

# 直流叠加脉冲电流波形宽频带电流传感器

杨晓光<sup>1,2</sup>, 金双双<sup>1,2</sup>, 朱波<sup>1,2</sup>, 高丽敬<sup>1,2</sup>, 徐林亮<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;

2. 河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室 天津 300130)

**摘要:**提出了一种用于测量直流叠加脉冲电流波形的电流传感器。该传感器由两个磁芯组成,一个工作于磁通门状态,另一个基于罗氏线圈原理。为了将磁通门与罗氏线圈检测技术集成在一起,引入了一个反馈绕组,有效克服了脉冲磁场与直流磁场对磁芯工作状态的影响。基于理论分析制作了样机。实验结果表明,所提出的电流传感器能有效测量直流叠加脉冲电流波形:有效测量频带为340 kHz,直流分量的测量误差为0.6%;低频段与高频段交点处的测量误差最大,最大测量误差为1.5%。

**关键词:** 电流传感器;磁通门传感器;罗氏线圈;脉冲电流

**中图分类号:** TP212 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Current sensor for DC superimposed with impulse current waveform

Yang Xiaoguang<sup>1,2</sup>, Jin Shuangshuang<sup>1,2</sup>, Zhu Bo<sup>1,2</sup>, Gao Lijing<sup>1,2</sup>, Xu Linliang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** This paper presents a current sensor for DC superimposed with impulse current waveform. The current sensor consists of two magnetic cores; one core works in fluxgate principle, and the other is based on Rogowski coil principle. A feedback winding is introduced into the sensor in order to integrate fluxgate principle with Rogowski coil technique. Introducing the feedback winding effectively overcomes the influence of the impulse magnetic field and DC magnetic field on the magnetic core working state. A prototype is developed based on the theoretical analysis. Test results show that the proposed current sensor can effectively measure DC superimposed with impulse current waveform with a wide bandwidth up to 340 kHz. The measurement error for DC is limited to 0.6%, and the maximum error is 1.5%, which is at cut-off point between the low frequency band and high frequency band.

**Keywords:** current sensor; fluxgate current sensor; Rogowski coil; impulse current

## 0 引 言

电流的精确检测是电力电子装备的基本要求,在不同的应用中,电流具有不同的波形、带宽和范围。为了满足各种检测要求,适应不同的工作环境,已经出现了多种多样的电流检测方法和电流传感器<sup>[1-2]</sup>。

在实际应用中,有一种电流波形为直流叠加脉冲电流的波形<sup>[3-6]</sup>,这种波形的特点是既包含直流分量,也包含脉冲分量,并且可能具有很大的带宽。

对于直流的检测目前有分流器、霍尔电流传感器、巨磁阻电流传感器和磁通门电流传感器等<sup>[7-11]</sup>。其中,磁通门电流传感器具有广泛的应用,具有高分辨率、高灵敏度、高精确度、温漂小、零漂小及体积小等优点<sup>[12]</sup>。

近年来,磁通门电流传感器发展迅速,目前已经报道了很多新方法和新结构,如激励电压占空比电流传感器<sup>[13]</sup>、磁致伸缩效应电流传感器<sup>[14]</sup>、零磁通电流传感器<sup>[15-16]</sup>、正交磁通门电流传感器<sup>[17]</sup>、时间差型磁通门传感器<sup>[18]</sup>、双向饱和磁通门电流传感器<sup>[19]</sup>等。磁通门电流传感器虽然能很好地应用于直流和低频电流的检测,但

不能应用于高频电流检测。

对于脉冲电流的检测目前有霍尔电流传感器、光学电流传感器与罗氏线圈等,其中,罗氏线圈具有测量范围大的优点<sup>[20-27]</sup>。

本文通过引入反馈绕组,将磁通门技术与罗氏线圈检测技术集成在一起,提出了一种新型的电流传感器;分析了直流分量和脉冲分量对磁芯的影响,对脉冲电流的测量进行了分析与电路设计;试制了样机,对电流传感器进行了实验研究。

## 1 新型电流传感器的设计和分析

### 1.1 电流传感器的设计

本文所提出的电流传感器如图 1 所示,其中, A 部分基于磁通门技术而 B 部分基于罗氏线圈技术,  $C_1$  和  $C_2$  为磁芯;  $W_p$ 、 $W_c$  ( $W_{c1}$  和  $W_{c2}$ )、 $W_e$  和  $W_s$  分别表示被测绕组、反馈绕组、激励绕组和脉冲电流检测绕组;  $N_p$  (通常为 1)、 $N_c$  ( $N_{c1}$  和  $N_{c2}$ )、 $N_e$  和  $N_s$  分别为相应绕组的匝数; 被测电流  $I_p$  在磁芯  $C_1$  中产生的磁通为  $\Phi_{p1}$ , 反馈电流  $I_c$  在磁芯  $C_1$  和  $C_2$  中产生的磁通分别为  $\Phi_{c1}$  和  $\Phi_{c2}$ 。

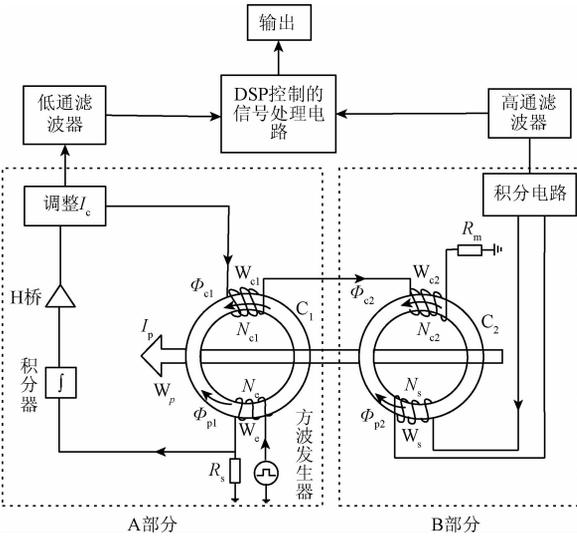


图 1 电流传感器原理

Fig. 1 Principle of current sensor

磁芯  $C_1$  对测量信号的检测基于闭环磁通门原理<sup>[15-16]</sup>。方波发生器产生的交变方波激励电压加载到激励绕组上,当被测电流  $I_p = 0$  时,激励电流产生的磁场使磁芯交替饱和,与激励绕组串联的采样电阻  $R_s$  上的电流波形正负对称;而当  $I_p \neq 0$  时,  $I_p$  产生的磁场与激励电流产生的磁场叠加,此时,磁芯在一个半周期的饱和程度大而在另一个半周期的饱和程度小,  $R_s$  上的电流波形不再正负对称,不对称的电流经过积分器后,得到非零信号,

这一信号控制 H 桥输出反馈电流  $I_c$ 。流经反馈绕组  $W_{c1}$  的反馈电流在磁芯  $C_1$  中产生的磁通  $\Phi_{c1}$  和被测电流在磁芯  $C_1$  中产生的磁通  $\Phi_{p1}$  方向相反,直到  $\Phi_{c1}$  和  $\Phi_{p1}$  大小相等时,达到零磁通状态  $\Phi_{p1} + \Phi_{c1} = 0$ ,此时,被测电流和反馈电流存在比例关系  $I_p = -N_{c1} \cdot I_c / N_p$ 。检测信号经过低通滤波器后输出给信号处理电路。

磁芯  $C_2$  对信号的检测基于罗氏线圈技术,测量被测电流中的脉冲分量,尤其是高频脉冲分量,典型波形如图 2 所示。测量信号通过罗氏线圈检测绕组  $W_s$ , 进入积分电路后输出给信号处理电路。

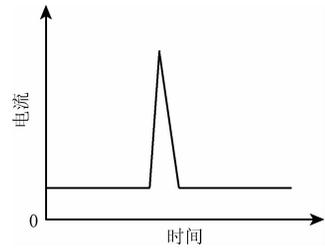


图 2 直流叠加脉冲电流波形

Fig. 2 DC superimposed with impulse current waveform

本文试图将磁通门技术与带磁芯的罗氏线圈技术集成在一起,达到检测直流叠加脉冲电流波形的目的。

然而,直流叠加脉冲电流波形包含直流分量和脉冲分量,这两个分量作用于磁芯  $C_1$  和  $C_2$  上;同时,脉冲电流的频率可能是低频或高频,并且脉冲电流的峰值远远大于直流。这种电流波形的特点对磁通门技术与带磁芯的罗氏线圈技术的集成带来了如下问题:

- 1) 直流分量在磁芯  $C_2$  上产生的磁场会使  $C_2$  产生直流偏置;
- 2) 脉冲分量对磁芯  $C_1$  可能存在影响;
- 3) 由于传统的罗氏线圈为空芯绕组,引入磁芯后,不仅存在直流偏置的问题,并且脉冲分量容易引起磁芯  $C_2$  的饱和。

### 1.2 直流分量对磁芯 $C_2$ 的影响

直流分量在磁芯  $C_2$  上产生的磁场会使  $C_2$  产生直流偏置。为了消除直流分量对磁芯  $C_2$  的影响,本文在磁芯  $C_2$  上引入绕组  $W_{c2}$  与反馈绕组  $W_{c1}$  串联,并且  $N_{c1} = N_{c2}$ 。

被测电流  $I_p$  在磁芯  $C_2$  中产生的磁通  $\Phi_{p2}$  与反馈电流  $I_c$  在磁芯  $C_2$  中产生的磁通  $\Phi_{c2}$  可分别表示为:

$$\Phi_{p2} = \mu_2 H_{p2} S_2 \quad (1)$$

$$\Phi_{c2} = \mu_2 H_{c2} S_2 \quad (2)$$

式中:  $\mu_2$  和  $S_2$  分别为磁芯  $C_2$  的磁导率与横截面积,  $H_{p2}$  和  $H_{c2}$  分别为被测电流  $I_p$  与反馈电流  $I_c$  在磁芯  $C_2$  中产生的磁场强度。

根据安培环路定理,由式(1)和(2)可得:

$$\Phi_{p2} = I_p N_p \frac{\mu_2 S_2}{l_2} \quad (3)$$

$$\Phi_{c2} = I_c N_{c2} \frac{\mu_2 S_2}{l_2} \quad (4)$$

由于  $N_{c1} = N_{c2}$ , 可得:

$$\Phi_{c2} = I_c N_{c1} \frac{\mu_2 S_2}{l_2} \quad (5)$$

当磁芯  $C_1$  达到零磁通状态时

$$I_p N_p = -I_c N_{c1} \quad (6)$$

由式(3)、(5)和(6)可得

$$\Phi_{p2} + \Phi_{c2} = 0 \quad (7)$$

因而,当磁芯  $C_1$  达到零磁通状态时,磁芯  $C_2$  也同时达到零磁通状态。从而绕组  $W_{c2}$  的引入,可以有效克服磁芯  $C_2$  中的直流偏置问题。

激励电流的波形可以反映磁芯的工作状态:当磁芯达到零磁通状态时,激励电流波形对称;当磁芯中有剩磁或者处于非零磁通状态时,激励电流正负不对称;并且剩磁越大,不对称的程度越大。磁芯中由非零磁通状态达到零磁通状态的过程如图3所示,当磁芯中存在剩磁时(非零磁通状态),第1个负半周期尖峰电流达到最大值,随着反馈电流的作用,正半周期尖峰电流逐渐增大,负半周期尖峰电流逐渐减小,经过5个周期,激励电流正负对称,磁芯达到零磁通状态。

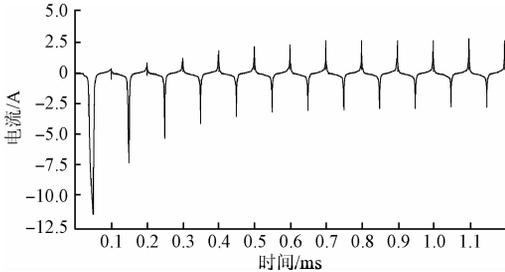


图3 零磁通状态实现过程中的激励电流波形

Fig.3 Excitation current waveform during the process of realizing a zero fluxgate state

### 1.3 脉冲分量对磁芯 $C_1$ 影响

当脉冲电流作用于磁芯  $C_1$  时,会导致磁芯的工作点上移,甚至到达饱和区;脉冲电流过后,磁芯  $C_1$  存在剩磁,磁芯的工作点仍然上移。然而,由磁通门的工作机理可知,在方波激励源的作用下,磁芯始终处于交替饱和与非饱和状态之间,这一工作模式本身能有效克服因脉冲电流所导致的工作点上移问题,最终达到零磁通状态,即  $\Phi_{p1} + \Phi_{c1} = 0$ , 被测电流和反馈电流仍存在比例关系,即  $I_p = -N_{c1} \cdot I_c / N_p$ , 所以,脉冲分量对直流的测量不会产生影响。

### 1.4 脉冲分量对磁芯 $C_2$ 影响

在罗氏线圈中加入磁芯可以提高耦合系数,但是磁芯容易饱和。假设  $C_2$  初始状态没有剩磁,但脉冲电流过后,磁芯  $C_2$  产生剩磁,导致磁芯的工作点上移,工作点上移位置取决于脉冲峰值。本文中反馈绕组  $W_{c2}$  的引入能有效解决这一问题,其工作机理参见 1.2 节,当磁芯  $C_1$  达到零磁通状态时,磁芯  $C_2$  也同时达到零磁通状态,使磁芯复位。

## 2 高频脉冲电流分量测量

罗氏线圈是一种特殊结构的空心线圈,广泛应用于大幅值交流和脉冲电流的测量,测量信号的线性度不受被测信号的频率及幅值的影响,适合测量高频大电流<sup>[20-27]</sup>。

带磁芯的罗氏线圈与空心罗氏线圈的工作原理相同,磁芯的引入增大了耦合系数,从而提高了测量的灵敏度和精度;然而带磁芯的罗氏线圈存在直流偏置、剩磁与磁饱和等问题,难以应用于较大幅值电流的测量。罗氏线圈传感头等效电路如图4所示。

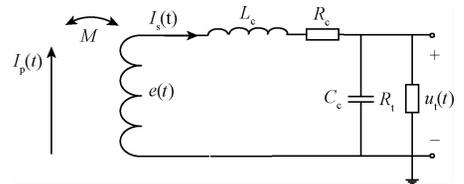


图4 罗氏线圈的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of Rogowski coil

图4中,  $I_p(t)$  为被测绕组  $W_p$  中的被测电流,  $I_s(t)$  为脉冲检测绕组  $W_s$  中的电流。  $L_c$ 、  $R_c$ 、  $C_c$  分别为  $W_s$  的自感系数、内阻和分布电容;  $M$  为  $W_p$  与  $W_s$  之间的互感系数,  $e(t)$  为  $W_s$  上的感应电压。  $R_t$  为  $W_s$  的终端电阻,  $u_t(t)$  为  $R_t$  两端的电压。对等效电路进行分析,可得如下关系式:

$$e(t) = -M \frac{dI_p(t)}{dt} \quad (8)$$

$$I_s(t) = C_c \frac{du_t(t)}{dt} + \frac{u_t(t)}{R_t} \quad (9)$$

$$e(t) = L_c \frac{dI_s(t)}{dt} + (R_c + R_t) I_s(t) \quad (10)$$

本文中的罗氏线圈带有磁芯,因此  $L_c$  较大,较之空心罗氏线圈,较低频率下即可满足  $\omega L_c \gg R_c + R_t$ , 此时,式(10)等号右边的第2项可以忽略,由式(8)与(10)可得:

$$-M \frac{dI_p(t)}{dt} = L_c \frac{dI_s(t)}{dt} \quad (11)$$

则被测电流可以表示为:

$$I_p(t) = -\frac{L_c}{M} I_s(t) \quad (12)$$

同理,由于本文中的罗氏线圈具有磁芯,较之空心罗氏线圈,被测绕组与脉冲检测绕组的耦合性极大提高,可近似为完全耦合,即  $L_c \approx N_s M$  ( $N_s$  为  $W_s$  的匝数)。另外,由于磁芯的存在,罗氏线圈的匝数可大大减小,从而绕组的分布电容  $C_c$  可以忽略,因而:

$$I_p(t) \approx -N_s I_s(t) \quad (13)$$

$$I_p(t) \approx -\frac{N_s}{R_t} u_t(t) \quad (14)$$

式(14)表明,带磁芯的罗氏线圈测量机理与传统电流互感器相同,适合测量高频或者陡脉冲电流。

当被测电流频率较低时,即,  $\omega L_c \ll R_c + R_t$ , 式(10)的等号右边第 1 项可忽略,由式(8)与(10)可以得到:

$$-M \frac{dI_p(t)}{dt} = (R_c + R_t) I_s(t) \quad (15)$$

由于分布电容  $C_c$  可以忽略,可得:

$$-M \frac{dI_p(t)}{dt} = \frac{R_c + R_t}{R_t} u_t(t) \quad (16)$$

$$u_t(t) = -\frac{MR_t}{R_c + R_t} \frac{dI_p(t)}{dt} \quad (17)$$

因而:

$$I_p(t) \approx -\frac{(R_c + R_t)}{MR_t} \int u_t(t) dt \quad (18)$$

由式(18)可知,当被测电流的频率较低时,需要对  $u_t(t)$  进行积分处理,也就是说需要配置外积分电路,如图 5 所示,包括无源积分电路(III)和有源积分电路(IV)。另外,图 5 中 I 为罗氏线圈传感头理想模型,II 为传感器探头自身的高频自积分部分。无源积分和有源积分电路分别用于处理中频信号和低频信号,输出信号经过高通滤波器(见图 1),用于降低运算放大器产生的低频噪声。

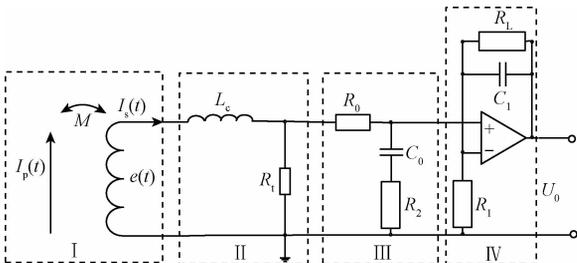


图 5 积分电路

Fig. 5 Integration circuit

由图 5 可得传感器的传递函数为:

$$\frac{U_0}{I} = \frac{sM}{(1 + T_a)} \left\{ \frac{T_L}{T_1} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_1 s} \right\} \left\{ \frac{1 + T_2 s}{1 + T_0 s} \right\} \quad (19)$$

式中:  $T_0 = (R_0 + R_2) C_0$ ,  $T_1 = R_1 C_1$ ,  $T_2 = R_2 C_0$ ,  $T_a = L_c / R_t$ ,  $T_L = R_L C_1$  分别对应于无源积分的下限频率  $f_0$ 、有源积分的上限频率  $f_1$ 、无源积分的上限频率  $f_2$ 、自积分的下限频率  $f_a$  和有源积分的下限频率  $f_L$ 。此时,  $f_0 = f_1$ 、 $f_2 = f_a$ 。检测绕组的谐振角频率  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_c C_c}$ , 可计算出自积分的上限频率  $f_c$ 。

### 3 样机试制

基于理论分析和仿真研究,磁芯  $C_1$  选用了 VAC 公司的纳米晶磁芯“T60006-L2025-W380”。该磁芯磁滞损耗小,饱和磁感应强度为 1.2 T。磁芯的平均磁路长度和横截面积分别为 6.4 cm 和 0.36 cm<sup>2</sup>,内径为 16 mm、外径为 25 mm,高为 10 mm。磁芯  $C_2$  选用了美磁 FeSiAl-77254-A7,其优点是不易饱和。该磁芯的平均磁路长度和横截面积分别为 98.4 mm 和 107 mm<sup>2</sup>,内径为 25 mm、外径为 40 mm 和高为 15 mm。检测绕组  $W_s$  的匝数  $N_s = 100$  匝。

图 4 与 5 中的相关参数如表 1 所示。积分电路中的运算放大器采用了 LM6365,其带宽为 725 MHz,高频转换速率达到了 300 V/ $\mu$ s。

表 1 传感头与积分电路参数

Table 1 Parameters of sensor probe and integrator

参数	数值	
罗氏线圈	互感系数 $M/\mu$ H	15
	分布电容 $C_c/p$ F	220
	内阻 $R_c/\Omega$	1.1
高频自积分	自感系数 $L_c/m$ H	1.5
	终端电阻 $R_t/\Omega$	10
无源积分	$R_0/\Omega$	820
	$C_0/n$ F	300
	$R_2/\Omega$	500
有源积分	$R_L/M\Omega$	20
	$C_1/n$ F	47
	$R_1/k\Omega$	8.5
上下限频率	自积分上限频率 $f_c/k$ Hz	340
	自积分下限频率 $f_a/k$ Hz	1
	无源积分下限频率 $f_0/$ Hz	400
有源积分下限频率 $f_L/$ Hz	0.17	

### 4 实验研究

实验设备包含功率分析仪 PA3000、电流探头 CT-

200-5 和电压探头 P6139B,用于测试本文所设计的传感器样机。

当被测电流仅包含脉冲电流时,对磁通门的频率特性进行了实验研究。实验结果表明:1)磁通门的测量精度随着被测电流频率的增大而减小;2)方波激励源频率越高,磁通门频率特性越好;3)在低频段,测量误差较小;在高频段,测量误差较大,并且被测电流频率对测量误差的影响很大。例如,当被测电流峰值为 10 A,被测电流频率变化范围为 0~600 Hz,激励源频率分别为 2 和 5 kHz 时,磁通门频率特性如图 6 所示。

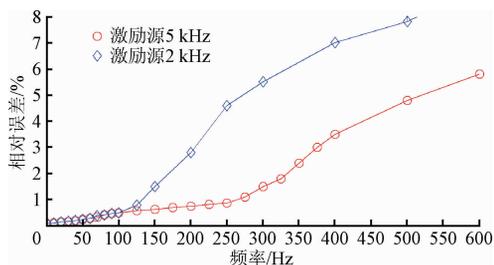


图 6 磁通门的频率特性

Fig. 6 Frequency characteristic of fluxgate

当被测电流仅包含脉冲电流时,对罗氏线圈的频率特性进行了实验研究。实验结果表明:1)罗氏线圈的测量精度随着被测电流频率的增大而增大;2)在低频段,测量误差较大,并且频率对测量误差的影响较大;3)在高频段,测量误差较小,并且频率对测量误差的影响很小,可忽略。例如,当被测电流峰值为 10 A,被测电流频率变化范围为 0~100 kHz 时,频率特性如图 7 所示。

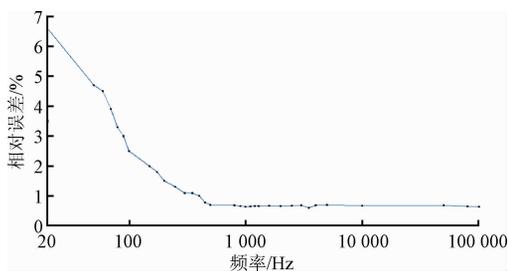


图 7 罗氏线圈频率特性

Fig. 7 Frequency characteristic of Rogowski coil

为了验证积分电路对罗氏线圈频率特性的影响,进行了如下对比实验:1)罗氏线圈不配置外积分电路;2)罗氏线圈只配置无源积分电路;3)罗氏线圈配置无源积分电路和有源积分电路。测试结果如图 8 所示,无源积分电路能有效减小中频段测量相对误差,而有源积分电路能有效减小低频段的测量误差。

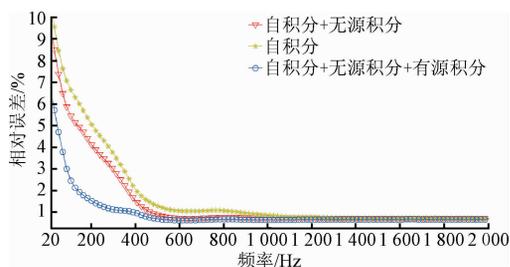


图 8 积分电路对罗氏线圈的频率特性的影响

Fig. 8 Effects of integration circuits on the frequency characteristic of Rogowski coil

对比图 6 与 8 可以看出,脉冲电流频率低于 300 Hz 时,采用激励频率为 5 kHz 的磁通门技术可获得更小的测量误差;而高于 300 Hz 时,采用罗氏线圈能获得更小的误差。因而,磁通门的输出信号需要经过一个截止频率为 300 Hz 的低通滤波器;而罗氏线圈的输出信号需要经过一个截止频率为 300 Hz 的高通滤波器(见图 1)。

由图 8 可知,当频率远大于 300 Hz 之后,频率对测量精度的影响可以忽略,在这个频率范围内考察脉冲峰值对测量精度的影响。测试结果表明,脉冲峰值对测试结果的影响也较小。例如,当测试频率为 10 kHz,测量范围为 0~60 A 时,脉冲分量测量峰值的相对误差曲线如图 9 所示。

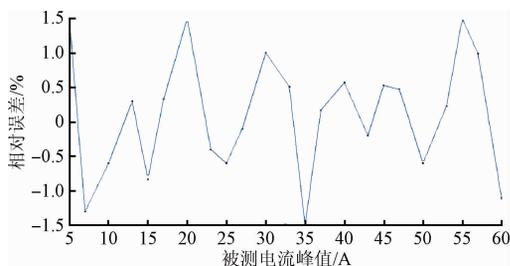


图 9 脉冲电流测量相对误差

Fig. 9 Relative error of the pulse current measurement

为了进一步说明电流传感器样机的性能,本文给出了 6 次具体实验结果,如下:

- 1) 实验 1,测试电流为直流:10 A。
- 2) 实验 2,测试电流为直流:20 A。
- 3) 实验 3,测试电流为脉冲电流:峰值为 48.0 A,频率为 500 Hz。
- 4) 实验 4,测试电流为脉冲电流:峰值为 48.0 A,频率为 100 kHz。
- 5) 实验 5,直流叠加脉冲电流:直流 10 A;脉冲电流峰值为 36.0 A,频率为 100 kHz。
- 6) 实验 6,直流叠加脉冲电流:直流 20 A;脉冲电流峰值为 30.0 A,频率为 100 kHz。

测试方法为采用电流探头 CT-200-5 检测被测电流, 电流信号输入功率分析仪 PA3000 的一个信号通道; 同时采用电压探头 P6139B 与所设计的电流传感器检测同一被测电流, 电压信号输入功率分析仪 PA3000 的另一个信号通道。本文设计的电流传感器输出信号为电压信号, 所以传感器输出波形的纵坐标为电压, 被测电流和输出电压呈一定的线性比例关系。

实验 1 与实验 2 的测量误差分别为 0.5% 和 0.35%, 波形如图 10(a) 和 (b) 所示。

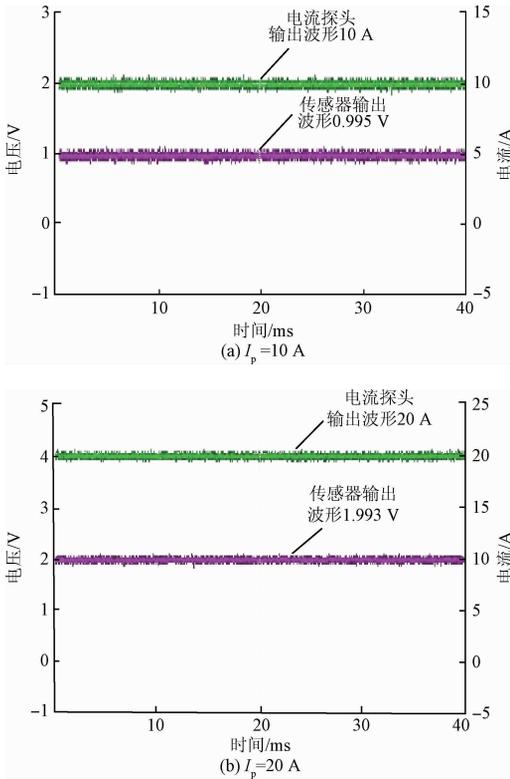


图 10 直流测量结果  
Fig. 10 DC measurement results

实验 3 与 4 测试波形如图 11(a) 与 (b) 所示, 采用电流探头与采用电流传感器样机所得到波形具有很好的一致性。

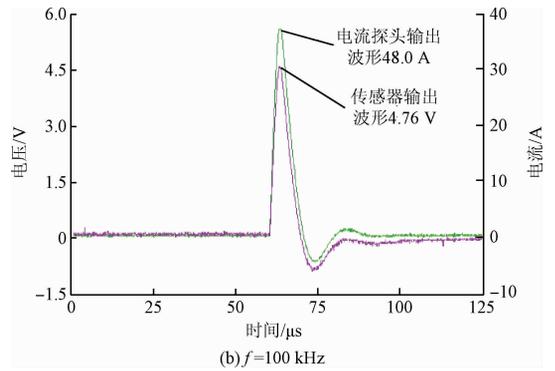
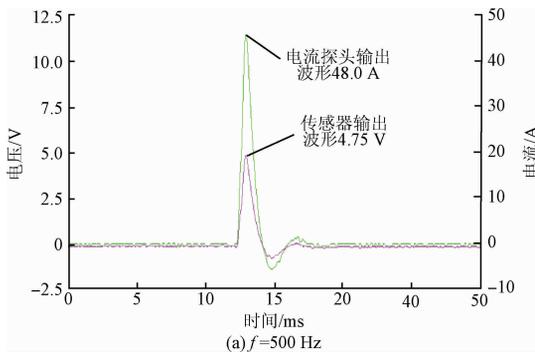


图 11 脉冲测量结果

Fig. 11 Impulse current measurement results

实验 5 与 6 实验结果分别如图 12(a) 与 (b) 所示。从图中可以看出, 所设计的传感器可以较好地测量叠加脉冲分量的直流电流。

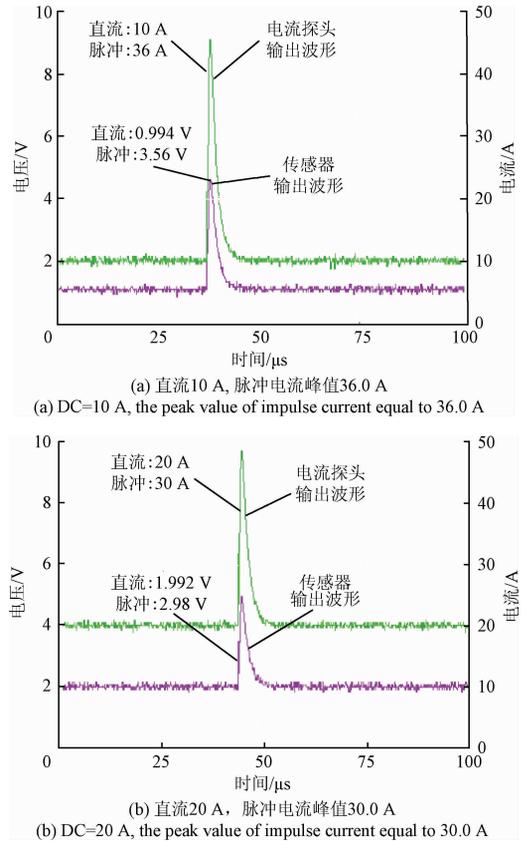


图 12 直流叠加脉冲电流测量结果

Fig. 12 Measurement results of DC superimposed with impulse current

## 5 结 论

偏置绕组的引入将磁通门技术与带磁芯的罗氏线圈技术集成在一起, 采用该技术能有效检测直流叠加脉冲

电流波形。

所设计的电流传感器有效测量频带为 340 kHz, 直流分量的测量误差为 0.6%, 低频段与高频段交点处的测量误差最大, 最大测量误差为 1.5%。

随着电力电子技术的发展, 电流波形愈加复杂, 本文所提出的检测方法不仅适用于直流叠加脉冲电流波形的检测, 也对其他复杂波形的检测方法具有参考价值。

## 参考文献

- [1] VELASCO-QUESADA G, ROMAN-LUMBRERAS M, CONESA-ROCA A, et al. Design of a low-consumption fluxgate transducer for high-current measurement applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(2): 280-287.
- [2] RIPKA P, DRAXLER K, STYBLIKOVA R. Measurement of DC currents in the power grid by current transformer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(1): 73-76.
- [3] 邓艳梅, 彭朝钊, 刘俊, 等. 电除尘器的脉冲电源研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(5): 145-150.  
DENG Y M, PENG CH ZH, LIU J, et al. Power pulse generator for electrostatic precipitators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(5): 145-150.
- [4] 魏浩, 孙凤举, 姜晓峰, 等. 直流叠加脉冲电压下 FLTD 气体开关击穿特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(4): 247-251.  
WEI H, SUN F J, JIANG X F, et al. Breakdown characteristics of gas spark switch for fast linear transformer driver under DC and pulse combined voltage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(4): 247-251.
- [5] 陈甥怡, 罗德福. 脉冲叠加直流偏压电弧离子镀制备 Ti/TiN 涂层的抗氧化性研究[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(14): 144-147.  
CHEN SH Y, LUO D F. Investigation on oxidation resistance of Ti/TiN coatings prepared by pulse superposition DC bias arc ion plating[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(14): 144-147.
- [6] 米彦, 周龙翔, 张晏源, 等. 用于直流陡脉冲复合电场净化脏污变压器油的可循环反应器研制[J]. *高压电压技术*, 2014, 40(9): 2714-2720.  
MI Y, ZHOU L X, ZHANG Y Y, et al. Development of circulative reactor used for purification of contaminated transformer oil with DC-steep pulse electric field[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2714-2720.
- [7] 徐雁. 光电直流电流及谐波电流互感器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
XU Y. A study on optic-electric current transformer applied to direct and harmonic measurements[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [8] 高敏, 卢文科, 孙仁涛. 基于二维回归分析法的霍尔电流传感器温度补偿[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(2): 100-104.  
GAO M, LU W K, SUN R T. Temperature compensation of Hall current sensor based on two-dimensional regression analysis[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2009, 23(2): 100-104.
- [9] 谢完成, 戴瑜兴. 一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(8): 705-710.  
XIE W CH, DAI Y X. New current measurement method based on Hall sensors[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2012, 26(8): 705-710.
- [10] YANG X, XIE C, WANG Y, et al. Optimization design of a giant magneto resistive effect based current sensor with a magnetic shielding[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(3): 1-4.
- [11] 庞娜, 程德福, 王言章, 等. 时间差型磁通门敏感单元巴克豪森噪声处理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(11): 2594-2601.  
PANG N, CHENG D F, WANG Y ZH, et al. Research on sensitive unit narkhausen noise processing of residence times difference fluxgate[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015, 36(11): 2594-2601.
- [12] 杨理践, 涂传宾, 高松巍. 基于磁通门传感器的弱磁场检测方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(9): 84-87.  
YANG L J, TU CH B, GAO S W. Detection method of weak magnetic field based on fluxgate sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(9): 84-87.
- [13] WANG N, ZHANG Z, LI Z, et al. Self-oscillating fluxgate-based quasi-digital sensor for DC high-current measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(12): 3555-3563.
- [14] SCHRITTWIESER L, MAUERER M, BORTIS D, et al. Novel principle for flux sensing in the application of a DC + AC current sensor[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(5): 4100-4110.
- [15] YANG X, LI Y, ZHENG W, et al. Design and realization of a novel compact fluxgate current sensor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(3): 1-4.
- [16] YANG X, LI Y, GUO W, et al. A new compact fluxgate current sensor for AC and DC application[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(11): 1-4.
- [17] YANG X, GUO W, LI C, et al. A fluxgate current sensor with a U-shaped magnetic gathering shell[J]. *IEEE*

- Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [18] TRIGONA C, SINATRA V, ANDÒ B, et al. Flexible microwire residence times difference fluxgate magnetometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(3): 559-568.
- [19] WRZECIONKO B, STEINMANN L, KOLAR J W. High-bandwidth high-temperature (250° C/500° F) isolated DC and AC current measurement: Bidirectionally saturated current transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5404-5413.
- [20] 刘志恒, 段雄英, 廖敏夫, 等. 罗氏线圈电子式电流互感器积分特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 191-196.  
LIU ZH H, DUAN X Y, LIAO M F, et al. Research on integral characteristic of ECT with rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 191-196.
- [21] 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.  
XIE X L, LIU Y D, LIU Z J, et al. Design of high frequency differential winding PCB rogowski coil[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 886-894.
- [22] 王永强, 谢军, 律方成, 等. 基于复合积分罗氏线圈的过电压监测方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1450-1455.  
WANG Y Q, XIE J, LV F CH, et al. An overvoltage monitoring method based on composite integral Rogowski coil[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1450-1455.
- [23] METWALLY I A. Performance improvement of slow-wave Rogowski coils for high impulse current measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 538-547.
- [24] 卫兵, 卿燕玲, 关永超, 等. 测量低频大电流的自积分罗氏线圈设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2227-2231.  
WEI B, QING Y L, GUAN Y CH, et al. Self-integrated Rogowski coil for low-frequency high current measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2227-2231.
- [25] IBRAHIM M E, ABD-ELHADY A M. Differential reconstruction method for power frequency AC current measurement using Rogowski coil[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8420-8425.
- [26] SAMIMI M H, MAHARI A, FARAHNAKIAN M A, et al. The Rogowski coil principles and applications: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 651-658.
- [27] 王宝诚, 王德玉, 邬伟扬. 罗氏线圈的频率特性分析与传感器的设计方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 21-27.  
WANG B CH, WANG D Y, WU W Y. Frequency response analysis of a Rogowski coil transducer and its design method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 21-27.

### 作者简介



**杨晓光** (通讯作者), 1995 年于天津轻工业学院获得学士学位, 分别在 2001 年和 2004 年于河北工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为河北工业大学教授, 主要研究方向为电源及其磁技术。

E-mail: xgyang@hebut.edu.cn

**Yang Xiaoguang** (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Tianjin Institute of Light Industry in 1995, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Hebei University of Technology in 2001 and 2004, respectively. Now he is a professor in Hebei University of Technology. His main research interests include power supply and its magnetic technology.



**金双双**, 2015 年于河北工业大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电源及其磁技术。

E-mail: 18222901400@163.com

**Jin Shuangshuang** received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in

2015. Now she is a M. Sc. candidate in Hebei University of Technology. Her main research interests include power supply and its magnetic technology.