 Kna 和 Knb 双联同步开关控制高精度罗氏线圈输出信号接入不同分压回路, 控制原理如图 5 所示。

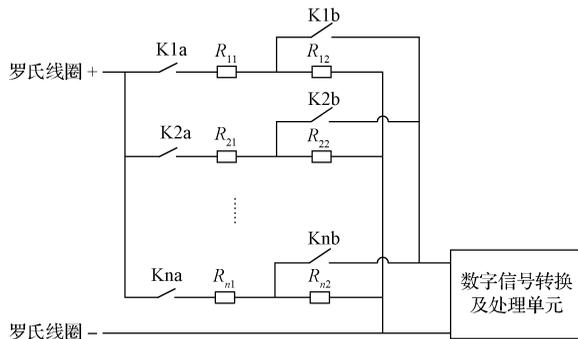


图5 开关控制原理

通过高精度电阻 R_{n1} 和 R_{n2} 分压处理后输出电压为定值 u_0 , 然后输入到数字信号转换及处理单元完成数字信

号采集和处理。通过开关控制回路, 满足在测量不同档位 n 时保证单一罗氏线圈经调理后输出恒定信号到数字信号转换及处理单元。

3.2 基于数字信号调理的多量程控制系统设计

为提高罗氏线圈型标准电流互感器信号调理精度及抗干扰性, 可通过数字信号调理的多量程控制系统方案实现多档位额定一次电流测量, 实施方案如图 6 所示。

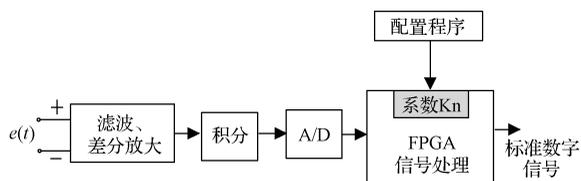


图6 数字信号调理

如图 6 所示, 不同额定一次电流下高精度罗氏线圈感应的模拟电压信号 $e(t)$, 通过滤波、差分放大, 积分处理, 经过 A/D 转换为数字信号进行调理。为满足罗氏线圈型标准电流互感器在不同测量档位 n 下输出标准数字信号, 通过设计的配置程序对 FPGA 进行程序配置调试, 即对系数 K_n 进行配置, 输出符合 GB/T20840-8 中电子互感器二次数字信号数据格式要求^[11]。

设在额定一次电流 I 作用下, 罗氏线圈感应的模拟电压信号 $e(t)$ 经 A/D 转换为数字信号 $F(I)$, 通过对系数 K_n 进行配置, 输出额定数字量为 2D41H 的标准数字信号, 即:

$$F(I) \times K_n = 2D41H \quad (4)$$

通过配置不同额定一次电流测量档位下系数 K_n , 罗氏线圈电子式互感器可满足高精度准确度校验要求。

3.3 方案对比

基于模拟信号调理和数字信号调理方案研究, 通过搭建对比试验环境, 对上述两种方案进行准确度对比试验, 对比试验方案如图 7 所示。

如图 7 所示, 使用同一罗氏线圈传感头, 分别连接模拟信号调理模块和数字信号模块输出数字信号, 通过合并单元对数字信号进行重采样处理, 并输入到电子互感器校验仪进行数据处理及对比分析。

本文设计罗氏线圈标准互感器测量档位包括 5 A、20 A、50 A、100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、600 A、800 A、1 000 A、1 200 A、1 500 A、2 000 A、2 500 A、3 000 A、4 000 A 和 5 000 A。按照 JJG 313-2010 测量用电流互感器中 0.05 级计量用电流互感器误差限制要求^[12], 在 5% 额定一次电流下, 各档位比值误差及相位误差如图 8、图 9 所示。

同理, 在 100% 额定一次电流下, 各档位比值误差及相位误差如图 10、图 11 所示。

根据上述试验测试数据, 在额定一次电流下, 模拟信号调理方案由于采用较多精密电阻, 加上开关控制回路接触电阻影响及电路杂散电容影响, 其信号传变精度易受环境影响, 不能满足 0.05 级误差限值要求; 数字信号调理方

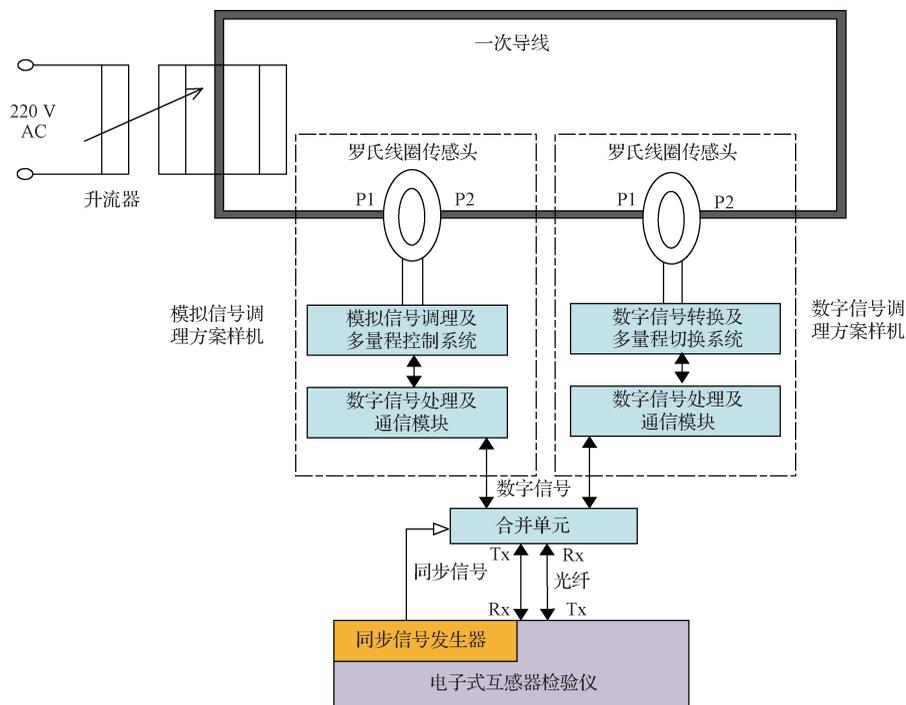


图7 准确度方案对比

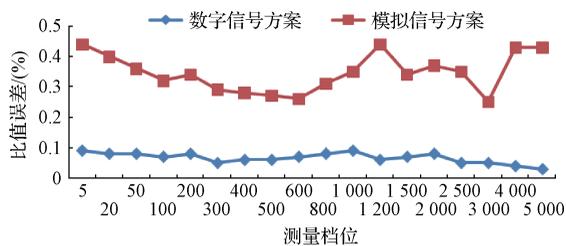


图8 5%额定一次电流比值误差

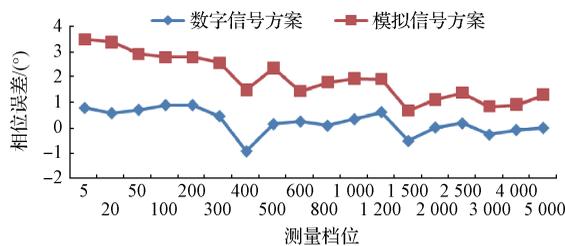


图11 100%额定一次电流相位误差

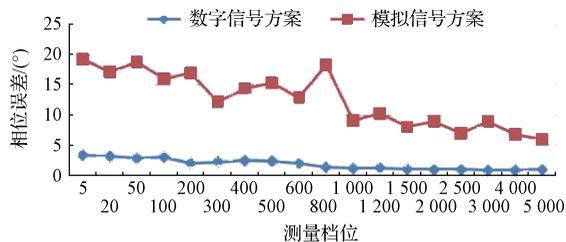


图9 5%额定一次电流相位误差

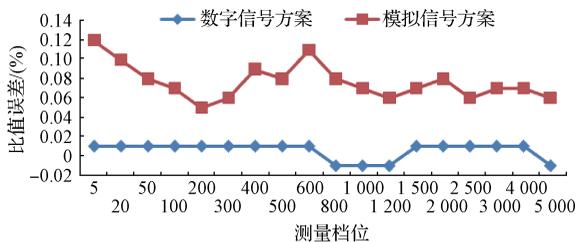


图10 100%额定一次电流比值误差

满足0.05级误差限值要求。因此,本文选用数字信号调理方案实现罗氏线圈标准电流互感器设计和制造。

4 样机研制及试验

基于高精度罗氏线圈研制及数字信号调理方案,本文研制了0.05级罗氏线圈标准电流互感器,测量范围为5~5 000 A,准确度为0.05级,可满足电子互感器准确度测试要求。样机实物如图12所示。



图12 罗氏线圈型标准电流互感器实物

案通过将模拟信号转换为数字信号后再经过配置程序对数字信号进行调试,信号处理精度高,抗干扰能力强,能够

如图12所示,罗氏线圈型标准互感器为手推车式结构,外部面板采用高性能非导磁材料,配置220 VAC电源接口及ST光纤输出接口,实现对一次电流的数字化信号转换,整机具有重量轻、结构紧凑、易携带及数字化输出等特点,可满足电子式互感器数字化校验需求。

通过大电流升流器、0.01级标准电流互感器和电子式互感器校验仪对研制的罗氏线圈型标准电流互感器进行准确度校验,试验数据如表1所示。

表1 准确度测试数据

一次电流/A	额定电流下的 电流误差(±%)	额定电流下的 相位误差(′)
5	+0.01	+0.77
20	+0.01	+0.57
50	+0.01	+0.70
100	+0.01	+0.88
200	+0.01	+0.88
300	+0.01	+0.45
400	+0.01	-0.92
500	+0.01	+0.14
600	+0.01	+0.24
800	-0.01	+0.08
1 000	-0.01	+0.33
1 200	-0.01	+0.61
1 500	+0.01	-0.52
2 000	+0.01	+0.01
2 500	+0.01	+0.17
3 000	+0.01	-0.27
4 000	+0.01	-0.09
5 000	-0.01	-0.01

根据表1测试数据可得,研制的罗氏线圈型标准满足0.05级计量用电流互感器误差限制要求,可用于电子互感器准确度校验。

5 基于罗氏线圈标准互感器准确度校验

罗氏线圈标准电流互感器可用于电子式互感器准确度校验,配合计量用合并单元、电子互感器校验仪,可实现从5~5 000 A不同额定一次电流准确度测试要求,校验原理如图13所示。

如图13所示,一次电流 I 经过罗氏线圈标准互感器转换为标准数字量信号,经过光纤传输到计量用合并单元,通过重采样等信号处理输出数据格式为IEC61850-9-2数字量到电子互感器校验仪中,完成一次电流 I 的数字量转换和采集。

当一次测量电流 I 为不同值时,通过电脑主机程序配置软件,经过光电转换对罗氏线圈标准电流互感器进行参数配置,实现测量档位切换,满足在不同电流 I 的作用下,其输出值均为额定数字量为2D41H的曼码FT3或异步FT3数字量信号。

基于罗氏线圈标准互感器,具有开放的协议接口,可满足不同类型电子式互感器数字信号接入及准确度校验。

6 结论

基于罗氏线圈电子式电流互感器技术,本文通过高精度罗氏线圈及多量程控制方案研究,并通过对不同调理方案的试验对比,选取数字信号调理方案,实现对罗氏线圈传变模拟信号处理及多量程切换。研制的0.05级罗氏线圈标准电流互感器,通过准确度校验,可满足从5~5 000 A不同额定一次电流0.05级准确度要求。最后,本文对罗氏线圈的准确度校验应用方案进行介绍,为罗氏线圈标准电流互感器的实际工程应用提供技术指导。

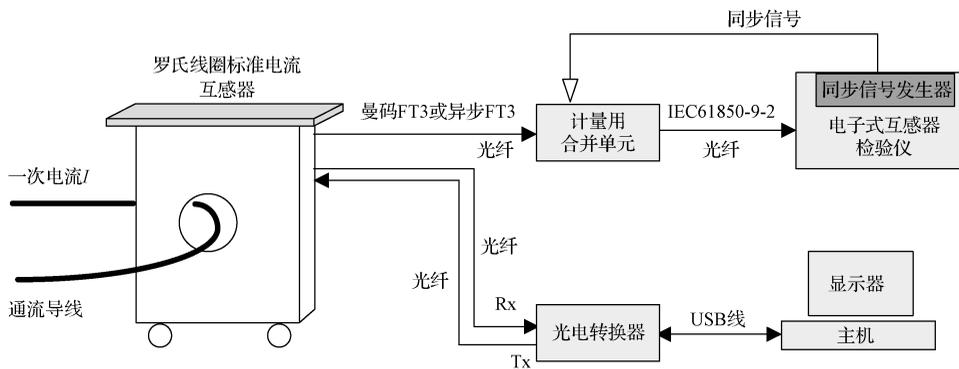


图13 罗氏线圈型标准电流互感器校验原理图

参考文献

- [1] 王立辉,杨志新,殷明惠,等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):1891-1895.
- [2] 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,2006,27(增刊1):334-336.
- [3] 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,2006,27(增刊1):334-336.
- [4] 谢潇磊,刘亚东,孙鹏,等. 基于电容分压法的配网线路智能电压传感器[J]. 仪器仪表学报,2016,37(5):1000-1009.
- [5] 贾丹平,武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(12):1806-1812.
- [6] 谢剑锋,闫军,卢旻. 高压电流互感器运行状态检测新技术及应用[J]. 电子测量技术,2016,39(7):169-172.
- [7] 谢潇磊,刘亚东,刘宗杰,等. 高频差分绕线 PCB 罗氏线圈设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):886-894.
- [8] 周勇,李晓波,秦国领. 靶场某测量设备数据采集单元可靠性设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(10):33-37.
- [9] 牟涛,周丽娟,周水斌,等. 高精度电子式电流互感器采集器的设计[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(20):141-144.
- [10] 尹明,周水斌,周丽娟,等. 电子式互感器采集单元关键技术研究[J]. 高压电器,2012,48(12):49-53.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 20840.8—2007 互感器第8部分:电子式电流互感器[S]. 2007.
- [12] 全国电磁计量技术委员会. JJG 313-2010 测量用电流互感器检定规程[S]. 2011.

作者简介

袁亮,1984年出生,工学学士,工程师,主要研究方向为电气绝缘设计、电子互感器研发和设计等。

E-mail:yuanliang8866@163.com

张旭乐,1987年出生,工学硕士,工程师,主要研究方向为工程电磁场技术、电子互感器研发及设计等。

E-mail:zhangxule30@126.com

张贺,1987年出生,工学学士,工程师,主要研究方向为电子互感器研发及设计等。

E-mail:414zhanghe@163.com

赵盼盼,1988年出生,工学学士,助理工程师,主要研究方向为电子互感器研发及设计等。

E-mail:15290987806@163.com

张凯,1987年出生,工学硕士,工程师,主要研究方向为电机与电器、变电站运维等。

E-mail:420465810@qq.com