

## Research on Ultra-Large Current Detection Technology of High Power Pulse Power Supply\*

MA Youchun<sup>1\*</sup>, LIU Pengyuan<sup>1</sup>, LI Di<sup>2</sup>, MA Ziguang<sup>1</sup>, HE Qiao<sup>1</sup>

(1. Ministerial Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Equipment Project Management Center, Army Equipment Department, Beijing 100071, China)

**Abstract:** With the wide application of high power pps (Pulse Power Supply) in electromagnetic rail gun, electromagnetic ejector and electromagnetic thruster, it is very important to accurately measure the pulse current generated by high power pulse power supply. However, the current testing methods commonly used in the field of current measurement can not meet the testing requirements of high power pulse power supply with megaampere discharge current due to its shortcomings such as insufficient stability, limited measurement range and low measurement precision. Therefore, a super-large current measurement technique based on Rogowski Coil and integrator is proposed. Firstly, the electromagnetic environment is simulated and analyzed by using the AC/DC magnetic field module of COMSOL finite element analysis software to determine the safe testing distance of the acquisition system in the electromagnetic environment. The testing principle of Rockwell coil and integrator is explained in detail. Finally, the hardware platform is built to prove that the scheme can realize the test of large pulse current of megaampere class, and the feasibility of this test method is proved.

**Key words:** pulse power supply; high current; Rogowski coil; integrator

EEACC: 7310D

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.02.015

## 高功率脉冲电源超大电流检测技术研究\*

马游春<sup>1\*</sup>, 刘鹏媛<sup>1</sup>, 李迪<sup>2</sup>, 马子光<sup>1</sup>, 何巧<sup>1</sup>

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;  
2. 陆军装备部装备项目管理中心, 北京 100071)

**摘要:** 随着高功率脉冲电源 (Pulse Power Supply) 在电磁轨道炮、电磁弹射器及电磁推射装置中的广泛应用, 对其产生的脉冲大电流的精确测量显得尤为重要, 但目前电流测试领域常用的测试方法由于稳定性不足、量程有限、测量精度不高等缺陷, 无法满足具有兆安级放电电流的高功率脉冲电源的测试需求。因此, 提出了一种基于罗氏线圈和积分器的超大电流测试技术。首先通过 COMSOL 有限元分析软件的 AC/DC 磁场模块建立模型对该电磁环境进行仿真分析, 以确定采集系统在该电磁环境中的安全测试距离, 并对罗氏线圈和积分器的测试原理做了具体说明, 最后搭建硬件平台在实际的试验中证明该方案能够实现对兆安级脉冲大电流的测试, 论证了该测试方法的可行性。

**关键词:** 脉冲电源; 大电流; 罗氏线圈; 积分器

中图分类号: TM89

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2020)02-0321-06

脉冲大电流由高功率脉冲电源放电而产生。脉冲大电流可用于雷达发射器、高能脉冲武器、分布式独立电源供电系统等, 并在航空母舰甲板的电磁弹射器、电磁轨道炮及大型水面舰艇等新型武器装备

中都扮演着重要角色<sup>[1]</sup>。不仅如此, 在民用方面也应用颇多, 电火花震源、生物医疗灭菌等技术也在脉冲大电流基础上发展起来, 并且还可运用于应用电源系统、电力电子变压器等电气工程领域。

项目来源: 国防重点实验室基金 (6142001180412)

收稿日期: 2019-05-17 修改日期: 2019-07-06

鉴于测量脉冲大电流的重要性,许多国家都在大电流测量领域开展了研究,虽然都取得了一些研究成果,但这还远远不够,还需要投入大量精力和时间,研究出更加先进的测试技术,我国的电流测量技术过去相比欧美强国较为落后,但是也一直在进步。大电流测量领域的科研成果越来越多样<sup>[2]</sup>。我国拥有全知识产权的零磁通式直流互感器无论从性能指标和可靠性上都与国外优秀设备不相上下,达到国际领先水准。不仅如此,还从光电领域找到突破口,尝试了诸如光学电流传感器的研究,但由于光电电流传感器的技术难点无法解决,从而造成测试精度不高、稳定性不强的弊端。目前,科学家正在不断进行试验研究,以实现电流测试行业新的跨越。

针对以上问题,提出了一种基于罗氏线圈和积分器的兆安级大电流测试技术。罗氏线圈具有测量精度高、测量范围宽、线性度好等突出优点,选用 Rocoil 公司 1000 系列的罗氏线圈在内部补偿系统的优化下可以很好地解决强电磁干扰的问题。该方法是将罗氏线圈沿正方向环绕在脉冲电源的汇流装置上,积分器与数据采集装置置于一体通过上位机对数据采集装置中存储的电流数据进行解析,最终得到与被测电流完全一致的电压曲线。高稳定性、高精度的大电流检测技术将推动大功率脉冲电源在电磁轨道炮、航母电磁弹射、地质勘探、生物灭菌、废固、废液、废气处理等领域做出更大的贡献,对推动国防科技的进步与创新具有重要价值<sup>[3]</sup>。

## 1 电源系统电磁场特性分析

为防止脉冲电源系统在放电瞬间产生的强电磁环境对电流测试系统的电磁干扰,根据脉冲电源的结构,在 COMSOL 有限元分析软件中进行了建模,对电源系统的放电过程进行了电磁仿真,并分析得到了电流测试系统在进行检测试验时的安全距离,确保系统得以正常工作,不受强电磁干扰的影响。

### 1.1 电源模块磁场研究模型

大功率脉冲电源系统在放电过程中,其所形成的电磁场环境主要以低频强磁场为主。在做仿真研究时,选择合适的对象建模是成功的关键,不仅可以更加有效,而且能够大大缩短模型计算时间<sup>[4]</sup>。因此,在电源系统的磁场特性分析中,选择调波电感器作为分析对象建立仿真模型进行研究。目前大多数脉冲电源所采用的调波电感都是如图 1 所示的平面螺旋结构。



图 1 螺旋式调波电感器

选用 COMSOL 有限元分析软件中的 AC/DC 模块,以螺旋式调波电感为研究对象进行建模。选择对距离模型 1 m 的磁场进行仿真。建模过程中,为了节约 COMSOL 软件的计算时间,将模型简化为多层铜线绕制而成的空心圆柱型结构,其二维轴对称模型如图 2 所示,圆柱的主视图为长方形,以横坐标为 0.1 时的竖线呈轴对称,该竖线为对称轴。

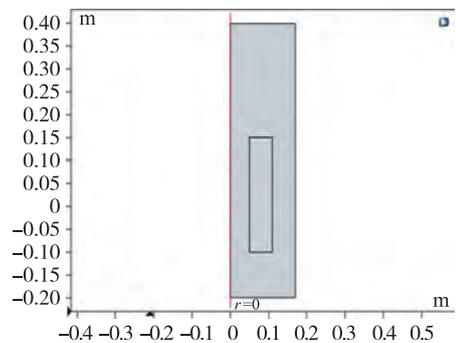


图 2 二维平面模型

### 1.2 电磁环境仿真分析

在添加激励时,选择双指数脉冲电流,峰值为 3 MA,该双指数脉冲电流的方程为:

$$I = I_0 \cdot (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

参数  $a, b$  为两个指数。

当电流达到峰值的时候,其磁场也达到最大值,该时刻距离模型 1 m 处的磁场分布如图 3 所示。从图中可以看出,磁通密度的最大值约为 0.0013 T。对于一般电子元件而言,磁通密度在 0.01 T 以下时,就认为磁场对电子元件不会造成影响。因此,距离模型 1 m 处的磁场较弱,其磁场辐射很小。

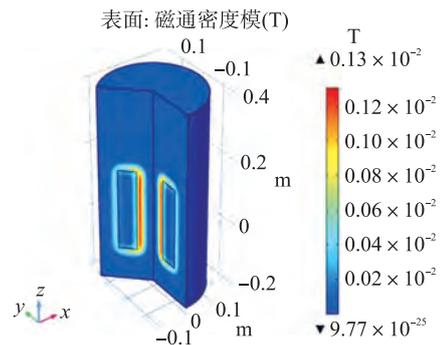


图 3 模型磁场分布图

为了分析磁场分布与距离的关系, 通过改变被监测点与仿真模型之间的距离, 便可在 COMSOL 软件中得到最大磁通密度随距离变化的曲线, 如图 4 所示, 不难看出, 磁场强度随着距离的增大呈反比例减小的趋势。

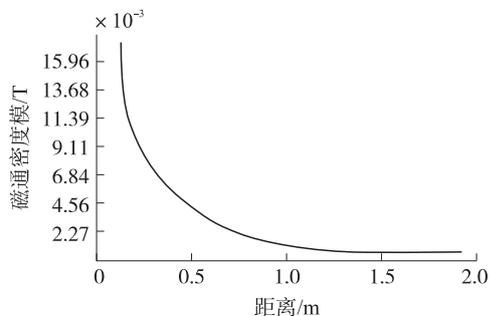


图 4 磁场强度随距离的变化曲线

根据以上分析, 电源系统在脉冲放电时, 其外部的磁场相比电源系统内部而言, 磁场强度很小, 在距离电源系统 1 m 处的位置, 其磁通密度仅为 0.0013 T, 远低于一般电子元件可承受的磁场强度极限 (0.01 T)<sup>[5]</sup>, 并且磁场强度随着距离的增大而呈反比例的方式减小, 因此在进行脉冲电流的测试时, 可无需对电流采集设备施加屏蔽措施, 而尽可能远离脉冲电源系统, 以减弱磁场对采集设备中的电子元件的影响。受罗氏线圈输出线长度的限制, 最终设计中确定了电流采集装置到电源系统的距离为 10 m。

## 2 超大电流的测试原理

目前常用的几种大电流测量原理有: 直流互感器原理、分流器原理、霍尔效应原理、磁光效应原理及罗科夫斯基 (Rogowski) 线圈原理等<sup>[6]</sup>。在对兆安级脉冲大电流进行检测时, 相比之下, 基于罗氏线圈的电流测量技术更加符合要求。罗氏线圈一直以来都是瞬态大电流测量的首选方法, 它具有较高的瞬态频率响应和幅度响应特性。而且, 罗氏线圈具有测量精度高、线性度好等优点, 使用便捷, 无磁饱和, 特别适合于测量大型交流电流<sup>[7]</sup>, 在罗氏线圈和积分器后端, 可直接连接示波器及数采设备, 即可直观的显示被测电流波形, 非常方便。因此, 选择了罗氏线圈加积分器的方法作为高功率脉冲电源系统电流检测的研究手段。

### 2.1 罗氏 (Rogowski) 线圈原理

罗氏线圈的结构如图 5 所示, 其结构组成很简单, 即将线圈均匀的缠绕于环形磁性材料上<sup>[8]</sup>。

它的工作原理为: 将柔性环形线圈套在导体上, 当导体内部有不断变化的电流通过时, 其周围就会

感生出变化的磁场, 而罗氏线圈处在不断变化的磁场中, 又会因此产生感应电动势, 即线圈内部会有变化的电流产生。

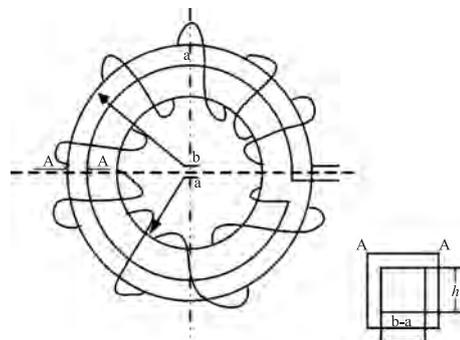


图 5 罗氏线圈示意图

由安培环路定律可以得出:

$$I(t) = \oint H \cdot dl \quad (2)$$

根据磁场强度  $H$  与磁感应强度  $B$  呈正比, 即

$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (3)$$

又由

$$E = \frac{d\phi}{dt}, \quad \phi = N \oint B \cdot dS \quad (4)$$

式(3)和式(4)联立可得, 感应电动势为:

$$E(t) = \frac{d(N \int B \cdot dS)}{dt} = \frac{d\left(N \int_a^b \frac{\mu I}{2\pi r} h dr\right)}{dt} \\ = \frac{d\left(N \frac{\mu I h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}\right)}{dt} = \frac{M dI(t)}{dt} \quad (5)$$

式中:  $M$  为互感系数

$$M = \frac{N \mu h \ln(b/a)}{2\pi} \quad (6)$$

式中:  $H$  为磁场强度;  $B$  为磁感应强度;  $N$  为线圈绕线匝数;  $E$  为感应电动势;  $\mu$  为骨架材料磁导率;  $b$  为骨架外径;  $a$  为骨架内径;  $h$  为线圈高度。

罗氏线圈在测量脉冲电流时, 处于强电磁环境下, 因此, 线圈本身的抗电磁干扰能力是关键。本试验选用的 Rocoil 公司 1000 系列罗氏线圈内部带有金属屏蔽层, 且在内部补偿系统的优化下, 可将电磁干扰降至 1% 以下, 很好地解决了强电磁干扰问题, 这对诸如高功率脉冲电源的汇流器这种不规则被测结构来说, 大大提高了电流测量精度。

罗氏线圈的标定选用了中国航天科技集团五院计量测试研究所的 kA 级高稳定性直流电流源作为源信号, 罗氏线圈缠绕在负载上, 后端接标准采集设备。在线圈标定过程中, 电流源分别加 1 kA、2 kA、

4 kA、6 kA、8 kA 和 9 kA 的直流电流信号,并得到相对应的实际测量的电流值,见表 1。

表 1 罗氏线圈标定数据 单位:kA

组别	标准值	实际值
1	1	0.996 17
2	2	1.992 65
3	4	3.984 86
4	6	5.977 83
5	8	7.969 82
6	9	8.965 74

对以上标定数据在 origin 软件中做了数据处理,得到 6 个点的拟合直线如图 6 所示。

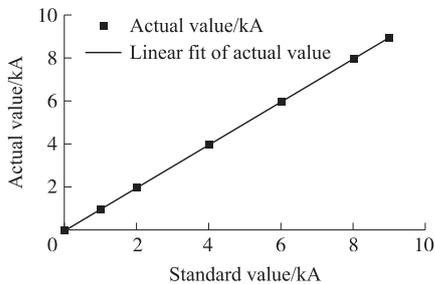


图 6 线圈标定的数据拟合直线

对标定数据经 origin 软件得到的线性拟合直线方程为:

$$Y=0.996\ 22X+8.723\ 74\times 10^{-5} \quad (7)$$

从该方程中可以发现,方程的  $b$  值几乎为 0,与实际相符;而其  $k$  值则为线圈实际输出值与标准值的对应关系,即该罗氏线圈的灵敏度为 1 V/MA,标定系数为 0.996 22。

然而,罗氏线圈的信号输出与被测电流对时间的微分成正比例关系,要想真实的还原被测电流波形,可在罗氏线圈的输出端加一 RC 积分回路来实现。因此,在用该方法测电流时,通常是由罗氏线圈和积分器搭配使用,共同完成。

### 2.2 积分器

积分器的内部电路部分其实是一简单的 RC 积分回路<sup>[9]</sup>,其等效电路图如图 7 所示。

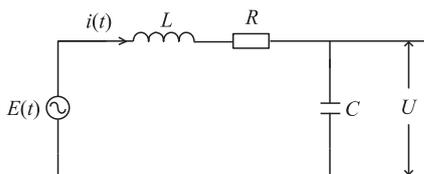


图 7 积分电路等效电路图

由图 7 所示的电路图可得,

$$E(t)=\frac{Ldi(t)}{dt}+(R_L+R)i(t)+\frac{1}{C}\int i(t)dt \quad (8)$$

式中: $E(t)$ 为感应电动势; $L$ 为罗氏线圈自感; $R_L$ 为罗氏线圈内阻; $R$ 为积分电阻; $C$ 为积分电容。

罗氏线圈的内阻非常小,与积分电路中的积分电阻相比,线圈内阻可以忽略;且由于  $R \gg \omega L$ 、 $R \gg 1/\omega C$ ,故可近似认为积分电阻和积分电容上通过的电流相等,由此即可得出:

$$U=\frac{1}{RC}\int E(t)dt=\frac{1}{RC}\int Mdi(t)=\frac{MI(t)}{RC} \quad (9)$$

对于一个特定的罗氏线圈测量系统来说,其互感系数  $M$ 、积分电容  $C$  和积分电阻  $R$  均为固定值,因此可知,积分器的输出电压与被测电流呈正比关系。因此,只要将积分器的电压输出信号接入数据采集存储系统,对电压信号进行采集存储,最终通过软件解析和回读,即可直观得到与被测电流波形一致的电压模拟量,再根据罗氏线圈的灵敏度,即可计算得到电流最大值<sup>[10]</sup>。

## 3 硬件测试平台搭建

### 3.1 采集系统硬件电路设计

电流采集系统主要功能是对罗氏线圈电流传感器获取的瞬态脉冲电流数据进行采集和存储,试验结束后,通过上位机操作软件对内部存储的电流数据进行回读与分析。完整的电流采集存储系统主要由罗氏线圈、积分器、FPGA 主控模块、A/D 采集模块、Flash 存储模块、无线控制模块及读数模块组成,其总体框图如图 8 所示。

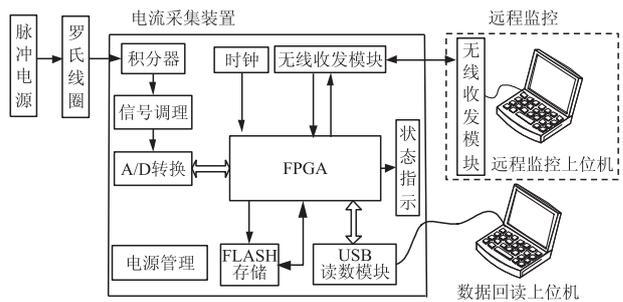


图 8 采集系统组成及原理框图

电流检测试验开始前,采集系统上电,经 5 s 的复位延时后,系统正式进入待工作状态;采集装置与上位机连接,在上位机中对存储模块进行擦除操作后,采集系统进入待采集模式;在收到“开始记录”的命令之后,打开无线串口控制软件,远程启动采集装置,系统内部存储模块开始数据记录;脉冲电源系统放电结束后,在无线串口控制软件中远程控制设备停止记录,试验结束;在上位机数据回读结束后,再对电流数据进行分析绘图,最终还原被测电流的波形。

搭建的系统硬件测试平台如图 9 所示,电流测试的工作流程为:(1)在测试前,将罗氏线圈沿正方向环绕在脉冲电源的汇流装置上;(2)罗氏线圈的输出线缆一端固定在线圈上,另一端接入积分器,作为积分器的输入信号;(3)积分器与数据采集装置置于一体,由数采设备给积分器提供 24 V 直流电源,积分器的信号输出端接入采集电路进行信号的调理与采集存储;(4)电流测试试验结束后,通过上位机对数据采集装置中存储的电流数据进行解析,最终得到与被测电流完全一致的电压曲线,再根据罗氏线圈的灵敏度,将电压最大值转换成电流最大值。



图 9 系统硬件测试平台搭建

#### 4 系统测试结果分析

测试设备参与了某科研单位的脉冲电源系统充放电试验,完成了对脉冲电流的测试工作,并最终获得电流数据。由于实际测到的脉冲电流信号上叠加了大约 5 mV 的噪声而无法确定脉冲电流的峰值,因此需对实际信号做滤波处理。如图 10 所示的波形曲线为将电流采集装置记录的脉冲电流原始数据经 origin 数据处理软件做 10kHz 低通滤波处理后的电流曲线,可以看出,该脉冲电流信号的脉宽大约 15  $\mu\text{s}$ 。在 origin 软件中对曲线求最大值可得该脉冲信号的峰值电压为 3.032 24 V(注意:罗氏线圈的输出信号经积分器后得到的是与实际被测电流波形一致的电压信号),再根据罗氏线圈的灵敏度 1 V/MA,以及线

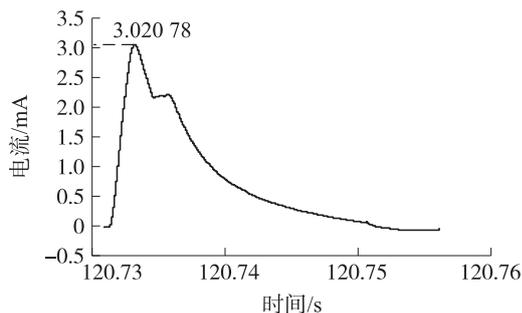


图 10 脉冲放电电流曲线

圈的标定系数 0.996 22,可以得出实际测量的脉冲电流峰值为:

$$I_{\max} = 3.032\ 24 \times 0.996\ 22 = 3.020\ 78\ \text{MA} \quad (10)$$

即该脉冲电流的最大值为 3.020 78 MA。

改变脉冲电源中的电容数量,重复对脉冲电源系统做充放电实验,将测试得到的电流值与理论值进行对比并由公式:

$$\text{误差} = \frac{\text{实际值} - \text{理论值}}{\text{实际值}} \quad (11)$$

计算测量的误差值,所得结果如表 2 所示。

表 2 测试数据误差分析

理论值/MA	实际值/MA	误差/%
0.5	0.503 94	0.79
1	0.994 02	0.60
1.5	1.490 68	0.62
2	2.008 15	0.82
2.5	2.481 55	0.74
3	3.020 78	0.69

#### 5 结束语

罗氏线圈具有结构简单、测量精度高、线性度好等诸多优点,由于目前在测试领域中没有兆安级别的标准电流源,因此给大电流传感器的标定增加了难度,但是由于罗氏线圈的特殊结构,其采用空心绕线的方式,不会产生磁饱和的现象,并且线性度好、测量精度高,使它可以通过小的标准电流源来进行标定,因此提出了一种基于罗氏线圈和积分器的大电流测试方案,并在实际的试验中证明该方法切实可行,能够实现对 MA 级脉冲大电流的测试,且精度可靠。该电流测试技术对脉冲电源系统的工作状态监测和发展具有深远的意义。

#### 参考文献:

- [1] 郑建毅,何闻. 脉冲功率技术的研究现状和发展趋势综述[J]. 机电工程,2008,25(4):1-4.
- [2] 张艳,马毅. 高压直流电流测量装置的应用现状与研究进展[J]. 电测与仪表,2014,51(11):32-39.
- [3] Reis V L, Freire R C S, Luciano B A, et al. Measuring the Excitation Current in Transformers Using Hall Effect Sensors[C]//Instrumentation & Measurement Technology Conference. IEEE, 2014:960-963.
- [4] 张适昌,严萍,王珏,等. 民用脉冲功率源的进展与展望[J]. 高电压技术,2009,35(3):618-631.
- [5] 张东东,严萍,王珏,等. 单级磁脉冲压缩系统实验研究[J]. 强激光与粒子束,2008,20(8):1397-1401.
- [6] Fair H D. Electric Launch Science and Technology in the United

- States[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 11-17.
- [7] Li J, Wang Y, Liu P, et al. Experimental Results from Pseudoliquid Armatures Launched by Two-Turn Railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 80-82.
- [8] 樊爱龙, 孙鹤鸿, 徐旭哲, 等. 高压脉冲放电震源及其放电特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 890-895.
- [9] 常亮, 朱望纯, 刘冲. 脉冲电流测量线圈试验验证平台的研制[J]. 装备制造技术, 2018, 283(7): 229-232, 236.
- [10] 马子光, 马游春, 孙宇梦. 电磁轨道炮过载测试系统设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(12): 51-54.



马游春(1977-),男,汉族,江苏盐城人,博士,副教授,主要研究方向为光纤光栅传感系统、电子测试仪器与系统,657268684@qq.com;



刘鹏媛(1994-),女,汉族,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术与仪器,18435132413@163.com。