

doi: 10.12052/gdutxb.190025

一种开合式微型电流互感器的设计与实验分析

董文华¹, 李春来¹, 兰 雄²

(1. 河源职业技术学院 电子与信息工程系, 广东 河源 517000; 2. 广东雅达电子股份有限公司, 广东 河源 517000)

摘要: 针对不方便断电拆线的场合, 设计了一种开合式微型电流互感器来代替常规电流互感器, 从而实现在线安装. 通过选择方形铁芯, 选用磁导率较大且切口平整、气隙较小的铁氧体为铁芯材料, 设计了互感器的外壳结构. 经过实验分析表明, 这种开合式微型电流互感器具有结构简单、使用方便、精度相对较高、线性度好的优点, 并针对其正常工作时温升的情况及其漏磁对周围电子器件的影响做了数据分析. 最后指出了提高其精度的改进措施.

关键词: 在线安装; 电流互感器; 开合式; 铁芯结构; 精度

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2019)04-0065-05

Design and Experimental Analysis of an Open-close Micro Current Transformer

Dong Wen-hua¹, Li Chun-lai¹, Lan Xiong²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Heyuan Polytechnic, Heyuan 517000, China;

2. Guangdong Yada Electronics Co., Ltd., Heyuan 517000, China)

Abstract: An open-close micro current transformer is designed for the situation where power disconnection is not applicable and it can replace the conventional current transformer, realizing online installation. The open-close micro current transformer has a square core and a casing made of ferrite with a high permeability, flat cut and small air gap. According to the experimental analysis, it has the advantages of simple structure, convenient operation, high precision and good linearity. In the end, the measures to improve its precision are proposed.

Key words: online installation; current transformer; open-close; core structure; accuracy

随着智能电网的应用与发展, 电流互感器在电力系统的测量、保护和监测时使用非常普遍, 其精度和稳定性能得到了很大的提高, 而在一些不方便断电拆线或者拆卸时间较长而又不方便长时间停电的场合, 常规的电流互感器不合适使用, 而且要求电流互感器体积较小, 因此, 能够在线安装的开合式微型电流互感器的研究和使用尤为重要^[1-2]. 虽然, 铁芯切开后会降低铁芯磁导率, 但微型电流互感器的精度并非仅由磁导率决定, 其精度可以通过不同的结构以及不同的补偿方法来提高^[3]. 本文从互感器结构和铁芯结构及磁性材料的选用上设计一种新型的开合式微型电流互感器并对其进行实验分析.

1 结构设计

根据开合式微型电流互感器的误差分析得出使

其误差减少的办法, 设计了型号为CTF16-100 A/40 mA的单匝开合式微型电流互感器.

1.1 结构设计

本次设计的开合式微型电流互感器(型号为CTF16)选择了铁氧体为铁芯材料, 并出于生产工艺方面的考虑, 选择了方形铁芯^[4], 中空, 长宽高尺寸为26.8 mm×15.9 mm×34 mm, 厚度为5 mm, 上下对半切割成2块, 每块高为17 mm, 两块大小一样, 其中一块绕二次绕组, 另外一块不用绕线(如图1所示); 而一次绕组为1匝, 二次绕组匝数为2 500匝, 全部绕在下面那块铁芯上, 直流电阻约为205 Ω; CTF16总重量为160 g. CTF16电流互感器塑料外壳外形结构尺寸(如图2所示), 由于下边绕了二次绕组, 所以外壳结构设计得大些, 而上边铁芯不需要绕线, 其外壳结构设计

收稿日期: 2019-02-22

基金项目: 广东省科技厅工业高新技术领域科技计划项目(2013B010101016); 河源市社会发展科技计划项目(18062810022165)

作者简介: 董文华(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电气自动化及自动控制技术.

得要小些;为了用来固定安装放置不需要绕线铁芯的外壳,将安装放置绕线铁芯的塑料外壳一边用连接螺销固定上半部分外壳(用来放置不需要接线的铁芯),可以旋转,而另一边用卡扣固定,测量时可将卡扣打开,放入需要测量的电流线,再把上下两部分合上,轻轻按压,卡扣就扣紧,使用非常方便。

使用这种开合式电流互感器时,先轻轻地打开卡扣,把所需要测量的电流的电线放入 $\phi 16\text{ mm}$ (如图2中标示)内孔中,按下卡扣扣紧,然后再用万用表测量电流互感器的电流,最后根据电流互感器的变比将测量的电流数据换算,就可以测得所需要测量电线的电流。

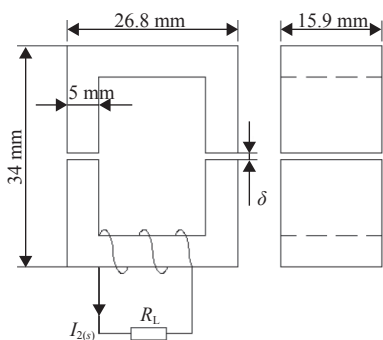


图1 开合式微型电流互感器CTF16铁芯结构图

Fig.1 CTF16 Core Structure Diagram of the Open-close Micro Current Transformer

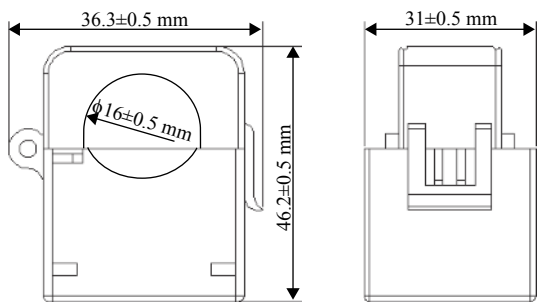


图2 CTF16外壳结构图

Fig.2 CTF16 Casing Structure Diagram

1.2 材料选择

考虑到闭合铁芯切割后切面的情况^[5],由于铁氧体切割后切面平整,气隙比较小且导磁率较高,本次设计选择了铁氧体作为铁芯材料^[6],铁氧体型号为UU27/34 SNH12,密度为 4.95 g/cm^3 ,其初始磁导率为12000,矫顽力为 4.5 A/m ;选择的绕线为漆包线,规格为 $\phi 0.13\text{ mm}$;采用塑料外壳,用环氧树脂封装。

2 误差分析

开合式微型电流互感器在正常工作时,一次绕

组匝数 n_1 为1,只考虑其接纯阻性负载时,根据开合式电流互感器的等效电路,列出其对应的状态方程,则可导出其传递函数模型如图3。

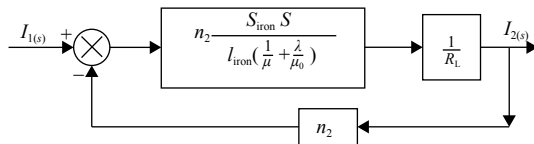


图3 传递函数模型

Fig.3 Transfer Function

图3中, R_L 为二次负载, s_{iron} 为铁芯面积, l_{iron} 为铁芯磁路长度, n_2 为二次绕组匝数, λ 为气隙比(即空气间隙的宽度^[7]), μ 为闭合铁芯磁导率, μ_0 为真空中的磁导率, $I_{1(s)}$ 为一次电流, $I_{2(s)}$ 为二次电流。因此,根据开合式电流互感器传递函数模型,则其传递函数可表示为^[8]:

$$W(s) = \frac{I_{2(s)}}{I_{1(s)}} = \frac{1}{n_2} \frac{n_2 \frac{s_{\text{iron}} S}{l_{\text{iron}} R_L \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{\mu_0} \right)}}{1 + n_2 \frac{s_{\text{iron}} S}{l_{\text{iron}} R_L \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{\mu_0} \right)}} \quad (1)$$

因此,其复合误差传递函数为:

$$E(s) = \frac{n_2 I_{2(s)} - I_{1(s)}}{I_{1(s)}} = - \frac{1}{1 + n_2 \frac{s_{\text{iron}} S}{l_{\text{iron}} R_L \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{\mu_0} \right)}} = - \frac{1}{1 + j W(s) n_2 \frac{s_{\text{iron}}}{l_{\text{iron}} R_L \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{\mu_0} \right)}} \quad (2)$$

从公式(2)可看出,要使得电流互感器的误差减少的办法有:减小负载、增加绕组匝数、选用磁导率大的铁芯并减小气隙比、增大铁芯截面积、减少磁路长度等^[9]。

3 实验与数据分析

3.1 实验条件

实验使用的设备^[10]:沈阳中川HESE型微型互感器检定装置,测量精度为0.005级。实验环境:温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,45%RH,实验环境周围没有与测试无关的电磁场。

3.2 实验方案

抽取5个开合式电流互感器CTF16样品,分不带负载(即 $0\text{ }\Omega$)、带负载 $20\text{ }\Omega$ 和带负载 $50\text{ }\Omega$ 3种情况,测量各个样品的比差、角差数据,任取一个样品的数据

来分析,实验数据详见表1.

3.3 实验步骤与实验线路图

实验原理图如图4所示,电流互感器检测仪使用说明如下:先根据电流互感器选择一次和二次量程;再将标准电流互感器输出电流线(L-X)穿过被测试电流互感器形成闭环(L-X, 5 A-5A);然后将被测试电流互感器的K₁、K₂分别接到标准电流互感器的K₁、K₂端;最后通过调节标准电流互感器输出电流(按被测试电流互感器的量程的5%、20%、50%、100%、120%),用互感器检测仪测出被测量电流互感器与标准电流互感器相比较的比差和角差,这个比差和角差是相对于标准电流互感器而言,标准电流互感器的精度越高,被测量的比差和角差误差就更小.(其中,L和5A,X和5A分别是标准电流互感器和电流电压发生器的4个接线柱).

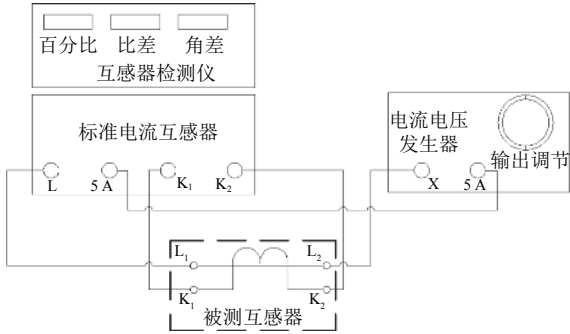


图 4 实验原理图
Fig.4 Experimental Schematic Diagram

测试步骤如下: 1. 将精密互感器的输出电流线(L-X)放入被测的开合式电流互感器中,输出电流调至100 A; 2. 将精密电流互感器的输出端K₁、K₂分别接到被测电流互感器的K₁、K₂端^[11](注意同名端,不要接反); 3. 将被测的电流互感器一次线圈的电流信号依次调至5 A、20 A、50 A、100 A、120 A,测量其传变特性,采集到其比差、角差数据,将测试数据填入表1中.

表 1 3种不同负载情况下CTF16实验数据表
Tab.1 CTF16 Experimental Data under Three Different Load Conditions

一次电流/%	0 Ω		20 Ω		50 Ω	
	比差/%	角差	比差/%	角差	比差/%	角差
5	-0.306	54.78	-0.340	59.34	-0.380	67.92
20	0.02	49.27	0.015	56.29	0.002	63.77
50	0.029	46.07	0.018	50.34	-0.014	59.70
100	-0.003	46.26	-0.022	51.19	-0.068	61.40
120	-0.034	48.62	-0.071	54.60	-0.150	67.29

3.4 实验数据分析

根据表1数据画出开合式电流互感器CTF16在不同负载的情况下其比差曲线和角差曲线^[12],如图5和图6所示.

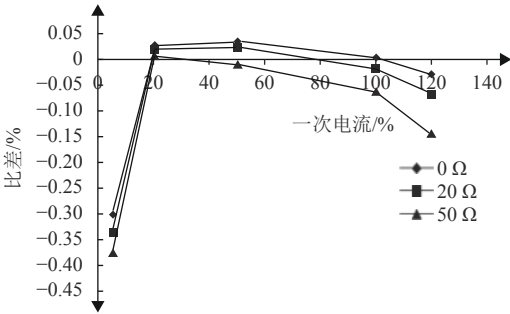


图 5 3种不同负载情况下CTF16比差曲线
Fig.5 CTF16 Ratio Difference Curves under Three Different Load Conditions

从微型电流互感器CTF16实验数据表1和其数据比差角差曲线图可以看出,采用这种结构的开合式电流互感器在没有采用任何补偿方法的情况下,根据国家标准GB20840-2010和微型电流互感器行业标准^[13-14],在负载不超过20 Ω时,其比差的测量精度可以达到0.2级;在负载为50 Ω时,其比差测量精度可达到0.5级;这种结构的开合式电流互感器的角差比较大,在带载20 Ω以内,其角差测量精度为1级,但是,不管其所带负载为0 Ω、20 Ω还是50 Ω,其角差的线性度都非常好^[15](如图6所示),使用时可以进行修正.

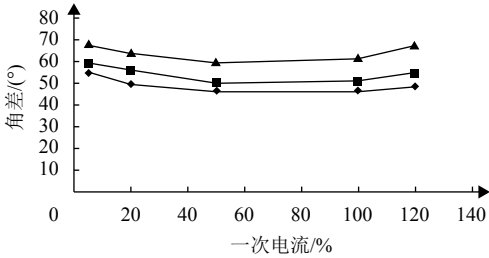


图 6 3种不同负载情况下CTF16角差曲线
Fig.6 CTF16 Angular Difference Curves under Three Different Load Conditions

3.5 温升的数据分析

在正常工作时,环境温度为23 ℃,让开合式电流互感器CTF16在额定电流100 A、额定负载20 Ω下连续工作5小时,用红外测温仪测量其表面温度,直到每小时温升的变化不超过1 K,记录其温升情况如表2所示.

从表2可知,电流互感器CTF16在正常工作时其温升在9±1 ℃,符合微型互感器标准要求.

表 2 CTF16温升情况的实验数据表

Tab.2 Experimental Data for CTF16 Temperature Rises					
工作时间/h	1	2	3	4	5
温度/℃	32	33	32	32	32
温升/℃	9	10	9	9	9

3.6 漏磁对电子器件影响的数据分析

考虑到这种开合式电流互感器(以下简称B)与普通的电流互感器相比,其漏磁相对会较大,因此将其漏磁对其周围的电子器件影响做了实验. 在实验时,选择电流互感器(以下简称A, 100 A/40 mA, 闭环)为被影响的电子器件. 将测量单独放置的A的比差角差1和将正常工作的CTF16和A放置在一起然后测A的比差2和角差2,数据如表3所示.

表 3 CTF16漏磁对电子器件影响情况的实验数据表

Tab.3 Experimental Data for the Impact of CTF16 Magnetic Flux Leakage on Electronic Devices					
一次电流/%	5	20	50	100	120
比差1	-0.010	-0.040	-0.044	-0.033	-0.032
角差1	5.290	3.330	1.840	1.980	2.200
比差2	-0.010	-0.038	-0.042	-0.032	-0.031
角差2	5.290	3.380	1.960	1.830	1.940
比差2-比差1	0	0.002	0.002	0.001	0.001
角差2-角差1	0	0.005	0.120	-0.150	-0.26

从表3的数据中可以看出,这种开合式电流互感器CTF16在正常工作时其漏磁对互感器A存在着一定的影响,可这种影响比较小,在正常的误差范围内.

4 结论

本文设计的这种选用方形铁芯并采取一块铁芯绕线,而另一块铁芯不用绕线,然后将这两块铁芯合在一起使用的开合式微型电流互感器,具有外形结构简单小巧、使用方便、比差精度较高的优点. 其角差线性度较好,正常工作时其温升符合微型互感器标准要求,其漏磁对周围电子器件影响较小,可用于测量不超过100 A的电流,不需要停电就可以安装操作. 这种开合式微型电流互感器可以满足精度不是特别高且不方便停电,或拆卸需要很长时间而又不方便长时间停电安装的使用场合,主要用于配套电表使用,可以做能耗监控.

这种开合式结构的微型电流互感器的精度较低的原因,有很大程度是受一次所测电流的摆放位置和上下两个外壳与铁芯配合紧密程度的影响. 要达

到更高的精度,有几种方法:(1) 不改变这种铁芯的设计,但改变其绕线方式,如两边铁芯绕线再将其铁芯上的绕线串联,这种绕线方式会少受一次所测电流的摆放位置的影响,因此其比差角差就会减少,而受一次所测电流摆放位置的影响就会减少.(2) 采取一些补偿措施,如自我补偿励磁电流、外部提供励磁电流和提供二次电势补偿的方法,都会对这种开合式微型电流互感器的精度提高有效.

参考文献:

[1] TONG Y, LI B H. An accurate continuous calibration system for high voltage current transformer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(2): 25107-25112.

[2] SHI Y R, ZHI J Z, WEN Y H. A multichannel openable-core stage-connection comparator for on-site test of the output current transformers of AC generators[C]//1999 IEEE AUTOTESTCON Proceedings. San Antonio: IEEE, 1999. 225-228.

[3] SO E, SHI Y R, BENNETT D A. High-current high-precision openable-core AC and AC/DC current transformers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, 42(2): 571-576.

[4] DOIG P, GUNN C, DURANTE L. Reclassification of relay-class current transformers for revenue metering applications[C]//2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dallas: IEEE, 2006: 1244-1251.

[5] 黄世泽, 郭其一. 铁芯开气隙电流互感器暂态特性仿真[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(8): 1719-1723.

HUANG S Z, GUO Q Y. Simulation of transient characteristics for air gapped core current transformer [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(8): 1719-1723.

[6] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 44-69, 115-136.

[7] 李志新, 王少华, 徐敏锐, 等. 一种新型宽量程电流互感器的设计与性能分析[J]. *电气应用*, 2017, 36(13): 36-39.

LI Z X, WANG S H, XU M R, *et al.* Design and performance analysis of a new wide range current transformer [J]. *Electrical application*, 2017, 36(13): 36-39.

[8] 陈彬, 李世松, 卢欣, 等. 表征开口式电流互感器工作原理的解析模型[J]. *电测与仪表*, 2014, 51(23): 1-5.

CHEN B, LI S S, LU X, *et al.* An analytical model for characterizing the working principle of open current Transformer [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(23): 1-5.

[9] 胡书红. 高精度开合式电流互感器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014. 20-23.

[10] 贾明, 杨功流. 开合式在线测量大电流的光纤电流互感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(4): 1-3.

JIA M, YANG G L. Open-close fiber optic current trans-

former for high-current measurement on line [J]. [Instrument Technique and Sensor](#), 2012(4): 1-3.

- [11] 李春来, 汤晓宇, 罗坤明. 0.1级超微晶微型电流互感器的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2015, 11(7): 52-53.
LI C L, TANG X Y, LUO K M. Research on 0.1 stage micro crystal micro current transformer [J]. *Instrument Technology and Sensor*, 2015, 11(7): 52-53.
- [12] 张贵新, 万雄, 王鹏. 使用带气隙铁心的电子式电流互感器[J]. *高电压技术*, 2009, 35(9): 2144-2149.
ZHANG G X, WAN X, WANG P. Use electronic current transformer with air gap core [J]. *High Voltage Engineering*,

2009, 35(9): 2144-2149.

- [13] 中国电器工业协会. 互感器第一部分: 通用技术要求: GB 20840.1-2010[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010.
- [14] 中国机械工业联合会. 微型电流互感器: JB/T10665-2006[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2006.
- [15] BACCIGALUPI A, LICCARDO A. Low-cost prototype for the electronically compensation of current transformers [J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2009, 9(6): 641-647.

(上接第45页)

- [5] 庞学亮, 林春生. 基于遗传算法三轴磁传感器校正系数求解[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(1): 42-45.
PANG X L, LIN C S. Calibration coefficients solving of three-axis magnetic sensor based on genetic algorithm [J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(1): 42-45.
- [6] FANG J, SUN H, CAO J, *et al.* A novel calibration method of magnetic compass based on ellipsoid fitting [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(6): 2053-2061.
- [7] 刘宇, 陈永炜, 路永乐. 基于最小二乘的磁力计误差补偿与校准[J]. 导航定位与授时, 2018, 1(5): 17-21.
LIU Y, CHEN Y W, LU Y L. Research on error compensation and calibration of magnetometer based on least square method [J]. Navigation Positioning & Timing, 2018, 1(5): 17-21.
- [8] 程华富. 磁传感器温度特性校准装置研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(10A): 45-49.
CHENG H F. Calibration device for temperature property of magnetic sensors [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(10A): 45-49.
- [9] WU Y X, LUO S T. On misalignment between magnetometer and inertial sensors [J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2016, 16(16): 6288-6297.
- [10] BONNET S, BASSOMPIERRE C, GODIN C, *et al.* Calibration methods for inertial and magnetic sensor [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2009, 156(2): 302-311.
- [11] 李勇, 刘文怡, 李杰, 等. 基于椭球拟合的三轴磁传感器

误差补偿方法[J]. 传感器技术学报, 2012, 25(7): 918-920.

- LI Y, LIU W Y, LI J, *et al.* Error compensation method for three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(7): 918-920.
- [12] ROHAC J, SIPOS M, SIMANEK J. Calibration of low-cost triaxial inertial sensors [J]. Instrumentation & Measurement Magazine IEEE, 2015, 18(6): 32-38.
- [13] 郭鹏飞, 华春红, 任章, 等. 基于递推最小二乘的航姿系统罗差校准[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 24-27.
GUO P F, HUA C H, REN Z, *et al.* Magnetic deviation compensation using recursive least square for AHRS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(1): 24-27.
- [14] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 34(3): 295-298.
YAN B, WANG B, LI Y. Optimal ellipse fitting method based on least square principle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 34(3): 295-298.
- [15] WUY X, SHI W. On calibration of three-axis magnetometer [J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2015, 15(11): 6424-6431.
- [16] 刘建敬, 陈丽, 汪冬瑾, 等. 三轴磁传感器的校正方法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9): 179-181.
LIU J J, CHEN L, WANG D J, *et al.* Correction method of 3-axis magnetic sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(9): 179-181.
- [17] LI X, LI Z. A new calibration method for tri-axial field sensors in strap-down navigation systems [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(10): 12-16.