

Rogowski 线圈信号电阻对纳秒级脉冲大电流的响应*

张 瑜, 刘金亮, 文建春, 殷 毅, 冯加怀, 梁 波

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 研制了一种自积分型 Rogowski 线圈, 从电路理论和电路仿真角度分析了信号电阻的寄生电感和线圈对地电容对测量信号的影响。采用电阻并联的方法, 制作了小电感信号电阻。在定标和大电流测量实验中, 小电感信号电阻的使用, 消除了测量信号的平顶振荡和波形畸变, 验证了理论分析的正确性。经定标, 采用小电感信号电阻的 Rogowski 线圈对方波脉冲前沿的响应为 11 ns, 灵敏度为 $4.25 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1}$ 。该线圈性能稳定, 已用于测量长脉冲强流电子束加速器二极管的电流, 测得的电流波形平顶较好, 半高脉宽为 180 ns, 幅度约为 15.36 kA。

关键词: Rogowski 线圈; 信号电阻; 寄生电感; 对地电容; 定标; 灵敏度

中图分类号: TM835.2 **文献标志码:** A

随着脉冲功率技术的不断发展和广泛应用, 准确地测量脉冲大电流是一项非常重要的工作。目前, 电阻分流器^[1-3]、光电诊断^[2]、Rogowski 线圈^[2-6]以及 Faraday 筒^[7]是测量脉冲大电流的重要手段。在电阻分流器和 Faraday 筒测量法中, 由于测量器件直接接入被测回路, 热效应和力学效应会对分流器的测量精度产生较大影响。光电诊断法由于系统复杂, 造价比较高和很少采用。Rogowski 线圈法是一种间接测量脉冲大电流的有效方法, 它具有制作简单、测量精度较高和使用方便等优点。Rogowski 线圈按照积分方式可分为自积分和外积分两种。自积分式 Rogowski 线圈, 信号电阻通常采用同轴式无感电阻^[8], 其结构比较复杂。但是很少有研究系统地分析自积分式线圈中, 信号电阻的寄生电感等参数对测量信号的影响。

本文针对自行研制的长脉冲强流电子加速器真空二极管大电流的测量, 设计并制作了一种圆环形自积分式 Rogowski 线圈。理论分析了信号电阻的寄生电感及线圈的对地电容对测量信号的影响。采用通常的金属膜电阻和同轴并联型小电感电阻作为信号电阻, 对线圈进行了定标和测量实验, 验证了理论分析的正确性。

1 Rogowski 线圈的结构

本文研制的 Rogowski 线圈是一种自积分方式的线圈, 主要由芯架、测量线圈和信号电阻构成, 其基本结构如图 1 所示。用作测量线圈的漆包线(直径 1 mm)均匀绕制在环形非磁芯芯架上, 共绕 296 匝, 为避免杂散磁场影响, 其首尾都在线圈的一侧, 匝间距约为 0.32 cm, 芯架横截面直径 d 为 2 cm, 信号电阻 R 接在测量线圈两端。有效半径为 15 cm 的芯架, 放入屏蔽铁盒内, 铁盒内壁中间开狭缝, 以便被测信号磁场进入。线圈与铁盒内壁之间均匀焊接 20 个 300Ω 的阻尼电阻, 以阻尼掉绕线与屏蔽盒(即地端)之间电容 C 和信号电阻寄生电感 L_R 构成的高频 $L-C$ 振荡改善测量信号波形^[4]。

测量原理: 被测电流 $I(t)$ 通过线圈芯架中间时, 在线圈上产生感应电动势 $e(t)$, 它会由线圈自身电感 L 、内电阻 R_L 及信号电阻 R 组成的回路流过信号电流 $i(t)$, 从而在信号电阻上产生电压。设芯架有效半径为 r , 横截面面积为 S , 材料磁导率为 μ , 线圈匝数为 n 。若线圈芯架环的有效半径 r 远大于芯架的横截面半径 $d/2$, 由 Faraday 电磁感应定律得

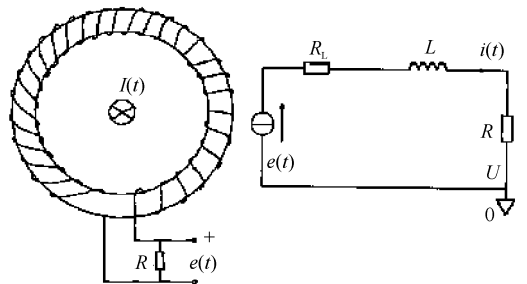


Fig. 1 Rogowski coil and its equivalent circuit

图 1 Rogowski 线圈及其等效电路图

$$e(t) = -\frac{\mu n S}{2\pi r} \frac{dI(t)}{dt} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009-01-05; 修订日期: 2009-05-21

基金项目: 国家高技术发展计划项目; 国家自然科学基金项目(10675168)

作者简介: 张瑜(1984—), 男, 硕士研究生, 从事脉冲功率技术及应用研究; zyu841227@yahoo.com.cn.

在图 1 所示的等效电路中,电路方程为

$$e(t) = Ldi(t)/dt + (R_L + R)i(t) \quad (2)$$

根据线圈电感的定义,不难得到

$$L = \mu n^2 S / 2\pi r \quad (3)$$

如果 $R_L + R$ 很小或电流的时间变化率 $di(t)/dt$ 很大,将满足自积分条件^[2]: $i(R_L + R) \ll Ldi(t)/dt$ 。若 U 为信号电阻电压,由式(1)~(3)得到

$$I = -ni = -nU/R \quad (4)$$

2 信号电阻寄生电感及线圈对地电容对测量结果的影响

2.1 理论分析

在对强流电子束的测量过程中,发现 Rogowski 线圈信号电阻的寄生电感等参数给测量结果带来了很大误差,影响了线圈对大电流信号的正确响应。因此有必要对信号电阻寄生参数对测量结果的影响进行系统的理论分析。Rogowski 线圈等效电路如图 2 所示,其中: $u(t)$ 是测量线圈的感生电动势, C 为线圈对地的寄生电容, L_R 为信号电阻 R 的寄生电感。

考虑 C 与 L_R 同时存在于电路中时,信号电阻自身寄生电容 $C_R \ll C$,它与 C 是并联关系,可忽略其影响。设 C 两端初始电压为 $u_C(0)$,图 2 的电路方程为

$$\begin{cases} u(t) = i(t)R_L + Ldi(t)/dt + (1/C) \int i_2(t) dt \\ i(t) = i_1(t) + i_2(t) \\ i_1(t)R + L_R di_1(t)/dt = (1/C) \int i_2(t) dt \\ i(0) = 0, i_1(0) = 0, u_C(0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)对进行 Laplace 变换^[9],得

$$\begin{aligned} \dot{I}_1(p) &= \frac{U(p)}{p^3 + (\beta/\alpha)p^2 + (\gamma/\alpha)p + \theta/\alpha} \\ \begin{cases} \alpha = LL_R C \\ \beta = R_L L_R C + RLC \\ \gamma = RR_L C + L + L_R \\ \theta = 1 + R \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: p 是 Laplace 变换因子。对于方程

$$p^3 + (\beta/\alpha)p^2 + (\gamma/\alpha)p + \theta/\alpha = 0 \quad (7)$$

有一个实根设为 a ,两个共轭复根设为 $b \pm ic$,其中 a, b, c 均为实数。设 Ψ 为线圈总磁链,由 Laplace 反变换^[9]得到流过信号电阻的电流为

$$i_1(t) = \frac{\Psi}{\alpha} \left\{ \frac{1}{[(a-b)^2 + c^2]} \exp(at) + \exp(bt) \sin \left[ct + \arctan \left(\frac{c}{a-b} \right) \right] \right\}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (8)$$

式中: T 为脉冲大电流脉宽; a 为信号平顶的指数衰减因子, a 越小则信号平顶下降得越快,波形平顶越倾斜; b 为叠加在信号平顶之上的高频振荡项的衰减因子, b 越小则高频振荡项幅度衰减得越快,振荡对平顶的影响便可忽略; c 为振荡项的角频率, c 越大则振荡越剧烈。实数 a, b, c 与线圈各个参量有关,在代入线圈各参数后可以求得 $a < 0, b < 0, c > 0$ 。从式(8)可知,当 $0 \leq t \leq T$,即原大电流信号出现平顶时,测量得到的小电流信号由平顶衰减项 $\exp(at)$ 与衰减振荡项 $\exp(bt) \sin \left[ct + \arctan \left(\frac{c}{a-b} \right) \right]$ 共同合成。下面再考虑图 2 的两种极端情况: $C=0$ 且 $L_R \neq 0$,或 $L_R=0$ 且 $C \neq 0$ 。

当 $C=0$ 时,利用 Laplace 变换及反变换可求得

$$i_1(t) = i(t) = \frac{\Psi}{L + L_R} \exp \left(-\frac{R + R_L}{L + L_R} t \right), \quad 0 \leq t \leq T \quad (9)$$

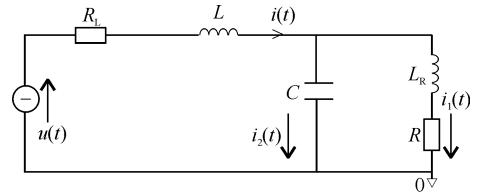


Fig. 2 Sampling resistor's equivalent circuit with residual inductance

图 2 带寄生电感信号电阻的等效电路图

总磁链 Ψ 是与被测初级大电流 I 有关的常量。式(9)说明测量结果有衰减无振荡,且 L_R 越大, $i(t)$ 幅度越小。另一种极端情形 $L_R=0$ 或极小时,同样可以解得

$$i_1(t) = \frac{\Psi}{LCR} [B_1 \exp(-A_1 t) + D_1 \exp(-C_1 t)] \tag{10}$$

$$\begin{cases} A_1 = [L + CRR_L - \sqrt{(L - CRR_L)^2 - 4R^2 LC}] / 2LCR \\ C_1 = [L + CRR_L + \sqrt{(L - CRR_L)^2 - 4R^2 LC}] / 2LCR \\ B_1 = LCR / \sqrt{(L - CRR_L)^2 - 4R^2 LC} \\ D_1 = -LCR / \sqrt{(L - CRR_L)^2 - 4R^2 LC} \end{cases} \tag{11}$$

式中: A_1, B_1, C_1, D_1 为 4 个简记参量。从式(10)可知:测量小信号 $i_1(t)$ 仅由两个衰减项构成,也不会出现振荡项,且在百纳秒尺度,衰减因子 A_1, C_1 作用不明显,信号平顶不会受影响。综合式(8)~(10)可知:只有在信号电阻寄生电感 $L_R \neq 0$ 时,才有可能会出现振荡项。

分析式(8)可知:在百纳秒时间段 T 内,衰减因子 a, b 随时间对信号的衰减作用不明显,而衰减振荡项的角频率 c 很大,可达 100 MHz,这对脉宽为百纳秒级的测量信号会产生严重干扰,甚至使测量信号完全失真。信号电阻寄生电感越小,振荡角频率 c 越高,振荡项的幅度也越小,且振荡衰减越快。当 L_R 小于 10 nH 量级时,它对测量得到的小信号平顶几乎无影响。由于线圈一旦成型,线圈对地电容 C 不易减小,因此必须考虑减小信号电阻寄生电感 L_R 以提高测量精度。

2.2 电路仿真

为验证理论分析的正确性,采用 Pspice 软件,按图 2 所示对测量回路进行电路仿真。按设计的 Rogowski 线圈结构参数,由式(3)可计算得 $L=36.4 \mu\text{H}$,实测 $L=42 \mu\text{H}, R_L=2 \Omega$ 。

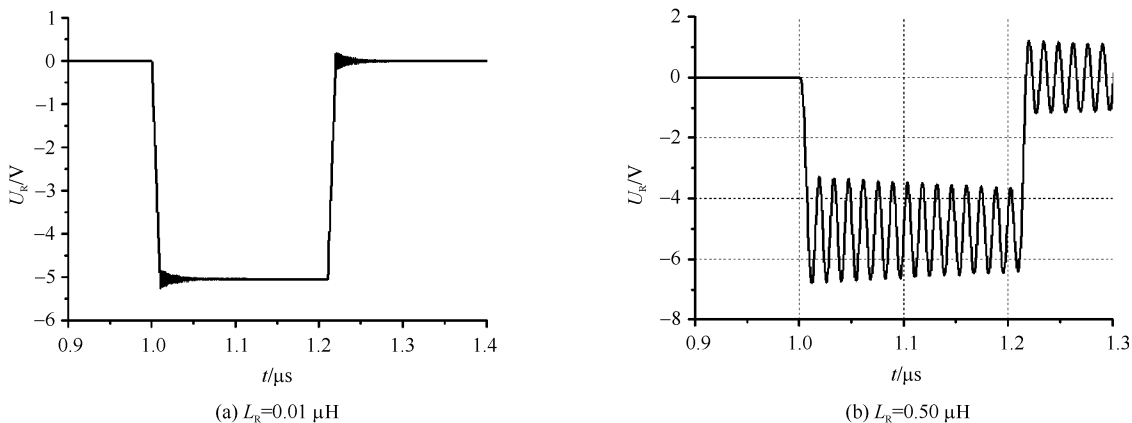


Fig. 3 Output voltage vs time
图 3 信号输出电压与时间的关系

设置仿真参数:感应脉冲电流 $i=4 \text{ A}$,脉宽 200 ns,延时 $1 \mu\text{s}$,前后沿均为 10 ns, $L=42 \mu\text{H}, R_L=2 \Omega, R=1.26 \Omega$ 。经估算线圈对地电容 C 的量级为 10 pF 级^[3],取 $C=10 \text{ pF}$ 。信号电阻寄生电感 L_R 分别取 $0.01 \mu\text{H}$ 和 $0.5 \mu\text{H}$ 时,设信号电阻输出电压 U_R 与时间 t 的关系如图 3 所示。从图 3 可知: L_R 较小 ($0.01 \mu\text{H}$) 时,测量波形平顶较好,虽有大幅度高频振荡,但很快就被衰减掉了;而 L_R 较大 ($0.5 \mu\text{H}$) 时,测量波形平均幅度变化不大,但平顶处出现了幅度较大的高频振荡,这与理论分析是完全吻合的。

图 4 给出了输出电压信号 U_R 的归一化振荡幅度 P (振荡幅度与信号平均幅度之比) 随寄生电感 L_R 的变化曲线。

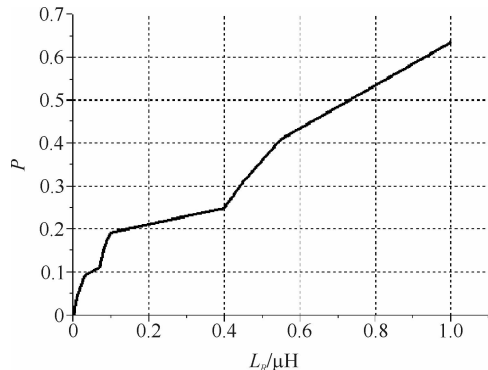


Fig. 4 Relation between normalized oscillation amplitude and residual inductance
图 4 归一化振荡幅度对寄生电感的关系曲线

3 实验研究

3.1 信号电阻的研制

为了满足较高精度的测量要求,同时兼顾制作简单方便、节

约成本等因素,我们制作了一个低寄生电感的信号电阻来近似无感电阻,其结构如图 5 所示。主体采用 50 个小金属膜电阻并联,内置于铜质空心圆柱筒而形成同轴结构。并联的电阻群两端均由 Q9 接头芯线引出,一端与 Rogowski 线圈相连,引入待测信号;另一端可与 50 Ω 匹配同轴电缆芯线相接,把信号电阻的电压信号输出到示波器。

设每个金属膜电阻寄生电感为 L_0 , 并联后总寄生电感为 L_1 , 则有 $L_1 = L_0/50$ 。已测得 L_0 约为 0.5 μH , 可计算得 $L_1 \leq 0.01 \mu\text{H}$ 。实际测得 $R = 1.26, L_1 = 0.01 \mu\text{H}$, 这与图 3 (a) 中的参数设置是一致的。而图 3 (a) 的仿真结果证明, 设计的低感信号电阻输出波形良好, 其低寄生电感不会对测量结果产生影响。

3.2 定标实验

我们采用 1 Ω 带寄生电感的电阻和有较小寄生电感的电阻作为自积型 Rogowski 线圈的信号电阻, 分别进行定标实验。

定标流程: 标准脉冲信号源输出理想方波电压脉冲, 信号由 50 Ω 匹配电缆线连接到一个 50 Ω 的负载电阻上, 再接入高频示波器 1 通道; 流过负载电阻的电流将从 Rogowski 线圈中央垂直流过, 感应出电流小信号, 由信号电阻检测, 再由电缆线连接到示波器 2 通道; 读出两个通道电压信号幅度, 计算比值。

图 6 为有感信号电阻定标波形, 其中 1 通道信号为标准信号源电压波形, 平顶无振荡; 2 通道为 1 Ω 有寄生电感的电阻输出的检测波形。其平顶出现明显振荡, 波形较差。

制作小寄生电感的信号电阻后再进行定标实验, 其波形如图 7 所示。其中 1 通道为标准信号源电压波形, 平顶幅度为 6.345 V, 由于进行了 50 倍衰减, 则信号源电压 $U_0 = 317.25 \text{ V}$, 2 通道为研制的 1.26 Ω 小电感电阻输出的检测波形, 幅度 $U_R = 27 \text{ mV}$, 平顶振荡几乎被遏制了, 脉冲前沿和后沿都较好。由于被测电流 I 流过 50 Ω 定标电阻产生的电压为 U_0 , 则 $I = 6.345 \text{ A}$, 根据式(4)可得实验灵敏度为 $S = U_R/I = 4.25 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1}$; 而根据线圈匝数 n 和信号电阻 R 可计算出理论灵敏度 $S = R/n = 4.3 \text{ mV} \cdot \text{A}^{-1}$, 实验结果与理论计算值一致。脉冲信号的响应时间 T_0 为^[4]

$$T_0 = n[h^2 + (2\pi a_0)^2]^{1/2}(\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r)^{1/2} \quad (12)$$

式中: h 为匝间距; a_0 为芯架横截面半径; μ_0, ϵ_0 分别为真空中的磁导率和介电常数; 芯架材料相对介电常数 $\epsilon_r = 3.4$ 。可计算得 $T_0 = 11 \text{ ns}$, 线圈能较好地满足测量要求。

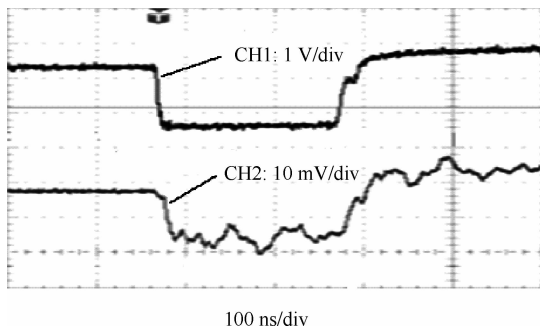


Fig. 6 Calibrating waveform of sampling resistor ($L_R = 0.5 \mu\text{H}$)

图 6 有感信号电阻定标波形

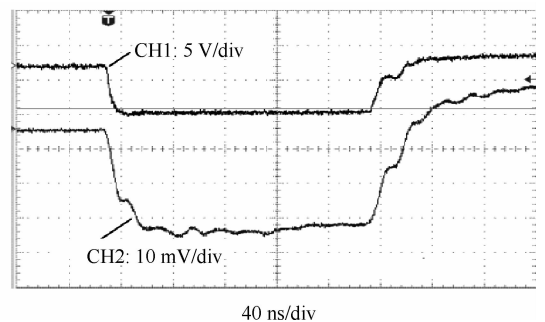


Fig. 7 Calibrating waveform of sampling resistor ($L_R = 0.01 \mu\text{H}$)

图 7 小电感信号电阻定标波形

3.3 测量实验

利用研制的 Rogowski 线圈对强流粒子束加速器的脉冲大电流信号进行精确测量。图 8 为实验中产生脉冲大电流的加速器系统结构简图。工作过程: 初级充电系统给初级储能电容充电到最大值时, 场畸变开关触发导通, 储能电容在脉冲 (Tesla) 变压器初级线圈回路放电, 能量通过高耦合系数的变压器传递到次级回路, 快速完成对螺旋 Blumlein 脉冲形成线充电, 充电电压达到主开关击穿电压时, 主开关导通, 形成线对匹配的水电阻假负载快速放电, 安装在加速器端盖板上的 Rogowski 线圈完成对大电流信号的测量。为了防止测量电压过

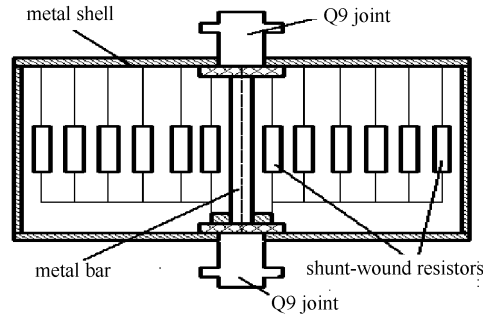


Fig. 5 Structure of low-inductance sampling resistor

图 5 取样电阻结构图

大,对示波器造成损坏,实验时使用 50 倍的衰减器对 Rogowski 线圈输出信号进行衰减。

在强流电子加速器上,利用带有较大寄生电感信号电阻的 Rogowski 线圈,测得的信号电阻的电压波形如图 9 所示,它除以恒定的信号电阻值便得到脉冲大电流信号,可看出平顶有较大幅度的振荡。重新制作小寄生电感信号电阻后,再对加速器大电流进行了测量,线圈输出波形如图 10 所示。由图可见:信号平顶较好,没有出现振荡,其宽度为 122 ns,半高宽 180 ns,幅度 1.31 V,还原衰减作用后为 65.27 V。再根据式(4),计算得加速器脉冲大电流信号 $I=U/S=65.27/0.00425=15.36$ kA,证明该线圈可以对数十 kA 的脉冲大电流进行准确测量。测量实验也验证了减小 Rogowski 线圈信号电阻的寄生电感有助于线圈准确测量。

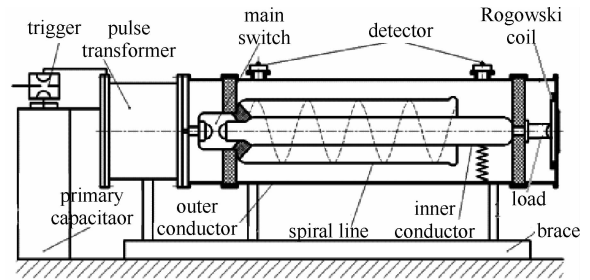


Fig. 8 System structure of intense electron beam accelerator

图 8 强流电子束加速器系统结构简图

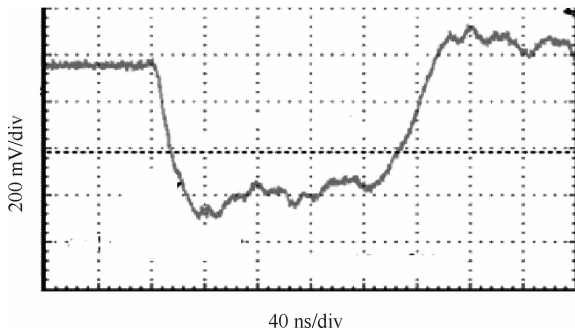


Fig. 9 Output voltage detected by Rogowski coil

图 9 Rogowski 线圈输出波形

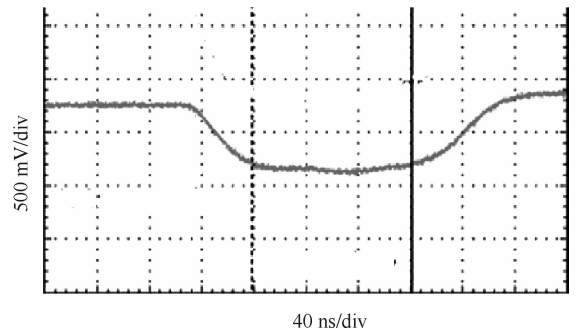


Fig. 10 Output voltage detected by improved Rogowski coil

图 10 改进后的 Rogowski 线圈输出波形

4 结 论

本文理论分析了自积分式 Rogowski 线圈的对地寄生电容和信号电阻寄生电感对百 ns 级脉冲大电流测量结果的影响,结果表明:寄生电感较大时,信号平顶出现较大幅度高频振荡,波形失真。利用电路仿真验证了理论分析的结论。自行研制了带小寄生电感信号电阻的 Rogowski 线圈,通过定标实验比较了大寄生电感电阻和小寄生电感电阻的定标波形,从实验角度证明了理论分析结论,并计算出测量灵敏度。利用该线圈对强流粒子束加速器的脉冲大电流进行了测量,取得了较好的结果。

参考文献:

- [1] 刘金亮,徐启福,李士忠,等. 测量 ns 级脉冲大电流的折带式分流器[J]. 高电压技术, 2006, **32**(5): 57-59. (Liu Jinliang, Xu Qifu, Li Shizhong, et al. Fold band shunt used in measuring the ns-grade pulse current. *High Voltage Engineering*, 2006, **32**(5): 57-59)
- [2] 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术[M]. 北京:科学出版社,1978:137-150. (High voltage technology speciality of electrical department of tsinghua university. *High pulse current technology*. Beijing: Science Press, 1978:137-150)
- [3] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003:161-164. (Zeng Zhengzhong. Introduction of the applicable pulsed power technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003:161-164)
- [4] 李海燕,蒋国雄. 测量强流陡脉冲的 ns 级 Rogowski 线圈[J]. 电工电能新技术, 1989, **2**: 40-45. (Li Haiyan, Jiang Guoxiong. A Rogowski coil of ns order for measuring fast-rising high current. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 1989, **2**:40-45)
- [5] Liao Rujun, Sun Caixin, Gu Leguan. The development of the linear Rogowski coil for measuring large impulse current[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998:743-746.
- [6] Douglass J D, Greenly J B, Hammer D A, et al. Design and use of small Rogowski coils for use with large, fast current pulses[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 2005:717-720.
- [7] 刘金亮,李传庐,何一平,等. 测量电子束流的小型法拉第筒[J]. 强激光与粒子束, 1993, **5**(4): 629-632. (Liu Jinliang, Li Chuanlu, He Yiping, et al. A compact Faraday cup for the measurement of electron beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, **5**(4): 629-632)
- [8] 刘金亮. 一种结构紧凑的同轴无感电阻器[J]. 电子元件与材料, 1997, **16**(5): 35-37. (Liu Jinliang. A compact Noninductive coaxial resistor. *Electronic Elements and Materials*, 1997, **16**(5): 35-37)
- [9] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 北京:高等教育出版社,1959:114-126. (Liang Kunmiao. Mathematical and physical methods. Beijing: Higher Education Press, 1959:114-126)

Sampling resistor's response of Rogowski coil to ns-grade high pulse current

Zhang Yu, Liu Jinliang, Wen Jianchun, Yin Yi, Feng Jiahuai, Liang Bo
(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A kind of self-integrated Rogowski coil is designed. Through circuit theory and simulation analyses, the impacts on the measured signal, which are caused by the sampling resistor's residual inductance and the coil's ground capacitance, have been studied. By shunt-wound method, we have made and calibrated a low-inductance sampling resistor. In the calibration and measure experiments, oscillation and deformation of the measured signal were eliminated resistor. And the theoretical analyses are supported by the experiments. The Rogowski coil's responding time to square pulse signal is 11 ns, and its sensitivity is 4.25 mV/A. For its good stability, we use the coil to measure the current of the diode of the long-pulsed intense electron beam accelerator and get the current waveform with flat-top oscillation effectively restrained. The half-height full-width of the current pulse is 180 ns, and the amplitude is about 15 kA.

Key words: Rogowski coil; sampling resistor; residual inductance; ground capacitance; calibration; sensitivity