

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.01.019

基于多层 PCB 罗氏线圈的精密冲击电流测量装置

李文婷¹, 龙兆芝¹, 范佳威¹, 潘曦宇², 刘少波¹, 周峰¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为准确评估防雷设备性能,冲击电流测量装置的测量精度和响应特性至关重要,因此文中提出了高频性能好、抗干扰能力强、灵敏度足够大的多层印刷电路板(PCB)罗氏线圈设计方案。文中分析了雷电流波形的频率范围以及罗氏线圈的传变特性;依据罗氏线圈尺寸、匝数与线圈频率特性之间的关系曲线,确定了线圈的结构尺寸;设计了新型屏蔽和信号输出方式,增强抗干扰能力。通过增加线圈厚度和串联线圈的方法,增大输出电压灵敏度。根据标准要求,进行测量装置的动态特性、标准雷电流测量误差以及线性度试验研究。试验中测量装置响应时间小于 90 ns,相对过冲小于 10%;与标准 Pearson 线圈比对,峰值误差小于 0.2%,时间参数测量误差小于 0.3%;5~40 kA 电流范围内,测量装置线性度约为 0.3%。试验结果表明研制的冲击电流测量装置具有良好的高频电流信号测量能力。

关键词:冲击电流;罗氏线圈;线性度;阶跃响应;高频特性

中图分类号: TM835.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0138-07

0 引言

雷电事故将引起该部分电力系统的电流幅值急剧上升,对电力系统中的电力设备安全性以及居民和工业用户的生产生活产生难以估量的影响^[1-3]。许多电气设备设计时应考虑耐受暂态电流冲击能力,防雷设备需要进行冲击电流耐受试验,因此冲击电流测量的准确度直接影响防雷设备性能评价。罗氏线圈为基于电磁感应原理测量电流信号的通用传感器^[4-5],是目前应用最广泛的暂态电流测量传感器,主要包括线圈以及积分回路^[6]。罗氏线圈的结构参数直接决定了其电磁参数,进而影响线圈的动态性能^[7-9]。加磁芯的罗氏线圈具有较高的测量灵敏度,可用于测量电流幅值小的信号或者电流变化率小的信号^[10];当需要测量的电流幅值很高时,电流产生的磁场强度过大将引起磁芯罗氏线圈的饱和,导致测量波形出现畸变^[11]。为了防止磁芯饱和,需要选取尺寸很大的磁芯来充当绕线的骨架,限制了磁芯罗氏线圈的应用。

不含铁芯骨架的罗氏线圈体积更小、重量更轻,可测量的电流频带更宽,但是绕线的均匀性、偏心问题仍未得到解决,因此基于印刷电路板(printed circuit board, PCB)的不含铁芯式罗氏线圈逐渐得到了专家学者的关注^[12-15]。PCB 型罗氏线圈具备很

多优点,基于计算机辅助设计软件进行布线设计,采用数控机床对 PCB 板进行加工布线,改善了罗氏线圈布线的均匀性问题^[16-20]。但目前对线圈高频特性的定量研究较少,线圈存在使用过程中易受外界磁场干扰和由于缺少铁芯而导致的输出电压灵敏度小的不足。

文中研制了一种基于多层 PCB 罗氏线圈的高精度冲击电流测量装置。分析了标准雷电流波形的频率成分,计算了传感器的频率特性要求;分析了线圈与积分回路的原理,研究了线圈尺寸、匝数与线圈高频特性、输出电压灵敏度的关系;设计并优化了多层 PCB 罗氏线圈,对测量装置进行特性试验研究,验证其特性参数。

1 雷电流频率成分分析

冲击电流测量装置最重要的技术参数为频率特性,首先分析雷电流波形的频率成分,以波形上下限频率作为罗氏线圈频率特性的设计依据。

根据文献[21]中对雷电流波形的规定,目前模拟雷电流的冲击电流分为指数型电流波形与方波电流波形。绝大部分电气设备的耐受电流试验采用指数型冲击电流波形,其主要特征参数为电流峰值 I_p ,波头时间 T_1 和半峰值时间 T_2 ,如图 1 所示。图中 T 为从 10% 电流峰值处到 90% 电流峰值处的时间间隔,波头时间 $T_1 = 1.25T$,半峰值时间 T_2 为视在原点与波形下降沿 50% 峰值处的时间间隔。其中 8/20 μs 的雷电波电流波形为标准雷电流波形,

收稿日期:2019-07-12;修回日期:2019-08-23

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“冲击电流测量与溯源技术研究”(JL71-17-002)

因此文中采用 8/20 μs 的雷电流波形作为测试线圈测量的典型波形。

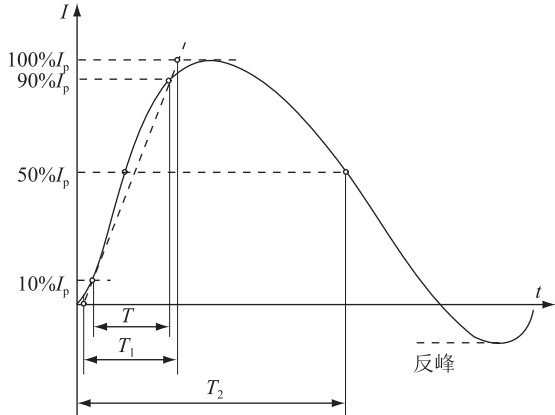


图1 标准雷电波示意

Fig.1 Standard lightning waveform

文中采用双指数模型来拟合 8/20 μs 的标准雷电流波形:

$$i(t) = I_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: I_0 为冲击电流峰值; k 为比例系数, $\alpha = 7.714 \times 10^4$; $\beta = 2.489 \times 10^5$ 。

由于雷电波的下降速度越来越缓且 100 μs 处雷电流幅值仅为电流峰值的 0.11%, 因此选取 8/20 μs 的波形中 100 μs 以内的波形做雷电波的频率特性分析。对上述波形做离散化处理, 获得其离散数据点, 通过快速 Fourier 变换 (fast Fourier transform, FFT) 对离散数据做频谱分析, 如图 2 所示。从图中可以看出雷电流波形的频率成分 99.5% 处于 0.1 ~ 100 kHz, 因此 PCB 型罗氏线圈式电流测量装置的上限频率取 100 kHz, 下限频率取 0.1 kHz 即可满足雷电流波形的测量要求。

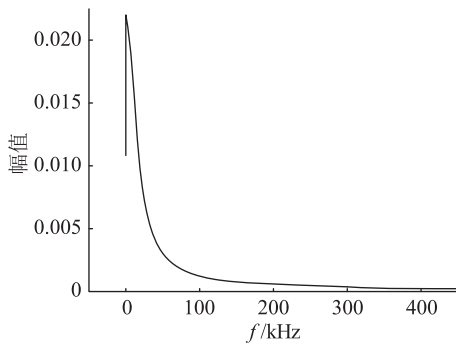


图2 雷电流波 FFT 频谱分析

Fig.2 FFT spectrum analysis chart of lightning current waveform

2 冲击电流测量装置原理分析

罗氏线圈的结构如图 3(a) 所示。其中 a 为线圈内半径; b 为线圈外半径; h 为线圈高度。感应电

压 U 与线圈结构参数的关系见式 (2), 线圈自感和杂散电容的计算见式 (3) 一式 (4)。

线圈等效电路如图 3(b) 所示。其中 L_c 为罗氏线圈自感; M 为线圈互感; R_c 为罗氏线圈内阻; C_c 为罗氏线圈等效端口电容; R_s 为外接在罗氏线圈两端的采样电阻; i_1 为待测电流; i_2 为线圈内部流过的电流。

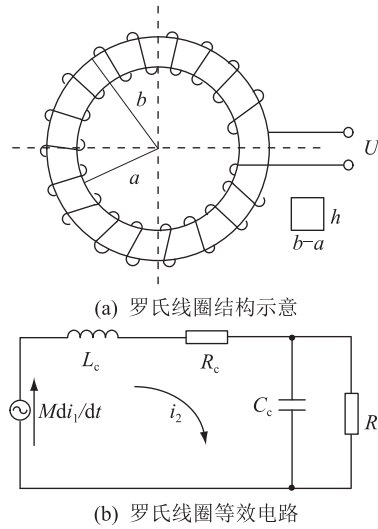


图3 罗氏线圈结构示意图与等效电路

Fig.3 Schematic diagram of Rogowski coil structure and equivalent circuit

$$U_0 = M \frac{di}{dt} = \frac{\mu_0 N h \ln(b/a)}{2\pi} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$L_c = \frac{\mu_0 N^2 h \ln(b/a)}{2\pi} \quad (3)$$

$$C_c \approx \frac{2\pi^2 N (b-a)}{\ln(b/a)} \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空磁导率; N 为线圈匝数; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数。

若忽略端口等效电容的影响, 则罗氏线圈的等效电路关系可由式 (5) 表示。

$$M \frac{di_1}{dt} = i_2 (R_c + R_s) + L_c \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

若 $U_{R_s} \ll U_{L_c}$, 可忽略电阻上的电压, 此时罗氏线圈工作在自积分状态。若 $U_{R_s} \gg U_{L_c}$, 可忽略电感上的电压, 此时罗氏线圈工作在外积分状态。

由于 PCB 型罗氏线圈不含铁芯, 其自感值往往很小, 因此为使 PCB 型罗氏线圈满足自积分的条件, 采取如下措施:

(1) 增大罗氏线圈的自感, 罗氏线圈的自感受匝数以及内外径的影响, 因此增大自感值将使罗氏线圈的自感和杂散电容响应增大, 同时降低了罗氏

线圈的高频截止频率。

(2) 减小采样电阻的阻值,采样电阻的阻值越小,采样电阻接线端的杂散电容以及杂散电感对电路的影响加强,对罗氏线圈测量信号的干扰也将越强。

文中采用外积分回路对罗氏线圈的输出信号进行积分处理。图 4 为 PCB 型罗氏线圈外接无源 RC 积分回路的等效电路图, R 和 C 分别为积分电阻与积分电容。

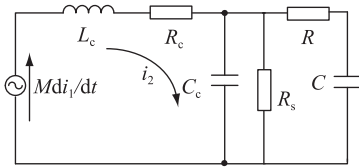


图 4 增加 RC 积分电路的罗氏线圈等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of Rogowski coil with RC integration circuit

根据复频域运算法可推导出电路的传递函数:

$$G(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{M_d R_s s}{L_c C_c R_s s^2 + (C_c R_c R_s + L_c) s + R_c + R_s} \frac{1}{C R_s + 1} \quad (6)$$

式中: $U(s)$ 为积分电容上的电压; $I(s)$ 为一次侧电流。

当传递函数取最佳阻尼比时,即满足式(7)时,阶跃响应下积分电容上的电压如式(8)所示;令上升时间为 10% 峰值处至 90% 峰值处,则罗氏线圈的上升时间如式(9)所示。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{R_a + R_s}{L_c C_c R_s}} \quad (7)$$

$$U_c(t) = \frac{M R_s}{R C (R_s + R_c)} \left[e^{-\frac{t}{RC}} - \sqrt{2} e^{-\frac{\omega_n t}{\sqrt{2}}} \sin\left(\frac{\omega_n t}{\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (8)$$

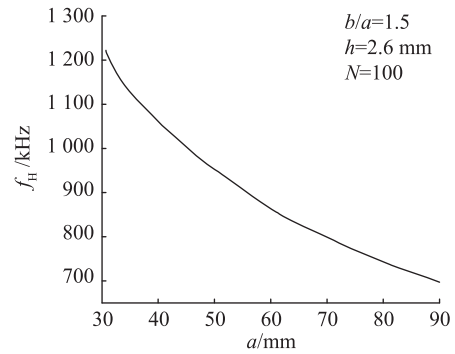
$$t_r \approx 2.66 \sqrt{L_c C_c} \quad (9)$$

由系统的传递函数以及幅频特性中幅值下降 3 dB 的标准确定系统的截止频率,系统低频截止频率 f_L 和高频截止频率 f_H 的计算如式(10)所示。

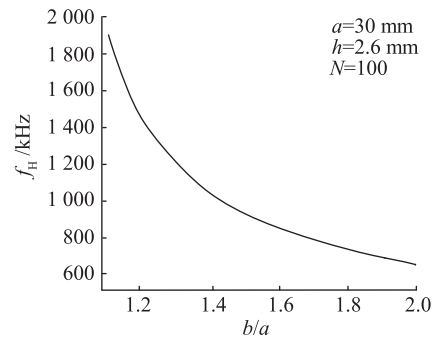
$$\begin{cases} f_L = \frac{1}{2\pi RC} \\ f_H = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_c C_c} \sqrt{\frac{R_c + R_s}{L_c C_c R_s}}} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, f_L 取决于积分回路的参数,而 f_H 取决于线圈的参数,如自感和端口电容等以及采样电阻的选择。

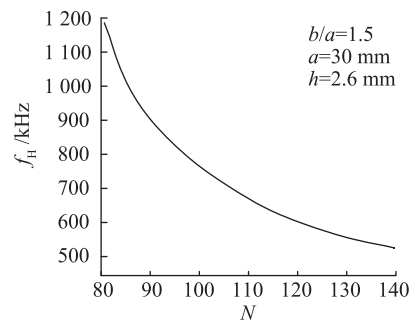
基于加工工艺的考虑,设置 h 为 2.6 mm, f_H 与 $a, b/a$ 以及 N 的关系如图 5 所示。从图中可以看出,线圈内径越大,截止频率越低,当内径为 60 mm 时,截止频率约为 850 kHz。 b/a 越大,匝数越多,截止频率越低。当线圈内径为 60 mm, b/a 约为 1.5, 线圈高度 2.6 mm, 匝数小于 90 匝时,高频截止频率大于 1 MHz, 满足雷电流的测量要求。



(a) 高频截止频率与线圈内径关系



(b) 高频截止频率与线圈内外径比例关系



(c) 高频截止频率与线圈匝数关系

图 5 线圈高频截止频率与线圈尺寸的关系

Fig.5 Relation diagram between high frequency cut-off frequency and dimension of coil

3 冲击电流测量装置研制

设计多层 PCB 罗氏线圈,根据频率特性要求确定线圈尺寸参数;改善输出电压干扰水平,设计屏蔽结构以及接线方式;研究增大输出电压灵敏度的方法。

(1) 频率特性。表 1 为罗氏线圈的具体参数,罗氏线圈的计算电感值为 3.04 μ F, 采样电阻选为

360 Ω,当频率为 100 kHz 时, $U_{Rs} \gg U_{Lc}$,线圈符合外积分的条件。

表 1 罗氏线圈尺寸参数

Table 1 Technical parameters of Rogowski coil

参数	数值	参数	数值
2a/mm	63	2b/mm	93
h/mm	26	R_s/Ω	360
R_c/Ω	6.85	$R/M\Omega$	1
N	60	C/nF	2

(2) 提高抗干扰能力。使用罗氏线圈测量脉冲电流时,干扰电磁场影响测量结果。干扰磁场分量可分为与罗氏线圈平面垂直方向以及平行方向的电磁场。对于垂直分量的电磁场,整个线圈相当于一个大线圈,穿过罗氏线圈的磁场在罗氏线圈两端产生感应电动势,因此中线中间增加方向与线圈绕向相反的回线,这样垂直方向的电磁场电动势极性相反,正好抵消。对于水平方向的干扰电磁场,当骨架的截面和线圈缠绕得不均匀时,干扰磁场在对称部分感应的电动势可能不相等,将会引起测量误差。因此线圈分布的均匀性直接影响线圈的测量精度,而 PCB 型罗氏线圈完全解决了线圈绕线不均匀的难题^[16]。图 6 为 PCB 罗氏线圈的分层示意,单个线圈分为 6 层,分别为上下屏蔽层、线圈上层、回线层、过孔层、线圈下层。从图中可以看出,线圈的屏蔽层增大了线圈的抗干扰能力,且线圈采用差分信号输出,消除了干扰磁场在屏蔽层上产生的感应电压对输出电压信号的影响。

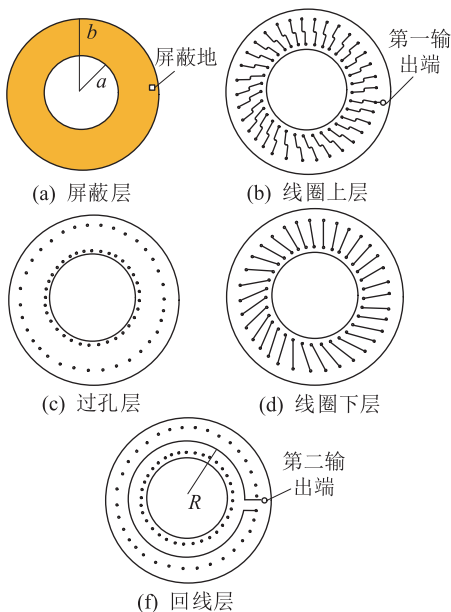


图 6 多层 PCB 罗氏线圈示意

Fig.6 Schematic diagram of multi-layer PCB Rogowski coil

(3) 简化回线层的设计,增大测量灵敏度。线圈上层的形状为鱼骨形,回线的直径可通过感应磁通面积来计算,回线的半径为线圈内层孔半径和外层孔半径的平均值即 $R = (a+b)/2$ 。罗氏线圈的缺点是感应电压太小,灵敏度太低。线圈研制过程中通过增加过孔层的方法增加了线圈高度,从而增加线圈的互感和输出电压幅值;另外使用 2 个相同的线圈首末段串联,输出感应电压将增大一倍。图 7 为单匝完整线圈的示意图。

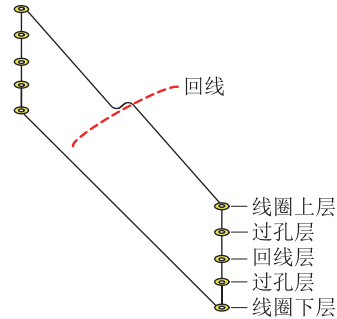


图 7 单个完整线圈示意

Fig.7 Schematic diagram of a single turn coil

表 2 为线圈技术参数,线圈为 2 个 60 匝的线圈串联,整个线圈的电压比例系数为 1.251 5 V/kA。将罗氏线圈和积分回路放置在屏蔽盒中,可进一步增强罗氏线圈和积分回路抗干扰能力。

表 2 罗氏线圈设计结果

Table 2 Design results of Rogowski coil

参数	数值	参数	数值
$L_c/\mu H$	3.04	C_c/nF	2.32
f_L/Hz	80	f_H/MHz	1.8
输出电压灵敏度/ (V·kA ⁻¹)	2.53	积分回路 衰减比	2:1
N	60	串联线圈数量	2
输出方式	差分	上升时间/ns	120

4 冲击电流测量装置的特性试验

根据文献[21]的要求,测量冲击电流测量装置的动态特性、标准雷电流误差测量以及线性度试验,以验证线圈的设计参数。

4.1 动态特性

冲击电流测量装置的动态特性可通过阶跃波响应试验获得。图 8(a)为方波电流发生电路,从图中可以看出,采用同轴电缆作为储能装置,使用直流源通过充电电阻对同轴电缆充电,充电完成之后,触发继电器对回路放电,罗氏线圈在回路中穿过而过,金属回流外壳上流过的电流与继电器支路上流过的电流大小相同,方向相反,尽可能地减小

回路杂散电感。实验时同轴电缆的长度为 100 m,同轴电缆的波阻抗为 50 Ω,当充电电压为 1 000 V 时,产生的方波电流幅值约为 20 A,脉宽约 1 μs。图 8(b)为阶跃波响应波形,根据数据计算得到上升时间约为 88.4 ns,相对过冲小于 10%。根据标准要求,可测量上升时间小于 1 μs 的冲击电流波形。

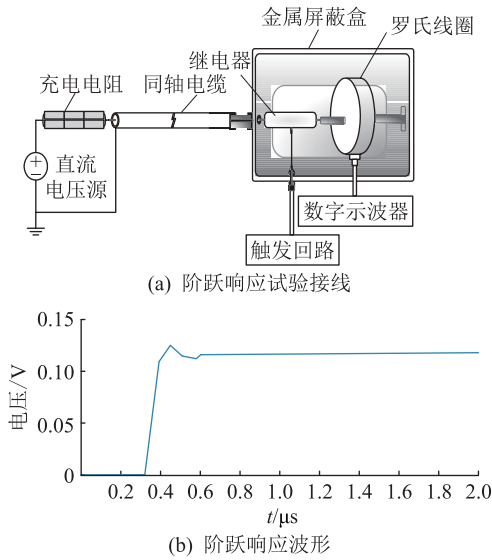


图 8 测量装置阶跃响应试验

Fig.8 Step response test of measuring device

4.2 冲击电流波形测量

图 9 为罗氏线圈测量装置中测量冲击电流波形的测量回路,为了改善测量回路的抗干扰能力,线圈外壳与双层屏蔽电缆的外层屏蔽相连,然后与数据采集单元的金属外壳相连,消除共模干扰。线圈通过积分之后的信号与同轴电缆的芯线和内层屏蔽相连,最终进入数据采集单元两端,数据采集单元测量的是差分信号。

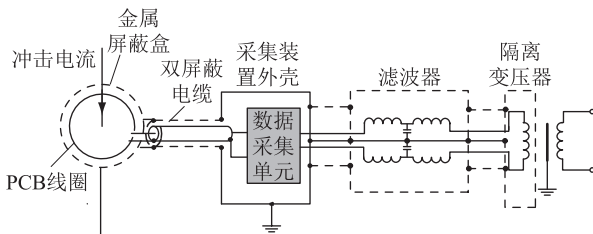


图 9 测量冲击电流的测量回路

Fig.9 Measurement loop of impulse current

图 10(a)为罗氏线圈的感应电压波形,为被测冲击电流的微分信号。从图中可以看出,波形起始位置的振荡非常小,由此可见线圈的抗干扰能力非常强。图 10(b)为增加积分回路后,整个传感器的测量波形与 Pearson 线圈测量波形的比较,罗氏线圈的设置比例系数为 1.25 V/kA,图中显示 2 种传感器输出波形高度吻合。在正负极性 20 kA 下重复

测量 10 次,峰值电流测量误差平均值为 0.15%,时间参数波头时间 T_1 和半峰值时间 T_2 的误差分别为 0.3% 和 0.1%。

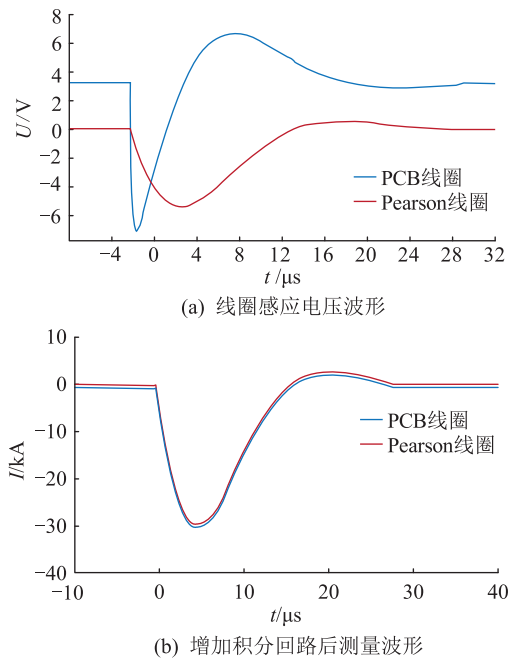


图 10 研制线圈与 Pearson 线圈测量波形对比

Fig.10 Comparison of current waveforms between developed Rogowski coil and Pearson coil

4.3 线性度测量

线性度试验测量回路如图 11 所示,从图中可以看出 Pearson 线圈和数字记录仪组成标准测量装置,该测量装置峰值参数的测量不确定度为 0.6%,时间参数测量不确定度为 1.5%。比对时环境温度 20 ℃,相对湿度 54%。PCB 罗氏线圈和采样率 500 MS/s,垂直分辨率为 10 Bit 的数字示波器组成被测测量装置。数字示波器的冲击刻度因数由冲击电压标准波源校准得到^[22-24]。

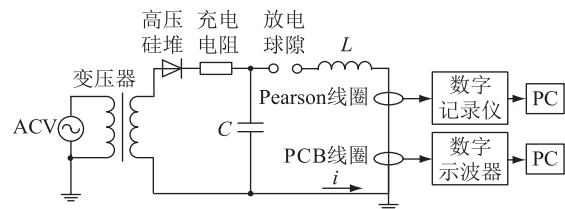


图 11 线性度试验回路

Fig.11 Test loop of linearity test

改变电容充电电压即可改变冲击电流幅值。该冲击电流发生回路产生 8/20 μs 的标准雷电流波形。图 12 为 PCB 罗氏线圈组成的测量装置的比例系数随电流峰值变化的情况,从图中可以看出,比例系数随着电流的增大而增大,在 5~40 kA 的电流范围内,罗氏线圈的比例系数从 1.25 V/kA 增大至 1.254 V/kA,变化量约为 0.3%。

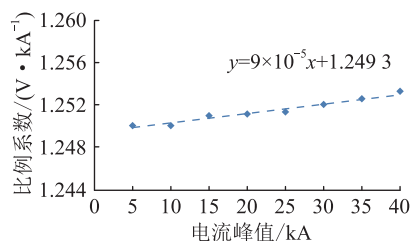


图 12 测量装置比例系数随电流的变化

Fig.12 The variation of scale factor with increase of impulse current

5 结语

文中介绍一种基于多层 PCB 型罗氏线圈的冲击电流测量装置并研究其特性。在消除传统罗氏线圈绕线不均匀引起较大测量误差的基础上,进一步改善了输出电压的灵敏度以及抗干扰能力。研究了线圈尺寸和匝数与线圈高频特性之间的变化关系。测量线圈的阶跃响应波形,其上升时间小于 90 ns,可测量上升时间小于 1 μs 的电流波形。测量 8/20 μs 的冲击电流波形,比例系数为 1.25 V/kA,其峰值误差小于 0.2%,时间参数测量误差在 0.3% 以内。与标准 Pearson 线圈组成的测量装置比对,在 5~40 kA 的电流范围内,线性度小于 0.3%。试验结果表明测量装置的技术参数符合设计预期参数,研制的测量装置具备测量高频冲击电流的能力。

参考文献:

- [1] 吕海勇,李文飞,吴坚. 1995~2014 年广东省雷电灾害事故的统计分析[J]. 广东气象,2015,37(6):52-55.
LYU Haiyong,LI Wenfei,WU Jian. Statistical analysis of lightning disaster accidents in guangdong province from 1995 to 2014[J]. Guangdong Meteorology,2015,37(6):52-55.
- [2] 梅贞,陈水明,顾勤炜,等. 1998~2004 年全国雷电灾害事故统计[J]. 高电压技术,2007(12):173-176.
MEI Zhen,CHEN Shuiming,GU Qinwei,et al. Statistic of lightning accidents during 1998~2004 in China[J]. High Voltage Engineering,2007(12):173-176.
- [3] 韩超. 雷电监测装置的研究[D]. 吉林:吉林大学,2015,12-50.
HAN Chao. Research of the lightning monitoring mechanism [D]. Jilin:Jilin University,2015,15-20.
- [4] 陈炜炜,王磊,詹跃东,等. 雷电回击通道电流影响因子仿真分析[J]. 电子测量技术,2019,42(2):1-5.
CHEN Weiwei,WANG Lei,ZHAN Yuedong,et al. Lightning return channel influence factor simulation analysis[J]. Electronic Measurement Technology,2019,42(2):1-5.
- [5] 龚勇镇. 罗氏线圈电流传感检测技术研究概况[J]. 广西轻工工业,2011,27(2):54-56.
GONG Yongzhen. Research survey of roche coil current sensing detection technology [J]. Guangxi Journal of Light Industry,

2011,27(2):54-56.

- [6] IBRAHIM A,METWALLY. Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2010,59(2):353-360.
- [7] CHEN Qing,LI Hongbin,ZHANG Mingming,et al. Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2006,55(3):939-943.
- [8] 张弛,康小宁,郑永康,等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特性[J]. 高电压技术,2018,44(12):4105-4112.
ZHANG Chi,KANG Xiaoning,ZHANG Yongkang,et al. Transient characteristics of Rogowski coil based current transformers [J]. High Voltage Engineering,2018,44(12):4105-4112.
- [9] 宋涛. Rogowski 线圈电流互感器中的高精度数字积分器技术研究[J]. 高电压技术,2015,41(1):237-244.
SONG Tao. Technical research of accurate digital integrators for Rogowski coil current transformer [J]. High Voltage Engineering,2015,41(1):237-244.
- [10] 王宝诚,王德玉,邹伟扬. 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 Baocheng,WANG Deyu,WU Weiyang. Frequency response analysis of a Rogowski coil transducer and its design method [J]. Transactions of China Electro-technical Society,2009,24(9):21-27.
- [11] 骆潘钊,张孝波. 一种适用于 Rogowski 线圈电流互感器的新型[J]. 广东电力,2015,28(10):97-102.
LUO Pandian,ZHANG Xiaobo. A new kind of digital integration algorithm for current transformer of Rogowski coil [J]. Guangdong Electric power,2015,28(10):97-102.
- [12] 张冈,王程远,陈幼平. PCB 空心线圈电流传感器的暂态特性[J]. 电工技术学报,2010,25(11):85-89.
ZHANG Gang,WANG Chengyuan,CHEN Youping. Transient behavior of PCB air-core coil current transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(11):85-89.
- [13] 李昂,毛先胤,刘亚东,等. 基于 PCB 罗氏线圈的暂态电流采集装置[J]. 电气自动化,2018,40(6):108-111.
LI Ang,MAO Xianyin,LIU Yadong,et al. Transient current acquisition device based on PCB Rogowski coil [J]. Electrical Automation,2018,40(6):108-111.
- [14] 张阳光,邢志鹏,刘延杰. 干扰因素对罗氏线圈精度的影响分析[J]. 电气自动化,2018,40(2):110-112.
ZHANG Yangguang,XING Zhipeng,LIU Yanjie. Analysis of the impact of interference factors upon the accuracy of Rogowski coils [J]. Electrical Automation,2018,40(2):110-112.
- [15] 杨为之,宋坤宇,周力行. 罗氏线圈磁屏蔽盒的设计与研究[J]. 高压电器,2018,54(12):158-164.
YANG Weizhi,SONG Kunyu,ZHOU Lixing. Design and research of the magnetic shielding box of the Rogowski coil [J]. High Voltage Apparatus,2018,54(12):158-164.
- [16] 王旭. 基于 Rogowski 线圈脉冲电流检测技术的研究[D].

- 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017:1-17.
- WANG Xu. Study on Rogowski coil for research on detection technology of pulse current [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 1-17.
- [17] 杨楠,段雄英. 一种新型的 Rogowski 线圈——PCB 罗氏线圈[J]. 高压电器,2005(3):209-211.
- YANG Nan, DUAN Xiongying. A novel PCB Rogowski coil [J]. High Voltage Apparatus, 2005(3): 209-211.
- [18] 陶涛,赵治华,潘启军,等. 一种抗强干扰型双面对称布线 PCB 罗氏线圈[J]. 电工技术学报,2011,26(9):130-137.
- TAO Tao, ZHAO Zhihua, PAN Qijun, et al. Design of PCB Rogowski coil and analysis of anti-interference [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2011, 26(9): 130-137.
- [19] 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 Xiaolei, LIU Yadong, LIU Zongjie, et al. Design of high frequency differential winding PCB Rogowski coil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 886-894.
- [20] 李雪桓. 基于 PCB 型罗氏线圈的脉冲大电流测量系统研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- LI Xuehuan. Research of large pulse current measurement system based on PCB Rogowski coil [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [21] 高电压和大电流试验技术 第4部分:试验电流和测量系统的定义和要求:GB/T 16927.4—2014 [S].
- High voltage and high current test techniques-part 4: Definitions and requirements for test currents and measuring systems: GB/T 16927.4—2014 [S].
- [22] 章欣,龙兆芝,宗贤伟,等. 溯源用冲击电压标准波源[J]. 高电压技术,2015,41(8):2810-2817.
- ZHANG Xin, LONG Zhaozhi, ZONG Xianwei, et al. Impulse voltage calibrator used in traceability [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2810-2817.
- [23] 龙兆芝,李文婷,鲁非,等. 低阻抗冲击电压标准波源[J]. 电测与仪表,2015(4):101-106.
- LONG Zhaozhi, LI Wenting, LU Fei, et al. A low impedance impulse voltage calibrator [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015(4): 101-106.
- [24] 刘少波,龙兆芝,鲁非,等. 冲击电压标准波源的研制[J]. 高压电器,2015,52(1):140-145.
- LIU Shaobo, LONG Zhaozhi, LU Fei, et al. Study of impulse voltage calibrator [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 52(1): 140-145.

作者简介:



李文婷

李文婷(1987),女,硕士,高级工程师,从事冲击电压/电流测量技术研究工作(E-mail: liwenting@epri.sgcc.com.cn);

龙兆芝(1984),女,硕士,高级工程师,从事冲击电压/电流测量技术研究工作;

范佳威(1994),男,硕士,工程师,从事高电压测量技术研究工作。

Precision impulse current measuring device based on multi-layer PCB Rogowski coil

LI Wenting¹, LONG Zhaozhi¹, FAN Jiawei¹, PAN Xiyu², LIU Shaobo¹, ZHOU Feng¹

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the performance of lightning protection equipment, the measurement level and response characteristics of transient current measurement sensor are very important. A design scheme of multi-layer PCB Rogowski coil with good high frequency performance, strong anti-interference ability and suitable sensitivity is proposed in this paper. The frequency range of lightning current waveform and the transmission characteristics of Rogowski coil are analyzed. According to the relationship curve between the size of Rogowski coil, turns number, and the frequency characteristics of coil, the structure size of coil is determined. A new shielding and signal output mode is designed to enhance the anti-interference ability. The sensitivity of output voltage is increased by increasing coil thickness and connecting two coils in series. According to the standard requirements, the dynamic characteristics of the measuring device, the measurement error of standard lightning current and the linearity test are carried out. The step response test of the measuring device shows that the response time is less than 90 ns and the relative overshoot is less than 10%. Compared with the standard Pearson coil, the peak error is less than 0.2%, the time parameter measurement error is less than 0.3%. The linearity of the measuring device is about 0.3% with current range from 5 kA to 40 kA. The test results show that the impulse current measuring system can measure high frequency current signal.

Keywords: impulse current; Rogowski coil; linearity; step response; high frequency characteristic

(编辑 方晶)