

# 数字示波器动态校准技术

杜亮

(中国一航空空导弹研究院计量测试中心, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 介绍了数字示波器的静态和动态校准项目, 并对数字示波器的部分动态校准项目作了技术分析。

**关键词:** 动态校准; 上升时间; 有效位数; 时基

## 1 动态测量与数字示波器测量特性

所谓动态测量是指为确定量的瞬时值及(或)其随时间变化的量所进行的测量。动态测量的被测量实际上是时间的函数, 由于这一特点, 动态测量中的系统影响、随机影响以及不确定度的含义及评定都与静态测量时的情况有所不同。

根据线性系统理论, 动态测量可以归结为已知系统输出和系统动态响应, 求系统的输入。由于仪器工作时常常伴随有耗费时间的过程, 所以仪器的脉冲响应函数一般都不是理想的  $\delta$  函数。它与输入卷积得到输出时, 将使输入信号的形状发生畸变, 且这种改变不可能靠对同一被测量进行多次测量来消除。如果把此时的输出作为输入的直接估计, 将产生系统偏差, 也既是信号通过系统时必然发生畸变, 理论上需要将仪器的输出与仪器的脉冲响应函数进行消卷积, 即动态修正后才能消去此畸变。

为了得到仪器的动态特性, 需要对仪器进行动态校准, 动态校准需要使用比测量仪器的动态响应更“快”的标准动态信号作为激励源。校准过程可以归结为已知系统的输入和输出, 求系统的响应特性, 能够进行此校准的设备称之为动态校准。一旦通过动态校准得到测量仪器的数学模型, 就可用于动态测量之中。

动态修正后, 动态测量不确定度可分为由测量噪声所生成的分量和由模型的不完善所生成的分量两部分, 前者的影响体现为测量结果的离散性; 而后的影响一般并不体现为测量结果的离散性。

数字示波器按测量特性分类, 主要分为:

①静态测量特性: 主要包括直流增益、直流偏移、输入阻抗、A/D 转换位数、 $\Delta V$  幅度测量误差、误差限量程、线性度等, 这是一类只须加载静态信号便可获取的性能指标, 最为基本。

②动态测量特性: 主要包括交流增益、频带宽度、时基误差、采样速率、动态有效位、信噪比、 $\Delta T$  时间

测量误差等, 可以说, 这是一类只能在加载动态信号下才能获取的指标。而上升时间、预冲、过冲、顶部不平度和建立时间等时域阶跃响应参数, 以及传递函数、幅频特性、相频特性等频域特性参数。这类只能在加载瞬态信号下才能获取指标的瞬态测量特性通常也被归并为动态测量特性的范围。

数字示波器的校准采用的是面向应用的校准思想, 如用户不仅需要测量记录静态或缓慢变化的准静态信号, 而且需要测量记录瞬变或稳态过程的交变信号, 就要求我们校准时需对其全面校准(即静态、动态校准)。

## 2 上升时间动态特性

数字示波器上升时间通常被认为是动态的, 根据示波器的带宽来评定上升时间的动态特性, 这个经验准则被众多技术人员所采用。从计量学的角度看, 上升时间通常从 10% 到 90% 来定义的, 也就是阶跃响应从幅度的 10% 上升到 90% 所持续的时间。由公式“上升时间 =  $(0.35 \text{ 到 } 0.45) / \text{带宽}$ ”计算。例如, 1 GHz 的示波器的计算上升时间可以是 350 ps 到 450 ps。许多当今的数字示波器不校验上升时间和脉冲失真。上升时间是在时域里描述瞬态响应特性的一项重要指标, 新的模拟示波器规程中, 规定了不测频响只测带宽, 是因为在频率响应测试中,  $f_{3dB}$  以上的幅度响应以及相频特性反映出通道的高频截止特性, 而这些高频特性又能比较可靠地在垂直通道的瞬态响应测试中得到反映, 所以检定示波器垂直特性时, 如果检定了瞬态特性, 那么只检频带宽度就够了, 不然要进行频响测试。

在校准数字示波器的上升时间时, 不同的采样方式、拟合方式及打开通道数的不同其校准结果是不同的。所以应根据实际测试信号的情况合理地进行示波器的设置, 尽量减少不合理的设置给测试结果所带来的

**作者简介:** 杜亮, 男, 高级工程师, 主要从事无线电计量研究。

的误差,尤其是在多通道实时采集方式下使用及被测信号的上升时间接近示波器的上升时间时,测量时对不同采样与拟合方式必须加以考虑这些因素的影响。

不同采样方式所测上升时间不同,宜区分为重复上升时间与实时上升时间;拟合方式应尽量选择正弦内插拟合方式;打开通道数的不同实时上升时间有可能不同;上升时间受上述多种因素影响且具有多值性,对量值的准确有重要影响,实际测试时,要求用户应根据信号性质及测量要求对不同采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,从而提高测量准确度。

不适当的带宽对上升时间测量结果所带来的影响是不容忽视的,例如:1 GHz 示波器在 1.5 ns CMOS 上升时间测量中仅引入 2.6% 的幅度误差,而 500 MHz 示波器则引入 10.3% 的误差。

### 3 数字示波器的有效位数

有效位数测试用于定量表示数字示波器中 A/D 变换器的动态特性,这种测试包含许多 A/D 变换器误差来源,如非线性失真,将它们合并为一个指标。理想的模数转换器在数据转换中只引入与其转换位数相对应的量化误差。根据实际模数转换装置对正弦交流信号的采样数据,求得相应的拟合正弦曲线。将采样数据与该拟合曲线对应点数据差的均方根值,作为模数转换装置动态转换下的量化误差有效值,与该误差有效值相对应的模数转换位数定义为动态有效位数,又称有效位数。其计算公式如下:

$$\rho = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E \sin(\omega i + \theta) - d)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$BD = \log_2(E_r / (\rho \times \sqrt{12})) \quad (2)$$

式中:  $E_r$  为被测通道量程;  $E$  为拟合正弦信号幅度;  $d$  为拟合信号的直流分量值;  $\rho$  为等效噪声有效值;  $x_i$  为采集数据值;  $BD$  为动态有效位。

在有效位数测试中有各种方法,包括通常为数字示波器制造商在出厂和检验时常用的正弦曲线拟合算法。这个指标并不需要总是检定,只是有时进行,为了测量这个参数,需要有一台低失真正弦信号发生器,例如,8 bit 的 A/D 变换器需要信号源的失真度最小为

-48 dB。需要注意的是数字示波器通常给出的垂直分辨力(8 bit),并不反映它真实的性能,它的实际性能由有效位数表示,宽带数字示波器典型的有效位数是 4.6 ~ 6 位,因此测量用正弦信号发生器失真大于 -36 dB,这种测试通常在一个垂直灵敏度档(通常在 50 mV/DIV)下进行,所以需要一个输出为 200 mV ~ 300 mV 的低失真正弦信号发生器,许多示波器校准仪都能达到这个水平。

### 4 测量时基准确度

当今最好的数字示波器的时基误差是  $10 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ ,这意味着校准仪的误差为  $25 \times 10^{-6}$  m 就足够了(9500 的时基误差为  $\pm 0.25 \times 10^{-6}$ )。测量模拟示波器的时基采用梳状脉冲,数字示波器可以使用同样的梳状信号,只要脉冲信号上升沿足够快且信号的抖动较小,一般情况下,将标准时标信号输入数字示波器,通过延迟触发提高时间分辨力,来测量时基准确度。由于数字示波器基线是数字化控制的,也可以只选择几个频率点,用测量功能来测量这些点的频率和周期,这样,频率点选择的合理与否,直接关系到仪器的动态指标的校准的合理与否,根据实际使用情况合理选择校准点,非常必要。因此,校准数字示波器的时基准确度,不像模拟示波器那样,校准仪不需要提供数字示波器最快扫描速度对应的时标信号。被校数字示波器在等效采样和实时采样状态下所得到的测量值会有不同,有时会差别很大,所以应加以区分采样方式,必要时应分别测量。

### 5 结论

通过明确数字示波器的静态指标、动态指标,就可以有针对性的进行校准,制定合理实用且价廉的动态校准方案,特别是对于我们计量部门来说,可以根据实际情况,针对动态指标在现场的具体表现对数字示波器进行有侧重、有目的的校准。

### 参考文献

- [1] JJF1057-1998, 数字存储示波器校准规范[S].
- [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.