

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.03.02

脉冲电流测量方法分析与比较

张建永, 胡耀元, 贾云涛, 岳伟, 张胜强

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 脉冲电流测量是脉冲功率技术中经常要进行的项目。脉冲电流测量方法分为传统的欧姆定律和非侵入式法。本文在研究脉冲电流测量技术应用现状的基础上, 总结了目前常用的几种测量方法的原理和优缺点, 包含分流器法、Rogowski 线圈法、霍尔电流法、磁光式电流法、法拉第筒法等, 并对脉冲电流测量技术的发展趋势做了展望。

关键词: 脉冲电流; 分流器; Rogowski 线圈法; 霍尔电流; 磁光式电流; 法拉第筒

中图分类号: TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)03-0010-04

Analysis and Comparison of Pulse Current Measurement

ZHANG Jianyong, HU Yaoyuan, JIA Yuntao, YUE Wei, ZHANG Shengqiang

(Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100039, China)

Abstract: The measurement of pulse current is widely used in pulse power technology. It is divided into traditional Ohm measurement method and non-invasive current measurement method. Based on the research of pulse current measurement application, this paper summarizes the principles and advantages of several commonly used measurement methods such as current shunt, Rogowski coil, Hall current, magneto-optical current and faraday cup, and then describes the developing trend of the pulse current measurement technology.

Key words: pulse current; current shunt; Rogowski coil; Hall current; magneto-optical current; faraday cup

0 引言

随着核聚变、强激光、粒子加速器、电磁脉冲、能源、环境、医疗等科学技术广泛应用, 脉冲功率技术发展迅速, 成为一门新兴科技领域。在电力领域中, μs 宽度的 $10^4 \sim 10^5 \text{ A}$ 的脉冲大电流被用于雷电测试实验等。随着被测对象的多样化, 所采取的测量方法和系统各种各样, 研究者主要从提高测量对象的电流幅值大小、准确度和响应速度等特性展开各项研究^[1-2]。

随着计算机和信息技术的发展, 传感器广泛应用于非电量转换为电量的间接测量中, 测量准确度不断提高。在脉冲大电流测量技术的推动下, 测量传感器开发与高性能化、光电子学技术的引入、提高应付噪声的对策、计算机数据处理和计量的数字化等技术也在不断提高和革新^[3-4]。

近些年来, 随着新兴科学的发展和脉冲电流的广

泛应用, 人们在传统测量方法的基础上不断探索研究, 创造了如磁光法、霍尔电流法等新的方式。这些方法不介入被测回路, 抗干扰能力强, 但系统较为复杂, 可靠性依赖于磁光、电子等系统的具体性能, 实际中多应用于特殊条件下。

1 测量方法

脉冲大电流测量系统有各式各样的结构, 但一般都采用图 1 的测量系统。从被测电流的回路开始, 利用传感器取出与之成比例的电物理量(通常多为电压), 经过适当的传送回路(通常为高频电缆)送到测量仪器上。使用的测量仪器通常有示波器、数字测量仪器、电流计、各种记录仪等。为了防止噪声, 一般对传感器、传送回路、测量仪器采取屏蔽。在大电流测量系统中, 传感器是最重要的器件, 测量准确度基本上由其性能决定。

根据国内外测量脉冲大电流过程中所使用传感器的不同和测定对象的不同, 如表 1 所示, 本文将测量方法分为分流器法、Rogowski 线圈法、霍尔电流法、磁光式电流法、法拉第筒法等。

收稿日期: 2015-02-06; 修回日期: 2015-03-27

基金项目: 国家“十二五”技术基础计量科研项目(J042011B006)

作者简介: 张建永(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电学计量科研和测试工作。

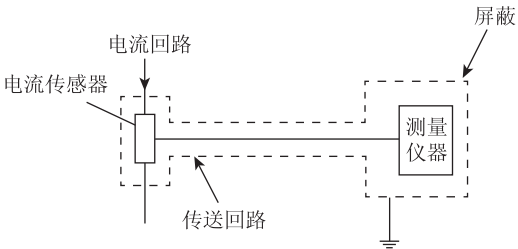


图 1 测量电路

表 1 测定对象与测量方法

测定对象	电流值 /mA	时间范围	主要测量仪器及方法
脉冲电流	~0.2	$0.1 \sim 10^2 \mu\text{s}$	分流器, Rogowski 线圈, 霍尔电流法, 磁光式电流法
短路电流	~0.1	$10^{-2} \sim 10^{-1} \text{s}$	分流器, 霍尔电流法
等离子电流	~1	$\mu\text{s} \sim 10\text{s}$	Rogowski 线圈
激光电源电流	~0.1	$\mu\text{s} \sim \text{ms}$	分流器, Rogowski 线圈, 霍尔电流法
电子束电流	~10	$1 \sim 10^2 \text{ns}$	法拉第筒, Rogowski 线圈
脉冲功率电流	~10	$1 \sim 10^2 \text{ns}$	Rogowski 线圈, 磁光式电流法

1.1 分流器法

分流器的本质是利用欧姆定律测量分流器上的电压和分流器阻值计算得到电流值。为了避免电感和电路中磁的交链，脉冲大电流测量多选择同轴圆筒结构，

其圆筒形电阻要尽可能贴近电流回归电路圆筒形导体，以减小电感，并且要使用电阻率小的薄电阻体，以抑制趋肤效应^[5-7]。

图 2 的左端为分流器的被测电流输入端，右端是到测量仪器的电压端。

被测脉冲电流从屏蔽内筒流入再从外筒流出。内筒为电阻率高的材料，因为电流流向是对称的，被测电流的磁场只分布在内外筒之间，减小了电感对测量的影响。另外对称电流也抵消了应力，使得同轴式分流器结构稳固^[8]。

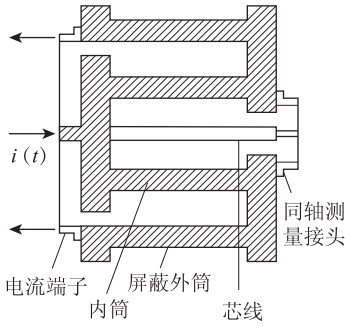


图 2 同轴式分流器

在测量脉冲大电流时，需要消除高频噪声。图 3 为脉冲大电流测量电路。此时，进入到测量仪器的主要噪声有：分流到测量电缆屏蔽层的电流所引起的对电缆芯线的感应噪声(A)、由大电流电路产生的电磁场(B)和由电流浸入到测量仪器的高频噪声(C)等。

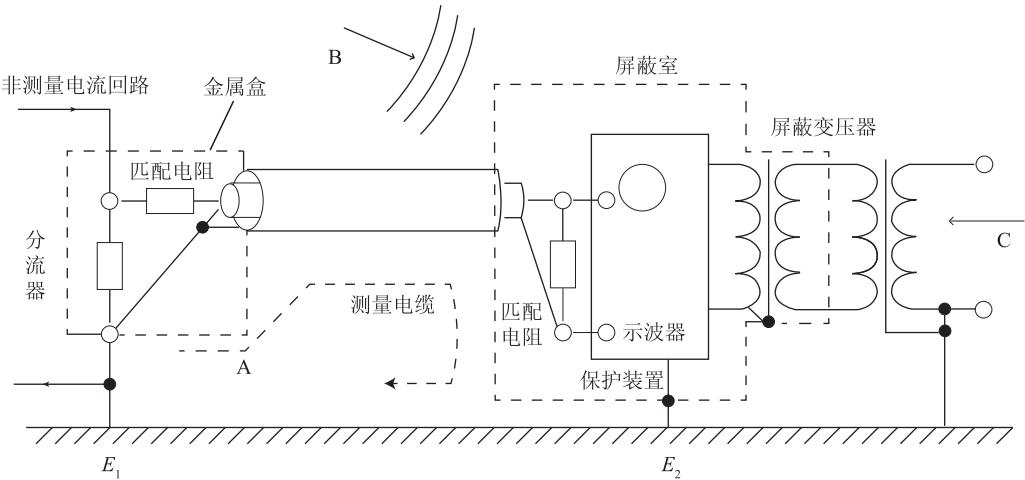


图 3 分流器测量回路

对于 A，可以采用良好的接地(E_1)、缩短分流器与接地之间的引线、使用双重屏蔽的电缆线作为测量电缆等方法。也可以采用将双重屏蔽电缆放在金属管中，电缆的内侧屏蔽层和测量仪器在屏蔽室不要接地

(为安全起见，要设置适当的保护装置)，整个测量系统都设置铜接地板等方法，可以进一步减小噪声。

对于 B，将分流器和测量仪器充分屏蔽起来是很有效的方法。特别是对于磁核聚变实验设备等百高斯

的漏磁场的屏蔽,高磁导率材料的饱和磁场小,不太适合,有人研究使用非常厚的软磁铁心材料。

对于 C,则采取通过一级或两级屏蔽变压器后接到电源的方法。

分流器法需要接入回路中,会影响系统状态,有时是不允许的。分流器原理简单,准确度较高、影响速度快,适合测量低频小幅值电流。当被测电流增大时,分流电阻消耗功率增加,发热量大,需要增加分流器的重量和尺寸。另外快速变化的高频电流使得电感影响不可忽略,趋肤效应使得电流不再均匀分布,测量准确度降低。

1.2 Rogowski 线圈法

Rogowski 线圈结构简单,能够实现非接触测量,容易制成大小和电流灵敏度不同的各种规格,因此在核聚变研究领域测量脉冲大电流时使用最广。它测量范围很宽,幅值可从十几 A 到 k A,上升时间可从 ns 到 ms。

Rogowski 线圈是根据电磁感应原理和全电流定律计算得到电流相关量值^[9-10]。

即当线圈截面 S 上磁场均匀分布,线圈在闭合电路 C 上均匀绕制,匝数为 N ,如图 4。则感应电动势大小 $e(t)$ 为

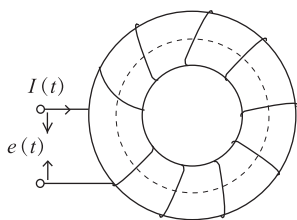


图 4 Rogowski 线圈结构示意图

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

式中: M 为比例系数,代表了电流路径和测量线圈之间的互感。

$$M = \frac{SN\mu}{2\pi r} \quad (2)$$

式中: μ 为磁导率, $\mu = \mu_0\mu_r$; μ_0 为真空磁导率, μ_r 为相对磁导率。

可得线圈两端感应电压与被测电流变化率成正比,即线圈两端感应电压和电流对时间的变化率成正比。所以,为了得到与感应电流成正比的信号,就必须进行积分,通常以无源的 LR 或 RC 四端网络作积分器。 RL 积分型上升沿时间短,仅为 1 ns 左右,由于衰减时间常数小,所以被用于测量高速短时间脉冲电流。 RC

积分型可选择不同的 RC 常数获得不同特性,一般用于 $\mu s \sim ms$ 的脉冲电流测量。

Rogowski 线圈的测量准确度为 $\pm 3\%$ 左右,但积分电路设置 DC 放大器,经偏移量和漂移量补偿后可实现高准确化。Rogowski 线圈电流测量范围可从几 A 到数百 k A,频带达到 MHz,与被测电流无直接连接,但其易受外部磁场干扰,准确度较低。

1.3 霍尔电流法

霍尔电流传感器是利用被测电流产生磁场大小实现对脉冲电流的测量。

霍尔元件是一种半导体薄片,如图 5 所示,其通过横向电流 I_c ,磁场 B 垂直于霍尔元件,电荷在洛伦兹力作用下在上下两端不断积累,元件一端为正电荷,另一端为负电荷,它们之间的电势即为霍尔电势。霍尔电势与电流大小和磁感应强度成正比。霍尔元件的温度漂移和可靠性是影响测量准确度的主要因素^[11]。

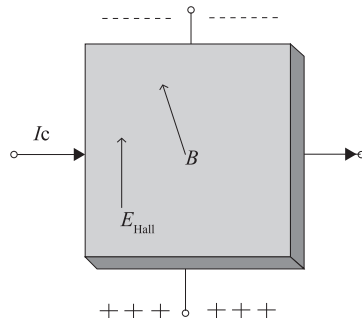


图 5 霍尔效应示意图

霍尔电流法适合低频任意波形的测量,在工业现场多用来测量几百 A 的电流。霍尔电流传感器都有铁芯,适合测量范围窄,体积大且质量重。霍尔电流法受体积和测量准确度影响,只适合于测量低频小幅值电流。

1.4 磁光式电流法

磁光式电流法利用了磁光材料的磁光效应,具有响应快、绝缘性能好、抗电磁干扰性能强等特点^[12-13]。传统的测量电流方法需要采用高频同轴电缆,可能引入干扰或高压,影响测量准确度。磁光式电流法是一种无源电流检测法,以光纤来传输信息,而光纤是用石英等材料制成的,其绝缘性能好,不会拾取杂散电磁场的干扰,对被测电流的影响非常小。

图 6 为磁光式电流法的构成图,其用磁光玻璃(具有磁光效应的玻璃)作为传感单元,当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光玻璃时,线偏振光的偏振面会在平行于光线方向的磁场作用下旋转。根据磁光效应和

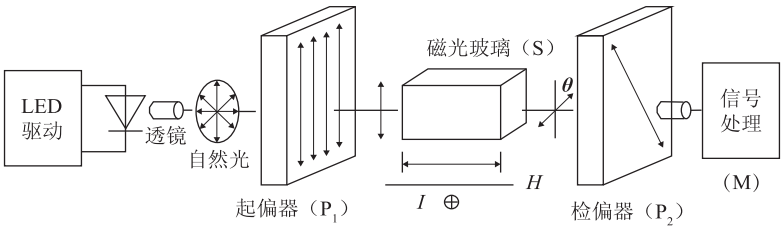


图 6 磁光式电流传感器的构成

安培定律可知，偏振面旋转的角度 θ 和产生磁场的电流 I 间有如下关系：

$$\theta = \mu_0 \int l H d l = VKI \tag{3}$$

式中： V, K 为常数。由公式(3)可知，角度 θ 和被测电流 I 成正比，通过检测偏振光偏振面偏振角度的变化，就可间接测量出被测导体中的电流值。

磁光式电流法频带宽、抗干扰能力强、体积小、绝缘好，但是长时间使用稳定性差、温度漂移大，使用范围不是很广。它适合测量单次高压脉冲电流，测量脉冲电流幅值小时准确度高，脉冲电流幅值很大时不再适用。

1.5 法拉第筒法

用法拉第筒直接测量电子束流是脉冲功率技术常用的一种测量方法。法拉第筒是一种电荷收集器，被测量的电子束穿过二极管阳极入射到法拉第筒收集体中，与收集体物质发生电力相互作用而被阻止时，产生激励电流。当此电流流经一种低感小电阻时，电阻上产生正比于电流的瞬时电位。用示波器记录下此信号，就可推算出所测量的电子束流的强度^[14-15]。对法拉第筒测量电子束流的要求是：收集体的收集率高，测量准确，由同轴电阻等组成的电流回路电感要小，而且还需具有良好的导电性等。

图 7 是法拉第筒结构示意图，它由石墨收集体、测量电阻、接地系统三部分组成。为了减小接地系统的电感，一般接地体都做成盘式结构。测量时将法拉第筒置于阳极箔正后方。

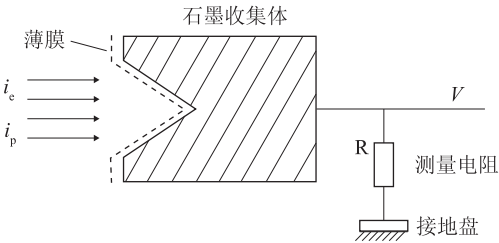


图 7 法拉第筒结构示意图

法拉第筒法适合测量电子束流，能有效屏蔽电力

束流产生的电磁波、X 射线、 γ 射线及中子射线。

我国西北核技术研究所的闪光-Ⅱ加速器的测量装置为法拉第筒。法拉第筒选择升华能量大、后方反射系数小的石墨，选择电阻箔厚度为 0.01 mm 的不锈钢箔；绝缘材料选择两层厚度各为 0.03 mm 的聚四氟乙烯薄膜；电阻衬筒为外径 30 cm、内径 28.4 cm 的黄铜筒；同轴电阻长度为 6 cm。计算得到电阻为 4.90 m Ω ，电感值为 4.8 pH，电容值为 18.6 nF，上升时间为 1 ns，测量准确度为 2%。

2 测量方法比较

综合以上讨论，本文将目前常用的脉冲电流测量法的适合电流和优缺点进行了比较，如表 2 所示。

表 2 脉冲电流测量法比较

测量方法	适合电流	优缺点
分流器法	0.2 MA 以下脉冲电流、短路实验、雷电电流、激光电源电流	准确度高，结构简单，性能稳定，外部磁场影响小，需要接入线路，高频大电流时性能差
Rogowski 线圈法	雷电电流、电子束电流、激光电源电流、脉冲功率电流	频带宽，电流范围大，易受外部磁场干扰，准确率低
霍尔电流法	0.2 MA 以下电力电流、激光电源电流	可测任意波形，响应快，频带宽，受位置因素影响，适合低频小幅值电流
磁光式电流法	高压传输电流测量、脉冲功率电流	频带宽，响应快，绝缘性能好，抗电磁干扰性能强，系统复杂，温度稳定性差，准确度差，大电流幅值测量性能差
法拉第筒法	电子束电流	响应快，抗电磁干扰性能强，性能稳定

3 结束语

脉冲电流测量对于脉冲功率技术研究保证设备安全、提高脉冲功率研究水平具有关键作用。本文介绍
(下转第 47 页)

综上所述,在建立了入腔法校准辐射热流计的等效腔体模型后,合理假设了黑体腔壁面轴向温度梯度,理论计算获得的等效腔体有效发射率最大位置与试验结果显示的热流峰值位置相一致。因此,最终确定入腔法校准辐射热流计时,入腔最佳位置在热流计距黑体腔底面 1 倍黑体腔直径处。

- [1] 董磊, 杨永军, 蔡静. 利用平板炉校准辐射热流计时角系数影响的分析 [J]. 计测技术, 2014, 34(6): 62-65.
- [2] ISO 14934-1: 2010 (E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 1: General principles, First edition [S]. 2010.
- [3] ISO 14934-2: 2013 (E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 2: Primary calibration methods, Second edition [S]. 2013.
- [4] ISO 14934-3: 2012 (E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 3: Secondary calibration method, Second

了几种脉冲电流测量方法,并对其测量原理、适用条件、测量准确度等做了介绍与比较。每种测量方法都有一定的优缺点和适用场合,在工作中可根据需求选用一种或几种比较测量。采用计算机处理数据、提高应对电磁干扰对策、开发新型传感器、引入新技术提高测量准确度等一直是脉冲电流测量领域的研究方向。本文提出的分流器法,测量结果准确稳定,可作为标准类仪器使用,但目前高频和大电流限制了其测量范围,需要进一步研究,以促进脉冲电流校准技术的发展。

- [1] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 145-176.
- [2] 叶石华. 脉冲电流测量及其运用研究[J]. 科技创新导报, 2010(5): 71.
- [3] 曾正华. 脉冲大电流测试技术研究[D]. 南京理工大学, 2006: 23-25.
- [4] 张德会. 脉冲电流测量的研究[D]. 华中科技大学, 2007: 8-62.
- [5] Jeremy A, Schaeffer, Lea-Der Chen, etc. Shunt current calculation of fuel cell stack using Simulink-R[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 599-602.
- [6] 郑锦秀, 童欣. 一元线性回归方程在大电流分流器测量中的应用[J]. 计测技术, 2009, 29(5): 17-19.
- [7] Shengyi Liu, Roger A. Dougal, Eugene V. Solodovnik. Maximum Power Tracking and Pulse-Width-Modulated Shunt for Sat-

- [5] ASTM E511 – 07, Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Copper-Constantan Circular Foil, Heat-Flux Transducer [S]. 201.
- [6] Murthy A V, Prokhorov A V, DeWitt D P. High Heat-Flux Sensor Calibration: A Monte Carlo Modeling [J]. AIAA, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3): 333–341.
- [7] Murthy A V, Fraser G T, DeWitt D P. Experimental In-Cavity Radiative Calibration of High-Heat-Flux Meters [J]. AIAA, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(2): 327–335.
- [8] 张学聪. 热管式黑体辐射源研制与评价技术研究 [J]. 计测技术, 2012, 32(4): 30–32, 44.
- [9] Amanie N, Abdelmessih, Thomas J. Horn. Experimental and Computational Characterization of High Heat Fluxes During Transient Blackbody Calibrations [J]. ASME, Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 24–36.

- [8] I P Scherbakov, S D Samuilov, Yu. N. Bocharov. A Unit for Measuring the Electrical Current in Complex (Including Coaxial) Circuit Sections [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2009, 52(2): 207-208.
- [9] 李红梅, 邱景辉, 林澍. 脉冲电流测量线圈的理论分析与实验研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 25(4): 386-389.
- [10] 王冰, 王端, 宋耀东, 等. 小型化脉冲电流测量线圈的设计 [J]. 电子世界, 2014(9): 136-137.
- [11] Togawa, Sanbonsugi, Lapicki. High-sensitivity In Sb thin-film micro-Hall sensor arrays for simultaneous multiple detection of magnetic beads for biomedical applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3661-3663.
- [12] 马仙云, 苏进喜, 吴维韩, 等. 磁光式光电电流互感器幅值精确度的研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(4): 89-92.
- [13] 朱卫安, 刘国瑛, 候鑫瑞, 等. 基于法拉第磁光效应的大电流测量技术 [J]. 电焊机, 2014, 44(1): 22-25.
- [14] LIN Min, SU Dan, CHEN Yi-zhen, etc. Study on Calibration of Proton Absorbed Dose of Alanine With Faraday Cup [J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2009(1): 249-250.
- [15] 何小平, 石磊, 张嘉生, 等. 用偏压法拉第筒测量强流脉冲离子束 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 753-755.