

# 示波器测量脉冲信号测量结果的不确定度分析与评定

史永彬 于蒙 李迪

(92493 部队 89 分队 葫芦岛 125000)

**摘要:**数字示波器由于操作便捷、信号输出实时显示等优点在脉冲信号测量领域被广泛应用。以是德(原安捷伦)科技 DSO6052A 数字示波器为例,详细说明了其测量脉冲信号幅度、频率和脉宽所得结果的不确定度评定过程,并对测量结果不确定度来源进行了分析、计算,给出了评定结果的表达形式。在分析各参量不确定度对测量结果的影响程度基础上,推荐给出了提高测量精度的方法,并经实验证明了其准确可靠,能够为脉冲信号发生器检定装置建标材料撰写及脉冲信号测量结果不确定度评定提供参考借鉴。

**关键词:**脉冲信号;数字示波器;不确定度评定

**中图分类号:** TM935.4 TN781 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Analysis and evaluation of uncertainty of pulse signal measurement result by oscilloscope

Shi Yongbin Yu Meng Li Di

(Unit 92493 of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Digital oscilloscopes are widely used in the pulse signal measurement field because of its measurement method easy and intuitive. By using Keysight (formerly Agilent's) Technologies DSO6052A digital oscilloscopes, the paper introduces the measurement result uncertainty evaluation process on pulse signal amplitude, frequency and width in detail. The uncertainty sources of measurement result are analyzed. Then the measurement data are calculated and the expressions are given. To the evaluation result, each factor influencing uncertainty is analyzed. Finally the method to improve measurement accuracy is recommended in the paper. It is proved that the analysis and evaluation method is correct and effective in practice. Thus it can be taken as reference for composing pulse signal generator verification device standard report and uncertainty evaluation on pulse signal measurement result.

**Keywords:** pulse signal; digital oscilloscope; evaluation of uncertainty

### 1 引言

电子脉冲信号仪器在航天测控、通信、雷达、医学治疗等领域被广泛应用。由于数字示波器在分析、描述电信号幅度与时间的关系特征方面优势明显,精确测试各种交、直流信号,形象反映被测信号的时域特征,使其成为脉冲测量领域最为常用仪器之一,在装备科研、试验和维修过程中得到广泛使用。脉冲信号测试包括幅度、频率和脉宽等多个参量,然而,面向不同用户对用数字示波器所获测量结果的不同要求,测量结果不确定度的分析评价显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。针对该领域相关研究及参考资料较少的现状,本文选用是德(原安捷伦)科技 DSO 6052A 数字示波器为例,对脉冲信号的幅度、频率和脉冲宽度进行了测量,

并对其测量结果不确定度进行了分析评定。

### 2 测量原理及方法

用是德(原安捷伦)科技 DSO 6052A 数字示波器测量某型脉冲信号发生器的脉冲信号输出。如图 1 所示进行仪器连接,将被测脉冲信号连接示波器的 CH1 输入通道,设置合适的垂直偏转系数和水平扫描时间因数,使显示波形占整个显示屏的 80% 左右,调节触发电平,使显示波形

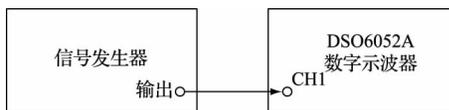


图 1 示波器测量脉冲信号原理

收稿日期:2015-09

稳定。调用示波器自动测量功能,分别测量脉冲信号幅度、频率和脉冲宽度<sup>[4]</sup>。

### 3 数学模型<sup>[5]</sup>

脉冲幅度、频率和脉冲宽度均由示波器直接读出,测量结果绝对误差:

$$\Delta Y = Y_X - Y_N$$

式中:  $\Delta Y$  — 被测脉冲的绝对误差;  $Y_X$  — 被测脉冲的标称值;  $Y_N$  — 被测脉冲的实测值。

## 4 测量结果不确定度的分析与评定

### 4.1 脉冲幅度测量结果不确定度的分析与评定

#### 4.1.1 脉冲幅度测量结果不确定度来源分析

脉冲信号幅度由数字示波器直接读出,其不确定度来源主要包括:

- 1) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_A$ , 该分量由所用仪器稳定性和随机因素而产生;
- 2) 数字示波器测量幅度的不准确而引入的标准不确定度  $u_{B1}$ ;
- 3) 数字示波器在幅度测量读数中显示分辨率引入的标准不确定度  $u_{B2}$ 。

#### 4.1.2 脉冲幅度测量结果不确定度评定

##### 1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

测量重复性引入的不确定度可以通过多次重复测量获取一组数据,并采用统计分析方法计算标准不确定度。测试中将频率为 1 kHz, 幅度为 700 mV 的脉冲信号输入示波器的 CH1, DSO 6052A 示波器的匹配阻抗设置为 50  $\Omega$ , 水平扫描时间因数设置为 200  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 垂直偏转系数设置为 100 mV/div, 调节触发电平, 使波形稳定显示。利用示波器“幅度”自动测量功能, 对幅度值进行 6 次测量获取数据如表 1 所示。

表 1 脉冲信号幅度值的测量数据

序号	测量值 $U_m$ / mV	平均值 $U_{Ave}$ / mV	实验标准偏差 $s(U_m)$ / mV
1	693.57		
2	693.53		
3	693.51		
4	693.32	693.465	0.101
5	693.36		
6	693.50		

$$u_A = \frac{s \cdot U_m}{\sqrt{n}} = \frac{0.101 \text{ mV}}{\sqrt{6}} = 0.041 \text{ mV}$$

2) 数字示波器测量幅度不准确而引入的标准不确定度  $u_{B1}$ <sup>[6]</sup>

根据 DSO 6052A 示波器说明书,  $\Delta V$  测量精度为:  $\pm 2\%$  满刻度  $\pm 0.4\%$  满刻度, 所以半宽度  $a$  为:

$$a = 2\% \times 800 \text{ mV} + 0.4\% \times 800 \text{ mV} = 19.2 \text{ mV}$$

按均匀分布取  $k = \sqrt{3}$ , 可得此项不确定度分量:

$$u_{B1} = \frac{a}{k} = \frac{19.2 \text{ mV}}{\sqrt{3}} = 11.1 \text{ mV}$$

3) 数字示波器在幅度测量读数中显示分辨率引入的标准不确定度  $u_{B2}$ <sup>[7]</sup>

数字示波器在幅度测量读数中显示分辨率引入的不确定度是由示波器 A/D 转换器的位数决定的, 由 DSO 6052A 示波器说明书中可知, 其 A/D 转换器为 8 位, 因此将屏幕垂直幅度分解为  $2^8$  个台阶, 满量程的分辨力即为: 满量程电压 / ( $2^8 - 1$ ), 当垂直偏转系数为 100 mV/div 时, 其读数分辨率为:

$$800 \text{ mV} / (2^8 - 1) = 3.14 \text{ mV}$$

半宽度:  $a = 3.14 \text{ mV} / 2 = 1.57 \text{ mV}$ , 按均匀分布取

$k = \sqrt{3}$ , 可得此项不确定度分量:

$$u_{B2} = \frac{a}{k} = \frac{1.57}{\sqrt{3}} = 0.91 \text{ mV}$$

##### 4) 合成标准不确定度 $u_C$

进行  $\Delta V$  测量由于采用双光标, 因此 DSO 6052A 示波器电平测量水平光标分辨率引入的不确定度按两次计算, 可得合成标准不确定度:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + 2u_{B2}^2} = 11 \text{ mV}$$

##### 5) 扩展不确定度 $U$

$$U = ku_C = 2 \times 11 = 22 \text{ mV} (k=2)$$

##### 6) 测量结果的最终表示。

脉冲信号幅度测量结果为 693 mV, 扩展不确定度  $U = 22 \text{ mV} (k=2)$ 。

### 4.2 脉冲频率测量结果不确定度的分析与评定

#### 4.2.1 脉冲频率测量结果不确定度来源分析

脉冲信号的频率由数字示波器直接读出, 其不确定度来源主要包括:

- 1) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_A$ , 该分量由所用仪器稳定性和随机因素而产生;
- 2) 数字示波器测量频率不准确引入的标准不确定度  $u_{B1}$ ;
- 3) 数字示波器频率测量读数中显示分辨力引入的标准不确定度  $u_{B2}$ 。

#### 4.2.2 脉冲频率测量结果不确定度评定

##### 1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

测量重复性引入的不确定度可以通过多次重复测量获取一组数据, 并采用统计分析方法计算标准不确定度。测试中将频率为 1 kHz, 幅度为 1 V 的脉冲信号输入示波器的 CH1, DSO 6052A 示波器的匹配阻抗设置为 50  $\Omega$ , 水平扫描时间因数设置为 200  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 垂直偏转系数设置为 0.2 V/div, 调节触发电平, 使波形稳定显示。利用示波器“频率”自动测量功能, 对频率值进行 6 次测量获取数据如表 2 所示。

表2 脉冲信号频率值的测量数据

序号	测量值 $f_m$ /	平均值 $f_{Ave}$ /	实验标准偏差 $s(f_m)$ /
	Hz	Hz	Hz
1	1 000		
2	1 000		
3	1 000		
4	1 000	1 000	0
5	1 000		
6	1 000		

2) 数字示波器测量频率不准确而引入的标准不确定度  $u_{B1}$  [8]

数字示波器对频率的测量是通过调用垂直双光标, 自动测量一个周期信号的  $\Delta t$ , 再根据频率与周期的倒数关系计算出频率值。当频率为 1 kHz 时,  $T = 1/f = 1/(1\,000\text{ Hz}) = 1\text{ ms}$ 。

根据 DSO 6052A 示波器说明书,  $\Delta t$  测量精确度为:  $\pm 0.0015\%$  读数  $\pm 0.01\%$  屏幕宽度  $\pm 20\text{ ps}$ , 所以半宽度  $a$  为:

$$a = 0.0015\% \times (1\text{ ms}) + 0.01\% \times (200\ \mu\text{s}) \times 10 + 20\text{ ps} = 2.015\ \mu\text{s}$$

按均匀分布取  $k = \sqrt{3}$ , 可得此项不确定度分量:

$$u_{B1T} = \frac{a}{k} = \frac{2.015\ \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 1.16\ \mu\text{s}$$

由于  $f = \frac{1}{T}$ , 可得:

$$df = -\frac{1}{T^2}dT = -\frac{1}{(1\text{ ms})^2} \times 1.16\ \mu\text{s} = -1.2\text{ Hz}$$

$$u_{B1} = 1.2\text{ Hz}$$

3) 数字示波器在频率测量中读数显示分辨率引入的标准不确定度  $u_{B2}$

通过实验可知 DSO 6052A 示波器在  $200\ \mu\text{s}/\text{div}$  档进行频率测量时分辨率为 2 Hz, 所以半宽度  $a$  为:

$a = 2\text{ Hz}/2 = 1\text{ Hz}$ , 按均匀分布取  $k = \sqrt{3}$ , 可得此项不确定度分量:

$$u_{B2} = \frac{a}{k} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58\text{ Hz}$$

4) 合成标准不确定度  $u_c$

进行  $\Delta t$  测量由于采用双光标, 因此 DSO 6052A 示波器时间测量垂直光标分辨率引入的不确定度按两次计算, 可得合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + 2u_{B2}^2} = 1.5\text{ Hz}$$

5) 扩展不确定度  $U$

$$U = ku_c = 2 \times (1.5\text{ Hz}) = 3\text{ Hz} \quad (k=2)$$

6) 测量结果的最终表示。

脉冲信号频率测量结果为 1 000 Hz, 扩展不确定度  $U = 3\text{ Hz} (k=2)$ 。

### 4.3 脉冲宽度测量结果不确定度的分析与评定

#### 4.3.1 脉冲宽度测量结果不确定度来源分析 [9]

脉冲信号的脉宽由数字示波器直接读出, 所以, 不确定度来源主要有以下 3 个方面:

1) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_A$ , 该分量由所用仪器稳定性和随机因素而产生;

2) 数字示波器测量脉冲宽度不准确而引入的标准不确定度  $u_{B1}$ ;

3) 数字示波器在脉冲宽度测量中读数显示分辨率引入的标准不确定度  $u_{B2}$ 。

#### 4.3.2 脉冲宽度测量结果不确定度评定 [10]

1) 测量重复性引入的标准不确定度  $u_A$

测量重复性引入的不确定度可以通过多次重复测量获取一组数据, 并采用统计分析方法计算标准不确定度。将频率为 1 kHz, 幅度为 1 V, 脉冲宽度为  $2\ \mu\text{s}$  的脉冲信号输入示波器的 CH1, DSO 6052A 示波器的匹配阻抗设置为  $50\ \Omega$ , 水平扫描时间因数设置为  $1\ \mu\text{s}/\text{div}$ , 垂直偏转系数设置为  $0.2\text{ V}/\text{div}$ , 调节触发电平, 使波形稳定显示。利用示波器“正脉冲宽度”自动测量功能, 对脉冲宽度值进行 6 次测量获取数据如表 3 所示。

表3 脉冲信号脉宽值的测量数据

序号	测量值 $t_m$ /	平均值 $t_{Ave}$ /	实验标准偏差 $s(t_m)$ /
	$\mu\text{s}$	$\mu\text{s}$	$\mu\text{s}$
1	1.98		
2	1.98		
3	1.98		
4	1.98	1.98	0
5	1.98		
6	1.98		

$$u_A = \frac{s \cdot t_m}{\sqrt{n}} = \frac{0}{\sqrt{6}} = 0\ \mu\text{s}$$

2) 数字示波器测量脉冲宽度不准确而引入的标准不确定度  $u_{B1}$

数字示波器测量脉冲宽度是通过调用垂直双光标自动测量  $\Delta t$ 。

根据 DSO 6052A 示波器说明书,  $\Delta t$  测量精确度为:  $\pm 0.0015\%$  读数  $\pm 0.01\%$  屏幕宽度  $\pm 20\text{ ps}$ , 所以半宽度  $a$  为:

$a = \pm 0.0015\% \times (1.98\ \mu\text{s}) + 0.01\% \times 1\ \mu\text{s} \times 10 \pm 20\text{ ps} = 0.01\ \mu\text{s}$ , 按均匀分布取  $k = \sqrt{3}$ , 可得此项不确定度分量:

$$u_{B1} = \frac{a}{k} = \frac{0.01\ \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0.0058\ \mu\text{s}$$

3) 数字示波器在脉冲宽度测量中读数显示分辨率引入的标准不确定度  $u_{B2}$

通过实验可知 DSO 6052A 示波器在  $1\ \mu\text{s}/\text{div}$  档进行脉冲宽度测量时分辨率为  $0.01\ \mu\text{s}$ , 所以半宽度  $a$  为:

$a=0.01\ \mu\text{s}/2=0.005\ \mu\text{s}$ ,按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ,可得此项不确定度分量:

$$u_{B2} = \frac{a}{k} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029\ \mu\text{s}$$

4)合成标准不确定度 $u_c$

进行 $\Delta t$ 测量由于采用双光标,因此DSO 6052A示波器时间测量垂直光标分辨率引入的不确定度按两次计算,可得合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + 2u_{B2}^2} = 0.007\ \mu\text{s}$$

5)扩展不确定度 $U$

$$U = ku_c = 2 \times 0.007 = 0.014 \approx 0.02\ \mu\text{s} (k=2)$$

6)测量结果的最终表示

脉冲信号脉冲宽度测量结果为 $1.98\ \mu\text{s}$ ,扩展不确定度 $U=0.02\ \mu\text{s}(k=2)$ 。

## 5 结 论

本文选用是德(原安捷伦)科技DSO 6052A数字示波器对脉冲信号的幅度、频率和脉冲宽度进行测量,并对所获测量结果加以不确定度评定。通过对影响测量结果不确定度的各个分量分析、计算,找到主要影响因素。基于上述实验数据及计算分析可以看出,脉冲幅度测量结果的不确定度主要是由数字示波器幅度测量不准确而产生,一般数字示波器幅度测量误差为2%,为提高脉冲信号的幅度测量精度,可用3458A数字多用表进行直流电压读取,利用其直流采样功能分别测量脉冲信号顶部和底部电压,此法可将测量结果不确定度降低一个数量级。脉冲信号频率和脉宽测量结果的不确定度主要是由数字示波器 $\Delta t$ 测量误差和垂直光标分辨率引起的,因此进行频率和脉冲宽度测量时,应选择足够小的扫描时间因数,测量频率时使整个屏幕完整显示一个周期脉冲信号,测量脉冲宽度时则使整个脉宽占显示屏宽度的20%~50%。为提高脉冲信号频率测量精度,可用频率计直接读取频率和脉冲宽度值的方法,此法测量结果不确定度能降低到 $10^{-6}$ 量级。

上述评定方法经实践证明准确可行,可为撰写脉冲信号发生器检定装置建标材料和进行脉冲信号测量结果不

确定度评定提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 谭威,曾文锋,王小兵,等.激光测距机脉宽测量技术研究[J].电子测量技术,2014,37(4):61-63.
- [2] 马亦飞.使用数字示波器之传感器和执行器测试[J].国外电子测量技术,2014,33(4):1-4,11.
- [3] 舒毅,李栋,任雍,等.数字示波器在雷达维护维修中的应用[J].气象水文海洋仪器,2012,29(2):77-80.
- [4] 管泽鑫,李文强.关于数字示波器的测量不确定度研究[J].电测与仪表,2012,49(增刊1):19-22.
- [5] 张正娟.浅析示波器校准仪方波信号的测量方法[J].电子测试,2013(6):12-14.
- [6] 夏昱,赵荣国,张峰,等.数字示波器校准的不确定度评定[J].电子测量与仪器学报,2008,22(增刊1):70-72.
- [7] 黄坤超,张靖悉,周焯,等.实时宽带示波器在快沿脉冲测量中的应用[J].电讯技术,2013,53(11):1532-1536.
- [8] 梁志国.数字存储示波器 $\Delta t$ 时间测量和 $\Delta V$ 幅度测量的不确定度评定[J].计测技术,2011,31(4):39-41,56.
- [9] 符晓明.数字存储示波器特性及其应用[J].计算技术与自动化,2011,30(1):64-66.
- [10] 沈正传,胡慧之.示波器测量脉冲信号的扩展思路[J].泰州职业技术学院学报,2010,10(3):1-2,5.

## 作 者 简 介

史永彬,1978年出生,工程师,主要研究方向为微波、脉冲等无线电参数计量与测试技术。

E-mail:395055505@qq.com.

于蒙,1982年出生,工程师,主要研究方向为微波、脉冲等无线电参数计量与测试技术。

李迪,1990年出生,助理工程师,主要研究方向为计量与测试技术。