

# Design of a Standard Current Transformer for On-Line Calibration

Shuhong Hu, Yan Xu

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan  
Email: hu\_shu\_hong@sina.com, xuyan919@hust.edu.cn

Received: Aug. 28<sup>th</sup>, 2013; revised: Sep. 16<sup>th</sup>, 2013; accepted: Sep. 24<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Shuhong Hu, Yan Xu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** This paper introduces the design of a standard current transformer for on-line calibration. The current transformer based on the electromagnetic induction theory works with dual cores and has the passive compensation circuit. It not only can be installed on line due to the open-close structure, but also possesses a strong anti-jam capability. The output of the current transformer is small analog signal which can be picked up directly by acquisition system. The testing results show that the accuracy class of the current transformer is better than 0.05 and it still can meet the standard when opened and closed 50 times.

**Keywords:** On-Line Calibration; Current Transformer; Open-Close Structure; Small Analog Signal

## 在线校验用标准电流互感器的设计

胡书红, 徐雁

华中科技大学, 武汉  
Email: hu\_shu\_hong@sina.com, xuyan919@hust.edu.cn

收稿日期: 2013年8月28日; 修回日期: 2013年9月16日; 录用日期: 2013年9月24日

**摘要:** 该文介绍了一种在线校验用标准电流互感器的设计。该电流互感器基于电磁感应原理, 利用双铁芯工作, 并引入了无源补偿, 具有开合式结构, 能够在线安装, 抗干扰能力强, 其输出为模拟小信号, 能直接被采集系统采集。实验结果表明, 其精度优于 0.05 级, 并且在开合 50 次后, 仍能满足 0.05 级的标准要求。

**关键词:** 在线校验; 电流互感器; 开合式结构; 模拟小信号

### 1. 引言

随着数字化变电站的发展, 智能电网的不断推进, 电子式电流互感器得到广泛的应用, 其准确性和稳定性是电力系统计量、保护和监测的重要保障, 直接影响到电力系统的安全与稳定。所以对电子式电流互感器进行在线校验是非常必要的, 而实现能够在线安装的高精度传感头是在线校验系统的关键<sup>[1]</sup>。

现在电力系统中计量用电流互感器一般为 0.2 级, 所以在线校验用的传感头的精度必须优于 0.05 级

<sup>[2]</sup>, 目前能够用于在线校验的传感头有空心线圈电流互感器<sup>[3]</sup>和电磁式电流互感器。文献[1]中设计的标准传感头基于钳形空心线圈电流互感器, 它具有频带宽、抗饱和能力强的优点, 但在实际应用中, 其抗干扰能力差, 容易受到外界磁场的干扰, 而且存在位置误差的影响, 低端性能较差, 必须进行放大处理, 从而温度变化也会影响其准确性, 所以其精度性能很不稳定; 文献[4]中的校验用标准电流互感器采用了双级结构, 它能够实现很高的精度, 但其不具有开合式结

构,难以进行在线安装,所以在现场使用中有很大的局限性;文献[5]中的标准电流互感器采用了有源补偿,为多级铁芯的开合式结构,低端性能较好,具有较高的精度,然而,由于采用了有源补偿,在实际应用中存在供能问题,而且其励磁电流基本上由电子补偿线路提供,因而有较大的功耗。

该文在比较上述标准电流传感器的特点后,提出了一种抗干扰能力强、精度高,并且具有开合式结构的在线校验用标准电流互感器,该电流互感器基于电磁感应原理,采用双级铁芯结构,引入了无源的补偿方法,其开合式结构使得在线安装非常方便,而且在全量程范围内有极好的线性,重复性好,精度等级优于0.05级。

## 2. 单级开合式电流互感器的误差分析

电流互感器是电流信号的变换装置,是基于电磁感应原理而工作的,而对于开合式电流互感器,同样是利用电磁感应原理,因此它仍可以用变压的T型等效电路来建立其等效电路模型<sup>[6]</sup>,如图1。

其对应的磁势方程和复数误差表达式如下:

$$n_1 \dot{I}_1 - n_2 \dot{I}_2 = n_1 \dot{I}_0 \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \quad (2)$$

$$Z_m = jw \frac{un_2^2 s}{l} \quad (3)$$

$$\varepsilon = f + j\delta = \frac{n_2 \dot{I}_2 - n_1 \dot{I}_1}{n_1 \dot{I}_1} = -\frac{n_1 \dot{I}_0}{n_1 \dot{I}_1} = -\frac{Z'_2 + Z_L}{Z'_2 + Z_L + Z_m} \quad (4)$$

式中,  $f$ 、 $\delta$  和  $\varepsilon$  分别为互感器的比值差、角差和复合误差;  $Z_1$ 、 $Z_m$ 、 $Z'_2$  和  $Z'_L$  分别为互感器的一次侧的阻抗、激磁阻抗、二次侧等效到一次侧的阻抗和负载阻抗;  $s$ 、 $l$ 、 $u$  和  $w$  分别为铁芯的截面积、平均磁

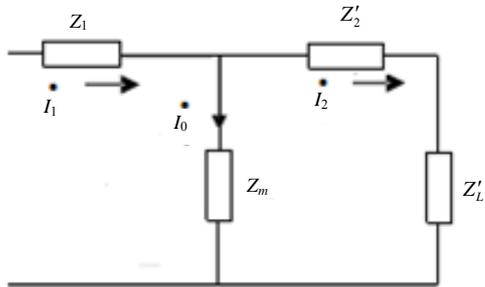


Figure 1. The equivalent circuit of the current transformer  
图1. 电流互感器等效电路

路长度、铁芯磁导率和电源频率。

从复合误差的表达式(4)可以看出,负载阻抗和激磁阻抗会直接影响单级电流互感器的精度,而通过增加铁芯截面积  $s$ 、减小磁路长度  $l$  和增加二次绕组匝数  $n_2$  可以增大激磁阻抗,进而提高互感器的精度。但是对于一定尺寸的铁芯,当其磁导率很小时,单级电流互感器的误差将会变得很大。

该文设计的在线校验用标准电流互感器为开合式结构,因而铁芯中必然存在气隙,而根据文献[7],铁芯开气隙后的等效磁化特性可表示为:

$$H_{equ} = F(B) = f(B) + \lambda \frac{B}{u_0} \quad (5)$$

式中,  $f(B)$  为铁芯本身的励磁特性;  $\lambda$  为铁芯气隙长度和平均磁路长度之比,即气隙比;  $u_0$  为真空磁导率。

根据公式(5)有,由无气隙铁芯的磁化特性可以得出气隙铁芯的磁化特性,下面是在气隙比为  $\lambda = 1\%$  时,对一具体铁芯的磁性能仿真,如图2。

从仿真曲线可以看出,铁芯开气隙后,线性范围增大,但其磁导率显著减小,当气隙比为  $\lambda = 1\%$  时,非饱和区的磁导率降幅可达10倍以上,而且可以推导出,气隙越大,磁导率减小得越多。

所以,对于单级开合式电流互感器,铁芯气隙的存在将直接影响到其高精度的实现,而且用传统的方法来提高其精度是有限的,主要原因有:

1) 增加铁芯截面积会增加单位线匝的电阻,而且铁芯截面积过大会导致铁芯中的磁通密度过小,进而也会减小导磁系数,从而导致精度改善不明显;

2) 平均磁路长度并不能无限减小,还必须考虑实

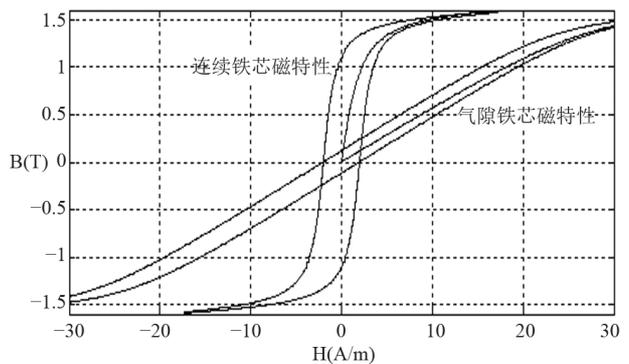


Figure 2. The magnetic properties for the air gapped core  
图2. 气隙铁芯磁化曲线图

际的安装尺寸;

3) 二次绕组匝数的增加也须考虑铁芯尺寸和安装尺寸, 并且过多的匝数还会增加容性误差。

综上所述有, 单级开合式电流互感器很难实现高精度, 特别是该文要实现 0.05 级的精度等级, 而且, 对一般结构的开合式电流互感器, 其低端(如一次电流为额定电流的 5% 时)很难满足 0.05 级的标准。

### 3. 在线校验用标准电流互感器的设计

依据上面的分析, 对于单级结构的开合式电流互感器, 由于铁芯存在气隙, 其磁导率显著减小, 会直接影响电流互感器的精度性能, 而通过增加铁芯截面积、减小磁路长度和增加二次绕组匝数所获得的性能改善有限, 甚至很不经济实用<sup>[8]</sup>, 从而使单级结构的开合式电流互感器很难实现高精度。因此, 为了实现开合式高精度电流互感器, 选择合理的结构并进行参数优化设计是非常重要的, 而且, 为了提高精度, 还必须引入有效的补偿方法。下面围绕结构设计、参数优化设计和补偿设计三方面来介绍该标准电流互感器的实现。

#### 3.1. 结构设计

为了实现开合式高精度电流互感器, 该文选择了双级结构<sup>[9]</sup>, 如图 3。

其中,  $n_1$  为一次绕组, 分别绕在铁芯 I 和铁芯 II 上;  $n_2$ 、 $n_b$  为二次绕组, 分别绕在铁芯 II 和铁芯 I 上;  $n_3$  为辅助绕组, 绕在铁芯 I 上。 $Z_L = R_2 + j\omega L_2$  和  $Z_3 = R_3 + j\omega L_3$  分别为二次绕组回路的总阻抗和辅助绕组回路的总阻抗。

如果优化选择  $n_b$ 、 $n_3$  和  $Z_3$ , 可以使铁芯 I 承担主磁通, 而使铁芯 II 中的磁通很小, 基本上为零磁通<sup>[10]</sup>, 从而实现开合式高精度电流互感器。

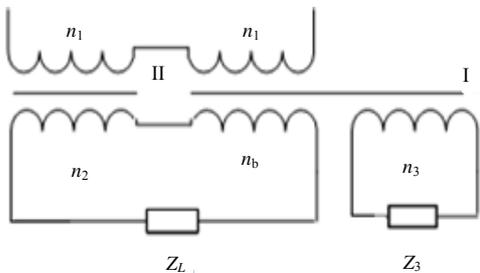


Figure 3. The structure of the current transformer  
图 3. 电流互感器的结构图

#### 3.2. 参数优化设计

为了对上面所选的双级结构进行参数优化设计, 下面建立其对应的传递函数模型, 用控制理论的方法进行分析。

根据结构图, 可以列出互感器的状态方程, 铁芯 I 和铁芯 II 的磁动势平衡方程:

$$\begin{aligned} n_1 i_1 + n_b i_2 + n_3 i_3 &= n_1 i_{01} \\ n_1 i_1 + n_2 i_2 &= n_1 i_{02} \end{aligned} \quad (6)$$

二次绕组回路和辅助绕组回路的电动势平衡方程:

$$\begin{aligned} n_b \frac{d\phi_1}{dt} + n_2 \frac{d\phi_2}{dt} &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ n_3 \frac{d\phi_1}{dt} &= R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

铁芯 I 和铁芯 II 的磁通变化量为:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1}{dt} &= n_1 \frac{s_1}{l_1} \frac{dB_1}{dH_1} \frac{di_{01}}{dt} \\ \frac{d\phi_2}{dt} &= n_1 \frac{s_2}{l_2} \frac{dB_2}{dH_2} \frac{di_{02}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $i_{01}$  和  $i_{02}$  分别为铁芯 I 和 II 的励磁电流,  $s_1$  和  $s_2$  分别为铁芯 I 和 II 的截面积,  $l_1$  和  $l_2$  分别为铁芯 I 和 II 的平均磁路长度,  $\frac{dB_1}{dH_1}$  和  $\frac{dB_2}{dH_2}$  分别为铁芯 I 和 II 的磁化过程的磁导率。

根据上述的状态方程, 可以画出其对应的传递函数模型, 如图 4。

通过对传递函数模型的分析, 可以看出, 由于采用了双铁芯结构, 在传递函数模型上体现为: 增加了误差反馈模块。通过误差反馈模块对互感器误差电流的处理, 形成强有力的电压反馈信号, 其叠加到互感器的二次回路中, 最后使得互感器的误差电流非常小, 趋向于零, 即铁芯 II 中基本上为零磁通, 从而实现高精度的二次电流输出。

根据前面的分析, 铁芯 II 中基本上为零磁通, 而为了构成强有力的反馈, 对铁芯 II 的选择须尽量使其初始磁导率高。

由传递函数模型, 可以得到互感器的传递函数为:

$$W(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{a_1 s + a_2 s^2}{\frac{R_2 + sL_2}{n_2} + b_1 s + b_2 s^2} \quad (9)$$

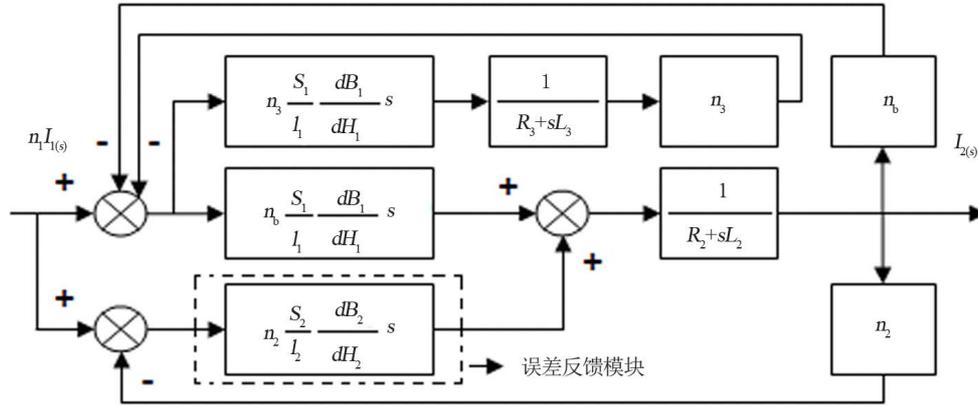


Figure 4. The transfer function model of the current transformer  
图 4. 互感器的传递函数模型

其中,

$$\begin{aligned} a_1 &= n_b \frac{s_1}{l_1} \frac{dB_1}{dH_1} + n_2 \frac{s_2}{l_2} \frac{dB_2}{dH_2} \\ a_2 = b_2 &= \frac{n_2 n_3^2}{R_3 + sL_3} \frac{s_1}{l_1} \frac{s_2}{l_2} \frac{dB_1}{dH_1} \frac{dB_2}{dH_2} \\ b_1 &= n_b \frac{n_b^2 + n_3^2}{n_2 n_b} \frac{R_2 + sL_2}{R_3 + sL_3} \frac{s_1}{l_1} \frac{dB_1}{dH_1} + n_2 \frac{s_2}{l_2} \frac{dB_2}{dH_2} \end{aligned} \quad (10)$$

由此可求得复合误差传递函数为:

$$\begin{aligned} E_{(s)} &= \frac{n_2 I_{2(s)} - n_1 I_{1(s)}}{n_1 I_{1(s)}} \\ &= \frac{\frac{R_2}{n_2} + \left( a_1 + \frac{L_2}{n_2} - b_1 \right) s}{\frac{R_2 + sL_2}{n_2} + b_1 s + b_2 s^2} \end{aligned} \quad (11)$$

根据上式, 通过参数优化设计, 使

$$a_1 + \frac{L_2}{n_2} - b_1 = 0 \quad (12)$$

则能够在一定程度上降低互感器的误差, 若只考虑纯阻性负载情形, 则由于二次绕组的漏抗很小<sup>[11]</sup>, 可以忽略, 即使  $a_1 = b_1$ , 结合式(10)有:

$$\begin{aligned} R_3 + j\omega L_3 &= \frac{n_3^2}{n_b (n_2 - n_b)} (R_2 + j\omega L_2) \\ Z_3 &= \frac{n_3^2}{n_b (n_2 - n_b)} Z_L \end{aligned} \quad (13)$$

所以, 将复合误差传递函数写成频域形式, 可简化为:

$$\begin{aligned} E_{(j\omega)} &= \frac{\frac{R_2}{n_2}}{j\omega b_1 + \frac{R_2}{n_2} - \omega^2 b_2} \\ &= \frac{R_2}{n_2 \sqrt{(\omega b_1)^2 + \left( \frac{R_2}{n_2} - \omega^2 b_2 \right)^2}} e^{j\varphi} \\ \varphi &= \arctan(\omega b_1) / \left( \omega^2 b_2 - \frac{R_2}{n_2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

对上式进行分析有, 当互感器的变比和负载确定后, 通过适当选择绕组  $n_b$ , 可以使

$\sqrt{(\omega b_1)^2 + \left( \frac{R_2}{n_2} - \omega^2 b_2 \right)^2}$  取得最大值, 从而进一步通过优化参数降低互感器的误差。

下面是在如下参数下所作的函数

$$y_{(n_b)} = \sqrt{(\omega b_1)^2 + \left( \frac{R_2}{n_2} - \omega^2 b_2 \right)^2}$$

关于  $n_b$  的曲线图, 其中条件参数如下:

- 铁芯 I 和铁芯 II 的尺寸: 截面积  $s = 4 \text{ cm}^2$ , 平均磁路长度  $l = 10\pi \text{ cm}$ ;
  - 铁芯 I 和铁芯 II 磁导率: 磁导率都大于  $200 \text{ Gs/Oe}$ ;
  - 二次回路总阻抗:  $Z_L = 10 \Omega$ ;
  - 额定变比:  $800 \text{ A} : 1 \text{ A}$ ;
- 仿真曲线如图 5。

从仿真结果上可以看出, 当铁芯 I 和铁芯 II 在开合式结构中的磁导率均大于  $200 \text{ Gs/Oe}$  时,

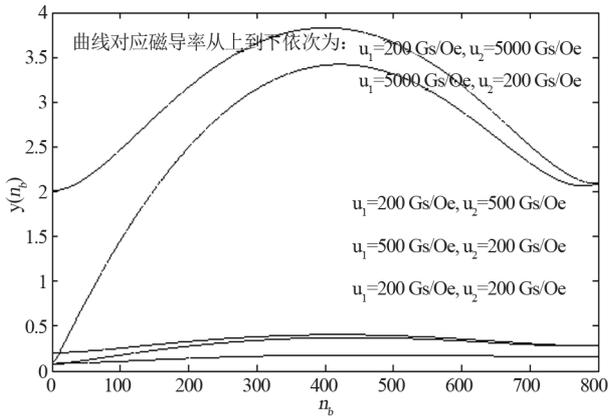


Figure 5. The curve of  $(y_{n_b})$  and  $n_b$

图 5.  $(y_{n_b})$  与  $n_b$  的关系曲线

$\sqrt{(wb_1)^2 + \left(\frac{R_2}{n_2} - w^2b_2\right)^2}$  在  $n_b = 400$  时取得最大值，从

数学推导上也可以证明，在此条件下，该结论成立。

因此，在实际中进行参数的优化设计，可以使互感器获得更优异的性能。

### 3.3. 补偿设计

为了进一步改善上述结构的互感器的精度性能，在这里引入了无源的 R、C 补偿方法，补偿后的互感器结构如图 6。

无源的 R、C 补偿方法的原理是在铁芯 II 中注入一个有效的合成补偿电流，进而降低或完全补偿铁芯 II 中原来的励磁电流，即误差电流<sup>[12]</sup>，下面从磁动势方程的角度来进行阐述。

对铁芯 II 列磁动势方程有，未引入无源的 R、C 补偿方法前对应的磁动势方程为：

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = n_1 i_{02} \quad (15)$$

引入无源的 R、C 补偿方法后对应的磁动势方程为：

$$\begin{aligned} n_1 i_1 + n_2 i_2 + n_{\text{同}} i_f + n_{\text{正}} i_{\delta} &= n_1 i_{02} \\ n_1 i_1 + n_2 i_2 &= n_1 i_{02} - (n_{\text{同}} i_f + n_{\text{正}} i_{\delta}) \end{aligned} \quad (16)$$

从上式分析知，若合成的补偿电流基本上取代未补偿前的误差电流，则可以达到进一步补偿的目的，即：

$$n_1 i_{02} - (n_{\text{同}} i_f + n_{\text{正}} i_{\delta}) \approx 0 \quad (17)$$

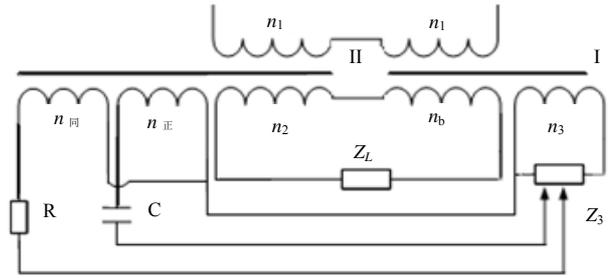


Figure 6. The structure of the current transformer with passive compensation circuit

图 6. 无源补偿的互感器结构图

从而，

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 \approx 0 \quad (18)$$

依据上面的分析，采用无源的 R、C 补偿方法后，能够进一步改善电流互感器的幅值误差和相角误差，从而实现更高精度的开合式电流互感器。

由于采用了双级结构，并进行了参数优化设计，未引入无源的 R、C 补偿方法前，互感器的精度已经比较高，即铁芯 II 中基本上为零磁通，仅有极小的误差电流存在，所以注入的补偿励磁电流其实非常小，在实际的补偿设计中即要求选择很大的电阻 R 和电容 C。

当 R、C 都很大时，在  $Z_3$  上取分压的阻抗都远小于 R 补偿回路和 C 补偿回路对应的阻抗，即补偿回路对互感器的影响非常小，可以忽略不计。同时，在 R 补偿回路中，电阻 R 远大于其补偿绕组的激磁阻抗，所以所取分压主要降落在 R 上；在 C 补偿回路中，电容 C 的容抗远大于其补偿绕组的激磁阻抗，所以所取分压主要降落在 C 上。又由于  $Z_3$  中的电流基本上与二次电流同相，所以 R 补偿回路的补偿电流主要补偿幅值误差，C 补偿回路的补偿电流主要补偿相角误差。

### 4. 互感器实现

根据上面的设计理论，该文设计了该结构的在线校验用开合式标准电流互感器，该电流互感器的相关参数选择如下：

- 额定变比选择：800 A : 1 A，即选择一次绕组为 1 匝，二次绕组为 800 匝；
- 负载选择：考虑到该电流互感器是在线校验用标准电流互感器，输出为便于采集的模拟小信号，所以选择精度等级为 0.005 级 1 A / 0.05 A、 $R_L =$

80 Ω 的仪用小电流互感器作负载，从而得到与二次电流成比例的模拟小信号；

- 铁芯选择: 铁芯 I 和铁芯 II 都为切割的环形铁芯，尺寸都为 120 mm \* 80 mm \* 20 mm，为了提高互感器的抗饱和能力，铁芯 I 选择硅钢材料的铁芯，为了构成强有效的反馈，铁芯 II 选择初始磁率高的坡莫合金材料的铁芯，其在两边开气隙后若密合的比较好，初始磁率可以达到 2000 Gs/Oe 左右；
- 导线选择: 二次电流为 1 A，选择直径为 0.68 mm 的铜线，辅助绕组和补偿绕组中的电流相对较小，可选用线径更小的铜线。

根据前面的参数优化设计分析，可选择  $n_b = 400$ ，同时根据铁芯尺寸和电气参数确定辅助绕组的匝数  $n_3 = 200$ ，补偿绕组的匝数  $n_{同} = n_{正} = 200$ 。其绕组分布为对称分布，辅助绕组在铁芯 I 的内层，补偿绕组在铁芯 II 的内层，二次绕组都分布在外层，层间进行隔离，绕组分布如图 7。

当按上面的绕组分布绕制完成后，进行电阻测量，然后根据公式(8)确定  $Z_3$ 。最后，该文设计了安装铰链，将互感器安装后的实物结构图如图 8。

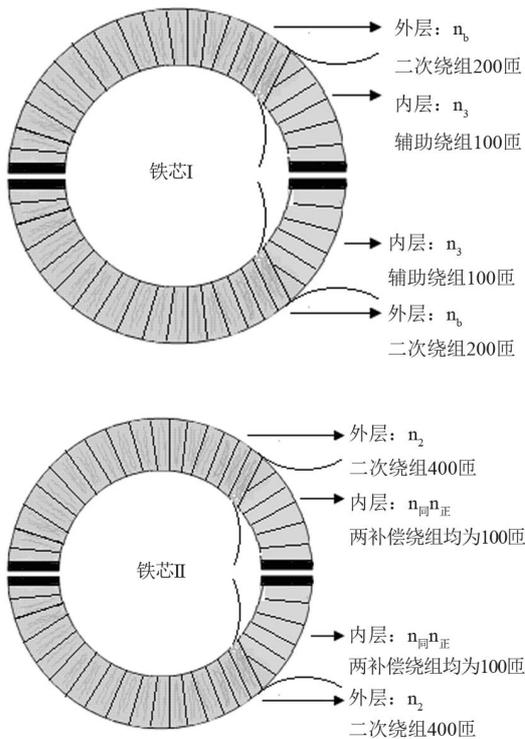


Figure 7. The winding distribution  
图 7. 绕组分布图

### 5. 互感器精度试验

该文的精度测试是在国家高压计量站进行的，并且通过了 0.05 级的精度测试，取得了检定报告。国家高压计量站选用了精度等级为十万分之一的电磁式电流互感器作为标准电流互感器，互感器校验仪的精度为 0.02 级，构成的互感器校验系统能够对 0.05 级的电流互感器进行检定，测试框图如图 9。

根据电流互感器国家标准<sup>[13]</sup>，对于精度等级为 0.05 级的电流互感器，允许的比值差和相位差如下表 1。

依照测量用电流互感器检定规程<sup>[2]</sup>，对于互感器精度试验的测试点，该文选在额定电流的 5%、10%、

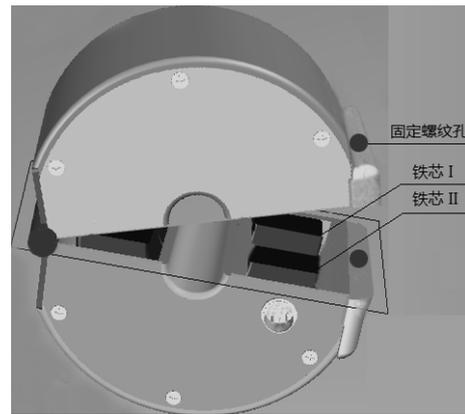


Figure 8. The picture of the current transformer after installation  
图 8. 互感器安装后的结构图

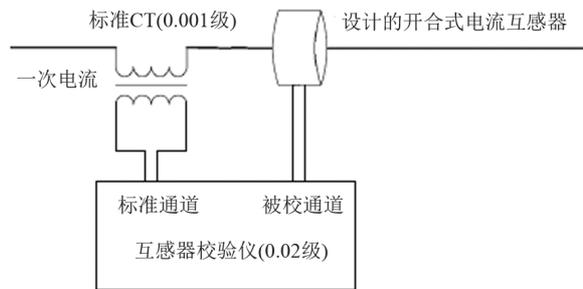


Figure 9. The test block diagram of the calibration system  
图 9. 校验系统测试框图

Table 1. The error limit of the current transformer  
表 1. 电流互感器误差限值表

精度等级	额定电流百分数(%)	允许误差	
		比值差(%)	相位差(°)
0.05	5	±0.10	±4
	10~120	±0.05	±2

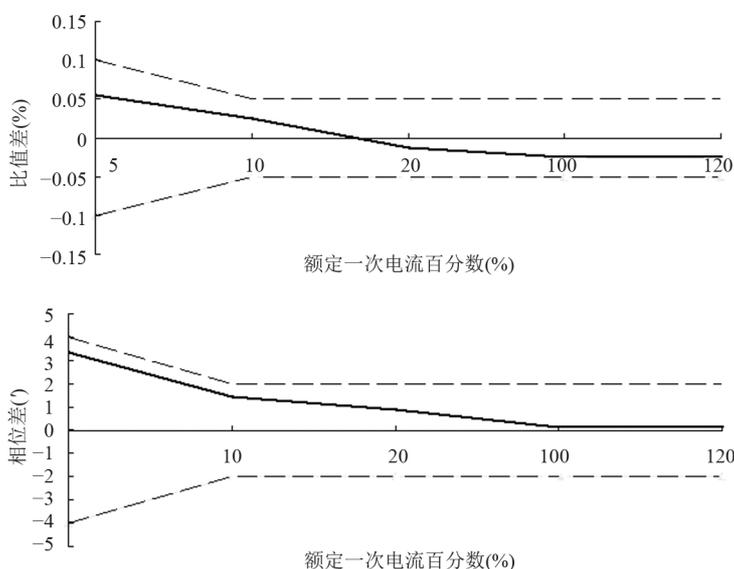


Figure 10. The error curve the current transformer  
图10. 互感器的误差曲线图

20%、100%和 120%处，在对应的测试电流下，互感器校验仪将被校电流互感器的输出和标准电流互感器的输出进行测差比较，从而得到被校电流互感器的误差，从校验仪上可以直接读出该误差。下面是设计的开合式电流互感器的误差曲线和精度等级为 0.05 级的误差限值曲线的比较图，如图 10。

测试结果表明，所设计的开合式电流互感器的误差曲线在精度等级为 0.05 级的误差限值曲线内，所以其精度优于 0.05 级。而且，其在开合 50 次后再做校验实验，其精度仍然满足要求。

## 6. 总结

该文设计了一种在线校验用的标准电流互感器，它能够很容易的进行在线安装，有很强的抗干扰能力，其在双级互感器结构的基础上进行了参数优化设计和补偿设计，输出易于采集的模拟小信号。经国家高压计量站精度测试，该开合式电流互感器在全量程范围内有很好的线性度，重复性好，精度优于 0.05 级，非常适合作为电流互感器在线校验系统的传感部分。

该标准电流互感器的不足之处在于对互感器的安装要求严格，必须保证铁芯结合面有效密合，所以安装误差必须控制在一定范围，否则互感器难以达到设计的精度。后续的工作可以是分析安装尺寸的变动对互感器误差的影响，从而得出保证互感器精度的允许安装误差范围，进而指导工程应用。

## 7. 致谢

该文是在导师徐雁老师的指导下完成的，徐老师她治学严谨，科研上务实求真，对待学生耐心而不乏亲切，给予了我许多的帮助和很多启发性的意见，最终才使得该论文顺利完成，在此，我带着崇高的敬意来表达对徐老师的感谢之情，谢谢您，辛苦了！另外，朱明钧老师、肖霞老师也提出了许多宝贵的意见，学生也衷心的感谢您们。最后，该文参考了许多文献，也包括引文中没有出现的文献，从这些文献中自己收获了许多设计思想和方法，这也使自己顺利完成论文起到了重要的作用，所以也要感谢那些文献的作者，因为您们的成果才促成该论文的完成，谢谢您们！

## 参考文献 (References)

- [1] Y. Tong, B. H. Li. An accurate continuous calibration system for high voltage current transformer. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(2): Article ID 025107.
- [2] JJG 313-2010. 测量用电流互感器检定规程[Z].
- [3] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.
- [4] E. So, R. Shiyan and D. A. Bennett. High-current high-precision openable-core AC and AC/DC current transformers. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 571-576.
- [5] 刘继发. 校验用标准双级电流互感器[J]. 电测与仪表, 1982, 10: 43-44.
- [6] 曹团结, 张剑, 尹项根等. 电流互感器的误差分析与工程计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 1: 53-56.
- [7] 杨鹏, 赵伟, 黄松岭等. 铁心开气隙电流互感器原理表述新探[J]. 电测与仪表, 2007, 44(10): 44-47.

- [8] 谭丽中. 电流互感器误差分析与校验[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 5: 33-34.
- [9] H. B. Brooks, F. C. Holtz. The two-stage current transformer. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1922, XLI: 382-393.
- [10] 刘君, 吴广宁, 周利军等. 零磁通传感器的研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 67-70.
- [11] P. J. Betts. Two-stage current transformers in differential calibration circuits. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education—Reviews, IEE Proceedings A, 1983, 130(6): 324-328.
- [12] 张振洪, 赵有俊. 高精度零磁通电流传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 10: 52-54.
- [13] GB 1208-2006. 电流互感器[Z].