

文章编号:1674-8190(2018)03-424-04

航空装备计量中脉冲上升时间测量 不确定度分析和评定

李效辉,黎琼炜,董智明

(北京航空工程技术研究中心,北京 100076)

摘要: 脉冲信号是航空装备计量保障中非常重要的基础参数,示波器校准仪检定装置是测量脉冲信号上升时间的重要标准。介绍示波器校准仪检定装置的组成,对示波器校准仪检定装置测量高速脉冲上升时间进行分析,对测量结果的不确定度进行评定。结果表明:可通过设置较小的时基、提高脉冲的输入电平等手段减小测量不确定度。研究结果可为航空装备计量技术机构编制示波器校准仪检定装置的建标报告和评定脉冲上升时间的不确定度提供参考。

关键词: 航空装备计量;高速脉冲信号;上升时间;示波校准仪检定装置;测量不确定度

中图分类号:TB973

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.018

Analysis and Evaluation of Pulse Rise Time Uncertainty in the Metrology Support for Aviation Equipment

Li Xiaohui, Li Qiongwei, Dong Zhiming

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: The pulse signal is an important basic parameter in metrology support for aviation equipment, and the calibration device of oscilloscope calibrator is an important standard for measuring the rise time of pulse signal. The composition of the measurement standard for oscilloscope calibrator is introduced, the measurement method of high speed pulse rise time is analyzed, and the uncertainty of the measurement results is evaluated. The results show that the measurement uncertainty can be reduced by setting a smaller time base and increasing the equal input power of the pulse. The uncertainty analysis of the pulse rise time can be used as a reference for compiling the measurement standard report and uncertainty analysis of oscilloscope calibrator in aviation test and calibration.

Key words: metrology support for aviation equipment; high speed pulse signal; rise time; calibration device of oscilloscope calibrator; uncertainty of measurement

0 引言

在航空装备计量保障中,脉冲信号是无线电计量保障的基础参数,其中,上升时间是脉冲信号的一个非常重要的技术指标。随着科技的不断发展,通讯、计算机技术等对脉冲参数测量的准确性要求

越来越高,脉冲测量也由原来的微秒、纳秒扩展到皮秒量级^[1]。目前,航空装备计量机构普遍建立了以示波器校准仪为核心的示波器检定装置,比较典型的是FLUKE公司的9500B型示波器校准仪,其产生的脉冲信号上升时间最快可达25 ps。新型示波器校准仪的脉冲信号上升速度非常快,普通设备很难对其进行有效测量,因此,对测量仪器和测量条件提出了更高的要求^[2]。为了实现对示波器校准仪的计量,通常利用采样示波器等设备建立示波器校准仪检定装置,采样示波器可以把高频重复信

号变成低频离散信号,从而实现高速脉冲上升时间的测量。

由于误差的存在,以及被测量自身定义和误差修正不完善等原因,被测量的真值难以准确复现,测量结果具有不确定性^[3],计量工作中经常要对测量不确定度进行分析从而对不确定性进行定量评价。目前,对上升时间的测量不确定度分析多以数字示波器为校准对象,探讨数字示波器上升时间测量结果不确定度的来源和评定过程^[4]。而以脉冲发生器的高速脉冲上升时间为校准对象的测量不确定度评定的研究,则较少。测量不确定度分析多采用 GUM 法,而当使用该方法时,不同的操作者对影响因素的考虑不同,例如,未考虑显示上升时间与真实上升时间的差异,或者未计算顶部和底部电压测量结果和时间的转换关系等,上述失误致使脉冲上升时间测量结果不确定度分析产生较大差异,最终导致测量不确定度的评定结果相差甚远。

本文对示波器校准仪检定装置测量高速脉冲上升时间进行分析,对测量结果的不确定度进行详细分析和评定,以期对航空装备计量技术机构评定脉冲上升时间的测量不确定度提供参考。

1 测量标准组成和原理

示波器校准仪检定装置由采样示波器、数字电压表、频率计、功率计、同轴电缆和转接头组成,如图 1 所示。采样示波器选用泰克公司的 TDS8200 和 80E01 模块,该示波器频带宽度可达 50 GHz,自身的上升时间为 7 ps。



图 1 示波器校准仪检定装置组成
Fig. 1 Composition of calibration device for oscilloscope calibrator

2 测量方法与数学模型

使用 TDS8200 采样示波器和 80E01 模块作

为标准对示波器校准仪的脉冲上升时间进行测量,被测设备是示波器校准仪 FLUKE9500B 带 9550 探头。遵循 JJG278-2002《示波器校准仪检定规程》,9500B 的 CH1 接 9550 探头,9550 探头通过转接器连接至 TDS8200 采样示波器的 80E01 模块,用 9500B 的触发功能输出触发信号至 TDS8200 的外触发输入通道,测量设备连接如图 2 所示。

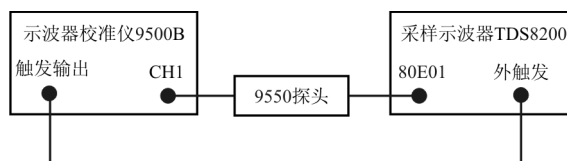


图 2 脉冲上升时间测量设备连接图

Fig. 2 Connection diagram of pulse rise time measurement

示波器校准仪设置输出快沿脉冲上升时间 25 ps、幅度 500 mV;采样示波器垂直档位 70 mV/div,水平档为 20 ps/div,设置平均为 8 次。调整触发电平使脉冲上升沿稳定显示在屏幕靠左部分,使用示波器上升时间测量功能测量并读取结果,共测量 10 次。

测量的数学模型为

$$\delta = t_x - t_0 \quad (1)$$

式中: δ 为示值误差; t_x 为 9500B 输出脉冲上升时间标称值; t_0 为 TDS8200 测得的上升时间。

3 测量结果的不确定度来源

由脉冲上升时间的定义可知,示波器时间测量准确度、幅度测量准确度均会影响测量结果;示波器自身上升时间会使实测结果并非真实的上升时间;设备的稳定性和各种随机因素也会影响测量结果。因此,脉冲上升时间测量结果不确定度的来源主要有以下 4 方面^[5]:

- (1) 测量重复性引入的不确定度,主要是测量设备的稳定性和随机因素造成的;
- (2) 示波器自身上升时间引入的不确定度;
- (3) 示波器时间间隔测量引入的不确定度;
- (4) 示波器幅度测量不准引入的不确定度。

4 不确定度评定

由于测量上升时间时采用直接测量法,在分析

不确定度时按直接测量进行评定。测量数据的分散性按 A 类方法给出不确定度 u_A , 其他因素的影响按 B 类方法给出不确定度 u_B , 计算其合成标准不确定度 u_C 及扩展不确定度 U 。

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^N u_{B_i}^2} \quad (2)$$

$$U = k u_C \quad (3)$$

式中: k 为包含因子。

4.1 测量重复性引入的不确定度

示波器校准仪设置输出快沿脉冲上升时间 25 ps, 幅度 500 mV, 采样示波器垂直档位为 70 mV/div, 水平档位为 50 ps/div, 设置平均为 8 次, 调整触发电平使脉冲上升沿稳定显示。利用示波器上升时间的自动测量功能对上升时间进行 10 次重复测量, 测量数据如表 1 所示。

表 1 25 ps、500 mV 时脉冲上升时间测量数据
Table 1 Measurement data of pulse rise time in
25 ps、500 mV

测量序号	测量值/ps	测量序号	测量值/ps
1	27.5	6	26.3
2	27.5	7	27.8
3	26.8	8	27.7
4	26.1	9	26.3
5	27.2	10	26.1

从表 1 可以看出: 10 次重复测量的平均值为 26.92 ps。

测量数据的分散性按 A 类方法给出不确定度, 根据贝塞尔公式计算实验标准偏差:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.70 \text{ ps}$$

重复性引入的不确定度可以通过计算得到^[6]。

$$u_A = \sqrt{\frac{s(x)}{n}} = 0.22 \text{ ps}$$

4.2 示波器自身上升时间引入的不确定度

示波器观测到的上升时间 t_r 、示波器校准仪输出脉冲的上升时间 t_{rp} 和示波器自身的上升时间 t_{rs} 之间的关系为^[7]

$$t_r = \sqrt{t_{rp}^2 + t_{rs}^2} \quad (4)$$

从式(4)可知, 示波器上升时间自动测量获得的结果不是真实的上升时间, 由于示波器自身上升时间的存在会导致测量结果存在误差。根据技术手册, 采样示波器自身的上升时间 t_{rs} 小于 7 ps, 示波器观测到的上升时间取测量结果的平均值 t_r , 则示波器校准仪输出的上升时间 t_{rp} 按 $t_{rp} = \sqrt{t_r^2 - t_{rs}^2}$ 计算, 由此引入的误差为 $\delta = t_r - \sqrt{t_r^2 - t_{rs}^2} = 0.93 \text{ ps}$ 。按均匀分布处理, 取区间半宽度 $a = 0.93 \text{ ps}$, 包含因子为 $k = \sqrt{3}$, 则引入的不确定度为 $u_{B1} = \frac{a}{k} = 0.53 \text{ ps}$ 。

4.3 示波器时间间隔测量引入的不确定度

根据技术说明书, TDS8200 时间间隔 Δt 测量的最大允许误差在时基小于 21 ps/div 时为 $\pm(1 \text{ ps} + 1\% \times \Delta t)$, 在时基大于等于 21 ps/div 时为 $\pm(8 \text{ ps} + 0.01\% \times \Delta t)$ 。本次测量设置的时基 20 ps/div, 取区间半宽度 $a = 1.25 \text{ ps}$, 按均匀分布处理, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则引入的不确定度为 $u_{B2} = \frac{a}{k} = 0.72 \text{ ps}$ 。

4.4 示波器幅度测量不准引入的不确定度

上升时间测量过程中, 需获得顶部幅度 V_H 、底部幅度 V_L 作为基准, 再确定脉冲波形幅度的 10% 点和 90% 点, 测出这两点对应的的时间 $t_{10\%}$ 和 $t_{90\%}$, 其时间差即为上升时间。因此, 幅度测量的不准确会影响幅度 10% 点和 90% 点的定位, 从而影响对应时间的测量。可以将脉冲的上升沿在上升段近似看成斜率为 K 的直线, 则幅度不准导致的时间间隔测量不准可以通过直线的斜率进行转换计算。上升时间 $t = K \times 0.8(V_H - V_L)$, 其中 $K = \frac{25 \text{ ps}}{0.8 \times 500 \text{ mV}} = 0.0625 \text{ ps/mV}$ 。

根据技术说明书, 幅度测量的最大允许误差为 $\pm 2 \text{ mV}$, 按均匀分布处理, 区间半宽度 $a = 2 \text{ mV}$, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则顶部和底部幅度测量不准引入的不确定度为 $u(V_H) = u(V_L) = \frac{a}{k} = 1.15 \text{ mV}$ 。根据采样示波器的测量特性, 每个点的测量均是独立的, 可以认为顶部和底部幅度的测量结果不相关, 则最终幅度测量不准引入的不确定度为

$$u_{B3} = \sqrt{(K \times 0.8)^2 u(V_H)^2 + (K \times 0.8)^2 u(V_L)^2} = 0.081 \text{ ps}。$$

4.5 测量结果不确定度的合成与表达

综上所述,采样示波器上升时间测量结果的不确定度分量如表2所示。

表2 上升时间不确定度分量

Table 2 Uncertainty component of rise time

不确定度来源	符号	评定方法	不确定度值/ps
重复性引入的不确定度	u_A	A类	0.220
示波器自身上升时间引入的不确定度	u_{B1}	B类	0.520
时间间隔测量不准引入的不确定度	u_{B2}	B类	0.720
幅度测量不准引入的不确定度	u_{B3}	B类	0.081

经计算可得合成标准不确定度 $u_C =$

$$\sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^3 u_{Bi}^2} = 0.92 \text{ ps}。$$

取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U = k u_C = 1.8 \text{ ps}$ 。

可得采样示波器测量脉冲上升时间的结果为:

$$t_r = 26.9 \text{ ps}, U = 1.8 \text{ ps} (k=2)。$$

5 结论

(1) 脉冲上升时间测量结果不确定度的来源主要包括:测量重复性引入的不确定度,示波器自身上升时间引入的不确定度,示波器时间间隔测量引入的不确定度,示波器幅度测量不准引入的不确定度。

(2) 对不确定度贡献最大的是时间间隔测量不准引入的不确定度。根据 TDS8200 采样示波器的技术说明书可知,在时基大于 21 ps/div 时,测量误差非常大,因此在设置时,应尽量设计时基小于 21 ps/div;采用其他示波器对上升时间进行测量时,也应尽量设置较小的时基,以减小时间间隔测量不准带来的影响。

(3) 在测量高速脉冲的上升时间时,应尽量选用自身上升时间远小于被测脉冲上升时间的示波器。

(4) 在其他条件不变的情况下,可以提高脉冲的输入电平,使波形更加陡峭,以减小幅度测量不准引入的不确定度。

参考文献

- [1] 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: 102.
CSTIND. Metrology of radioelectronics[M]. Beijing: Nuclear Energy Press, 2002: 102. (in Chinese)
- [2] 龚鹏伟, 姜河, 湛贝, 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, 35(1): 1-20.
Gong Pengwei, Jiang He, Shen Bei, et al. Experiments research of calibration of sampling oscilloscope risetime based on optic-electrical pulse[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(1): 1-20. (in Chinese)
- [3] 国防科工委科技与质量司. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 239.
CSTIND. Basis of metrology technology[M]. Beijing: Nuclear Energy Press, 2002: 239. (in Chinese)
- [4] 寇琼月, 张红, 张磊. 数字示波器上升时间的测量不确定度分析与评定[J]. 电子测量技术, 2016(1): 31-34.
Kou Qiongyue, Zhang Hong, Zhang Lei. Analysis and evaluation of uncertainty of rise time measurement of digital oscilloscopes [J]. Electronic Measurement Technology, 2016(1): 31-34. (in Chinese)
- [5] 叶德培, 宋振国, 汪贤至, 等. GB3756-1999 测量不确定度的表示及评定[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 1999.
Ye Depei, Song Zhenguo, Wang Xianzhi, et al. GB3756-1999 Expression and evaluation of uncertainty in measurement[S]. Beijing: PLA General Equipment Department, 1999. (in Chinese)
- [6] 叶德培, 施昌彦, 原遵东, 等. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
Ye Depei, Shi Changyan, Yuan Zundong, et al. JJF1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 郭伟民, 邓晓莉, 李莉. 关于数字示波器上升时间测量的探讨[J]. 宇航计测技术, 2003, 23(5): 31-39.
Guo Weimin, Deng Xiaoli, Li Li. Discussion about rise time of digital oscilloscope[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2003, 23(5): 31-39. (in Chinese)

作者简介:

李效辉(1983-),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空装备计量测试理论、技术和保障工程。

黎琼炜(1971-),女,博士,高级工程师。主要研究方向:航空装备计量测试理论、技术和保障工程。

董智明(1979-),男,学士,工程师。主要研究方向:航空装备计量测试理论、技术和保障工程。

(编辑:马文静)