

文章编号: 1001-4322(2009)10-1561-05

脉冲高电压幅值测量的不确定度分析*

卫 兵, 卿燕玲, 傅 贞, 顾元朝, 李洪涛, 丰树平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在脉冲高电压幅值测量的不确定度评定中,从测量和标定溯源的角度出发将不确定度来源分为示波器测量不确定度和探头不确定度。以初级实验平台单路样机三板线入口电压的测量为例,按照探头不确定度的来源分别分析了三板线电压测量随机效应产生的不确定度, D-dot 探头和电阻分压器标定时的系统效应和随机效应产生的不确定度,示波器和衰减器的校准不确定度,示波器的分辨力不确定度。同时进行了测试和标定系统的频率响应分析,以证明被测信号在测试系统的频率响应范围之内。以相关实验数据为基础计算了各个不确定度分量、合成标准不确定度以及扩展不确定度。按工程测量要求取包含因子为 2,可得三板线入口电压测量值为 1.89 MV,扩展不确定度为 3.9%。

关键词: 脉冲高电压; 测量; 标定; 不确定度

中图分类号: TM930.115 **文献标志码:** A

测量不确定度是表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数^[1]。一个表述完整的脉冲高电压测量结果应当包含不确定度。因此不确定度的评定对确定脉冲功率装置的性能指标具有重要的意义。脉冲高电压测量信号同时具有脉冲信号和高电压测量的特点,其不确定度分析与针对无线电技术的脉冲测量^[2]、电力系统的交(直)流高电压测量^[3]和冲击高电压测量^[3-4]既有相似性,又存在不同点。本文根据脉冲高电压的测量和标定方法,分析了不确定度来源,对各不确定度分量进行了评定,计算了合成不确定度。并对初级实验平台(PTS)单路样机三板传输线电压的测量结果进行了不确定度评定。

1 幅值测量的不确定度分析

1.1 不确定度的来源及评定

脉冲高电压的常规测量方法有电阻分压器^[5]、电容分压器^[5-6]和 D-dot 探头^[7-8],其测量原理各不相同。如果用测试回路的等效电路方程做为建立不确定度分析的数学模型,并不能完全反映测量不确定度的来源。事实上,无论使用哪一种测量探头,都是用示波器的读数和探头灵敏度来计算测量值的,而探头灵敏度是通过标定获得的。因此从测量和标定溯源的角度出发,并考虑相关的频率响应及环境条件等因素,可以较好地分析不确定度的来源,并建立其数学模型。

脉冲高电压测量值的表达式为

$$V = SV_m \quad (1)$$

式中: V_m 为示波器的读数; S 为探头的幅值灵敏度系数。

1.1.1 示波器测量的不确定度

式(1)中 V_m 的测量不确定度包括了示波器的系统效应和随机效应产生的不确定度。

示波器的系统效应产生的不确定度是由示波器的校准不确定度和示波器的分辨力来确定,校准不确定度 u_{osc} 可以从校准证书中获得。分辨力不确定度 u_d 按 B 类不确定度评定。分辨力是由数字示波器 A/D 变换器的位数决定的。通常使用的数字示波器为 8 位,它将屏幕垂直显示幅度分解为 2^8 个台阶。满量程的分辨力为

$$\delta = V_t/256 \quad (2)$$

式中: V_t 为测量时的满量程值。当示波器的分辨力为 δ 时,可以认为被测量在 $[-\delta/2, \delta/2]$ 区间内为均匀分布。根据其概率分布,可知被测量的方差 $u_d^2 = (\delta/2)^2/3$,并得到标准不确定度为^[9]

$$u_d = \delta/\sqrt{12} \quad (3)$$

随机效应产生的不确定度 u_1 主要指由于读数误差导致的不确定度。在脉冲功率装置相同状态(指充电电

* 收稿日期:2009-03-27; 修订日期:2009-06-10

基金项目:国防科技基础研究基金项目

作者简介:卫 兵(1973—),男,高工,从事脉冲功率装置电参数测试技术研究;73wb@163.com。

压、开关的气压等参数相同)的实验中,不同发次电压数据的偏差更多表征的是装置本身的不确定度,而不是测量不确定度。因此,尽管这个不确定度是由随机效应产生,但是不能使用 A 类不确定度评定。由于读数误差主要由扫描线的宽度决定(实际是高频干扰造成扫描线变粗),所以参考分辨力不确定度进行 B 类不确定度评定。

1.1.2 探头不确定度

式(1)中的探头的幅值灵敏度系数 S_D 是通过标定获得的。对于电容分压器或 D-dot 探头,由于探头的结构电容会随着装置结构的变化而改变(即结构影响灵敏度系数),因此需要进行在线标定。通常使用一个电阻分压器进行比对测量,电阻分压器安装在不影响探头电场分布的位置^[6-8]。探头的灵敏度算式为

$$S_D = S_R V_R / V_D \quad (4)$$

式中: S_R 为电阻分压器的灵敏度; V_R 为标定时电阻分压器的输出电压; V_D 为同一发实验的 D-dot 探头的输出电压。探头不确定度 u_D 也是由系统效应和随机效应产生。可以通过 V_R/V_D 多次测量的统计结果分析随机效应产生的不确定度 u_{D1} (即使用 A 类不确定度评定)^[4]。 V_R 和 V_D 的系统效应产生的不确定度分析仍与 V_m 相同。

不论是用于上述标定实验还是直接测量高电压的电阻分压器,通常都是按照脉冲功率装置的具体结构进行设计的,并不是一个可以直接溯源的标准测量设备。因此仍然需要进行标定。使用高压信号源、衰减器和示波器可以完成电阻分压器的线下标定。灵敏度算式为

$$S_R = S_a V_a / V'_R \quad (5)$$

式中: S_a 为衰减器的灵敏度; V'_R 为标定时电阻分压器的输出电压; V_a 为同一发实验的衰减器输出电压。电阻分压器不确定度 u_R 的评定与 D-dot 探头相类似,分别计算 V'_R 和 V_a 系统效应产生的不确定度,以及由随机效应产生不确定度 u_{R1} 。衰减器在计量单位进行校准,可以保证校准结果溯源至国家计量基准及国际单位制。

1.1.3 测试系统频率响应对不确定度的影响

在进行不确定度来源分析时,当能够证明被测信号在测试系统的频率响应范围之内,则认为该不确定度分量可以忽略。但是如果被测信号的等效频率超出了测试系统的频率响应范围,测量波形会发生畸变,会导致不确定度分量急剧增大。因此在不确定度分析中应附带给出测试、标定系统的频率响应分析。

1.1.4 环境因素造成的不确定度

对于脉冲功率装置的高电压测量,主要的环境因素是温度变化。根据 D-dot 探头(或电容分压器)的测量原理^[5-7],探头的灵敏度取决于探头与高压电极之间的结构电容和积分器的积分常数(或低压臂电容)。这些参数随温度的变化很小,因此其不确定度分量可以忽略。对于使用水电阻做高压臂的电阻分压器,由于水电阻的电阻率 ρ 随温度变化较大,就需要对该不确定度分量进行分析。多数分压器测量的是单次信号,由于水电阻发热而导致的温升较低,分析时主要考虑实验室环境温度 T 的变化。假设测试与标定时温差等概率落在区间 $[-\Delta T, \Delta T]$ 内,根据 ρ 随 T 变化的表达式^[10]就可以得到 ρ 的不确定度分量。

1.2 合成标准不确定度

因上述不确定度分量相互独立,按不确定度传递律可得探头的合成标准不确定度 u_R 和 u_D ,及脉冲高电压幅值的合成标准不确定度 u_c 。以使用 D-dot 探头测量脉冲高电压为例,并假定示波器的 u_{osc} 和 u_d 都相等,可得

$$u_R = \sqrt{2u_{osc}^2 + 2u_d^2 + u_{R1}^2 + u_a^2} \quad (6)$$

$$u_D = \sqrt{2u_{osc}^2 + 2u_d^2 + u_{D1}^2 + u_R^2} = \sqrt{4u_{osc}^2 + 4u_d^2 + u_{D1}^2 + u_{R1}^2 + u_a^2} \quad (7)$$

$$u_c = \sqrt{u_{osc}^2 + u_d^2 + u_1^2 + u_D^2} = \sqrt{5u_{osc}^2 + 5u_d^2 + u_1^2 + u_{D1}^2 + u_{R1}^2 + u_a^2} \quad (8)$$

由于不同实验的测量幅值和量程选择的不同,示波器的分辨力也会不同。因此,在实际操作中,应当具体计算 u_d 值。另外需要注意的是:为使各不确定度分量相互独立,应当避免使用相同示波器通道的同一个量程去测量不同的量。原因类似于在体积测量中,不能使用同一仪器的的同一工作段去测量直径和高度^[9]。例如:如果在测量 V_R 时使用的通道和量程与测量 V'_R 时相同,会使不确定度分量 u_{R1} 和 u_{D1} 成为强相关,而不是相互独立, u_D 就不能用公式(7)表示,不确定度也会相应增加。

1.3 扩展不确定度

扩展不确定度是以标准差的倍数表示的不确定度,表明了具有较大置信概率的区间的半宽度。按工程测

量要求,一般取包含因子 $k=2$ (对应置信概率 $P=95\%$),则脉冲高电压的扩展不确定度为

$$U_c = ku_c = 2u_c \quad (9)$$

2 不确定度评定实例

以 PTS 单路样机三平板传输线入口电压的测量结果进行不确定度评定。PTS 单路样机是为了研制多路并联输出、负载电流为数 MA 的超高功率电脉冲装置而建造的单个模块^[11]。其脉冲传输单元的高功率三平板传输线使用了 D-dot 探头测量电压^[8]。

2.1 不确定度的来源及评定

2.1.1 示波器的校准不确定度

示波器的校准结果给出使用量程的 $U=0.66\%$, $k=2$ 。因此示波器的校准不确定度 $u_{osc}=0.33\%$ 。

2.1.2 衰减器的校准不确定度

衰减器的校准结果给出衰减器在实际使用频带的衰减量为 -39.89 dB, 扩展不确定度 $U=0.22$ dB ($k=2$)。衰减量用 $20 \lg(V_{out}/V_{in})$ 表示, 其中 V_{in} 为校准时衰减器的输入电压, V_{out} 为输出电压。为了保持与式(5)中 S_a 的定义一致, 将结果换算成灵敏度。衰减器的灵敏度 $S_a=V_{in}/V_{out}$ 。因此校准结果换算为 $S_a=98.74$, 校准不确定度 $u_a=1.26$, 以相对不确定度表示, $u_{a1rel}=1.28\%$ 。

2.1.3 电阻分压器标定时的随机效应产生不确定度

按照 A 类不确定度评定。电阻分压器标定时的比对测量数据见表 1。表中, i 为实验发次, $a=V_a/V_R'$ 。其单次测量的实验标准差 $s(a_i)$ 可以由贝塞尔公式计算。其平均值的实验标准差 $s(\bar{a})$ 表示为

$$s(\bar{a}) = s(a_i)/\sqrt{n} \quad (10)$$

式中: n 为测量次数。使用 $s(\bar{a})$ 作为测量结果的标准不确定度, 即 A 类标准不确定度^[9]。计算可得: a 的算术平均值为 9.76 , $s(a_i)=0.060 1$, $u_{R1}=s(\bar{a})=0.019 0$ 。以相对不确定度表示, $u_{R1rel}=0.19\%$ 。电阻分压器的灵敏度 $S_R=aS_a=964$ 。

2.1.4 D-dot 探头标定时的随机效应产生不确定度

按照 A 类不确定度评定。D-dot 探头标定时的比对测量数据见表 2, 其中, $b=V_R/V_D$ 。 b 的算术平均值为 404 , 单次测量的实验标准差 $s(b_i)=5.48$, 平均值的实验标准差 $s(\bar{b})=1.73$ 。 $u_{D1}=s(\bar{b})$, 相对不确定度 $u_{D1rel}=0.43\%$ 。D-dot 探头的灵敏度 $S_D=bS_R=389$ kV/V。

表 1 电阻分压器标定数据表

Table 1 Experimental data of calibration for resistor divider

i	V_a/V	V_R'/V	a
1	20.4	2.11	9.67
2	20.4	2.09	9.76
3	20.3	2.08	9.76
4	20.3	2.09	9.71
5	20.3	2.09	9.71
6	20.3	2.08	9.76
7	20.3	2.08	9.76
8	20.2	2.06	9.81
9	20.3	2.06	9.85
10	20.3	2.06	9.85

表 2 D-dot 探头标定数据表

Table 2 Experimental data of calibration for D-dot probe

i	V_R/V	V_D/mV	b
1	1.08	2.64	409
2	1.09	2.64	413
3	1.09	2.72	401
4	1.11	2.74	405
5	1.09	2.75	396
6	1.15	2.85	404
7	1.11	2.71	410
8	1.10	2.77	397
9	1.12	2.77	404
10	1.10	2.75	400

2.1.5 三板线入口电压测量随机效应产生的不确定度

按照 B 类不确定度评定。在装置充电 80 kV 的一发实验中, 三板线入口电压的示波器读数 $V_m=4.85$ V, 基线的宽度 $d<130$ mV, 假设测量结果在 $[V_m-d/2, V_m+d/2]$ 区间内为均匀分布。根据其概率分布, 可知不确定度 $u_1=(d/2)/\sqrt{3}=37.5$ mV。以相对不确定度表示, $u_{1rel}=0.77\%$ 。

2.1.6 分辨力不确定度

按照 B 类不确定度评定。电阻分压器标定时, V_a 的量程为 5 V/div, 满量程 $V_i=40$ V。根据式(2), 分辨力 $\delta=0.157$ V。根据式(3)可得分辨力不确定度 $u_a=0.045 3$ V。标定时 V_a 的测量值为 20.3 V, 以相对不确

定度表示, $u_{\text{drel}} = 0.22\%$ 。同理可得 V'_R, V_R, V_D 和 V_m 的分辨力不确定度分别为 $0.22\%, 0.42\%, 0.69\%$ 和 0.19% 。

2.1.7 测试和标定系统的频率响应分析

测试和标定系统包括测试探头、传输电缆和示波器。通过分析可知,影响系统频率响应的主要是测试探头。三板线电压测量使用的是 D-dot 探头,标定中使用了电阻分压器和衰减器。衰减器的标称频率响应范围是直流到 1 GHz,在电阻分压器线下标定的信号范围之内。

电阻分压器的频率响应范围没有下限,上限主要取决于分压器的阻值与对地电容的乘积^[5]。电阻分压器的响应能力可以由线下标定结果确定。图 1 是标定用的电阻分压器线下标定的测试波形。当衰减器输出信号前沿为 10 ns 时,分压器输出约 12 ns,可以大致估算电阻分压器的响应时间 $t = \sqrt{12^2 - 10^2} \text{ ns} \approx 7 \text{ ns}$ 。因此,假设在线标定时的信号前沿约 80 ns,计算分压器的输出信号为 80.3 ns(因为该前沿对应的等效频率远小于示波器和电缆的截止频率,因此用探头的响应时间代替系统响应时间进行计算),所以电阻分压器测试系统的响应符合要求。从图 1 中也可以看出:电阻分压器的波形仅仅在前(后)沿部分与衰减器波形有区别。

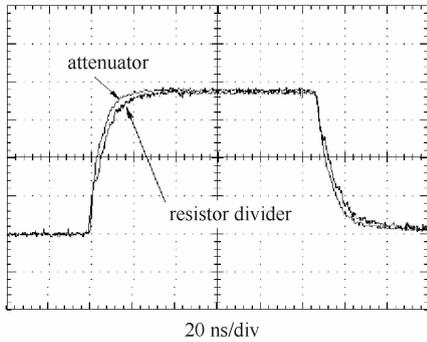


Fig. 1 Calibration signals of resistor divider and attenuator

图 1 电阻分压器标定时的波形

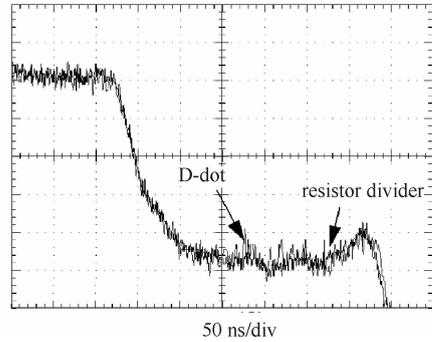


Fig. 2 Calibration signals of D-dot and resistor divider

图 2 标定时 D-dot 和电阻分压器的输出波形

D-dot 探头的频率响应上限主要由探头对地电容和等效负载电阻的乘积决定;频率响应下限由积分器时间常数决定。在水介质中进行较慢信号(μs 量级)测量时,与高压臂电容并联的等效电阻也会影响低频响应^[6]。应用该分析结合探头的设计参数^[8]可估算 D-dot 探头的响应范围在 2~500 ns 之间。从 D-dot 在线标定结果(图 2)中可以看出:在响应前沿约 80 ns 的标定信号时,D-dot 与电阻分压器的测试结果一致性较好。由于三板线电压的前沿也约为 80 ns^[8],因此该测试系统可以满足频率响应要求。另外还需要指出:在标定中,由于 D-dot 探头的输出信号较小,示波器使用的是 2 mV 档,测试信号受高频干扰造成扫描线较粗,影响到数据判读。因此对该测试通道使用了 250 MHz 的限频(估算对应前沿约 4 ns),可以获得较为满意的波形,而且对 80 ns 的标定信号不造成影响。

2.2 合成标准不确定度及扩展不确定度

将各项不确定度代入式(8)中,可得 $u_{\text{crel}} = 1.95\%$ 。由式(9)可知扩展不确定度 $U_{95} = 3.9\%$ 。因此,该发次的三板线入口电压测量结果为: $V = 1.89 \text{ MV}; U = 3.9\% (k=2, P=95\%)$ 。

3 结 论

在脉冲高电压幅值测量的不确定度评定中,从测量和标定溯源的角度出发将不确定度来源分为示波器测量的不确定度和探头不确定度。需要注意区别测量不确定度和探头不确定度的概念,在测量结果的表述中,不能使用探头不确定度来代替测量不确定度。在评定中应当给出测试和标定系统的频率响应分析,如果分析表明被测信号在测试系统的频率响应范围之内,则认为系统频响不确定度分量可以忽略。为了使各测量不确定度分量相互独立,避免使用相同示波器通道的同一个量程去测量不同的量。从 PTS 单路样机三板线电压的测量不确定度分析可知:由于探头需要经过多级标定才能溯源到相关国家计量基准,因此测量不确定度相对较大。

参考文献:

[1] GJB3756299. 测量不确定度的表示及评定[S]. (GJB3756299. Expression and evaluation of uncertainty in measurement, 1997)

- [2] 国防科工委科技与质量司. 无线电电子学计量[M]. 北京:原子能出版社, 2002. (Department of Science, Technology and Quality of COST-IND. Metrology of radio electronics. Beijing: Atomic energy press, 2002)
- [3] GB/T 16927. 1. 2-1997 高电压试验技术[S]. (GB/T 16927. 1. 2-1997 high-voltage test technique, 1997)
- [4] 杨迎建. 高压测量不确定度[J]. 高电压技术, 2002, **28**(1):19-20. (Yang Yingjian. Uncertainty in high voltage measurements. *High Voltage Engineering*, 2002, **28**(1):19-20)
- [5] 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, 2003:148-161. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical high power pulse technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003:148-161)
- [6] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计和应用[J]. 高电压技术, 2007, **33**(12):39-43. (Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high-voltage pulse measurement. *High Voltage Engineering*, 2007, **33**(12):39-43)
- [7] Struve K W. Design, calibration and performance of water diagnostics on the PBFA Z[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference, 1997:1304-1306.
- [8] 卫兵, 刘其能, 关永超, 等. 一种高功率三平板传输线电压测量探头的设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(7):1225-1228. (Wei Bing, Liu Qineng, Guan Yongchao, et al. D-dot design for the high-power triplate transmission line voltage measurement. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7):1225-1228)
- [9] 国防科工委科技与质量司. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京:中国计量出版社, 2000. (Department of Science, Technology and Quality of COSTIND. Guide to the evaluation and expression of uncertainty in measurement. Beijing: China Metrology Publishing House, 2000)
- [10] Beverly R E, Campbell R N. Aqueous-electrolyte resistors for pulsed power applications[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(12):5625-5629.
- [11] 丰树平, 李洪涛, 谢卫平, 等. Z箍缩初级实验平台模块样机[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(3):463-467. (Feng Shuping, Li Hongtao, Xie Weiping, et al. Development of prototype module of Z-pinch primary test stand. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(3):463-467)

Uncertainty in amplitude measurement of high voltage pulse

Wei Bing, Qing Yanling, Fu Zhen, Gu Yuanchao, Li Hongtao, Feng Shuping
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: Amplitude measurement uncertainty of high voltage pulse lies in the probe and oscillograph measurement. A D-dot probe has been designed to measure the voltage pulse at the input of a high-power triplate transmission line for the prototype of Z-pinch primary test stand. The uncertainty sources were analyzed. Type A evaluation of standard uncertainty was used to evaluate the random effect in calibration of the D-dot probe and the resistor divider. Type B evaluation of standard uncertainty was used to evaluate the random effect in measurement, the systematic effect of the calibration, and the uncertainty from the resolving ability of the oscillograph. The uncertainty of the attenuator and the oscillograph themselves are refer to the calibration document. The output waveform of the resistor divider in calibration was compared with that of the attenuator. And the waveform of the D-dot probe was compared with that of the resistor divider. The result proves that the signal frequency is in the frequency response range of the voltage pulse measurement system, and the corresponding uncertainty is neglected because it is so small. The standard uncertainty and combined standard uncertainty were calculated based on some experimental data, and the expanded uncertainty was given. When the Marx-bank charge voltage is 80 kV, the voltage pulse at the input of the triplate transmission line is 1.89 MV. The expanded uncertainty is 3.9% when coverage factor is 2.

Key words: high voltage pulse; measurement; calibration; uncertainty