

## 一种印制板罗氏线圈的结构参数和电磁参数影响研究

李维波, 马伟明, 胡安, 潘启军, 范学鑫

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

Study on Operation Characteristics of the Single Printed Board Current Sensor

LI Wei-bo, MA Wei-ming, HU An, PAN Qi-jun, FAN Xue-xin

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

摘要: 设计了一种具有单面线圈结构的印制板罗氏线圈, 对其结构参数和电磁参数之间的相互影响以及它们对线圈动态特性的影响进行了研究, 并归纳了影响其电磁参数和动态特性的重要因素。获得了所设计的具有单面线圈结构的印制板罗氏线圈的幅频特性和相频特性的试验曲线, 利用它测量了脉冲功率源中的脉冲大电流。实验表明, 所得出的有关分析和优选印制板罗氏线圈的结构参数和电磁参数的分析方法, 对于快速设计具有合理结构、最优电磁参数和良好动态特性的印制板罗氏线圈, 具有指导价值。

关键词: 单面板线圈; 电流传感器; 结构参数; 电磁参数; 罗氏线圈

中图分类号: TM933.1

文献标志码: A

Abstract: A printed-type R'coil functioned as a current sensor coupling with the measured current bus and forming magnetic linkage was designed in this paper, and the influence characteristics between the structural parameters of the board and the electromagnetic parameters of the printed-type R'coil have been analyzed. The important influence factors on the equivalent inductance of the integrated sensor were also summarized. Characteristic curves of the impedance and phase both of the single printed board coil and two series coils were presented. Self-resistance, self-inductance and stray capacitance curves of both the single printed board coil and two series coils were analyzed. The judgment method for the results validity was proposed. The sensor centered on the printed board structure was proposed to measure the discharging current of the pulse power source. Experimental results verify the truth of the design principles and methods of the integrated coil with good dynamic property. The integrated coil can be integrated with the post process circuit unit and the detective coil sensor.

Key words: single printed board; current sensor; structure parameters; electromagnetic parameters; Rogowski coil(R'coil)

## 0 引言

绕线式罗氏线圈不含铁心, 具有很多优点, 在许多工业领域得到应用, 如充当直流比较仪的检测绕组、在高压环境中作为脉冲电流传感设备等<sup>[1-3]</sup>。然而, 传统罗氏线圈的结构尺寸一般较大, 且多为环形结构, 安装和拆卸不便<sup>[4,5]</sup>。用布置成环状结构的印刷导线, 代替绕制传统罗氏线圈的导线, 构建具有新型结构的罗氏线圈, 已在很多文献有所报道<sup>[5-8]</sup>, 并对印制板罗氏线圈的结构及工作性能作了非常详尽的分析, 而对这种新型罗氏线圈的结构参数和电磁参数之间的相互影响却论述得不多。笔者在印刷板的某个面上均匀密布铜箔环状导线, 形成具有单面线圈结构的印制板罗氏线圈(简称单面板罗氏线圈), 以它为例, 来分析印制板罗氏线圈的结构参数和电磁参数之间的影响特性, 探讨获得具有良好动态特性印制板罗氏线圈的分析方法。

## 1 一种单面线圈结构的印制板罗氏线圈

## 1.1 结构特点

所设计的单面板罗氏线圈的原理模型见图1(仅示意了3匝铜箔导线)。图中结构尺寸为:  $W_c$  为铜箔线宽度,  $m; l_1$  为图示线圈边长,  $m; a, b$  为第1圈印刷导线所包围的有效面的长度和宽度,  $m; d_1$  为印刷导线之间的间距,  $m; x$  为第1圈印刷导线与导电母线之间的最小距离,  $m; r$  为单面板罗氏线圈与导电母线之间的间距,  $m; l_x$  为与印制板相耦合的那段导电母线的长度,  $m; d_x$  为导电母线的直径,  $m; e(t)$  为单面板罗氏线圈拾取的感应电势,  $V; i_1(t)$  为被测电流,  $A$ 。

## 1.2 工作机理

图1所示线圈的等效电路见图2(a), 图中  $i_2(t)$

收稿日期: 2007-01-28; 修回日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(50421703); 国家自然科学基金资助项目(50677070)。

作者简介: 李维波(1973-), 男, 博士, 主要从事计算机测控与信息处理技术研究。

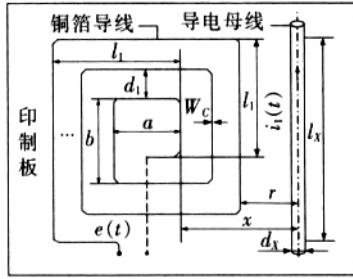
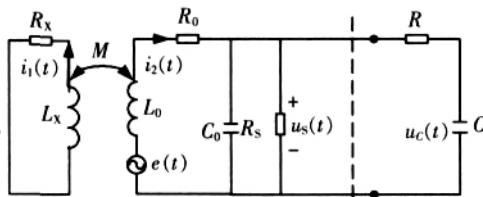


图1 单面板罗氏线圈的模型示意图

为流过印刷导线的感应电流,  $A$ ;  $R_0$ 、 $L_0$  和  $C_0$  为该线圈的内阻、总自感和线匝之间的分布电容,  $\mu$ 、 $H$ 、 $F$ ;  $R_S$  和  $u_S(t)$  为后接阻尼电阻及其端电压,  $V$ ;  $L_X$  和  $R_X$  分别为与印制板相耦合的那段导电母线的自感和内阻,  $H$ 、 $\Omega$ 。



(a)单面板罗氏线圈的等效电路 (b)RC 积分器

图2 单面板罗氏线圈等效电路和 RC 积分器

单面板罗氏线圈的感应电势  $e(t)$  为

$$e(t) = -M \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1)$$

式中  $M$  为单面板罗氏线圈与被测电流母线之间的互感,  $H$ 。当不考虑流过  $C_0$  中的电流时, 感应电势  $e(t)$  又可表示为

$$e(t) = L_0 \frac{di_2(t)}{dt} + (R_0 + R_S) i_2(t) \quad (2)$$

且流过印刷导线的电流  $i_2(t)$  可表示为

$$i_2(t) = \frac{u_S(t)}{R_S} \quad (3)$$

当满足  $L_0 [di_2(t)/dt] \ll (R_0 + R_S) i_2(t)$  时, 联立式(1) ~ (3) 可得被测电流  $i_1(t)$  的表达式为

$$i_1(t) = -\frac{(R_0 + R_S)}{MR_S} \int u_S(t) dt \quad (4)$$

分析式(4)可知: 单面板罗氏线圈, 实质上相当于一个微分环节, 要将端电压  $u_S(t)$  还原为被测电流波形, 需在阻尼电阻之后接积分电路。选用 RC 积分器, 见图 2(b)。有关 RC 积分器与有源积分器的更详细内容见文 [3, 4], 且可以将包括阻尼电阻、积分器等后续处理电路与单面板罗氏线圈一起布置在同一块印制板上。

RC 积分器的输出电压  $u_C(t)$  的近似表达式为

$$u_C(t) = \frac{1}{RC} \int u_S(t) dt \quad (5)$$

因此, 被测电流  $i_1(t)$  可以表示为

$$i_1(t) = -\frac{(R_0 + R_S) RC}{MR_S} u_C(t) \quad (6)$$

所以, 可由式(6)得到被测电流  $i_1(t)$  波形。因此, 单面板罗氏线圈与传统罗氏线圈的工作机理是相同的, 不同之处在于它们与被测电流的磁场相耦合的小线匝的构成方式, 单面板罗氏线圈的小线匝由印刷电路与非磁性材料的印制板构成, 而传统罗氏线圈的小线匝由导线与非磁性材料的骨架芯构成。

### 1.3 电磁参数

与单面板罗氏线圈相耦合的那段导电母线的自感  $L_X$  和内阻  $R_X$  近似表示为

$$L_X = 2l_X \left( \ln \frac{l_X}{d_X} - 1 + \frac{2d_X}{l_X} - \frac{2d_X^2}{l_X^2} \right) \times 10^{-7} \quad (7)$$

$$R_X = \frac{4l_X}{d_X^2} \quad (8)$$

式中  $\rho$  为铜导线的电阻率,  $\Omega \cdot m$ 。由所有铜箔导线围成的环状线圈的总自感  $L_0$  的近似表达式为

$$L_0 = \mu N^2 \ln \frac{l_1}{Nd_1} \quad (9)$$

式中  $N$  为整个印制板的铜导线匝数(类似于传统罗氏线圈的小线匝数)。

假设不计印刷导线的宽度、导电母线本身尺寸的影响, 且均匀、对称布置印刷导线, 可得印刷电路板与被测电流母线之间的互感的表达式为

$$M = \frac{\mu b}{2} \sum_{i=1}^N S \quad (10)$$

式中  $S$  ( $m^2$ ) 为

$$S = [b + (i-1)2d_1] \ln \frac{x + a + (i-1)2d_1}{a + (i-1)2d_1} \quad (11)$$

由式(10)、(11)可知, 系数  $M$  取决于: ①印制板的尺寸(它决定印刷电路所包围的有效面积  $\sum_{i=1}^N S$ ); ②印制板与导电母线之间的位置(即参数  $x$ )。

从集肤效应原理可知, 印制板导线截面上的交变电流的分布特性既决定于导线材料的磁导率和电导率, 也决定于导线电流的频率。因此, 用这种线圈测量不同频率特性大电流时, 其自感和互感也间接地与上述各量有关。当其它条件不变时, 电流频率愈高, 集肤效应和邻近效应对线圈的影响也就愈强烈<sup>[9-12]</sup>。因此, 在计算该线圈自感和互感时, 应具体分析被测电流的频率特性。由于印制板的铜箔厚度很薄, 如  $30 \mu m$  左右, 对于所要检测的宽脉冲电流而言, 可忽略集肤和邻近效应对自感和互感的影响。

单面板罗氏线圈的内阻可表示为

$$R_0 = \frac{l_C}{W_C h_C} \quad (12)$$

式中  $l_C$  和  $h_C$  分别为构成单面板罗氏线圈的铜导线总长度和铜箔厚度。

当线圈接阻尼电阻为  $R_S$  且不考虑分布电容时, 其复阻抗的表达式为

$$Z=[R_0+R_s+\frac{R_x(M)^2}{R_x^2+(L_x)^2}]+j[L_0-\frac{(M)^2L_x}{R_x^2+(L_x)^2}] \quad (13)$$

单面板罗氏线圈的等效电感为

$$L_E=L_0-\frac{(M)^2L_x}{R_x^2+(L_x)^2} \quad (14)$$

分析式(13)、(14)可知,印制板线圈的阻抗、等效电感都是该互感 M 平方的函数。而 M 随线圈与导电母线距离参数 x 的变化而改变的,所以参数 x 也将对等效电感产生直接影响。

相对传统绕线式结构而言,印制板线圈的尺寸较小,当它测量高频电流时,与印制板相互耦合的那段导电母线的内阻与它的感抗相比,满足条件式

$$R_x \ll L_x \quad (15)$$

因此,印制板线圈的等效电感可以简化为

$$L_E=L_0-\frac{(\frac{M}{2}\sum_{i=1}^N S_i)^2}{L_x} \quad (16)$$

分析式(10)、(16)可得,印制板线圈的等效电感与导电母线距离 x 的变化规律。当满足条件式  $M^2 \ll L_x$  时,该线圈的等效电感可简化为

$$L_E \approx L_0 \quad (17)$$

所以,印制板线圈的等效电感的上限为该线圈的自感,要有效提高等效电感,就需要适当控制单面板的位置参数、铜箔参数、印制板尺寸以及导电母线的尺寸、内阻和自感等。

可见,在印制板与导电母线之间的位置固定时,单面板罗氏线圈的自感、互感、等效电感和内阻等电磁参数,均取决于印制板的结构尺寸和布线参数。

### 1.4 结构参数和电磁参数的影响特性

设印制板线圈的初始条件为零,可得它的传递函数(以下简称传函)为

$$H(s)=\frac{U_s(s)}{I_1(s)}=-\frac{Ms}{L_0C_0(s-s_1)(s-s_2)} \quad (18)$$

式中 s 为拉氏算子,  $I_1(s)$  和  $U_s(s)$  分别为电流  $i_1(t)$  和端电压  $u_s(t)$  的拉氏变换,特征根  $s_1$  和  $s_2$  分别为

$$s_{1,2}=-\pm\sqrt{2-\ln^2} \quad (19)$$

式中  $s_{1,2}=-\pm j\zeta\omega_n$ , 衰减系数  $\zeta=\ln>0$ , 阻尼振荡频率  $\omega_n$  为  $\omega_n^2=2\ln(1-\zeta^2)$ 。阻尼比  $\zeta$  和自然频率  $\omega_n$  的取值依据分别为

$$\zeta=\frac{R_sC_0R_0+L_0}{2\sqrt{L_0C_0(R_s+R_0)R_s}} \quad (20)$$

$$\omega_n=\sqrt{\frac{R_s+R_0}{R_sL_0C_0}} \quad (21)$$

分析式(18)表明:①该线圈特征方程系数全为实数,且  $\ln>0$ ,罗氏线圈传感系统的所有极点均分布在虚轴左半边,确保了它的稳定性;②为确保线圈具有较好的动态特性,必须综合考虑它的快速性和稳态误差,即要求阻尼电阻  $R_s$  必须满足一定的条

件<sup>[9,10]</sup>。如果要求阻尼比  $\zeta$  为最佳阻尼系数即

$$\zeta_{opt} \approx 0.707 \quad (22)$$

联立式(20)、(22),可得线圈最佳阻尼电阻  $R_{s_{opt}}$

的取值方法为

$$R_{s_{opt}}=\sqrt{\frac{R_0}{L_0}} \quad (23)$$

综上所述,当在单面板罗氏线圈与导电母线位置固定时,一旦印制板结构尺寸和布线参数(如导线宽度和铜箔厚度)确定,该线圈的重要电磁参数如总自感、互感、内阻和等效电感,可分别由式(9)、(10)、(12)、(14)计算获得,再将计算获得的总自感和内阻代入式(23)中,即可求得最佳阻尼电阻。其分析过程见图 3。

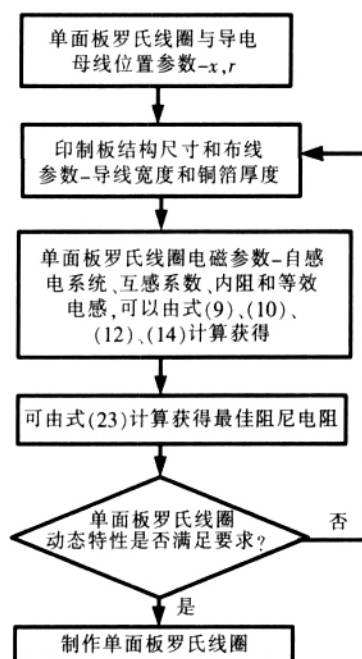
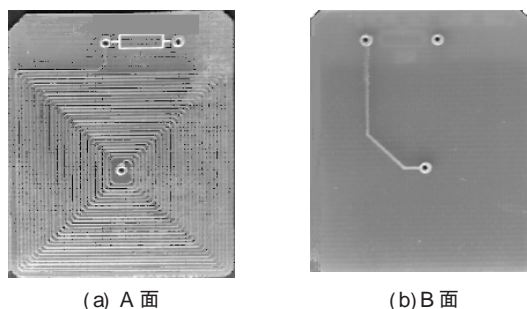


图 3 分析流程图

由计算确定该线圈的最佳阻尼电阻的取值范围,而不像传统罗氏线圈那样加工完后才能确定阻尼电阻,避免了因阻尼电阻不满足要求而重新制作线圈造成的效率低且成本高<sup>[1,3,4]</sup>。

## 2 试验结果

制作的单面板罗氏线圈,见图 4,将其电气参数列于表 1 中。为方便后面讨论,先定义两种研究对



(a) A 面 (b) B 面

图 4 所加工的单面板罗氏线圈

象:①单面板,指的是单面板罗氏线圈;②顺串板,是指将两个同样的单面板罗氏线圈顺次串联之后得到的印制板线圈,见图5。

表1 印制板罗氏线圈的电气参数

	单面板	顺串板
尺寸(裸露板)/mm <sup>2</sup>	50×40×2	50×40×4
导线宽度/mm	0.254	0.254
导线间距/mm	0.254	0.254
铜箔厚度/m	30.000	30.000
导线圈数N	26	52
r <sub>1</sub> , r <sub>2</sub> 和r <sub>2</sub> /mm	r=5.000	r <sub>1</sub> =4.000, r <sub>2</sub> =6.000
l <sub>1</sub> /mm		15.564
d <sub>1</sub> /m		0.254

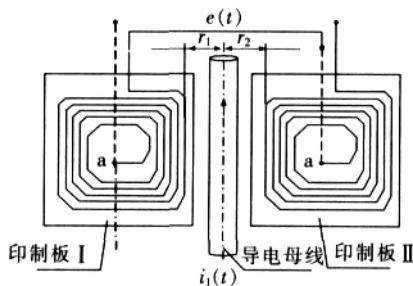


图5 两个顺串罗氏线圈的接线示意图

将表1中相关参数代入式(9)中可得该线圈的总自感L<sub>0</sub>的计算值为

$$L_0 = 11.33 \mu\text{H} \quad (24)$$

在频率分别为1、10和50 kHz时,其总自感的测量值分别为11.46、11.40和11.46 μH。因此,该自感计算值与测量值之间的最大误差为

$$= \frac{11.46 - 11.33}{11.46} = 1.1\% \quad (25)$$

说明所提出的用于计算线圈总自感L<sub>0</sub>的模型还是有一定的参考价值。

当上述两种研究对象均未接阻尼电阻时,利用阻抗分析仪测量它们的阻抗特性和相频特性,测试结果见图6。

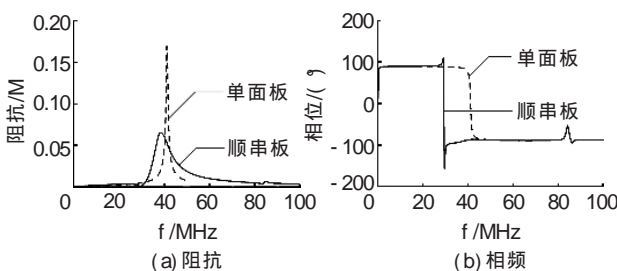


图6 单面板和顺串板的相频和阻抗特性曲线

分析图6得知:①单面板和顺串板的谐振频率分别为41、38 MHz,差异较小;②在两个频段之间即0~36 MHz和42~80 MHz,它们的相频特性是相同的平直段。由此可见,单面板和顺串板的相频特性相差不大且都较为优良。

将单面板和顺串板的自感、内阻和分布电容的

测试结果见图7。

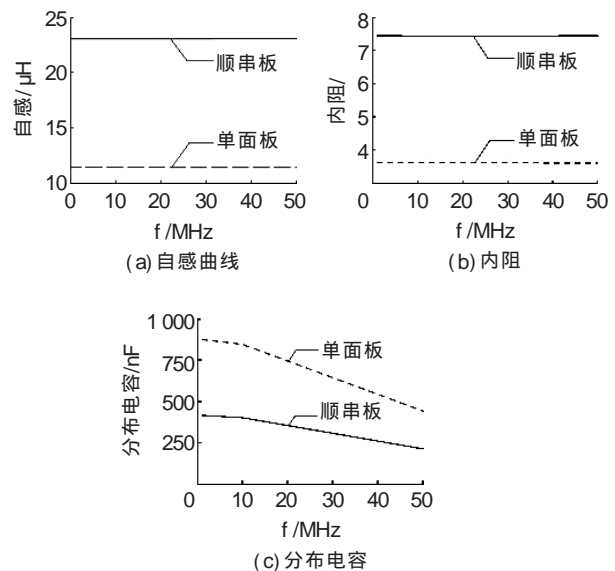


图7 单面板和顺串板的自感曲线、内阻及分布电容曲线

由图7可知:①被测电流的频率虽然对单面板和顺串板的内阻和自感的影响较小,却对其分布电容影响较大;②在满足被测电流带宽和不增加印制板尺寸的前提下,将线圈顺串,既可有效增加线圈的自感,还能大幅度减小其分布电容,这对提高传感器的信噪比是非常有利的;③顺串线圈与单面板相比,它们的相频特性均能满足宽脉冲电流的测量要求。

若将单面板罗氏线圈的上升时间近似定义为

$$t_{\text{rise}} = \sqrt{L_0 C_0} \quad (26)$$

利用式(26)校核所设计的印制板线圈的上升时间与被测电流的脉宽 $w$ 是否满足条件

$$\begin{cases} t_{\text{rise}} < k_w w \\ k_w = 0.05 \sim 0.1 \end{cases} \quad (27)$$

在高压测试环境中,如果被测电流对线圈的上升时间要求越高,系数 $k_w$ 的取值就越小。

将单面板的相关测量数据代入式(26)中,计算可得上述两种线圈的上升时间均不超过16 μs。由于已知脉冲电流的主脉宽为600 μs,因此,满足条件式(27),故可利用它们测量上述脉冲电流。

脉冲功率源的脉冲电流主脉宽为600 μs,与印制板线圈相配合的积分器为 $R=51 \text{ k}\Omega$ 、 $C=330 \text{ nF}$ ,单面板和顺串板线圈与导电母线之间的距离示于表1中,阻尼电阻 $R_s$ 为1 kΩ。通过改变脉冲功率源的放电电压大小以改变脉冲电流峰值,由单面板和顺串板两种线圈同时测量同一脉冲电流,将它们所拾取的端电压 $u_s(t)$ 进行积分还原,得到 $u_c(t)$ 电压,并分别示于图8(a)、(b)中。

图8(a)、(b)分别为充电电压为602和10.04 kV时的 $u_c(t)$ 电压波形(即脉冲电流波形)。比较图(a)中的积分波形可知,两种线圈获得的波形形状相同,但由顺串板获得的波形的峰峰值最大(58 mV),说明

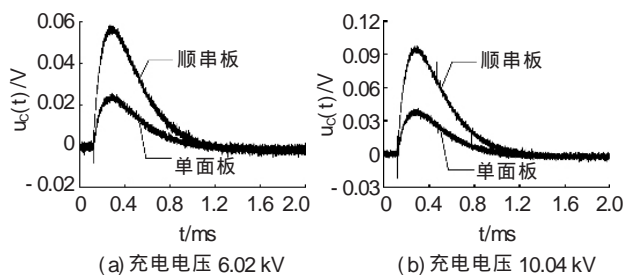


图 8 单面板、顺串板的积分器输出电压  $u_c(t)$

它获得的感应信号最强。比较图 8(b) 中的积分波形可知, 两种线圈获得的波形形状相同, 但由顺串板获得的波形的峰峰值最大 (100 mV), 说明它获得的感应信号最强。因此, 在测量相同脉冲电流时, 顺串板的信噪比比单面板好。

图 9 表示利用传统罗氏线圈和顺串板线圈同时测量同一脉冲电流获得的积分器输出波形  $u_c(t)$ , 其充电电压 9.04 kV。

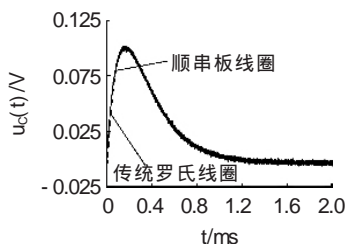


图 9 两种结构罗氏线圈获得的积分器输出电压  $u_c(t)$

分析图 9 中的积分还原波形可知, 利用顺串板线圈和传统罗氏线圈, 均能够得到相同的还原波形 (峰峰值最大为 90 mV), 它们的上升段基本重合, 说明两种结构的罗氏线圈的上升时间相同。

图 10 表示单面板和顺串板线圈的输出比例系数, 即横坐标表示充电电压 (它反映了脉冲电流幅值), 纵坐标为两种线圈获得的积分还原波形  $u_c(t)$  的峰值电压。其反映了两种线圈对被测脉冲电流幅值的敏感程度, 曲线斜率越大, 说明传感器对被测脉冲电流越敏感。单面板线圈和顺串板的输出比例系数分别为 4.5 和 10 mV/kV。分析表明, 单面板线圈的输出比例系数并不等于由两个单面板线圈顺次串联得到的顺串板线圈的 2 倍, 其原因在于单面板线

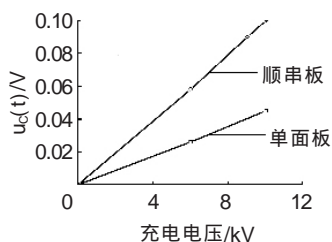


图 10 单面板和顺串板线圈的输出比例系数

圈与被测电流母线之间的距离为 5 mm, 而构成顺串板的两个单面板分别与 被测电流母线之间的距离为 4 和 6 mm。

综上所述, 利用单面板罗氏线圈可以测量脉冲电流, 将单面板罗氏线圈顺串能够提高其信噪比。

### 3 结语

通过分析单面板罗氏线圈的结构参数和电磁参数的计算模型, 剖析它们之间的影响特性, 用所提出的最佳终端电阻的计算模型作为判断罗氏线圈的动态特性是否满足要求的重要依据, 将印制板线圈的上升时间与被测电流的脉宽按照所提出的表达式进行比对, 以判断单面板罗氏线圈获得的测量数据的有效性。为了有效提高传感器的抗干扰能力, 可以采取印制板线圈的顺次串联方式。

### 参考文献:

- [1] 李芙蓉, 陈翔. 基于 Rogowski 线圈和压频变换的电流测量方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(3): 28-31.
- [2] 李维波, 毛承雄, 陆继明. 基于饱和电感器结构下的新型直流比较仪原理研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 77-81.
- [3] TURNER G R, I W Hofsjajer. Rogowski Coils for Short Duration (<10  $\mu$ s) Pulsed Current (>10 kA) Measurements[C]// 1999 IEEE AFRICON Conference, 1999: 759-764.
- [4] Li Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Study of the Virtual Instrumentation Applied to Measure Pulsed Heavy Currents [J]. IEEE Trans. on Instrumentation & Measurement, Feb. 2005, 54(1): 284-288.
- [5] KOJUVIC L. PCB Rogowski Coils Benefit Relay Protection [J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3): 50-53.
- [6] 杨楠, 段雄英. 一种新型的 Rogowski 线圈-PCB 罗氏线圈[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 209-211.
- [7] 陈庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印制电路板构造的 Rogowski 线圈性能分析及设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.
- [8] KARRER N, HOFER N P. PCB Rogowski Coils for High di/dt Current Measurement [C]// 2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference, 2000: 1296-1301.
- [9] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 新型钢板地电流磁场测量仪的噪声分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 63-68.
- [10] GOLDFINE N, ZILBERSTEIN V, CARGILL J S, et al. Meandering Winding Magneto Meter Array Eddy Current Sensors for Detection of Cracks in Regions with Fretting Damage[J]. Materials Evaluation, 2002, 60(7): 870-877.
- [11] 李维波, 毛承雄, 陆继明. Rogowski 线圈结构、电磁参数影响研究[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 94-97.
- [12] 李维波, 毛承雄, 余岳辉, 等. 高速大功率 RSD 开关状态电流测量用罗氏线圈研究 [J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 108-111.

祝贺人民电器集团 河南人民电器工程有限公司成立