

数字示波器上升时间的测量不确定度分析与评定

寇琼月¹ 张红² 张磊¹

(1. 91635 部队 北京 102249; 2. 上海市计量测试技术研究院 上海 201203)

摘要: 为了实现对数字示波器上升时间的测量结果的不确定度评定,根据数字示波器检定规程(GJB7691-2012)提供的方法,对数字示波器实时上升时间进行测量。分析了示波器实时上升时间的测量结果的不确定度来源,以泰克公司的 TDS3032C 数字示波器为例,详细介绍了数字示波器上升时间测量结果的不确定度的评定过程,给出了评定结果表达形式。经实践证明该方法合理、有效,可供撰写示波器检定装置建标报告和示波器上升时间不确定度评定方面参考。

关键词: 计量学;数字示波器;上升时间;不确定度评定

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Analysis and evaluation of uncertainty of rise time measurement of digital oscilloscopes

Kou Qiongyue¹ Zhang Hong² Zhang Lei¹

(1. Mailbox1014 18#, Beijing 102249, China; 2. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: In order to realize the evaluation of rise time measurement of digital oscilloscopes, according to the method of Verification regulation for digital oscilloscope, the rise time of oscilloscopes is measured. In this paper, the uncertainty sources of measurement result is analyzed. Using Tektronix's TDS3032C digital oscilloscopes as an example, the paper introduces the measurement result uncertainty evaluation process of the rise time of digital oscilloscopes, and given the evaluation results. Practice proves that the method is logical and effective, which can be referenced for writing oscilloscope verification device standard report and evaluation of rise time of oscilloscopes.

Keywords: metrology; digital oscilloscope; rise time; evaluation of uncertainty

1 引言

数字示波器是一种强大的波形测量仪器,已经被广泛应用于众多科学研究领域,为了保证数字示波器测量结果的准确,避免超出测量误差范围,给出测量结果误判,需对其进行校准。数字示波器需要校准的参数很多,如直流增益、带宽、时基、上升时间等^[1],其中,上升时间是考察示波器瞬态响应能力最为关键的参数,也是众多示波器厂商和用户一致关注的技术指标,必须对其进行校准,而校准结果的可信度由其测量结果不确定度反映。为此,本文以数字示波器上升时间为校准对象,探讨数字示波器上升时间测量结果不确定度的来源、评定分析过程,在此基础上分析给出测量结果不确定度的主要贡献分量。

2 数字示波器上升时间测量方法

数字示波器上升时间,根据实时采样、重复采样分为实

时上升时间和重复上升时间。本文以泰克公司的 TDS3032C 数字示波器为例着重讨论实时上升时间测量结果不确定度的评定。重复上升时间测量结果不确定度评定,参考实时上升时间评定方法进行。

实时上升时间的测量按照 GJB 7691-2012《数字示波器检定规程》中的要求,接线如图 1 所示,调用数字示波器出厂默认设置。选定数字示波器的测量通道、垂直偏转系数,设置为 50 Ω 、DC 耦合,触发设置为内触发、触发 DC 耦合,实时采样、平均 128 次,波形显示为正弦内插拟合。调节时基和触发电平,使数字示波器屏幕上波形稳定显示。之后,调节快速沿脉冲信号发生器输出幅度和数字示波器水平、垂直位置旋钮,使输入阶跃脉冲幅度居中覆盖约 80% 屏幕范围。不断加快水平偏转系数,使波形上升部分呈现一定的斜率,同时波形底部显示水平方向不少于两格(2div)、波形顶部显示水平方向不少于三格(3div)。

收稿日期:2015-05

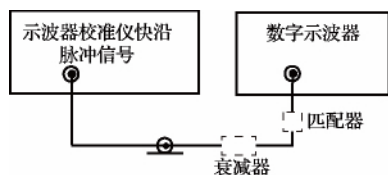


图 1 数字示波器实时上升时间测量连接图

打开数字示波器的自动测量功能,选取数字示波器 10%~90% 上升时间测量功能进行读数(读数保留到 1 ps),即为该数字示波器对应通道、垂直偏转系数的实时上升时间 t_r 。

3 数字示波器实时上升时间测量不确定度来源分析

由数字示波器上升时间的定义可知,数字示波器的上升时间与测量重复性、示波器校准仪快沿脉冲信号上升时间准确度、数字示波器幅度测量准确度以及时间测量分辨力均有关系,因此,不确定度主要来源有以下方面^[2]:

- 1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_A , 它主要是所用测量设备的稳定性和随机因素造成的^[3];
- 2) 示波器校准仪快沿脉冲信号上升时间 t_{rp} 引入的标准不确定度 u_{B1} ;
- 3) 数字示波器幅度测量引入的不确定度 $u(\Delta t)$;
- 4) 数字示波器 Δt 时间测量引入的标准不确定度 u_{B2} 。

4 实时上升时间测量结果的不确定度评定

4.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_A

数字示波器置 100 mV/div 档,示波器校准仪(9500B/9530)给数字示波器输入幅度为 500 mV,快沿为 150 ps 的方波信号,利用示波器上升时间自动测量功能,对上升时间进行 6 次重复测量,测量数据如表 1 所示^[4]。

表 1 数字示波器 100mV/div 档上升时间测量数据

测量次数 n	1	2	3	4	5	6
测量值 x_i /ps	865	862	854	860	857	851
平均值 \bar{x} /ps	858					

实验标准偏差:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 5.2 \text{ ps}$$

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{5.2}{6} = 0.87$$

4.2 示波器校准仪快沿脉冲信号上升时间引入的标准不确定度 u_{B1}

数字示波器屏幕观测到的上升时间 t_r (由示波器自动测量功能测得) 与示波器校准仪快沿脉冲上升时间 t_{rp} , 数字示波器本身的建立时间 t_{rs} 之间的关系^[4] 如下:

$$t_r = \sqrt{t_{rp}^2 + t_{rs}^2}$$

由上式可见,利用示波器自动测量功能测得的上升时

间不是真实的示波器的上升时间,示波器自身的上升时间因示波器校准仪输入快沿信号的前沿变慢,使测量结果产生误差。因此,由于示波器校准仪快沿信号上升时间影响,对示波器上升时间引入的不确定度分析如下:

设 n 为示波器校准仪的快沿信号的上升时间与示波器本身上升时间之比,即: $n = t_{rp}/t_{rs}$, $t_{rp} = nt_{rs}$, 则:

$$t_r = \sqrt{t_{rp}^2 + t_{rs}^2} = \sqrt{t_{rp}^2 + \frac{t_{rp}^2}{n^2}} = nt_{rs} \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}}$$

将 t_r 代入下式,得示波器上升时间测量相对误差为:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t_{rs}} = \frac{t_r - t_{rs}}{t_{rs}} = n \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 \quad (1)$$

由于示波器屏幕显示的上升时间 $t_r = 858$ ps, 9500B 示波器校准仪 9530 校准头快沿脉冲上升时间为 $t_{rp} = 150$ ps, 因此,示波器实际建立时间 t_{rs} :

$$t_{rs} = \sqrt{t_r^2 - t_{rp}^2} = \sqrt{858^2 - 150^2} = 845 \text{ ps}$$

$$\text{则: } n = t_{rp}/t_{rs} = 150/845 = 0.18$$

由式(1)计算示波器上升时间相对误差为:

$$\delta = n \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 = 1.6\%$$

示波器校准仪引入的不确定度分量服从均匀分布,取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$\delta = 1.6\% \times 845 = 13.5 \text{ ps}$$

示波器校准仪快沿脉冲信号引入的标准不确定度:

$$u_{B1} = \frac{\delta}{k} = 13.5/1.73 = 7.8 \text{ ps}$$

4.3 数字示波器幅度测量引入的不确定度 $u(\Delta t)$

上升时间测量过程中,需获得波形的顶值、底值,10% 和 90% 的幅度电平,因此,应评价幅度测量引入的标准不确定度分量。由于, TDS3032C 数字示波器采用密度分布众数法^[5] 获得快前沿阶跃信号的顶值 x_i 和底值 x_b (其差值为幅度值 A), 进而获得 10%、90% 快沿脉冲幅度点幅值 x_L 和 x_H 。脉冲波形幅度值点 x_L 、 x_H 对应时间轴上的 t_L 、 t_H , t_L 与 t_H 时间间隔便是数字示波器的上升时间,即 $t_r = \Delta t = t_H - t_L$, 如图 2 的说明所示。因此,数字示波器幅度测量准确度是上升时间测量结果的一个重要不确定度分量^[6]。

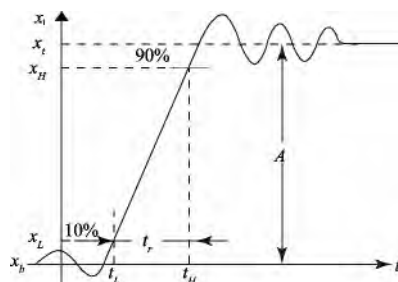


图 2 数字示波器上升时间检定波形示意

首先讨论获得波形顶值 x_i 和底值 x_b 幅度测量引入的不确定度分量,其主要来源于数字示波器垂直分辨力, TDS3032C 数字示波器垂直分辨率为 50 线/div, 垂直偏转

系数 100 mV/div 时,数字示波器垂直分辨力为 $\delta=2 \text{ mV}$, 区间半宽度 0.5δ , 认为服从均匀分布^[7]。因此,数字示波器顶值、底值引入的不确定度为:

$$u(x_b) = u(x_t) = \frac{0.5\delta}{\sqrt{3}} \text{ mV} \quad (2)$$

以下讨论基于波形顶值、底值,获得 10% 、 90% 快沿脉冲幅度测量值引入的上升时间测量不确定度分量 $u(\Delta t)$:

由上升时间的定义可知: 10% 、 90% 快沿脉冲幅度点幅值 x_L 和 x_H 分别为^[8]:

$$x_L = x_b + 0.1(x_t - x_b) = 0.9x_b + 0.1x_t \quad (3)$$

$$x_H = x_b + 0.9(x_t - x_b) = 0.1x_b + 0.9x_t \quad (4)$$

可以认为 x_b 和 x_t 不相关,则由式(3)、(4)可得:

$$dx_L = 0.9dx_b + 0.1dx_t$$

$$dx_H = 0.1dx_b + 0.9dx_t$$

x_L 和 x_H 的不确定度为:

$$u(x_L) = \sqrt{\left(\frac{\partial x_L}{\partial x_b}\right)^2 u^2(x_b) + \left(\frac{\partial x_L}{\partial x_t}\right)^2 u^2(x_t)}$$

$$u(x_H) = \sqrt{\left(\frac{\partial x_H}{\partial x_b}\right)^2 u^2(x_b) + \left(\frac{\partial x_H}{\partial x_t}\right)^2 u^2(x_t)}$$

式中: $\frac{\partial x_L}{\partial x_b} = 0.9$, $\frac{\partial x_L}{\partial x_t} = 0.1$, $\frac{\partial x_H}{\partial x_b} = 0.1$, $\frac{\partial x_H}{\partial x_t} = 0.9$ 。

$$u(x_L) = \sqrt{0.9^2 u^2(x_b) + 0.1^2 u^2(x_t)}$$

$$u(x_H) = \sqrt{0.1^2 u^2(x_b) + 0.9^2 u^2(x_t)}$$

将式(2)代入上式得:

$$u(\Delta t) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta t}{\partial t_H}\right)^2 u^2(t_H) + \left(\frac{\partial \Delta t}{\partial t_L}\right)^2 u^2(t_L) + 2 \frac{\partial \Delta t}{\partial t_H} \cdot \frac{\partial \Delta t}{\partial t_L} r(t_H, t_L) u(t_H) u(t_L)}$$

由 $\frac{\partial \Delta t}{\partial t_H} = 1$, $\frac{\partial \Delta t}{\partial t_L} = -1$, 式(8), 可得:

$$u(\Delta t) = \sqrt{u^2(t_H) + u^2(t_L) - 0.44 u(t_H) u(t_L)} = \sqrt{1.56 \times \frac{0.82(t_H - t_L)^2}{0.64(x_t - x_b)^2} u^2(x_b)} = \frac{1.42(t_H - t_L) u(x_b)}{(x_t - x_b)} = \frac{1.42 \times 858 \text{ ps}}{500 \text{ mV}} \times 0.58 \text{ mV} = 1.4 \text{ ps}$$

4.4 数字示波器 Δt 时间测量引入的标准不确定度 u_{B2}

数字示波器上升时间 $t_r = \Delta t$, 是 t_H 与 t_L 之差, 因此数字示波器时间测量准确度是上升时间测量结果的一个重要不确定度分量, 时间测量准确度主要取决于数字示波器的水平分辨力, 测量过程涉及 t_H 与 t_L 两个时刻, 因此, 引入的不确定度应是水平分辨力的两倍。TDS3032C 数字示波器水平分辨力为 50 线/div , 垂直偏转系数 2 ns/div 时, 水平分辨力为 $\delta=40 \text{ ps}$, 区间半宽度 $0.5\delta=20 \text{ ps}$, 设此区间范围分辨力引入的误差为均匀分布, 则数字示波器水平分辨力引入的不确定度为:

$$u_{B2} = \delta/\sqrt{3} = 23 \text{ ps}$$

4.5 测量结果不确定度合成与最终表达

综合以上分析, TDS3032C 数字示波器上升时间测量结果不确定度分量如表 2 所示。

$$u(x_L) = u(x_H) = \sqrt{0.82} u(x_b) \quad (5)$$

x_L 和 x_H 的协方差为:

$$u(x_L, x_H) = \frac{\partial x_L}{\partial x_b} \cdot \frac{\partial x_H}{\partial x_b} u^2(x_b) + \frac{\partial x_L}{\partial x_t} \cdot \frac{\partial x_H}{\partial x_t} u^2(x_t) = 0.09(u^2(x_b) + u^2(x_t))$$

则 x_L 和 x_H 的相关系数为:

$$r(x_L, x_H) = \frac{u(x_L, x_H)}{u(x_L) u(x_H)} = \frac{0.09(u^2(x_b) + u^2(x_t))}{(\sqrt{0.82} u(x_b))^2}$$

$$\text{由 } u(x_b) = u(x_t) \text{ 得: } r(x_L, x_H) = \frac{0.18}{0.82} = 0.22。$$

$$\text{由 } dx = x'(t)dt, \text{ 得: } u(t) = \frac{u(x)}{x'(t)}。$$

所以, t_L 和 t_H 的不确定度为:

$$u(t_L) = \frac{u(x_L)}{x'(t_L)}, u(t_H) = \frac{u(x_H)}{x'(t_H)} \quad (6)$$

由于, 快沿脉冲响应曲线在区间 $[t_L, t_H]$ 可以近似认为是一条斜线, 所以:

$$x'(t_L) = x'(t_H) \approx \frac{0.8(x_t - x_b)}{t_H - t_L} \quad (7)$$

由式(5)、(7)代入(6)式, 可得:

$$u(t_L) = u(t_H) = \frac{\sqrt{0.82}(t_H - t_L) u(x_b)}{0.8(x_t - x_b)} \quad (8)$$

用同样的方法得 t_L 和 t_H 相关系数:

$$r(t_L, t_H) = r(x_L, x_H) = \frac{u(x_L, x_H)}{u(x_L) u(x_H)} = 0.22$$

由 $\Delta t = t_H - t_L$,

表 2 TDS3032C 数字示波器上升时间测量结果不确定度分量

序号	不确定度来源	分量符号	评定方法	不确定度量值/ps
1	测量重复性引入的不确定度	u_A	A 类	0.87
2	示波器校准仪快沿脉冲信号引入的不确定度	u_{B1}	B 类	7.8
3	数字示波器幅度测量引入的不确定度	$u(\Delta t)$	B 类	1.4
4	数字示波器水平分辨力引入的不确定度	u_{B2}	B 类	23

合成标准不确定度 u_c :

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u^2(\Delta t)} = \sqrt{0.87^2 + 7.8^2 + 1.4^2 + 23^2} = 24.3 \text{ ps}$$

扩展不确定度 U :

取 $k=2$ (置信概率 $P=95\%$), 扩展不确定度: $U=$

$k \times u_c = 2 \times 24.3 = 49 \text{ ps}$ 。

数字示波器上升时间测量结果的最终表述： $t_r = 858 \text{ ps}, U = 49 \text{ ps} (k=2)$ 。

5 结 论

本文结合实例,给出了数字示波器上升时间的测量结果不确定评价分析全过程,从上述数字示波器上升时间来源及不确定度分析可见,影响评价结果的因素,主要涉及快沿信号上升时间引入的不确定度和数字示波器幅度测量、时间测量引入的不确定度,而且数字示波器时间测量是测量结果不确定度量值的主要贡献者。因此,为降低数字示波器上升时间测量结果的不确定度,除应选取尽量快的前沿信号作为标准输入信号外,还应当减小数字示波器幅度测量、时间测量引入的不确定度,这也是和被检数字示波器垂直系统、水平系统分辨力密切相关,并受其指标限制的。经实践证明该方法合理、有效,可供撰写示波器检定装置建标报告和示波器上升时间不确定度评定方面参考。

参考文献

- [1] 龚鹏伟,姜河,谌贝,等. 基于光电脉冲的取样示波器上升时间校准实验研究[J]. 宇航计测技术, 2015(01):1-4.
- [2] 叶德培,宋振国,汪贤至,等. GJB3756-1999,测量不确定度的表示及评定[M]. 北京:中国人民解放军总装备部军标出版发行部,1999,09:2-12.
- [3] 刘彬,钟明琛. 直流电子负载基本工作模式的测量不确定度评定[J]. 电子测量技术, 2012(8):42-45.
- [4] 陈玉宽,张馥生. 示波器检定装置不确定度分析评定[J]. 计量与测试技术, 2011,38(5):64-66.
- [5] 夏昱,赵国荣,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(21):70-72.
- [6] 冯继伟,柏航,黄运来. 数字示波器校准测量结果不确定度评定[J]. 计量与测试技, 2013(8):79-80.
- [7] 梁志国. 方波上升时间的测量不确定度[J]. 计测技术, 2006,36(3):43-45.
- [8] 毛春丽. 如何做好数字示波器幅值的测量审核[J]. 国外电子测量技术, 2014(8):78-81.

作者简介

寇琼月,1976年出生,高工,毕业于北京邮电大学,硕士,主要从事计量和自动化测试方面的研究。
E-mail:kqykqy@sina.com

普源推出新型 VSWR 驻波比测量电桥 VB 1032

普源精电公司(以下简称:RIGOL)宣布,将于2016年1月1日推出VB1032电桥。VB1032可用于配合RIGOL的DSA800、DSA1000系列带有内置跟踪源-TG的频谱分析仪对天线等被测件进行谐振频率点、回波损耗、反射系数、电压驻波比等与S11相关的参数进行测量。VB1032具有更好的方向性指标(10 MHz到3.2 GHz; $>=30 \text{ dB}$),可更好地满足用户对反射参数测量的需求,有着广泛的应用空间。

传统的S参数测量使用网络分析仪来进行,但网络分析仪通常价格昂贵,其普及性和使用频率远远不如频谱分析仪。近几年RIGOL在频谱分析仪领域频频出手,推出了价格万元起步的频谱分析仪,大大加快了频谱分析仪普及的脚步,使频谱分析仪已经成为硬件工程师必备的测量设备了。带有内置跟踪源的DSA800-TG和DSA1000-TG系列可以实现滤波器、电缆、放大器等传输特性的频响测试,对于反射特性的测试,则需要使用外置的测量电桥或定向耦合器来实现。电桥与频谱分析仪配合构成了标量网络分析系统,可以对被测件(DUT)的端口进行回波损耗,电压驻波比,反射系数等的快速测量。这种方法,使得您购买的频谱分析仪即可以测量信号的特性,又可以测量器件的传输和发射的标量特性,大大提高了仪器的使用效率。

测量S参数的频谱分析仪需要带跟踪源功能,RIGOL推出的DSA1000系列和DSA800系列5款频谱分析仪都有带TG的功能,DSA800系列的频率范围从9 kHz~7.5 GHz,DSA1000系列的频率范围从9 kHz~3 GHz,不仅性能指标优异,还有丰富的高级测量功能,性价比突出,充分满足工程师的应用需要。

RIGOL已经推出了多款能与带有内置跟踪源的DSA1000-TG系列和DSA800-TG系列频谱分析仪配套使用的电桥产品,包括VB1020、VB1032、VB1040、VB1080,具体如下表:

型号	类型	频率范围
VB1020	提供3个N型母头连接	1 MHz 至 2 GHz
VB1032	提供3个N(阴)型连接器	1 MHz 至 3.2 GHz
VB1040	提供3个N(阴)型连接器	800 MHz 至 4 GHz
VB1080	提供3个N(阴)型连接器四款电桥	2 GHz 至 8 GHz

使用带有内置跟踪源的RIGOL DSA1000-TG系列和DSA800-TG系列频谱分析仪与VB系列电桥的配合,可以让工程师在没有网络分析仪的情况下,也能对S信号进行测量,使射频微波工程师能够简单、顺利、经济地完成产品的开发测试工作。