

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306752

# 基于混合铁心的新型电流互感器研究\*

张哲璇<sup>1,2</sup> 陈柏超<sup>1,2</sup> 田翠华<sup>1,2</sup> 陈耀军<sup>1,2</sup> 王羽<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院 武汉 430072; 2. 武汉大学电网环境保护全国重点实验室 武汉 430072)

**摘要:**传统电流互感器铁心饱和会导致其二次电流波形发生畸变,进而可能影响电能计量的精度或引起继电保护设备错误动作,威胁电网的安全稳定运行。针对此类问题,提出了基于混合铁心的新型电流互感器(CCCT)。CCCT主要由混合铁心、二次绕组、二次电阻、磁场传感器与信号处理电路组成,其中混合铁心包含完整的内铁心与带气隙的外铁心,磁场传感器放置在外铁心的气隙中,其输出信号用于补偿发生畸变的二次电流。为验证该结构的有效性,进行了有限元仿真,制作了CCCT样机并进行了正弦交流电流、正弦半波电流、短路电流和直流电流的测量实验。有限元仿真与实验结果表明,CCCT在额定电流下的复合误差小于0.2%,稳态对称短路电流下的复合误差为2.04%,暂态短路电流下的峰值瞬时误差为4.25%,直流条件下输出与输入的拟合优度为0.9999,既基本保留了传统电流互感器的测量精度,也具有良好的暂态响应特性与抗直流特性,可同时满足相关标准对测量、保护用电流互感器的精度要求,具备在实际工程中应用的潜力。

**关键词:** 电流互感器; 铁心饱和; 电能计量; 继电保护; 混合铁心; 磁场传感器

**中图分类号:** TM933

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Research on a novel current transformer based on composite core

Zhang Zhexuan<sup>1,2</sup> Chen Baichao<sup>1,2</sup> Tian Cuihua<sup>1,2</sup> Chen Yaojun<sup>1,2</sup> Wang Yu<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Core saturation of traditional current transformers can cause distortion of the secondary current waveform, which may affect the accuracy of energy metering or cause malfunction of relay protection equipment, posing a threat to the power grid. A novel current transformer based on composite core (CCCT) is proposed to address such issue. The CCCT is mainly composed of a composite iron core, secondary winding, secondary resistance, magnetic sensor, and signal processing circuit. The composite iron core includes a complete inner iron core and an outer iron core with air gaps. The magnetic sensor is placed in the air gap of the outer iron core, and its output is used to compensate for the distorted secondary current. To verify the validity of the structure, this paper builds a finite element simulation model, makes a prototype, and carries out the measurement experiment including sinusoidal AC, sinusoidal half-wave current, short-circuit current and direct current. Results of the finite element simulation and experiment show that the composite error of the CCCT at rated current is less than 0.2%, the composite error under symmetrical steady short-circuit current is 2.04%, the peak value of instantaneous error under transient short-circuit current is 4.25%, and the goodness of fit between output and input under DC conditions is 0.9999, which can simultaneously meet the accuracy requirements of standards for measuring current transformers and protective current transformers. Consequently, the CCCT has the potential to be applied to practical projects since it has good transient response characteristics and anti-DC characteristics while maintaining the high measurement accuracy of traditional current transformers.

**Keywords:** current transformer; core saturation; electric energy metering; relaying; composite core; magnetic sensor

## 0 引言

电流互感器是电力系统中最广泛使用的测量设备之一,主要应用于电能计量、状态监测与继电保护等领域<sup>[1]</sup>。然而随着电网规模的不断扩大与清洁能源及非线性负荷的大量接入,易发生磁饱和的传统电流互感器逐渐难以完全满足电网发展的需要<sup>[2]</sup>。导致传统电流互感器铁心饱和的原因主要包括线路电流中存在的直流偏磁<sup>[3-4]</sup>与短路电流中包含的非周期分量<sup>[5]</sup>。当传统电流互感器铁心发生饱和时,二次电流会发生畸变,测量误差将有所增大,从而可能会影响电能计量的准确性或导致继电保护设备错误动作,给电力系统安全可靠运行带来威胁。

针对传统电流互感器铁心饱和问题,当前主流的方法可分为如下几类:

1) 在铁心上开气隙<sup>[6]</sup>。气隙式电流互感器具有抗饱和和能力强的特点,作为保护用电流互感器已广泛应用于电力系统中,但即使只有微米量级的气隙,也会使此类电流互感器的等效磁导率显著降低,在测量正弦交流时误差较大<sup>[7]</sup>;中国电力科学研究院提出了一种同时具备传统电流互感器和气隙式电流互感器优点的双铁心电流互感器<sup>[7]</sup>,但当一次电流中的直流分量较大时,该互感器的误差将仍主要由气隙式电流互感器决定,准确度依然不高。

2) 饱和补偿算法。饱和补偿算法或通过检测铁心饱和的起始与结束时刻,使用二次电流中还未发生畸变的部分估算一次电流波形参数,从而还原一次电流波形<sup>[8]</sup>;或通过数学、物理建模,得到互感器的励磁电流<sup>[9]</sup>;或通过神经网络算法重构一次电流波形<sup>[10]</sup>。饱和补偿算法不需要更换电流互感器,易嵌入到数字设备中,经济性较好,但一些算法依赖于互感器参数,其实现需要一定的计算时间,并且会不同程度的受到噪声的影响<sup>[11-12]</sup>。

3) 基于闭环反馈原理的去磁技术。此类技术在传统电流互感器的基础上增加了一定匝数的反馈线圈,并使用例如全桥逆变电路<sup>[13]</sup>、可调开关电阻<sup>[14]</sup>、电阻-电感-开关电路<sup>[15]</sup>与变压器<sup>[16]</sup>等设备产生一个反馈电流以避免铁心饱和。但在此类技术中用于产生反馈电流的设备往往体积较大,且均需要使用微处理器、控制算法与散热设备,去磁过程复杂且成本较高。

4) 使用不含铁心的电流传感器。主要包括罗氏线圈、光学电流传感器与基于磁传感芯片阵列的电流传感器。罗氏线圈的电流测量频带宽,广泛应用于测量高频或脉冲电流,但存在互感系数低,灵敏度较差且在波形起始处有轻微振荡等问题<sup>[17]</sup>。光学电流传感器具有优异的抗干扰能力、线性和频率响应特性,但由于技术不成

熟,运行故障率较高,暂未得到规模化应用<sup>[18]</sup>。基于磁传感芯片阵列的电流传感器是将多个磁传感芯片组成一定形状的阵列结构<sup>[19]</sup>,通过优化算法由磁传感芯片输出信号反演出被测电流的波形,具有重量轻,体积紧凑,可做到非接触、远距离测量等优点,但此类传感器完全依赖于磁传感芯片与优化算法的性能,并且会不同程度的受到外部干扰磁场的影响<sup>[20-21]</sup>。

针对上述问题,本文提出了一种基于混合铁心的新型电流互感器。本文首先介绍了 CCCT 的基本结构,建立了 CCCT 的等效模型,并从理论上分析了 CCCT 的工作原理与误差来源;随后进行了基于电路—磁场耦合的 CCCT 有限元仿真,初步验证了该结构的可行性;最后在理论与有限元仿真的基础上制作了 CCCT 样机,进行了正弦交流电流、正弦半波电流、短路电流与直流电流的测量实验,实验结果表明,CCCT 在一定范围内可以解决传统电流互感器铁心饱和导致的二次电流发生畸变的问题,并且具备测量直流电流的能力。

## 1 基本原理

### 1.1 基本结构

CCCT 主要由混合铁心、二次绕组、二次电阻、磁场传感器与信号处理电路组成,结构图如图 1 所示。CCCT 使用的混合铁心包括 1 个完整的环形内铁心与 1 个开设有 1 个或多个气隙的环形外铁心;二次绕组均匀绕制在内、外铁心之上,并通过二次电阻形成闭合回路;外铁心的气隙中放置有磁场传感器,用于测量该气隙处的磁场强度;信号处理电路用于将磁场传感器的输出信号与二次电阻电压信号进行一定处理(具体处理流程如 3.1 节 3) 中所示);信号处理电路的输出为 CCCT 的总输出。

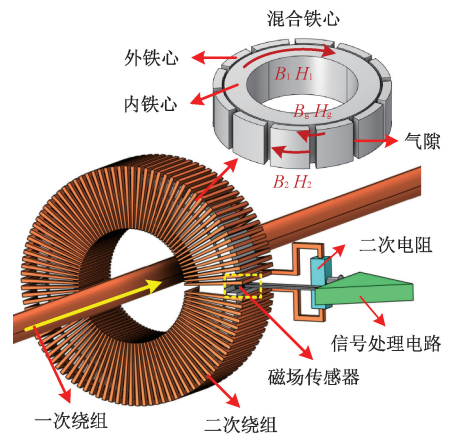


图 1 CCCT 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of CCCT

### 1.2 工作原理分析

根据安培环路定理:

$$\oint H dl = H_1 l_1 = i_1 - N_2 i_2 = N_2 i_m \quad (1)$$

$$\oint H dl = H_g n l_g + H_2 l_2 = i_1 - N_2 i_2 \quad (2)$$

式中:  $i_1$  为一次电流,  $i_2$  为二次电流,  $i_m$  为励磁电流,  $N_2$  为二次绕组匝数,  $H_1$  为内铁心磁场强度,  $l_1$  为内铁心平均长度,  $H_2$  为外铁心磁场强度,  $l_2$  为外铁心平均长度(不考虑气隙),  $H_g$  为气隙磁场强度,  $l_g$  为气隙长度,  $n$  为气隙个数。

考虑边缘效应时, 根据磁通连续性:

$$B_2 S_2 = G B_g S_2 \quad (3)$$

式中:  $B_2$  为外铁心磁感应强度,  $S_2$  为外铁心截面积,  $B_g$  为气隙磁感应强度,  $G$  是等效导磁面积系数<sup>[22]</sup>。

联立式(1)~(3)可得:

$$i_1 = N_2 i_2 + \left( n l_g + \frac{G l_2}{\mu_{r2}} \right) H_g \quad (4)$$

式中:  $\mu_{r2}$  为外铁心的相对磁导率。

当  $\mu_{r2}$  满足  $n l_g \gg G l_2 / \mu_{r2}$  时, 式(4)可简化为:

$$i_1 = N_2 i_2 + n l_g H_g \quad (5)$$

由式(5)可知, 将二次电流与气隙磁场强度比例相加后即可获得完整的一次电流波形。如图1所示, 气隙磁场强度可通过磁场传感器输出获得, 二次电流可由二次电阻电压等效代替。

#### 1) 等效磁化曲线

为方便进一步分析, 根据图2与式(6)、(7)将CCCT混合铁心等效为一个具有相同尺寸的完整铁心<sup>[23]</sup>, 并使用式(8)表示的数学近似模型<sup>[22]</sup>描述其铁心材料的  $B-H$  曲线。

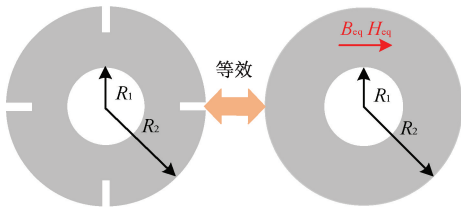


图2 CCCT 等效铁心示意图

Fig. 2 Diagram of equivalent iron core

$$B_{eq} (S_1 + S_2) = B_1 S_1 + B_2 S_2 \quad (6)$$

$$i_1 - N_2 i_2 = H_{eq} l_{eq} \quad (7)$$

$$B = k H^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

式中:  $B_{eq}$  为等效铁心的磁感应强度,  $S_1$  为内铁心截面积,  $B_1$  为内铁心磁感应强度,  $H_{eq}$  为等效铁心的磁场强度,  $l_{eq}$  为等效铁心的平均长度。

联立式(6)~(8)可得 CCCT 的等效磁化曲线为式

(9)~(10):

$$B_{eq} = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \left[ \frac{l_2}{l_1} (G \mu_0 H_g)^{\alpha} + \frac{k^{\alpha} n l_g H_g}{l_1} \right]^{\frac{1}{\alpha}} + \frac{S_2}{S_1 + S_2} (G \mu_0 H_g) \quad (9)$$

$$H_{eq} = \frac{l_2}{l_{eq}} \left( \frac{G \mu_0 H_g}{k} \right)^{\alpha} + \frac{n l_g H_g}{l_{eq}} \quad (10)$$

式中:  $B_{eq}$  与  $H_{eq}$  均表示为气隙磁场强度  $H_g$  的函数。

由式(9)~(10)可以得到如图3所示的CCCT等效磁化曲线。本文根据CCCT铁心饱和情况和等效磁化曲线斜率的变化趋势将其分为线性区、部分饱和区和完全饱和区。

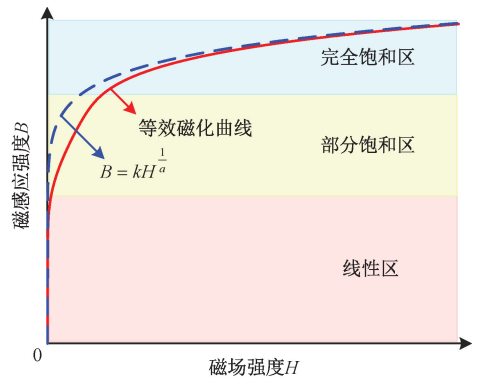


图3 等效磁化曲线

Fig. 3 Equivalent magnetization curve

(1) 当CCCT内、外铁心均未饱和, 等效铁心的相对磁导率保持在较高的数值时, CCCT工作在线性区。在此工况下, 气隙的存在使得磁感应强度集中分布于内铁心, 而外铁心与气隙处的磁感应强度接近于0, CCCT与传统电流互感器的工作状态相似, 二次电流与总输出均可线性转变一次电流。

(2) 当内铁心进入饱和, 等效铁心的相对磁导率有所下降时, CCCT工作在部分饱和区。在此工况下, 二次电流会发生畸变, 但根据式(5)校正后的CCCT总输出仍能线性转变一次电流。

(3) 当内、外铁心均进入饱和时, CCCT工作在完全饱和区。由于外铁心的相对磁导率  $\mu_{r2}$  不再满足  $n l_g \gg G l_2 / \mu_{r2}$ , CCCT总输出也不再可以线性转变一次电流。

综上所述, 在使用CCCT时, 应使其工作在等效磁化曲线的线性区与部分饱和区。

#### 2) 等效电路模型与误差分析

当气隙磁场强度未超过磁场传感器的饱和磁场  $H_{sat}$  时, 磁场传感器的输出电压  $u_{sensor}$  为<sup>[24]</sup>:

$$u_{sensor} = K_s H_g u_0 \quad (11)$$

式中:  $K_s$  是磁场传感器的灵敏度,  $u_0$  为制作工艺、内部噪

声或外界杂散磁场导致的不等位电势。

当磁场传感器输出信号经过信号处理电路的调零与调整幅值后,可写为:

$$u_{\text{sensor}} = KK_s H_g + u'_0 \quad (12)$$

式中: $K$ 为放大倍数, $u'_0$ 为残余的不等位电势。

联立式(1)、(2)与(12)可得:

$$u_{\text{sensor}} = \frac{KK_s N_2}{nl_g} i_m + u'_0 \quad (13)$$

综上,CCCT的等效电路如图4所示<sup>[25]</sup>,其中,根据式(13),本文将磁场传感器等效为1个受励磁电流 $i_m$ 控制的电压源与1个表示残余不等位电势的电压源 $u'_0$ , $L_{\text{meq}}$ 为等效铁心的励磁电感, $R_{2c}$ 为二次绕组电阻, $R_2$ 为二次电阻, $u_{\text{CCCT}}$ 为CCCT的总输出电压。

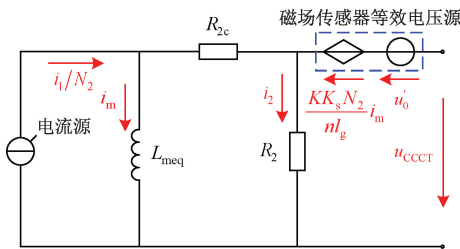


图4 CCCT等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of CCCT

二次电流误差的复数表达式为<sup>[26]</sup>:

$$\epsilon = \frac{N_2 \dot{I}_2 - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-N_2 \dot{I}_m}{\dot{I}_1} \quad (14)$$

CCCT总输出误差的复数表达式为:

$$\epsilon_{\text{CCCT}} = \frac{N_2 \dot{I}_2 + N_2 \dot{U}_{\text{sensor}} - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = \left(1 - \frac{KK_s N_2}{nl_g}\right) \epsilon + \frac{N_2 \dot{U}'_0}{\dot{I}_1} \quad (15)$$

由式(15)可得出:

(1)当气隙总长度 $nl_g$ 、二次绕组匝数 $N_2$ 与磁场传感器型号确定后,放大系数 $K$ 应为:

$$K = \frac{nl_g}{K_s N_2} \quad (16)$$

(2)CCCT总输出的误差包含两项:第1项在理想状态下应为0,但由于气隙长度 $nl_g$ 、磁场传感器灵敏度 $K_s$ 与放大倍数 $K$ 在实际中均存在误差,因此该项实际存在且与二次电流误差 $\epsilon$ 成正比;第2项与残余不等位电势 $u'_0$ 有关,主要由于信号处理电路无法完全消除磁场传感器存在的不等位电势且各类电子元器件均存在噪声信号与失调电压,但该项与一次电流成反比,将会随着一次电流的增加而减小。

为了降低CCCT总输出的误差,除了选择合适的加

工工艺、铁心结构参数、软磁材料与二次绕组匝数之外,应使用高灵敏度的磁场传感器及低噪声、低失调电压的高精度电子元器件以减小残余不等位电势 $u'_0$ 。

### 3) 动态性能分析

根据参考文献[27],CCCT的动态性能可由其阶跃响应近似表示。如图4所示,当一次电流 $i_1$ 为阶跃函数 $\epsilon(t)$ 时,二次电流 $i_2$ 与励磁电流 $i_m$ 可分别由式(17)与(18)描述。

$$i_2 = e^{-\frac{t}{\tau}} \epsilon(t) \quad (17)$$

$$i_m = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \epsilon(t) \quad (18)$$

式中: $\tau$ 为时间常数,可由式(19)表示:

$$\tau = \frac{L_{\text{meq}}}{R_{2c} + R_2} \quad (19)$$

当CCCT的铁心未发生饱和时,时间常数 $\tau$ 的数值往往较大。因此,在一次电流完成跳变后的极短的时间内,二次电流 $i_2 \approx \epsilon(t) = i_1$ ,励磁电流 $i_m \approx 0$ 。

## 2 有限元仿真与分析

### 2.1 有限元仿真模型

按照图1所示的结构搭建CCCT有限元仿真模型。仿真模型的额定一次电流为100 A,额定二次电流为1 A,额定输出为1 V·A。如图5与6所示,CCCT的设计流程依次为:

1)根据额定一、二次电流选择CCCT的匝数比。在本章的仿真模型中,一次绕组匝数设置为1匝,二次绕组匝数设计为100匝。为了进一步提高电流互感器的测量精度,铁心材料可使用磁导率较高的非晶和纳米晶合金代替传统的冷轧硅钢片。

2)根据式(20)计算(内)铁心截面积<sup>[28]</sup>:

$$S_1 = \frac{I_{2n} Z_2}{\sqrt{2} \pi / K_{Fe} N_2 B_N} \times 10^4 \quad (20)$$

式中: $I_{2n}$ 为二次电流额定值, $Z_2$ 为二次回路总阻抗, $f$ 为频率, $K_{Fe}$ 为叠片系数, $B_N$ 为额定电流下的磁密。

3)在(内)铁心的截面积确定后,其宽度 $r$ 与高度 $h$ 会通过影响平均磁路长度与二次绕组内阻值影响互感器的测量误差。对于环状铁心,文献[29]给出了经验公式: $1.5r \leq h \leq 2r$ 。

4)外铁心气隙的总长度应满足以下工况:当一次电流的瞬时值等于短路冲击电流且二次电流已衰减至0时,气隙磁场强度 $H_g$ 应小于磁场传感器的饱和磁场 $H_{sa}$ 。即式(5)转变为式(21):

$$nl_g \geq \frac{1.9\sqrt{2}I_{\text{psc}}}{H_{sa}} \quad (21)$$

式中: $I_{\text{psc}}$ 为额定一次短路电流。

5) 气隙的长度  $l_g$  应大于磁场传感器(及其保护外壳)的厚度。但如图 7 所示,当磁通流经铁心中的气隙时,会发生衍射现象,且气隙长度值越大,衍射现象越明显<sup>[30]</sup>。因此,气隙长度值仅应略大于磁场传感器(及其保护外壳)的厚度。在确定气隙的长度后,可进一步确定气隙的数量  $n$ 。

6) 如图 7 所示,为了减小衍射现象对 CCCT 输出精度的影响,应使磁场传感器的传感区域位于气隙的中部,即衍射现象较弱的区域。因此,外铁心的宽度应与磁场传感器的高度基本相同。

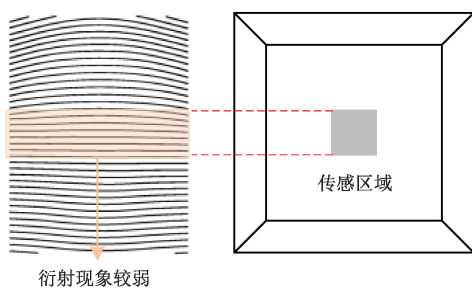


图 7 衍射现象与磁场传感器的传感区域  
Fig. 7 Diffraction phenomenon and sensing area of magnetic field sensor

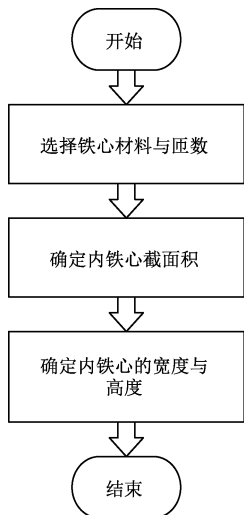


图 5 内铁心的设计流程  
Fig. 5 Design process of inner core

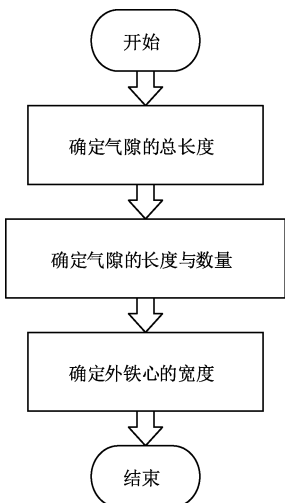


图 6 外铁心的设计流程  
Fig. 6 Design process of outer core

如图 8 所示,设置内铁心内半径为 25 mm,外半径为 35 mm,外铁心内半径为 36 mm,外半径为 40 mm,内、外铁心高度均为 20 mm;外铁心上均匀开设了 12 个气隙,

每个气隙长度均为 3 mm;内、外铁心材料的  $B-H$  曲线如图 9 所示。本文通过改变仿真中外电路的结构模拟不同工况下的一次电流波形。

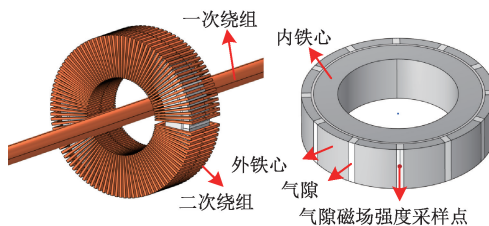


图 8 CCCT 仿真模型  
Fig. 8 Simulation model of CCCT

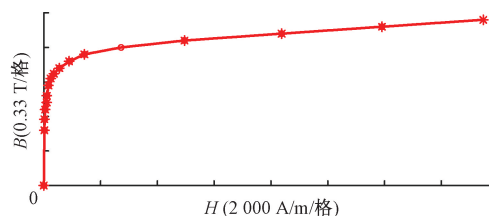


图 9  $B-H$  曲线  
Fig. 9  $B-H$  curve

## 2.2 正弦交流电流仿真分析

在仿真中设置一次电流有效值的范围为 1 ~ 120 A<sup>[30-32]</sup>,记录不同一次电流下的二次电流、气隙磁场强度与 CCCT 总输出的波形。一次电流有效值为 100 A 时的仿真波形与磁场分布云图如图 10 所示,其中二次电流的数值折算到一次侧,气隙磁场强度与 CCCT 总输出的数值根据式(5)计算得到。CCCT 二次电流与总输出的复合误差曲线如图 11 所示。

由图 10 与 11 可知:

1) 当一次电流有效值小于 120 A 时,CCCT 在一个周期内均工作在线性区。此时,CCCT 的内、外铁心均未发生饱和,磁感应强度集中分布于内铁心,气隙磁场强度峰值仅约为 0.60e,二次电流与 CCCT 总输出的波形均可以

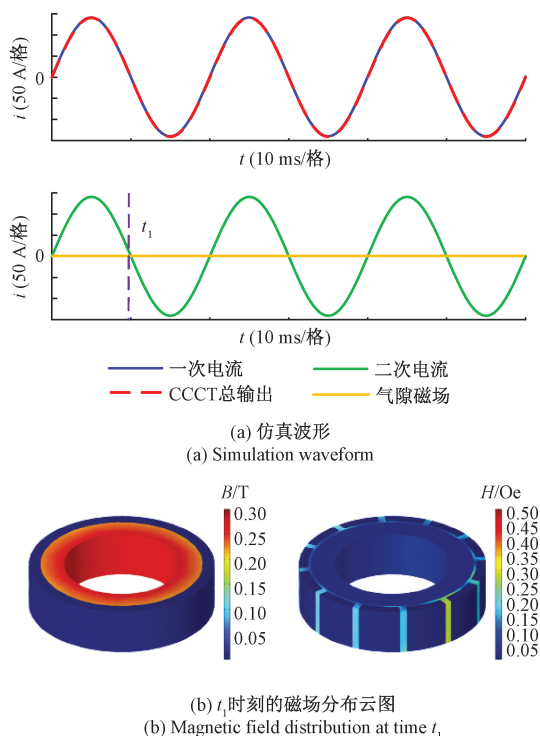


图 10 一次电流有效值为 100 A 时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results when the rms of the primary current is 100 A

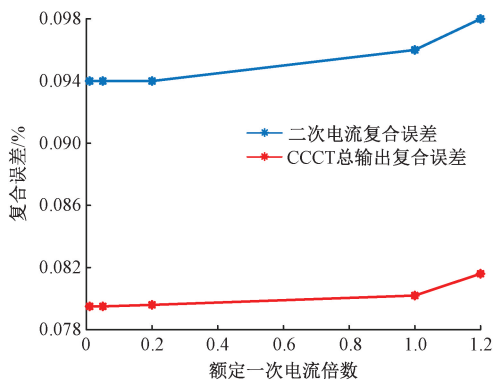


图 11 复合误差曲线

Fig. 11 Composite error curve

准确反映一次电流波形。

2) CCCT 总输出的复合误差变化趋势与二次电流的复合误差变化趋势基本相同,且 CCCT 总输出的精度较二次电流更高。

### 2.3 短路电流仿真分析

短路电流可表示为:

$$i_p = I_p [e^{-\frac{t}{T_p}} \cos\theta - \cos(\omega t + \theta)] \quad (22)$$

式中:对电流互感器暂态响应特性有影响的参数主要包括短路初始角  $\theta$ 、短路电流幅值  $I_p$  与一次时间常数  $T_p$ 。

铁心中存在的剩磁会使电流互感器更易饱和,从而也会影响电流互感器的暂态响应特性。

#### 1) 短路初始角 $\theta$

仿真中设置短路初始角  $\theta$  分别为  $90^\circ$  与  $0^\circ$ ,保持短路电流幅值  $I_p$  为  $1000\sqrt{2}$  A,一次时间常数  $T_p$  为 60 ms。仿真波形与磁场分布云图分别如图 12 与 13 所示。

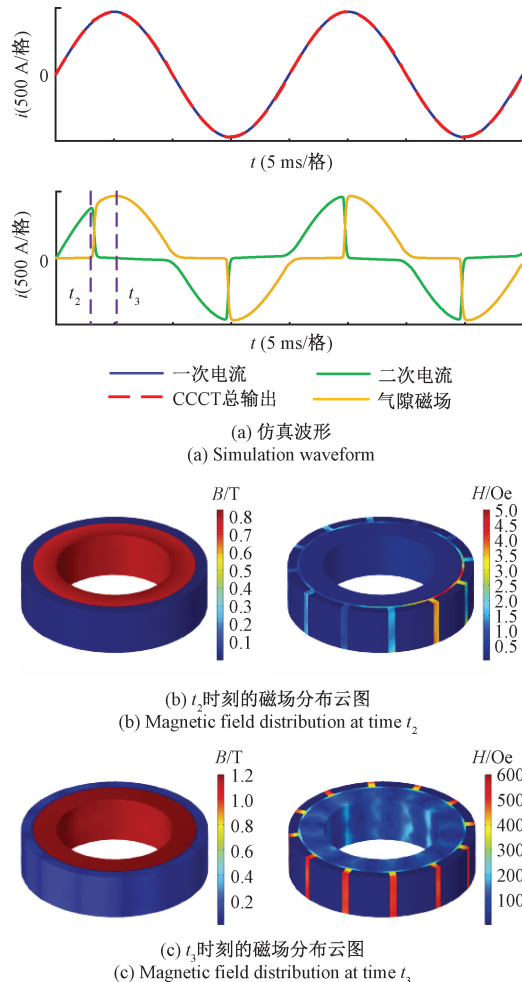


图 12 初始角  $\theta$  为  $90^\circ$  时的仿真结果

Fig. 12 Simulation results when  $\theta = 90^\circ$

由图 12 与 13 可知:

(1) 在此类工况下,CCCT 在一个周期内会相继工作在线性区和部分饱和区。当 CCCT 工作在线性区时(例如  $t_2$  与  $t_4$  时刻),磁场分布规律与 2.2 节相同,二次电流与 CCCT 总输出均可以还原一次电流。当 CCCT 工作在部分饱和区时(例如  $t_3$  与  $t_5$  时刻),由于内铁心已进入饱和,二次电流波形开始发生畸变,无法正确反映一次电流波形;而气隙磁场强度在内铁心进入饱和后迅速增加。

(2) 一次电流中包含的非周期分量会随着短路初始角  $\theta$  的减小而上升,从而导致铁心的饱和时间与二次电流的畸变程度增加。但 CCCT 总输出波形均与一次电流

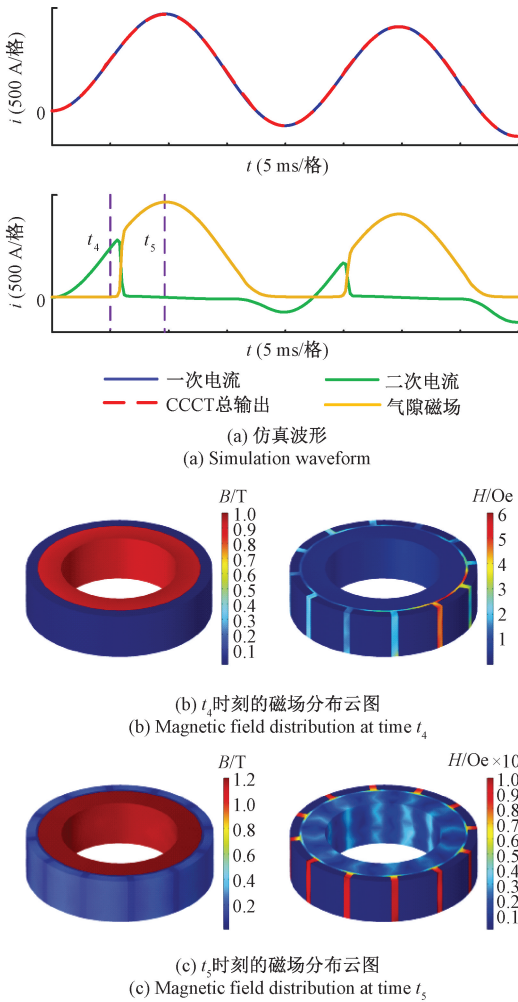


图 13 初始角  $\theta$  为  $0^\circ$  时的仿真结果  
Fig. 13 Simulation results when  $\theta = 0^\circ$

波形基本保持一致,  $\theta = 90^\circ$  与  $\theta = 0^\circ$  时的复合误差分别为 1.02% 与 1.06%, 峰值瞬时误差<sup>[30-32]</sup> 分别为 2.1% 与 2.24%, 未明显受到短路初始角  $\theta$  的影响。

2) 短路电流幅值  $I_p$

仿真中设置短路电流峰值  $I_p$  分别为  $1\ 000\sqrt{2}$  A 与  $2\ 000\sqrt{2}$  A, 保持一次时间常数为 60 ms, 短路初始角  $\theta$  为  $0^\circ$ 。仿真波形如图 14 所示。

仿真结果表明, 铁心饱和时间与二次电流畸变程度会随着短路电流幅值  $I_p$  的增加而增加, 而 CCCT 总输出波形可以在不同的短路电流幅值  $I_p$  下较好地跟踪一次电流的变化, 峰值瞬时误差分别为 2.24% 与 1.64%。

3) 一次时间常数  $T_p$

仿真中, 一次时间常数  $T_p$  分别设置为 100 与 200 ms<sup>[33]</sup>, 保持短路电流峰值  $I_p$  为  $1\ 000\sqrt{2}$  A, 短路初始角  $\theta$  为  $0^\circ$ 。仿真波形如图 15 所示。

由图 15 可知, 铁心饱和时间与 CCCT 二次电流的畸变程度会随一次时间常数  $T_p$  的增加而增大, 并且当  $T_p$

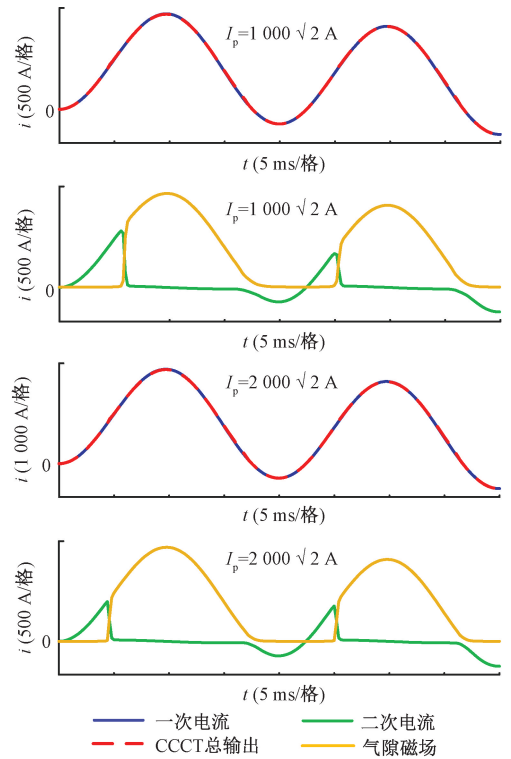


图 14 不同短路电流幅值的仿真结果  
Fig. 14 Simulation results of different short-circuit current amplitude

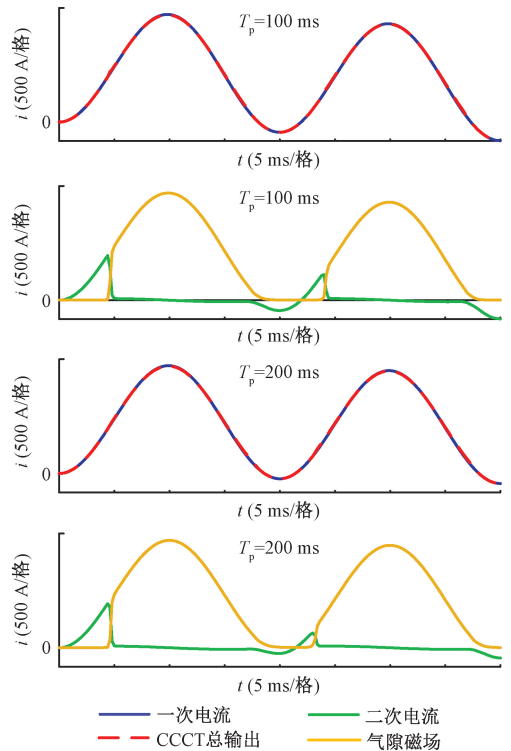


图 15 不同一次时间常数下的仿真结果  
Fig. 15 Simulation results of different primary time constants

较大时,二次电流几乎衰减至 0;而 CCCT 总输出波形依然与一次电流波形相吻合,峰值瞬时误差分别为 2.21% 与 2.15%。仿真结果表明,CCCT 在电力系统所涵盖的时间常数下均可表现出良好的暂态响应特性。

4) 剩磁

本文使用 C-O-C-O 工作循环的电流波形作为一次电流研究剩磁对 CCCT 暂态响应特性的影响<sup>[34]</sup>。由于铁磁材料的磁滞现象是产生剩磁的原因<sup>[35]</sup>,因此本节在仿真模型中使用 Jiles-Atherton 模型代替前文使用的  $B-H$  曲线描述铁磁材料的磁化过程。本节的仿真参数见表 1,仿真结果如图 16 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 The parameters of simulation

参数	数值
饱和磁化强度 $M_s/(A \cdot m^{-1})$	$0.97 \times 10^6$
域壁密度 $a/(A \cdot m^{-1})$	1.46
域间耦合 $\alpha$	$1.63 \times 10^{-6}$
钉扎损耗系数 $k/(A \cdot m^{-1})$	4.5
可逆磁化系数 $c$	0.17
一次时间常数 $T_p/ms$	60
短路电流幅值 $I_p/A$	$1\ 000\sqrt{2}$
无电流时间 $t_{fr}/ms$	800
短路电流通过时间 $t/ms$	40

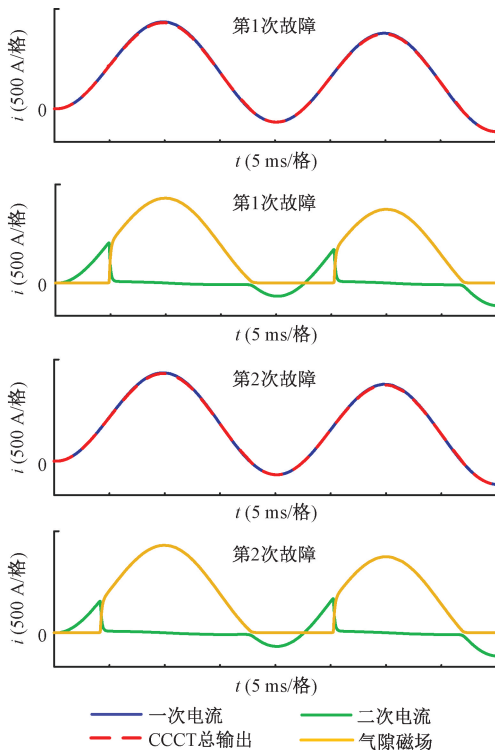


图 16 铁心含有剩磁的仿真结果

Fig. 16 Simulation results when the core contains remanence

在仿真中,自动重合闸动作时的内铁心剩余磁感应强度约为 0.8 T,外铁心剩余磁感应强度近似为 0 T。如图 16 所示,在两次测量中,二次电流波形均发生畸变,并且在第 2 次测量中内铁心含有的剩磁导致二次电流波形畸变更严重;CCCT 总输出的峰值瞬时误差分别为 2.16% 与 2.1%,测量准确度未受到内铁心剩磁的影响。

面对时间常数较大的发电机系统或考虑自动重合闸的二次工作循环时,工程上会通过成倍地增加互感器铁心截面积或在铁心上开气隙的方式防止其发生暂态饱和<sup>[30-32]</sup>。根据本节的仿真结果,使用 CCCT 不但可以减小保护用电流互感器的体积,而且可以更精确地还原短路电流波形,从而防止继电保护设备,特别是差动保护设备出现错误动作<sup>[36]</sup>。

2.4 具有直流偏磁的正弦交流电流仿真分析

在仿真中,一次电流有效值设置为 100 A,直流偏磁含量设置为一次电流有效值的 0%~10%。直流偏磁含量为 10% 时的仿真波形如图 17 所示。图 18 为 CCCT 二次电流与总输出的复合误差随直流偏磁的变化曲线。

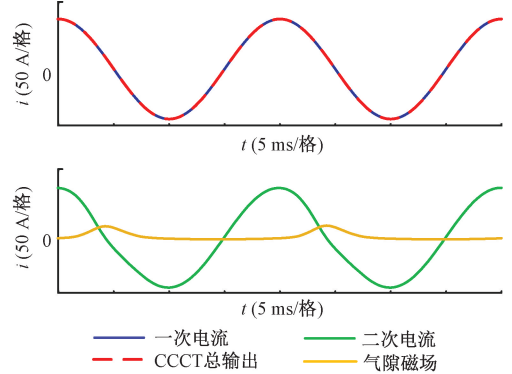


图 17 一次电流含有直流偏磁时的仿真波形

Fig. 17 Simulation waveforms when primary current contains DC content

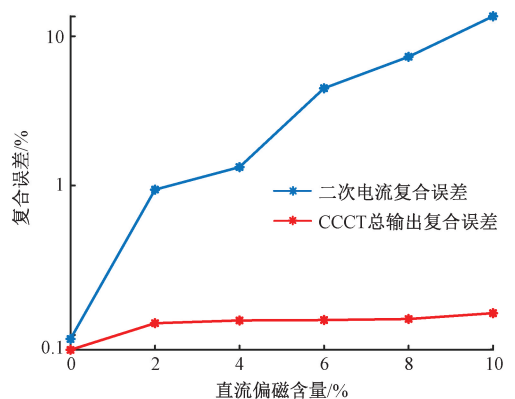


图 18 复合误差曲线

Fig. 18 Composite error curve



仿真结果表明,当一次电流中含有直流偏磁含量时,铁心可能会在与直流偏磁方向一致的半周内进入饱和,从而导致二次电流发生不同程度的畸变,复合误差有所增加;而 CCCT 总输出的复合误差显著低于二次电流复合误差,可以基本还原一次电流波形。

## 2.5 阶跃响应仿真分析

在仿真中,设置一次电流为如图 19 所示的阶跃函数,过渡区为  $1 \mu\text{s}$ 。图 19 与 20 分别为不同仿真时间下的 CCCT 阶跃响应的仿真波形。

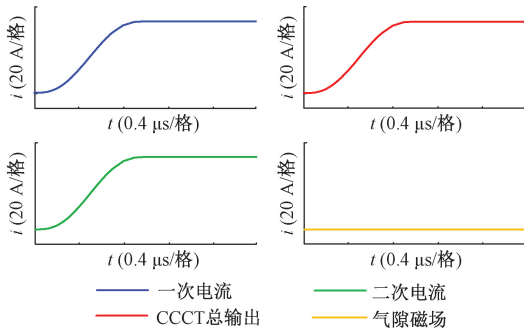


图 19 阶跃响应的仿真波形 ( $2 \mu\text{s}$ )

Fig. 19 Simulation waveforms of step response ( $2 \mu\text{s}$ )

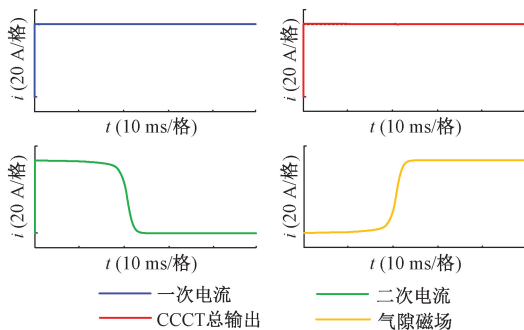


图 20 阶跃响应的仿真波形 ( $50 \text{ms}$ )

Fig. 20 Simulation waveforms of step response ( $50 \text{ms}$ )

仿真结果表明,在一次电流发生跳变后的极短的时间内,二次电流与 CCCT 总输出的波形均与一次电流波形基本保持一致,气隙磁场强度近似为 0;在铁心未发生饱和时,由于时间常数  $\tau$  较大,二次电流的衰减过程较慢;在内铁心发生饱和后,时间常数  $\tau$  会迅速减小,导致二次电流在较短的时间内衰减至 0;CCCT 总输出在二次电流衰减至 0 时依然可以还原一次电流波形。

## 3 实验与分析

### 3.1 样机

#### 1) 铁心

为了进一步验证 CCCT 具有的优势,本文制作了额

定电流比为  $100/1 \text{A}$ 、额定输出为  $1 \text{V}\cdot\text{A}$  的 CCCT 样机。CCCT 样机所使用的内、外铁心如图 21 所示,其几何参数,气隙长度及个数均与仿真一致。铁心材料选择相对磁导率较高的非晶合金,其未饱和时的相对磁导率最高可达约 350 000,饱和磁感应强度约为  $1.04 \text{T}$ 。

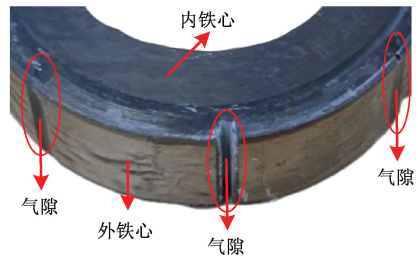


图 21 CCCT 铁心

Fig. 21 Iron core of CCCT

#### 2) 磁场传感器

常用的微磁场传感器主要包括霍尔、各向异性磁阻 (AMR)、巨磁阻 (GMR) 与隧道磁阻 (TMR) 等传感器。本文选择在灵敏度、线性范围与温漂特性等方面更有优势的 TMR 传感器<sup>[37]</sup>。CCCT 样机使用江苏多维科技有限公司生产的型号为 TMR2501 的 TMR 传感器。

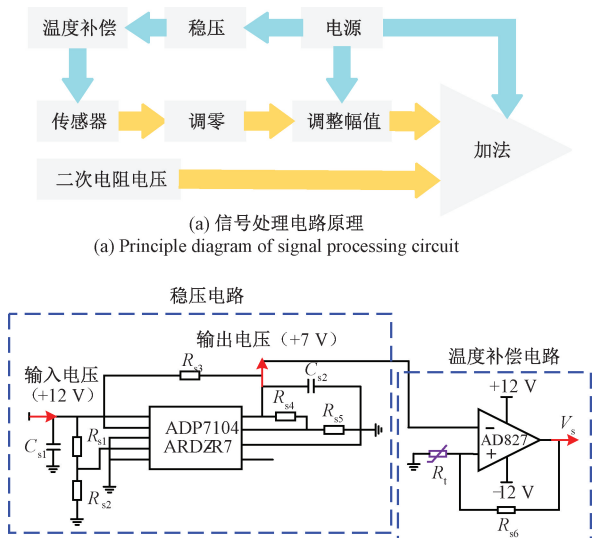
#### 3) 信号处理电路

如图 22(a) 所示,CCCT 信号处理电路主要包括稳压电路、温度补偿电路、调零电路、放大电路与加法器电路,本文使用如图 22(b) 所示的稳压电路将电源电压转换为适用于 TMR 传感器的  $+7 \text{V}$  电压;针对 TMR 传感器存在的温度漂移问题,采用如图 22(b) 所示的温度补偿电路,其根据温敏电阻  $R_t$  的阻值变化动态调整 TMR 传感器的工作电压  $V_s$ ,从而调节 TMR 传感器的输出;考虑到 TMR 传感器使用惠斯通电桥结构,本文采用如图 22(c) 所示的调零电路通过调整电位器的阻值减小 TMR 传感器存在的不等位电势;为了减小信号处理电路对 CCCT 总输出精度的影响,本文选择低噪声、低失调电压和高共模抑制比的 AD8421 放大器和 AD827 放大器分别调整 TMR 传感器的输出信号幅值与作为加法器<sup>[38]</sup>。图 22(b)、(c)中,  $R_{si}$  为电阻,  $C_{si}$  为电容,  $R_t$  为温敏电阻,型号为 ERTJ1VS104FA,  $R_{mi}$  表示磁电阻。

### 3.2 稳态响应特性验证实验

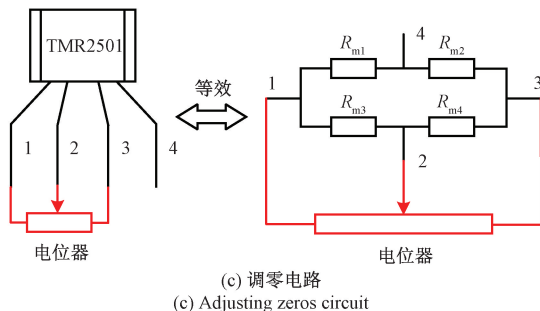
使用等安匝法<sup>[39]</sup>进行正弦交流电流测量实验以检验 CCCT 的稳态响应特性。实验中设置等效一次电流有效值范围为  $1 \sim 120 \text{A}$  与  $1000 \text{A}$ 。等效一次电流有效值为  $100$  与  $1000 \text{A}$  时的波形分别如图 23 及 24 所示,其中二次电流、TMR 输出信号与 CCCT 总输出均折算到了一次侧。正弦交流下 CCCT 二次电流与总输出的复合误差随等效一次电流的变化曲线如图 25 所示。

由实验结果可知:

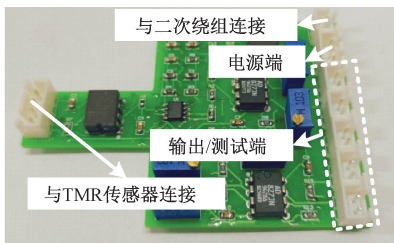


(a) 信号处理电路原理  
(a) Principle diagram of signal processing circuit

(b) 稳压电路与温度补偿电路  
(b) Stabilizing circuit and temperature compensation circuit



(c) 调零电路  
(c) Adjusting zeros circuit



(d) 信号处理电路PCB  
(d) PCB of signal processing circuit

图 22 信号处理电路

Fig. 22 Signal processing circuit

1) 等效一次电流有效值在 1~120 A 时, CCCT 二次电流与总输出均可以准确地还原一次电流波形。如 1.2 节 2) 所述, 由于受到磁场传感器与信号处理电路的影响, CCCT 总输出的复合误差较二次电流略有增加, 但仍满足相关标准对测量用电流互感器精度的要求。

2) 当等效一次电流有效值为 1 000 A 时, CCCT 二次电流已经发生了明显畸变, 复合误差增大至 82.7%, 而经过 TMR 传感器输出补偿后的 CCCT 总输出波形依然与一次电流波形基本一致, 复合误差为 2.04%, 小于标准中要求的 5% 或 10%。

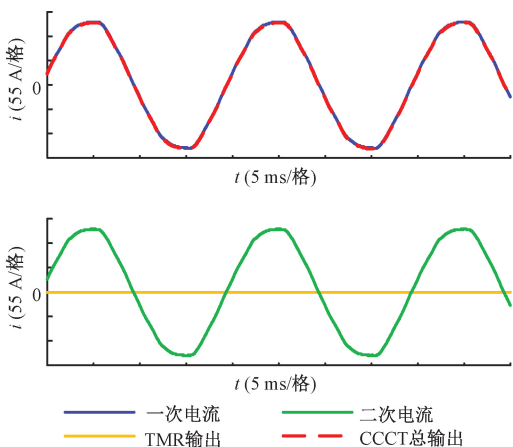


图 23 额定电流下的实验波形

Fig. 23 Experimental waveforms at rated current

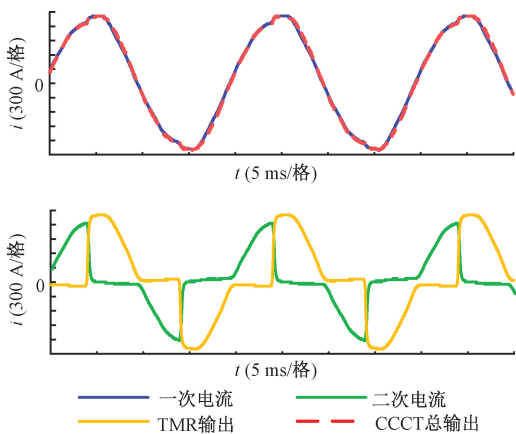


图 24 10 倍额定电流下的实验波形

Fig. 24 Experimental waveforms at tenfold rated current

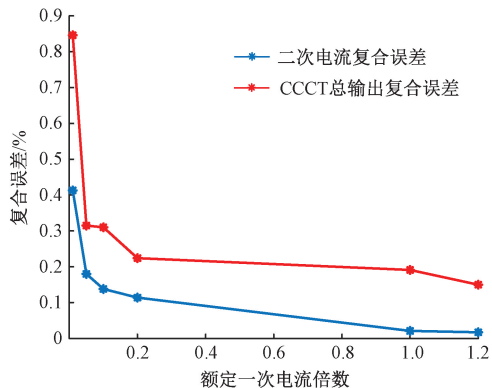


图 25 复合误差曲线

Fig. 25 Composite error curve

### 3.3 暂态响应特性验证实验

本文使用电感-电阻-开关串联回路模拟实际输电线路。由于回路中存在电感元件, 当开关闭合时, 回路会呈

现一个暂态过程,类似于实际输电线路发生短路故障<sup>[40]</sup>。实验中,电阻阻值为 1 Ω,电感为 60.8 mH,等效一次电流的短路电流幅值  $I_p$  约为  $1\ 000\sqrt{2}$  A。实验波形如图 26 所示。

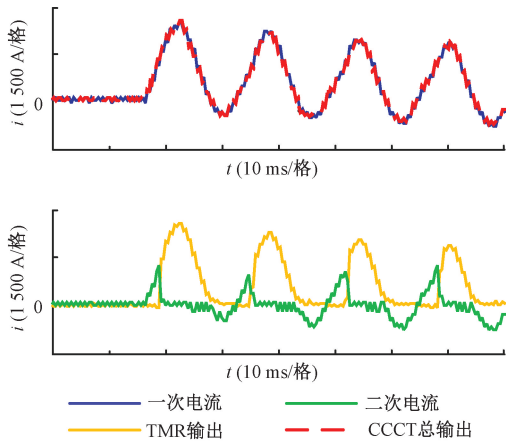


图 26 短路电流实验波形

Fig. 26 Experimental waveforms of short-circuit current

根据实验结果,内铁心在开关闭合后的第 1 个周期内便进入深度饱和,二次电流瞬时值最高损失近 100%; CCCT 总输出的波形可以还原一次电流波形,峰值瞬时误差为 4.25%,小于标准中要求的 10%。实验结果进一步表明,CCCT 在继电保护领域具有良好的应用前景。

### 3.4 抗直流特性验证实验

实践中,常用直流分量占比约为 32%的正弦半波电流来检验电流互感器的抗直流性能<sup>[41]</sup>。本文使用整流装置产生正弦半波电流,等效一次电流峰值范围为 10~1 000 A。峰值为 1 000 A 时的实验波形如图 27 所示。图 28 为 CCCT 二次电流与总输出的复合误差随等效一次电流峰值的变化曲线。

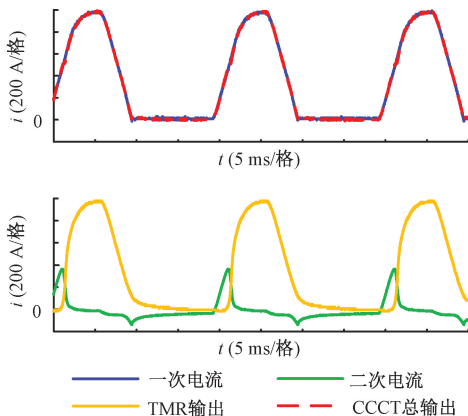


图 27 正弦半波电流实验波形

Fig. 27 Experimental waveforms of half-sinusoid current

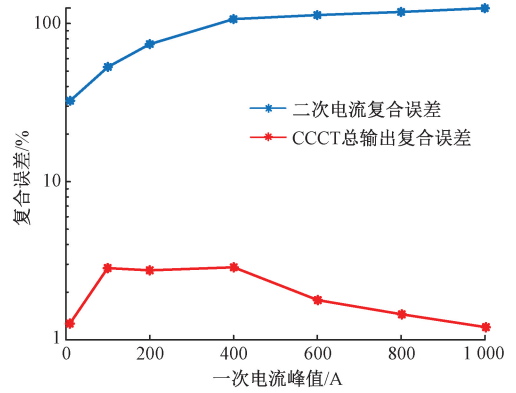


图 28 复合误差曲线

Fig. 28 Composite error curve

由图 22 与 23 可知,正弦半波电流包含的直流分量会使互感器铁心进入深度饱和,二次电流波形严重失真,幅值显著减小,复合误差随一次电流峰值的上升而增加; CCCT 总输出波形与一次电流波形基本吻合,复合误差小于 2.88%。由此可见,CCCT 具有良好的抗直流特性,在一定范围内可以用于测量含有直流偏磁的交流电流。

### 3.5 直流传变特性验证实验

为了检验 CCCT 的直流传变特性,本文进行了直流电流测量实验。设置等效一次电流为 -600~+600 A,绘制直流电流下 CCCT 的输入-输出特性曲线,如图 29 所示。拟合方程为  $U_{CCCT} = 0.002\ 023 I_1 + 0.001\ 522$ ,拟合优度  $R^2$  为 0.999 9。实验结果表明,在一定范围内,CCCT 在测量直流电流时具有良好的线性度。

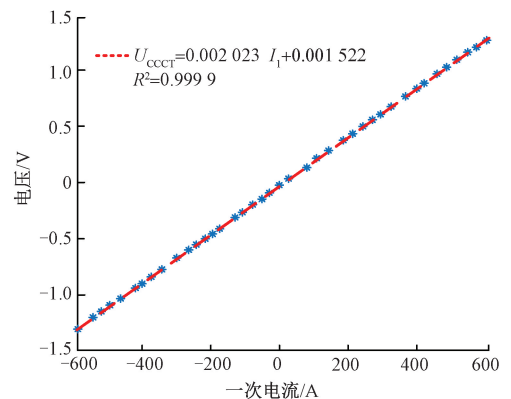


图 29 输入-输出特性曲线(直流)

Fig. 29 Input-output characteristic curve (DC)

### 3.6 动态性能验证实验

限于实验条件,本文使用方波信号代替阶跃信号初步验证 CCCT 的动态性能。方波信号的周期为 20 ms,过渡区约为 40 μs。实验波形如图 30 所示。

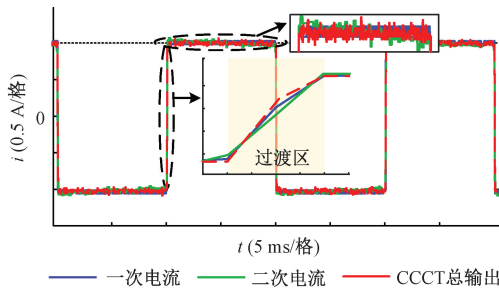


图 30 方波电流实验波形

Fig. 30 Experimental waveforms of square-wave current

根据图 30 所示的实验波形,在一次电流由负值跳变至正值的过渡区内,二次电流与 CCCT 总输出均可以较为准确地跟随一次电流波形的变化;在一次电流波形跳变完成后,由于铁心未发生饱和,二次电流的衰减过程较慢,而 CCCT 总输出波形未表现出衰减的趋势。本节实验结果所呈现出的规律基本与上文的理论分析及有限元仿真结果一致。综上,CCCT 具有良好的动态性能,可以用于测量快速变化的电流信号。

### 3.7 与常规电流互/传感器的对比

#### 1) 与传统电流互感器的对比

上文进行的仿真与实验已通过对比二次电流与 CCCT 总输出的误差与波形详细说明了 CCCT 相较于传统电流互感器所具有的优势。本节仅对比 CCCT 与传统电流互感器的主要材料费用,忽略二次加工、组装与人工费用等。

如图 31 所示,一组传统电流互感器设备至少包含两台电流互感器,一台用于计量或测量,另一台用于继电保护。假设用于对比的传统电流互感器设备的额定电流比与额定输出与 CCCT 样机保持一致,则主要材料费用如表 2 所示,其中保护用电流互感器可以在准确限值规定时间内较准确地测量暂态短路电流,其尺寸由有限元仿真初步确定。由表 2 可知,该传统电流互感器设备的主要材料费用至少为 137.8 元。本文使用的 CCCT 样机的材料费用如表 3 所示,约为 317 元。由于该 CCCT 样机主要使用亚德诺(ADI)公司生产的模拟集成电路,材料费用较高,若使用国产的芯片,材料费用将会进一步下降。尽管 CCCT 样机的费用略高于传统电流互感器设备的费用,但如前文所述,CCCT 可同时满足相关标准对测量用电流互感器与保护用电流互感器的精度要求,还具备一定的抗直流能力,更适用于日益复杂的电力系统。

表 2 1 组传统电流互感器设备的材料费用

Table 2 Material cost of a set of conventional current transformer devices

用途	材料	内径×外径×高度	单价	费用
计量	非晶	5 cm×7 cm×2 cm	30 万元/吨	81.2 元
保护	硅钢	5 cm×16 cm×8 cm	5 100 元/吨	56.6 元



图 31 35 kV 干式电流互感器

Fig. 31 Composition of 35 kV dry-type current transformer

表 3 CCCT 样机的材料费用

Table 3 Material cost of the CCCT prototype

材料	内径×外径×高度	单价	费用
非晶	5 cm×8 cm×2 cm	30 万元/吨	132 元
TMR2501	\	15 元	15 元
PCB	\	5 元	5 元
ADP7104	\	15 元	15 元
AD8421	\	30 元	30 元
AD827	\	60 元	120 元

#### 2) 与基于聚磁环和磁场传感器的电流传感器的对比

在现阶段,该类电流传感器可大致分为开环式电流传感器与闭环式电流传感器。如图 32 所示,开环式电流传感器主要包括聚磁环、磁场传感器与运算放大器。磁场传感器放置在聚磁环的气隙中,会输出一个与原边电流成线性关系的电压信号<sup>[42]</sup>。闭环式电流传感器是在开环式电流传感器的基础上增加了功率放大器与副边线圈。当原、副边电流的安匝数相等,即磁场达到平衡状态时,可根据副边电流与原、副边的匝数比计算出原边电流<sup>[43]</sup>。几款商用开、闭环式电流传感器的性能参数如表 4 所示。

表 4 商用电流传感器性能参数

Table 4 Parameters of commercial current sensors

型号	测量精度	测量范围
JS-OA03(开环霍尔)	1%	3 倍额定电流
JS-CA21(闭环霍尔)	0.3%	1.5 倍额定电流
LHB-100A(闭环霍尔)	0.5%	2 倍额定电流
TMR7506-B(开环 TMR)	0.5%	3 倍额定电流
TMR7553-B(闭环 TMR)	0.3%	2 倍额定电流

根据 3.2 与 3.3 节的实验结果,CCCT 在额定电流下的复合误差约为 0.2%,虽略高于其二次电流的复合误差,但仍优于表 4 列举的霍尔电流传感器与 TMR 电流传感器的测量精度;相较于表 4 中电流传感器的测量范围,CCCT 可以准确测量 10 倍于额定电流的对称短路电流与

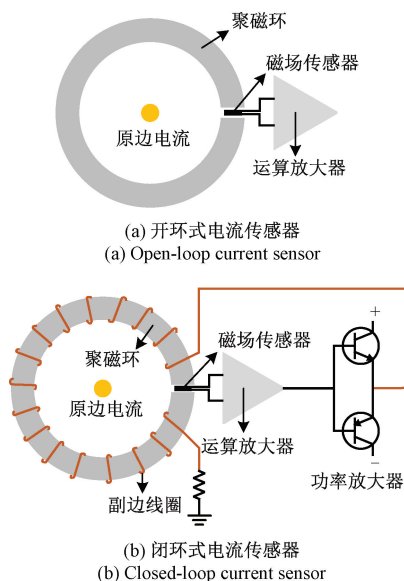


图 32 基于聚磁环和磁场传感器的电流传感器

Fig. 32 Current sensor based on magnetic ring and sensors

考虑暂态系数的暂态短路电流,更适合应用于继电保护领域。此外,由于 CCCT 的组成与基于聚磁环和磁场传感器的电流传感器相似,均包含聚磁环、磁场传感器与运算放大器等,因此可近似认为两者的成本相同。综上所述,相比于已有的基于聚磁环和磁场传感器的电流传感器,CCCT 更具备在电力系统中应用的潜力。

## 4 结论

针对传统电流互感器铁心饱和问题,本文提出了一种基于混合铁心结构的新型电流互感器,并对其工作原理与测量特性开展了理论分析、有限元仿真与实验验证,得到的结论如下:

1) CCCT 的交直流稳态响应特性良好。在测量正弦交流电流时,CCCT 的测量精度可满足有关标准对测量用电流互感器的精度要求;在测量 10 倍于额定电流的对称短路电流时,CCCT 总输出的复合误差为 2.04%,小于相关标准中要求的 5% 或 10%,满足有关标准对保护用电流互感器的要求;在测量直流电流时,CCCT 总输出与一次电流的拟合优度为 0.999 9,线性度优异。

2) CCCT 的暂态响应特性良好。在测量含有非周期分量的短路电流时,CCCT 总输出波形可以基本还原一次电流波形,并且未受到短路初始角、短路电流幅值、一次时间常数与铁心剩磁的影响。

3) CCCT 具有一定的抗直流能力。在测量直流分量占比约为 32% 的正弦半波电流时,CCCT 总输出波形与一次电流波形相吻合,复合误差小于 2.88%。

该互感器的结构与工作原理简单,不需要使用微处

理器与算法即可解决传统电流互感器铁心饱和导致的二次电流发生畸变的问题,具有在电力系统中应用的潜力。

## 参考文献

- [1] 赵鹏,蒲天骄,王新迎,等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-457.  
ZHAO P, PU T J, WANG X Y, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of Things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-457.
- [2] 张宁,马国明,关永刚,等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283.  
ZHANG N, MA G M, GUAN Y G, et al. Panoramic information perception and intelligent grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283.
- [3] 李长云,李庆民,李贞,等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.  
LI CH Y, LI Q M, LI ZH, et al. Transfer characteristics of current transformers with dc bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [4] 严勤,李世松,叶远誉,等. 直流偏磁下电流互感器测量特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 144-148.  
YAN Q, LI SH S, YE Y Y, et al. Analysis of measurement characterization of current transformers with DC magnetic bias [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(12): 144-148.
- [5] 戴魏,郑玉平,白亮亮,等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.  
DAI W, ZHENG Y P, BAI L L, et al. Analysis of protective current transformer transient response [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [6] 李敏,杨爱超,吴宇,等. 开口式电流互感器耐直流性能研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 123-128,135.  
LI M, YANG AI CH, WU Y, et al. Research on anti-DC performance of air-gap-core current transformer[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2019, 56(13): 123-128,135.
- [7] 熊魁,岳长喜,李登云,等. 高磁导率比双铁芯电流互感器原理和误差性能研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 114-119.  
XIONG K, YUE CH X, LI D Y, et al. Research of theory and error characters of high magnetic permeability

- ratio two cores current transformer [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2018, 55 (17): 114-119.
- [8] KANG Y C, PARK J K, KANG S H, et al. Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers[J]. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1996, 143(1): 41-49.
- [9] KANG Y C, LIM U J, KANG S H, et al. An algorithm for compensating secondary currents of current transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, 12(1): 116-124.
- [10] ZADEH H K, PASAND M S. Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1): 73-79.
- [11] NASERI F, KAZEMI Z, FARJAH E, et al. Fast detection and compensation of current transformer saturation using extended kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34 (3): 1087-1097.
- [12] 黄梓欣, 林湘宁, 马啸, 等. 含风电继电保护应用中的电流互感器饱和和电流重构方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(19): 4823-4834.
- HUANG Z X, LIN X N, MA X, et al. Reconstruction method of saturation current of current transformer in relay protection application related to wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(19): 4823-4834.
- [13] HAJIPOUR E, VAKILIAN M, PASAND M S. Current transformer saturation prevention using a controlled voltage-source compensator [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(2): 1039-1048.
- [14] SANATI S, BEROMI A Y. Avoid current transformer saturation using adjustable switched resistor demagnetization method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 92-101.
- [15] ZHENG T Y, HU E, YANG H, et al. Fast, in situ demagnetization method for protection current transformers [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7): 971-978.
- [16] DELZENDEH M, KAREGAR K H. Current transformer saturation compensator by using negative voltage feedback[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35 (3): 1200-1208.
- [17] 周峰, 李鹤, 李文婷, 等. 大电流测量传感技术综述[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1905-1920.
- ZHOU F, LI H, LI W T, et al. Review of high current measurement and sensing technology [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1905-1920.
- [18] 邸志刚, 陈佳旗, 贾春荣, 等. 基于马赫-曾德干涉仪的光纤电流互感器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 228-237.
- DI ZH G, CHEN J Q, JIA CH R, et al. Design on fiber optical current transformer based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 228-237.
- [19] 李非凡, 冀永芳, 庄盛秋. 三轴隧道磁阻阵列电流传感器及电流测量方法[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(18): 54-60.
- LI F F, JI Y F, ZHUANG SH Q, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(18): 54-60.
- [20] CHEN K L, CHEN N M. A new method for power current measurement using a coreless hall effect current transformer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(1): 158-169.
- [21] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 349-367.
- YANG Q, SUN SH P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 349-367.
- [22] 卡齐梅尔恰克. 高频磁性器件[M]. 钟智勇, 唐晓莉, 张怀武, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- KAZIMIERCZUK M K. High-Frequency Magnetic Components[M]. ZHONG ZH Y, TANG X L, ZHANG H W, translated. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [23] 田翠华, 陈柏超. 低谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. *电工技术学报*, 2006, 21(1): 19-23.
- TIAN C H, CHEN B CH. Study of low distortion two-stage saturable magnetically controlled reactor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(1): 19-23.
- [24] 陆霞飞, 鲍丙豪. 基于巨磁阻效应的电流传感器研制[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(1): 8-13.
- LU X F, BAO B H. Research and design of a current sensor based on giant magnetoresistance effect [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(1): 8-13.
- [25] KONDRATH N, KAZIMIERCZUK M K. Bandwidth of current transformers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58 (6):

- 2008-2016.
- [26] ZHANG H, ARKADAN A A. B-H curve-based model for CT error evaluation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 971-978.
- [27] 黄俊钦. 仪表与传感器动态性能指标的计算方法[J]. 传感器与微系统, 1983(3): 1-12.  
HUANG J Q. Calculation method for dynamic performance indices of instruments and sensors [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 1983(3): 1-12.
- [28] 陈乔夫, 李湘生. 互感器电抗器的理论与计算[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1992.  
CHEN Q F, LI X SH. Theory and Calculation of Transformers and Reactors [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1992.
- [29] 赵修民. 测量用互感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.  
ZHAO X M. Measuring Current Transformer [M]. Beijing, China: China Machine Press, 1986.
- [30] GB/T 20840.2—2014 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
GB/T 20840.2—2014 Chinese Standard SN for Books[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2014.
- [31] GB/T 20840.8—2007 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
GB/T 20840.8—2007 Chinese Standard SN for Books[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2007.
- [32] DL/T 866—2015 中国标准书号[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
DL/T 866—2015 Chinese Standard SN for Books[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2015.
- [33] 张杰, 叶国雄, 刘翔, 等. 保护用电子式电流互感器暂态特性试验关键技术及装置研制[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3884-3891.  
ZHANG J, YE G X, LIU X, et al. Critical technology and equipment development of transient characteristics test on electronic current transformer for protection[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3884-3891.
- [34] 段建东, 金转婷, 雷阳, 等. 自动重合闸期间电流互感器剩磁抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1498-1505.  
DUAN J D, JIN ZH T, LEI Y, et al. Study on residual flux suppression of current transformer during automatic reclosing[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1498-1505.
- [35] 王宁. 非晶合金带材及铁心模型的损耗及磁化特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
WANG N. Study on loss and magnetization characteristics of amorphous alloy strip and core model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [36] 郝后堂, 史泽兵, 江卫良. 重合于故障时 TA 饱和对差动保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 167-170.  
HAO H T, SHI Z B, JIANG W L. Influence of CT saturation on differential protection during faulty line reclose and countermeasure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 167-170.
- [37] XIANG Y, CHEN K, XU Q. A novel contactless current sensor for HVDC overhead transmission lines[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4725-4732.
- [38] 高明星. 宇航高可靠耐高压型霍尔电流传感器的研制[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2017.  
GAO M X. Research on high reliability and high pressure hall current sensor for aerospace [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [39] 冯宇, 王晓琪, 汪本进, 等. 采用等安匝合成电源的电流互感器谐波特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3154-3160.  
FENG Y, WANG X Q, WANG B J, et al. A measurement method of current transformers' harmonic characteristics by using equal ampere-turns synthetic power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3154-3160.
- [40] 司马文霞, 郑荣锋, 杨鸣, 等. 基于稀土磁光玻璃的非接触式电流传感器研制及其传感性能[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1867-1876.  
SIMA W X, ZHENG R F, YANG M, et al. Development and sensing performance of a non-contact current sensor based on rare earth magneto-optic glasses [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1867-1876.
- [41] 靳绍平, 杨敏, 刘见, 等. 低压抗直流电流互感器及检测装置研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 59-64.  
JIN SH P, LI M, LIU J, et al. Research on low anti-DC current transformer and its detection device [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(13): 59-64.
- [42] 张涵竹. 用于在线校验的高精度开合式霍尔电流传感器研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.  
ZHANG H ZH. Research on high-precision open-close hall current sensor for online calibration [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [43] 李雪洋, 李岩松, 刘君. 对称式闭环霍尔电流传感器研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 69-76.  
LI X Y, LI Y S, LIU J. Symmetrical closed-loop Hall

current sensor research and design [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 69-76.

### 作者简介



张哲璇, 2020 年于山东大学获得学士学位, 现为武汉大学在读博士研究生, 主要研究方向为新型电流互感器及其在电力系统中的应用。

E-mail: whu\_zhexuan@outlook.com

**Zhang Zhexuan** received his B. Sc. degree from Shandong University in 2020. Now he is a Ph. D. candidate in Wuhan University. His main research interest

includes novel current transformers.



王羽(通信作者), 2006 年于武汉大学获得学士学位, 2012 年于武汉大学获得博士学位, 现为武汉大学电气与自动化学院副教授, 主要研究方向为防雷与接地技术。

E-mail: yuwang\_whu@sina.com

**Wang Yu** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University in 2006, and Ph. D. degree from Wuhan University in 2012, respectively. Now he is an associate professor in Wuhan University. His main research interest includes lightning protection grounding technology.