

文章编号: 2095-4980(2016)01-0108-04

一种提高脉冲电流测量准确度的方法

陈曙光, 邓国荣, 谭金玉, 何 鹏

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 对脉冲电流的测量, 现用设备由数字示波器和电流探头组成, 此测量装置的误差限为 $\pm 1\%$, 对误差限有较高要求的脉冲电流测量, 该测量装置存在局限性。本文在上述测量设备的基础上, 分析并找出常用方法产生误差的主要来源; 为减小误差分量, 提出了一种提高脉冲电流测量准确度的方法, 即直流电流替代法; 并详细阐述了直流电流替代法的工作原理和方法, 对改进方法和常用方法进行不确定度分析比较。实验结果表明, 改进方法可操作性强, 能明显提高电流测量的准确度。

关键词: 脉冲电流; 测量; 不确定度

中图分类号: TN806

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0108

An improvement method on pulse current measurement accuracy

CHEN Shuguang, DENG Guorong, TAN Jinyu, HE Peng

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physic, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The pulse current measuring equipment consists of digital oscilloscope and current probe, with the error limit of 1%. This error limit shows some defects when the measurement of the pulse current requires higher accuracy. The major sources of error is found out based on the aforementioned equipment in this paper, and an advanced method is put forward, which can decrease the component of error. In this advanced method, the pulse current is replaced by direct current(short for RDC). In addition, the working principle and method of RDC are illustrated in detail. Through the comparative analysis on the uncertainty with the former method, the proposed method has better operability and higher accuracy.

Key words: pulse current; measurement; uncertainty

雷管测试仪是能产生幅度、宽度可调的电流输出设备, 电流为脉冲方式, 应用在雷管电参数的测试中。其工作原理是: 利用开关, 实现对直流电流的斩波, 从而获得脉冲电流输出; 由于此类设备的脉冲电流技术指标较高, 其误差限可达到 $\pm 1\%$ ^[1]; 国内主要计量技术机构对脉冲电流的检定, 通常采用数字示波器和电流探头组成的测量装置进行^[2], 但测量装置误差限通常为 $\pm(1\% \sim 3\%)$, 从量传关系上已不能满足雷管测试仪量传的要求, 需要开展脉冲电流测量方法研究。在现有测量设备的基础上, 本文提出了一种改进的脉冲电流的测量方法, 利用直流电流替代脉冲电流测量的原理, 提高对脉冲电流测量的准确度, 满足雷管测试仪的量传要求。

1 常用测量方法

对脉冲电流的测量, 常采用数字示波器和电流探头组成的测量装置, 测量连接图见图 1, 测量工作原理是: 当脉冲电流通过电流探头时, 电流探头感应磁场的变化产生电压, 再由数字示波器完成感应电压测量, 从而获得测量结果。

由此测量装置可以看出, 误差来源主要是电流探头量化的不准确和数字示波器测量的不准确, 故此测量装置测量精确度通常不高, 不能满足技术指标较高的脉冲电流的测量。

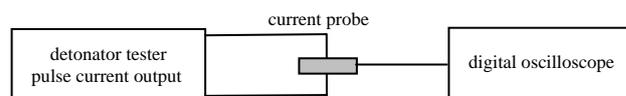


Fig.1 Block diagram of normal method
图 1 常用方法连接框图

2 直流电流替代法原理

传统的脉冲电流的测量方法，是利用数字示波器和电流探头组成的测量装置测量脉冲电流波形，电流幅值的测量误差主要来源于电流探头量化的不准确(±1%)和数字示波器测量的不准确(±1%)，减小这 2 个因素的误差来源，可提高脉冲电流测量的精确度；用直流电流幅度替代法测量脉冲电流幅度^[3]，可以避免主要引起测量不准的 2 大误差来源，测量设备连接图见图 2。

此方法是把数字示波器仅作为脉冲波形显示工具，这样，数字示波器的测量不准确和电流探头量化的不准确不再是误差的主要来源，新方法误差主要来源为：标准电流源输出电流的不准确和数字示波器显示已知电流值的标准直流电流波形线同脉冲电流的波形顶、底波形线重合时的分辨力。大幅度减小这 2 项来源的误差限，可以提高测量精确度。具体方法是：把已知电流值的标准直流电流波形线同脉冲电流的波形顶、底波形线相比较，当 2 条线重合时，用标准直流源示值分别替代脉冲波形的顶、底值，其差值得到脉冲电流幅度值，从而获得测量结果；另一方面，为了提高读数分辨力，需要利用数字示波器的直流偏置功能，使偏置电压同被测电压形成大小相同的共模电压，达到共模信号^[4]平衡显示波形的目的。

由此可见，此方法是在现有通用设备的基础上，仅改进测量方法，即可完成高精度脉冲电流测量问题；现用脉冲电流测量装置为：标准电流源(型号：3010)、数字示波器(型号：DPO7254)和电流探头(型号：TCP202)。

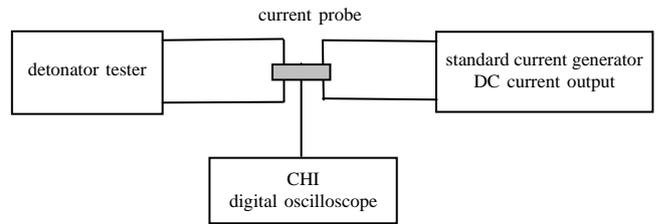


Fig.2 Block diagram of improved method
图 2 改进方法连接框图

3 测量结果不确定度评定

3.1 电流脉冲幅度测量数学模型

$$I = I_1 - I_2$$

式中： I 是被测电流脉冲幅度； I_1 是脉冲电流的顶值， I_2 是脉冲电流的底值，单位均为 A，其中 I_1, I_2 不相关，故合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_{c1}^2(I_1) + u_{c2}^2(I_2)}$ ，用传统方法和直流电流替代法分别对 1 A 稳定脉冲电流进行测量，其结果重复性试验数据见表 1。

表 1 重复性试验数据
Table1 Repetitive experiment data

traditional experiment data			improved experiment data		
top value/V	base value/mA	amplitude value/A	top value/A	base value/mA	amplitude value/A
1.008	-8	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.004	-12	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.008	-8	1.016	1.005	-3.016	1.008
1.004	-12	1.016	1.005	-3.016	1.008
1.004	-12	1.016	1.005	-3.016	1.008
1.004	-12	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.004	-12	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.004	-12	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.008	-8	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.008	-8	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.004	-12	1.016	1.004	-3.016	1.007
1.008	-12	1.020	1.004	-3.016	1.007
average value 1 016 mA			average value 1 007.3 mA		
repetition S ₁ :top value 2.1 mA; base value 2 mA			repetition S ₂ :top value 0.5 mA; base value 0 mA		

3.2 常用法的测量不确定度评定

常用脉冲电流测量方法的不确定度^[5]来源：电流探头量化的不准，数字示波器受限于 A/D 的位数，即 A/D 量化过程中的分辨力，测量重复性。

测量装置测量的不准确引入的不确定度：试验所采用 TCP202 型电流探头与数字示波器修正后可达到 ±1%，设服从均匀分布，则 $u_1(I_{11}) = (0.01 \times 1000) / \sqrt{3} = 5.8 \text{ (mA)}$ 。

分辨力引入的不确定度: 数字示波器采用 8 位 A/D 采样方式, 分辨力为 1/256, 约为 0.4%, 服从正态分布, 则 $u_1(I_{12}) = (0.0004 \times 1000) / 2 = 0.2$ (mA)。重复性引入的不确定度: 以 1 次测量值作为测量结果, 重复性引入的不确定度 $u_1(I_{13}) = s_1 = 2.1$ (mA), 顶值的合成不确定度 $u_{c1}(I_1) = \sqrt{u_1^2(I_{11}) + u_1^2(I_{12}) + u_1^2(I_{13})} = 6.1$ (mA); 相同方法分析, 底值的合成不确定度 $u_{c2}(I_2) = \sqrt{u_2^2(I_{21}) + u_2^2(I_{22}) + u_2^2(I_{23})} = 6.1$ mA, 合成不确定度 $u_c(I) = \sqrt{u_{c1}^2(I_1) + u_{c2}^2(I_2)} = 8.6$ (mA), 扩展不确定度 $U_A = ku_c(I) = 2 \times 8.6 \approx 18$ (mA), 转化为相对值为 1.8%, 测量结果为 $(1\ 016 \pm 18)$ mA, $k = 2$ 。

3.3 直流电流替代法测量不确定度评定

改进方法的测量结果不确定度来源: 目视两线重合分辨力、标准电流源不准和重复性。

目视两线重合的分辨力引起的不确定度: 目视观察扫描线, 显示分辨力可达到 50 线/格, 两线重合可分辨 1/2 线, 按 8 格显示计算, 即 $1 / (50 \times 8 \times 2) \approx 0.13\%$, 计算值为 0.13%, 服从正态分布, 则 $u_1(I_{11}) = (0.0013 \times 1000) / 2 = 0.65$ (mA)。

标准电流源不准引入的不确定度: 试验所用的标准电流源(型号: 3010 型)误差限可查技术说明书, 为 $\pm(0.03\% \times$ 设置值 $+ 0.3$ mA), 假设服从均匀分布, 则 $u_1(I_{12}) = (0.0003 \times 1000 + 0.3) / \sqrt{3} = 0.34$ (mA), 重复性引入的不确定度: 以一次测量值作为测量结果, 重复性引入的不确定度 $u_1(I_{13}) = s_2 = 0.5$ (mA), 顶值的合成不确定度 $u_{c1}(I_1) = \sqrt{u_1^2(I_{11}) + u_1^2(I_{12}) + u_1^2(I_{13})} = 0.9$ (mA); 相同方法分析, 底值的合成不确定度 $u_{c2}(I_2) = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2 + u_{23}^2} = 0.8$ mA, 合成不确定度 $u_c(I) = \sqrt{u_{c1}^2(I_1) + u_{c2}^2(I_2)} = 1.2$ (mA), 扩展不确定度 $U_B = ku_c(I) = 2 \times 1.2 = 2.4$ (mA) 化为相对值为 0.23%, 测量结果为 $(1\ 007.3 \pm 2.4)$ mA, $k = 2$ 。

2 种方法扩展不确定度结果比较, 采用直流电流替代法, 其测量不确定度相对传统方法减小了 7 倍。

4 方法实验验证

采用标准设备进行方法验证, 在没有标准脉冲电流发生器情况下, 采用 5720 A 多功能校准器产生的直流电流, 利用 8 位半数表的电流测量功能来进行验证(8045 型), 验证电流点为 1 A, 验证数据见表 2。

表 2 2 种方法试验结果比较

Table 2 Comparative results of two methods	
method	results of measurement / A
digital voltage meter	1.000 2
replacement of DC	1.001 7

采用比对法验证^[6], 测量结果应满足 $|y_a - y_b| \leq \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$, 由于 $|y_a - y_b| = |1.000\ 2 - 1.001\ 7| = 1.5$ (mA); $\sqrt{U_A^2 - U_B^2} = \sqrt{2^2 + 2.4^2} \approx 3.1$ (mA), 故 $|y_a - y_b| \leq \sqrt{U_A^2 - U_B^2}$, 满足验证条件要求。

5 结论

通过对雷管试验仪输出脉冲电流测量方法的研究, 在传统测量脉冲电流方法的基础上, 分析产生误差的原因, 并避开常规方法主要产生测量误差的因素, 采用直流电流替代法; 经不确定度评定分析和实验验证, 此方法提高了脉冲电流测量准确度, 能满足误差限为 $\pm 1\%$ 脉冲电流的量值传递的要求; 现已采用此方法, 开展相关设备的测量工作, 取得了满意的效果。

参考文献:

- [1] 吴奇. 雷管电参数测试仪使用说明书[Z]. 南京:南京理工大学民爆器材研究所, 2004. (WU Qi. Detonator electrical parameters test instrument operating instructions[Z]. Nanjing, China: Civilian Blasting Equipment Institute, Nanjing University of Science, 2004.)
- [2] 吴奇. WJ9047-2004 工业电雷管电参数测试仪校准规范[Z]. 北京:国防科学技术工业委员会, 2004. (WU Qi. WJ9047-2004 Verification regulation of industrial electric detonator electrical parameters test instrument[Z]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Committee, 2004.)
- [3] 郭伟民. 一种改进的脉冲幅度比测量方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2005, 3(2): 118-122. (GUO Weimin. An improved comparative measurement method of pulse amplitude[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic

Information Technology, 2005,3(2):118-122.)

- [4] 国防科工委科技与质量司. 无线电电子学计量(上册)[M]. 北京:中国计量出版社, 2003. (Radio Electronics Metrology(I)[M]. Beijing:China Metrology Press, 2003.)
- [5] 叶德培. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]// 北京:中国标准出版社, 2012. (YE Depei. JJF1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]// Beijing:Chinese Standard Press, 2012.)
- [6] 陈怀艳. GJB 2749A-2009 军事计量测量标准建立与保持通用要求[S]// 北京:中国人民解放军总装备部, 2010. (CHEN Huaiyan. GJB 2749A-2009 Military metrology measure setup and hold general requirements[S]// Beijing:PLA General Armament Department, 2010.)

作者简介:



陈曙光(1967-), 男, 浙江省诸暨市人, 高级工程师, 主要研究方向为无线电脉冲测量技术. email:Chshg@hotmail.com.

邓国荣(1972-), 男, 江苏省丹阳市人, 技师, 主要研究方向为电磁学专业数表测量技术.

谭金玉(1982-), 女, 河南省周口市人, 硕士, 主要研究方向为无线电脉冲测量技术.

何 鹏(1986-), 男, 四川省巴中市人, 硕士, 主要研究方向为无线电脉冲测量技术.

(上接第 100 页)

- [15] LIU Y J, LU B, CAO T, et al. On the robustness of look-up table digital predistortion in the presence of look delay error[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I:Regular Papers, 2012,59(10):2432-2442.
- [16] 杨大龙,任亚博,张健,等. 部分更新块自适应均衡算法分析及应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(4):512-517. (YANG Dalong, REN Yabo, ZHANG Jian, et al. Analysis of equalization algorithm using partial update block structure and its application[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):512-517.)

作者简介:



张 祺(1988-), 男, 贵州省安顺市人, 硕士, 主要研究方向为功放的数字预失真技术. email:zsq1128@163.com.

周 劼(1972-), 男, 郑州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为信号处理、测控技术等.

金数波(1968-), 男, 四川省广安市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器测控系统、数字化接收机.

蒋鸿宇(1982-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 主要研究方向为高速率数字采集、通信信号处理.