

关于数字示波器上升时间测量的探讨

郭伟民 邓晓莉 李莉

(中国工程物理研究院计量测试中心,四川 绵阳 621900)

文 摘 上升时间是示波器的重要指标,由于工作原理的差异,影响数字示波器上升时间的因素要多于模拟示波器,我们通过一系列测试,对此作了初步探讨,提出实时上升时间与重复上升时间的概念,探讨了取样率、取样方式、拟合方式、打开通道数等因素对上升时间的影响,并探讨了与带宽的乘积关系,以及给实际应用带来的作用和影响,得出了有关结论。

主题词 * 上升时间 数字示波器 * 取样 测量 检定

Discussion about Rise Time of Digital Oscilloscope

GUO Wei - min DENG Xiao - li LI Li

(Metrology and Testing Center of China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900)

Abstract The rise time is a key feature of oscilloscope. Because of work principle difference between digital scope and analog scope, there are more factors which affect the rise time of digital oscilloscope. By serial tests, this paper makes a pilot study, putting forward concepts about real time rise time and repetitive rise time, discussing sampling rate, sampling modes, interpolation modes and active channel numbers have effects on the rise time of digital oscilloscope, still discussing the product relationship of rise time and bandwidth, and effects on applying measurements. On the basis of these, some conclusions are drawn.

Subject terms * Rise time Digital oscilloscope * Sampling Measurement Verification

1 引 言

上升时间是脉冲技术中的一项重要技术指标和参数,用示波器进行测量是常用手段,方便

收稿日期:2002-05-10

作者简介:郭伟民(1970-),男,硕士,主要从事无线电与时间频率计量工作。

而又直观。对快速脉冲,测量中应考虑示波器自身影响。因此有必要检定示波器自身的上升时间,视以往检定中的关键指标,考察示波器瞬态响应的能力。目前数字示波器应用日益广泛,工作原理明显有别于传统的模拟示波器。显然不加验证地照搬模拟示波器的观点与方法是不合适的,应加以分析。如在数字示波器的说明书中,一般各厂家将上升时间列为典型指标而非保证指标,不同于模拟示波器。有些文献^[1,2]认为数字示波器的上升时间可以不检定,而国家校准规范^[3]中列为校准项目,观点不一致,此其一。其二,实际情况表明数字示波器不同设置下上升时间有很大差异,应考虑各种因素的影响。本文即是通过各种实验对此加以探讨,对上升时间及与带宽的乘积及对应用测量的影响也进行了一定探讨。

2 测量原理

我们知道,对高斯型示波器,屏幕上显示的上升时间实际上是示波器自身上升时间与信号源上升时间的方和根,即

$$Tr_D = \sqrt{Tr_0^2 + Tr_s^2} \quad (1)$$

其中: Tr_D ——示波器屏幕显示的上升时间;

Tr_0 ——示波器自身上升时间;

Tr_s ——信号源上升时间。

对非高斯型示波器,严格说来不适用上式,理论分析及下述实验表明可将上式作为某种程度的近似。

经计算可知,当信号源上升时间是示波器上升时间的 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 倍时,将屏幕显示的上升时间当作示波器上升时间时引入的测量误差分别为 41%, 12%, 5%, 3%, 2%, 故检定时信号源上升时间宜小;当信号源上升时间是示波器上升时间的 1, 2, 3, 4, 5 倍时,则将屏幕显示的上升时间当作信号源上升时间的测量误差分别为 41%, 12%, 5%, 3%, 2%, 故应用示波器时自身上升时间宜小。

3 影响检定的因素

3.1 取样方式

我们采用足够快的脉冲对数字示波器的上升时间进行测量。先看不同取样方式下的差别。将 600 mV、150 ps 上升时间的脉冲输入到一台带宽 500 MHz、取样率 2 GS/s 的 Tek 数字示波器,知取样点间隔为 500 ps。打开一个通道,每组数据采集 10 次,并给出前两次波形(打开光标测量功能,则可对自动测量的准确性加以验证),见图 1(b)和(c)及表 1 第 3、4 列的测量数据,分别为实时取样和重复取样下的波形和数据。可以看出,实时取样下测得的上升时间比重复取样慢约 80 ps,有明显区别。同样,再将该脉冲输入到标称带宽仍为 500 MHz 的 HP 数字示波器,测量结果见表 2。可以看出,实时取样下测得的上升时间比重复取样至少慢约 200 ps。可见,不同取样方式下数据差异显著。

表1 不同取样与内插方式下所测上升时间数据对比

测量列	实时取样(2GSa/s) 线性内插(ps)	实时取样(2GSa/s) 正弦内插(ps)	重复取样(2GSa/s) 正弦内插(ps)
1	710.9	660.3	537.0
2	799.3	556.2	537.3
3	766.9	652.2	532.4
4	796.4	636.6	536.0
5	797.6	663.5	547.3
6	780.9	573.3	537.0
7	726.0	561.2	542.0
8	796.4	680.3	548.0
9	790.5	625.3	531.0
10	792.7	591.7	543.5
平均值	<u>775.8</u> 取为 776	<u>620.1</u> 取为 620	<u>539.2</u>
实验标准偏差	32	46	5.8

表2 某台 HP54540A(US35300130)2通道 200 mV/div 档上升时间(单位:ps)

测量列	重复取样	实时取样		
		打开1个通道	打开2个通道	打开4个通道
1	472	612	986	1956
2	472	724	947	1947
3	533	624	1255	1945
4	451	707	1173	2882
5	446	712	994	2349
6	512	714	1015	1954
7	462	702	1252	3013
8	468	663	957	2573
9	496	647	1428	1952
10	518	728	1044	2000
平均值	<u>483</u>	<u>683.3</u> 取为 683	<u>1105.1</u> 取为 1110	<u>2257.1</u> 取为 2260
实验标准偏差	30	43	160	420

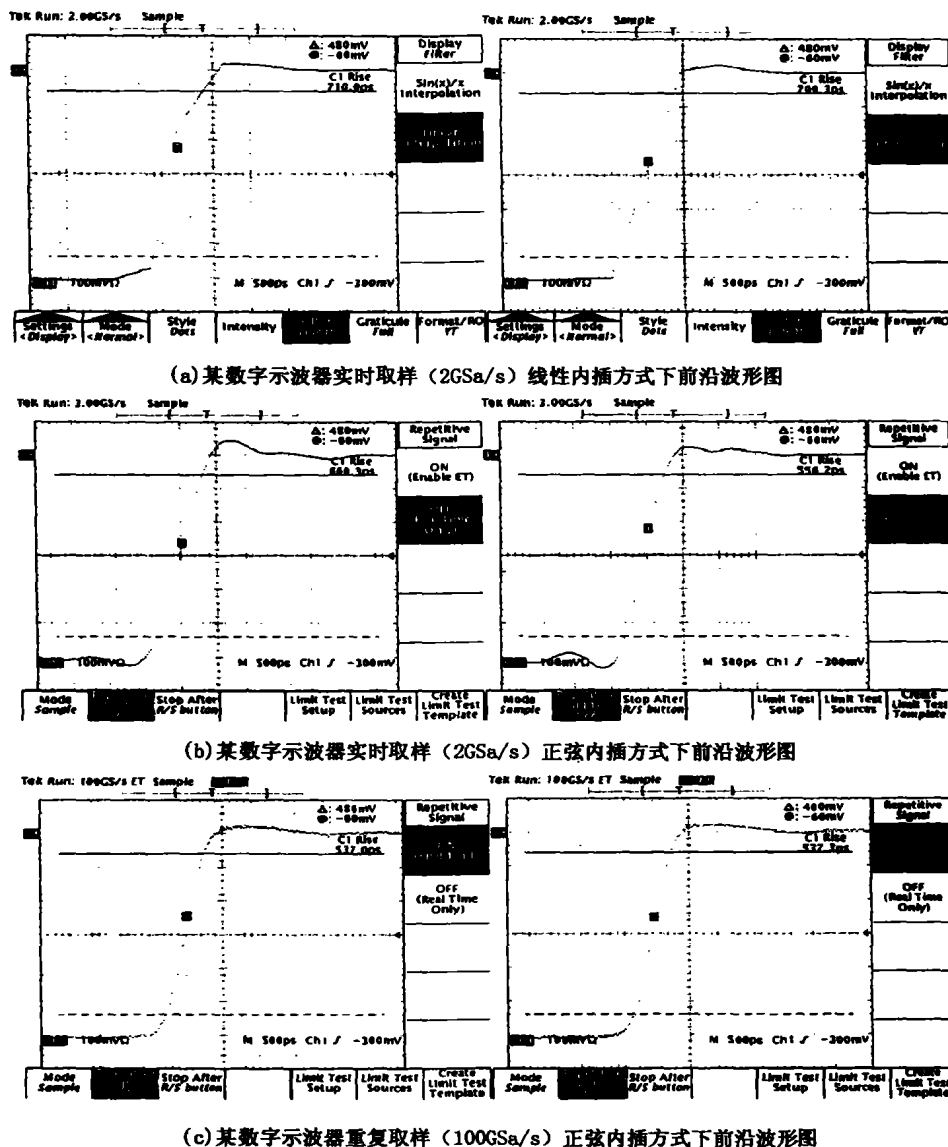


图 1 三种不同取样与波形拟合(内插)方式下前沿波形的对比图

基于这种差异,有必要将上升时间分类。与数字示波器带宽分类为实时(单次)带宽和重复(模拟)带宽相对应,上升时间依据不同的取样方式,应明确对应地区分为实时上升时间与重复上升时间。即实时上升时间为实时取样时,脉冲从其幅度的 10% 到 90% 所占用的时间;而重复(模拟)上升时间为重复取样时,脉冲从其幅度的 10% 到 90% 所占用的时间。这样不仅与带宽概念相对应,而且具有实际意义和应用价值。后者主要取决于模拟电路特性,而前者还取决于取样方式等特性,故实时上升时间 \leq 重复上升时间。厂家一般给出的是重复上升时间,而实时特性有更广泛的应用,并对应用测量造成影响。

3.2 拟合方式

我们再看不同曲线拟合方式对测量的影响。参见图 1(c),在 K 值(最高取样率与对应带

宽的比值)较大时,因取样点密集,对波形的影响很小,实测表明不同内插方式下的波形差异小,因而不必关注内插方式。因此,取样率越高越好。但不断增大 K 值是困难的,尤其是实时状态下。当 K 值较小,取样点变得稀少,不同内插方式下的波形差异则较大。从图 1(a)和图 1(b)的对比中可知不同内插方式间的明显差异,线性内插下上升时间测量值明显偏大,从表 1 第 2,3 列的测量数据知,平均比正弦内插慢约 150 ps。再与图 1(c)对比,并考虑到信号本身为 150 ps,可知正弦内插的波形(含过冲等特性)更接近真实特性(有宽带高重复取样示波器更好)。因此,从内插方式上我们以为应尽量选择正弦内插方式为妥。

3.3 打开的通道数

实时状态下,许多数字示波器在部分通道工作时采用了分时取样的技术,将未用通道的资源贡献给正在使用的通道,因而取样率较高,上升时间较快,实时带宽较高。当打开的通道数增多时,取样率随之下降,引起上升时间和实时带宽指标的下降。一般打开 1 个通道与 2 个通道不同,打开 3~4 个通道又不同,指标成倍下降;也有些仅是打开 1~2 个通道与 3~4 个通道不同。Tek TDS 754D 500 MHz(B040360)和 HP 54540A 500 MHz(US35300130)数字示波器的不同上升时间见表 3。

表 3 不同取样方式下两台数字示波器的上升时间(200 mV/div)

取样方式		TDS754D 1 通道 上升时间(ps)	HP5450A 2 通道 上升时间(ps)(详见表 2)
重复取样		507	483
实时取样 (正弦内插)	打开 1 个通道	627	683
	打开 2 个通道		1 110
	打开 3~4 个通道	1 048	2 260

可见,实时取样时打开通道数不同上升时间有更为明显差异。同时,从表 3 可以看出,实时上升时间随取样率下降近似成整倍数增大(结合表 2,不确定度更为明显增大),与取样率近似成反比例(不严格),可据此对打开通道数目不同时的上升时间进行估算。

厂家说明书往往只列出了最高指标,而未分别说明,而使用时往往更倾向于打开多个通道,所以应引起特别注意。对于某些数字实时示波器,如 Tek TDS 600 系列,则与打开的通道数无关,实时性大为增强。

事实上,该因素本质上决定于取样率。随着打开通道数的增多,若取样率下降则上升时间变缓。

3.4 其他

采用自动测量的准确度将明显优于光标测量(见图 1 光标)和传统目测。但应注意:一、自动测量的幅度定义是否规范,在此基础上合理选用,如 Tek 公司针对正弦与方波有两种定义,不可混淆;二、波形顶部与底部水平方向应有足够取样点数从而不影响底部和顶部值的准确确定,在此基础上尽可能提高扫速拉开波形,保证幅值准确前提下的高分辨率,提高测量准确度。否则会因自动确定顶部或底部值的不准确,特别是含有过冲的顶部值的不准确,从而引入较大的不确定度。

另外,需要指出容易忽略的一点:不同偏转系数下的上升时间有所不同,原则上硬件电路

不同就应分别检定。以往模拟示波器检定未予以强调是因为当时快沿脉冲发生器制造水平的限制了幅度宽量程可调。检定时一般按 1-2-5 步进分档。而且,数字示波器的偏转系数可细微调整,要考虑某些特殊情况再加入个别测试点,如力科 LT374 500 MHz 数字示波器 10 mV/div ~ 1 V/div 下带宽为 500 MHz,但其中 99 mV/div 为 400 MHz,应予以检定。当清楚内部电路结构时,如衰减器何处切换,可据此更为合理地确定检定档位,在此基础上结合取样方式与通道数进行更合理的选择。

4 上升时间与带宽乘积分析

一般数字示波器说明书中给出了不同型号系列数字示波器上升时间与带宽的乘积值,由该乘积和带宽可得到计算的上升时间。该值依滤波器类型的不同而不同,如 Tek TDS600 系列数字实时示波器为 0.45 的关系, Tek 700 系列为 0.40 关系, HP54540A 为 0.35 关系。大体说来,在 0.35 ~ 0.45,甚至 0.55 之间。而模拟示波器一般为 0.35 的关系,表明了与模拟示波器的差异。但是,并未区分实时与重复取样,单通道与多通道打开等不同情况下乘积是否有差异,为此,进行了有关实验。

表 4、表 5 是两种数字示波器的测试计算实例。

表 4 TDS 754D(B040360)数字示波器上升时间 × 带宽实例(1Ch)

垂直偏转系数	实时打开 1~2 通道上升时间 (ps)	实时打开 1~2 通道带宽 (= 重复带宽) (MHz)	乘积 (实时 1~2 通道)	实时打开 3~4 通道上升时间 (ps)	实时打开 3~4 通道带宽 (MHz)	乘积 (实时 3~4 通道)	重复上升时间 (ps)	乘积 (重复取样)
1 mV/D	622	583	0.36	1011	450	0.45	633	0.37
2 mV/D	662	634	0.42	1129	450	0.51	577	0.37
5 mV/D	628	600	0.38	1037	450	0.47	545	0.33
10 mV/D	583	600	0.35	1086	450	0.49	528	0.32
20 mV/D	599	650	0.39	1054	450	0.47	510	0.33
50 mV/D	614	630	0.39	1074	450	0.48	508	0.32
100 mV/D	623	630	0.39	1075	450	0.48	518	0.33
200 mV/D	627	640	0.40	1048	450	0.47	507	0.32
500 mV/D	511	620	0.32	966	450	0.43	510	0.32

考虑到垂直偏转系数较小时测量不确定度较大, 20 mV/div ~ 200 mV/div 下不确定度较小。可见,该仪器实时取样下打开 1~2 个通道时的乘积约在 0.39 左右,打开 3~4 个通道时的乘积约在 0.48 左右,而重复取样下的乘积约在 0.33 左右,有明显差异,但数值较为确定。

表 5 HP 54540A(US35300130)数字波器上升时间 × 带宽实例(2Ch 200 mV/div)

项 目	重复取样	1 个通道打开 实时取样	2 个通道打开 实时取样	4 个通道打开 实时取样
上升时间 (平均)	483 ps	683 ps	1 110 ps	2 260 ps
带宽	667 MHz	620 MHz	360 MHz	182 MHz
乘积	0.32	0.42	0.40	0.41

对该 HP 数字示波器而言,实时取样下的乘积约在 0.41 左右,而重复取样下的乘积约在 0.32 左右。也有明显差异。

综上所述,实时取样下的上升时间、带宽的乘积与重复取样相比偏大,并且,无论哪种取样方式,都并非较为严格的 0.35 关系。

实测表明,一、不同取样方式或打开通道数的不同,其乘积为较为明显差异,并非说明书中标明的单一值;二、对于取样方式和打开通道数限定的情况下,其乘积有一较为稳定数值;三、重复取样下乘积较小,实时取样下乘积较大。因此了解乘积仍有实际意义,需要了解确定不同情况下乘积具体数值。在此基础上,才能根据带宽或上升时间对另一参数做出较为准确的估计,否则一律按传统的 0.35 关系估算是粗糙的,不确定度较大。

5 不同上升时间对应用测量影响

多种上升时间的存在使数字示波器选用时考虑因素增多。在实际应用中,即使对重复信号也更多的关注查找分析异常事件,因此实时取样有着更为广泛用途。由于实时上升时间 \leq 重复上升时间,保守而又快捷的做法是尽可能查知实时上升时间,据此作为数字示波器选用依据之一。

以下用同一数字示波器以不同取样方式测量同一信号的上升时间,进行比较分析;再选用不同数字示波器;进而选用不同上升时间的信号进一步分析。仍用前述两台数字示波器进行实验。因暂缺宽带重复取样示波器,故采用 TDS 7404 4GHz 数字示波器(B020847)重复取样方式对可调前沿脉冲源(HP 8082A 2903G06282)的上升时间做出调整。Tek 示波器调用了 16 次平均测量,HP 示波器人工取均值,前者不确定度较小,后者则较大。

从表 6 第 3,4 列测量值看,当被测信号上升时间越接近数字示波器自身上升时间时(3 倍以内),不同取样方式测量数据差异越明显(754D 基本一致),且与“真值”一致性越差;当被测信号上升时间是数字示波器实时上升时间的约及 4 倍以上时,同一示波器的测量差异明显较小,相差 2% 以内,不同示波器间的测量差值略大些,2 ns 与 5 ns 时相差较大,最大差异分别为 4.5% 和 3.4%,均与“真值”更一致。因此,当被测信号上升时间大于示波器其自身上升时间 3 倍以上时,可忽略示波器上升时间影响。

表 6 数字示波器以不同取样方式测量同一被测信号所得上升时间的比较

所给信号上升时间	示波器型号	重复取样下读数	实时取样下读数(打开 1 个通道)	
			正弦内插	线性内插
1 ns (1.4~2 倍)	TDS 754D	970 ps	970 ps	1 120 ps
	HP 54540A	910 ps	950 ps	
1.5 ns (2~3 倍)	TDS 754D	1.46 ns	1.47 ns	1.57 ns
	HP 54540A	1.479 ns	1.5 ns	
2 ns (3~4 倍)	TDS 754D	1.84 ns	1.86 ns	1.89 ns
	HP 54540A	1.93 ns	1.94 ns	
3 ns (5~6 倍)	TDS 754D	3.0 ns	2.98 ns	3.04 ns
	HP 54540A	3.0 ns	3.0 ns	
5 ns (8~10 倍)	TDS 754D	4.95 ns	4.94 ns	4.96 ns
	HP 54540A	5.12 ns	5.1 ns	
10 ns (~20 倍)	TDS 754D	9.92 ns	9.98 ns	10.0 ns
	HP 54540A	10 ns	9.99 ns	

再看表格最后一列,线性内插下数据总是偏大,直至被测信号上升时间是数字示波器实时上升时间的 10 倍及以上时,数据才几乎一致。由此也可看出,为准确测计,一般情况下还是采用线性内插。

我们再看打开通道数不同对同一快脉冲测量的差异。测试数据所附括号内倍数为被测信号上升时间与示波器自身该状态下上升时间的比值。

表 7 数字示波器实时取样下打开通道数不同测量同一被测信号所得上升时间的比较

所给信号上升时间	示波器型号	打开 1 个通道	打开 2 个通道	打开 4 个通道
1 ns	TDS 754D	970 ps(1.6 倍)		1.18 ps(1 倍)
	HP 54540A	950 ps(1.5 倍)	1.4 ns(0.9 倍)	2~3 ns(0.5 倍)
1.5 ns	TDS 754D	1.47 ns(2.4 倍)		1.53 ns(1.4 倍)
	HP 54540A	1.5 ns(2.2 倍)	1.7 ns(1.4 倍)	2.2~3.2 ns(0.7 倍)
2 ns	TDS 754D	1.86 ns(3.2 倍)		1.87 ns(1.9 倍)
	HP 54540A	1.94 ns(2.9 倍)	2.01 ns(1.8 倍)	2.8 ns(0.9 倍)
3 ns	TDS 754D	3.04 ns(4.8 倍)		3.04 ns(2.9 倍)
	HP 54540A	3.0 ns(4.4 倍)	3.1 ns(2.7 倍)	3.4 ns(1.3 倍)
5 ns	TDS 754D	4.94 ns(8 倍)		4.98 ns(4.8 倍)
	HP 54540A	5.1 ns(7.4 倍)	5.2 ns(4.5 倍)	5.3 ns(2.2 倍)
10 ns	TDS 754D	9.98 ns(16 倍)		10.0 ns(10 倍)
	HP 54540A	9.99 ns(15 倍)	10.1 ns(9 倍)	9.9 ns(4.4 倍)

从表 7 由下往上横向看,当被测信号上升时间越接近数字示波器任一上升时间时,测量不一致性越明显,至少被测信号上升时间接近数字示波器上升时间 3 倍及以上时,结果才显得较为准确一致。因此,对数字示波器不同状态下的上升时间要明确区分。当打开的通道数目较多时,尤其应引起注意。如 HP 54540A 500 MHz 示波器,实时状态下打开 4 个通道,测量约 10 ns 的信号时其值才较为准确;如果笼统地不加区分且按常规的 0.35 关系分析,500 MHz 示波器上升时间为 700 ps,得出测量 2 ns 信号就较为准确的结论,从而大大偏离实际情况而做出错误判断。

因此应根据具体应用情况对数字示波器做出合理的选择及设置。当被测信号上升时间接近数字示波器任一上升时间时,对不同取样与拟合方式必须加以仔细考虑,尤其是多通道实时使用时。

6 结束语

不同取样方式上升时间不同,并影响到应用测量,应区分为重复上升时间与实时上升时间。

拟合方式尽量选择正弦内插拟合方式为妥。

打开通道数的不同实时上升时间有可能不同。可观察取样率是否发生变化进行判断,并可据此进行大体估算。

上升时间受多种因素影响且具有多值性,对量值准确有重要影响,有必要检定且应区分不同情况下指标。

不同上升时间与对应带宽乘积不同,实时取样时乘积较大,重复取样时乘积较小,具有实际意义。

应用时根据信号性质及测量要求对不同取样方式和通道数加以合理选用,估算具体条件下示波器的影响,从而控制测量误差,提高测量准确度。

以上是一些初步结论。如果具备上升时间可调(或几档不同)的检定用快沿源和宽带重复取样示波器,则可进行更精细地分析与研究。如对绝大多数非高斯型的数字示波器,可仔细探讨对公式(1)的偏离程度或寻找更完善的公式。因为实际情况表明用该公式作为选择信号源或示波器的依据较为保守故可行,但作为修正公式却不妥当。

参 考 文 献

- [1] Bob Myers A Practical Look at Calibrating High - Speed DSOs Evaluation Engineering 1997(5):114 ~ 118.
- [2] 王沃伦. 宽带示波器校准的实用方案[J]. 宇航计测技术,1998(10):10 ~ 16.
- [3] 梁志国等. JJF1057 - 1998《数字存储示波器校准规范》[M]. 中国计量出版社,1999.3.