

通用示波器计量规程规范述评



梁志国, 商佳尚

北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术国家重点实验室, 北京 100095

【摘要】 综述了现行有效的通用示波器检定规程和校准规范, 涵盖模拟示波器和数字示波器, 对各自的计量校准和检定项目设置、技术思想以及计量技术特点进行了全面而系统的分析。模拟示波器的计量检定, 一直是以屏幕波形的特征值直接读取法来获得其性能指标特性, 覆盖输入探头、通道放大器、扫描电路、高压电子枪、阴极射线管显示等各个部分共同作用的结果, 其波形稍纵即逝, 很难使用屏幕直接读取法以外的方式获得全面有效的计量结果; 数字示波器基于 A/D 采样技术制造, 影响其测量性能的部分主要包括输入通道放大器、采样电路、A/D 转换器等, 与显示部分的性能没有特别关系, 测量结果可以永久保存的为采样波形序列, 因而既可以通过直接屏幕读取法计量校准, 也可以使用电子计算机, 以数字信号处理方式获得性能结果。分别从技术指标的全面性与准确度、校准方法与技术手段的难易程度、自动校准手段的适宜与否、所用标准仪器的多寡等几个方面, 讨论了两类示波器检定规程及校准规范各自的优点与不足, 为上述各个规程规范的使用、修订、完善及后续计量技术研究提供了参考和借鉴。

【关键词】 计量学; 模拟示波器; 数字示波器; 检定; 校准

【中图分类号】 TB973

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2023)09-0069-06

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0226

【引用本文】 梁志国, 商佳尚. 通用示波器计量规程规范述评 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(9): 69-74.

Analysis and Review of Metrological Specifications for General-Purpose Oscilloscopes

LIANG Zhiguo, SHANG Jiashang

National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology and Calibration, Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing, 100095, China

【Abstract】 This article provides a comprehensive review of the current effective verification regulations and calibration specifications for general-purpose oscilloscopes, encompassing both analog and digital types. It systematically analyzes the metrological calibration and verification items, technical concepts, and measurement characteristics of each oscilloscope category. For analog oscilloscopes, calibration has traditionally relied on the direct reading method from screen waveforms, reflecting the combined effects of input probes, channel amplifiers, scanning circuits, high-voltage electron guns, and cathode ray tube displays. The transient nature of these waveforms makes it challenging to obtain comprehensive and effective measurements through methods other than direct screen reading. Conversely, digital oscilloscopes, built on A/D sampling technology, focus mainly on input channel amplifiers, sampling circuits, and A/D converters, with their display performance being less relevant. The measurement results, represented as saved sampling waveform sequences, allow for calibration through both direct screen reading and digital signal processing via computers. The article discusses the strengths and weaknesses of verification regulations and calibration specifications for both oscilloscope types, considering the comprehensiveness and accuracy of technical indicators, the difficulty of calibration methods and techniques, the appropriateness of automatic calibration methods, and the range of standard instruments required. The analysis provides a reference for the application, revision, improvement, and future metrological research of these regulations and specifications.

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-11-30

作者简介: 梁志国 (1962-), 北京长城计量测试技术研究所研究员, 研究方向: 数字化测量与校准、模式识别、动态校准、精确测量, 邮箱: Lzg304@sina.com。

【Key words】 metrology, analog oscilloscopes, digital oscilloscopes, verification, calibration

0 引言

示波器是一种用途极为广泛的电子仪器,主要用于对电压信号波形进行观察、显示、测量。据统计,在所有电子测量仪器中,示波器约占五分之一,由此示波器的计量校准成为特别重要的工作。

通用示波器主要有两大类:1)以纯模拟电子线路技术为基础的模拟示波器;2)以A/D转换器为核心的,以数字化测量和显示技术为特征的数字示波器,也称为数字存储示波器,其特征为,可以对测量所获得的采样波形序列进行数据存储和显示。

有关示波器校准的研究,近年来多数涉及数字示波器^[1-7],间或注重校准问题讨论^[8-11],关于具体指标和参数的校准研究依然在持续^[12-20],有关计量标准的研究^[21-22],以及及不确定度评定研究众多^[23-25]。

在我国,涉及通用示波器的计量规程规范共有3个^[26-28],它们分别是:JJG 262-1996《模拟示波器检定规程》;JJF 1057-1998《数字存储示波器校准规范》;GJB 7691-2012《数字示波器检定规程》。

若是模拟示波器,人们通常会依据JJG 262-1996执行检定或校准,而若是数字示波器的校准,其依据问题由于所涉及到的规程与规范的差异性,往往在实际工作中造成不同的理解和争议。本文后续内容,将试图从这些文件本身出发,对其进行技术特征讨论。

1 模拟示波器检定规程

模拟示波器是一种实时观测电压波形的仪器设备,包括用于显示电压波形的阴极射线管、电子枪、线性扫描控制电路,以及用于稳定显示电压波形的触发电路等等。它只能被用于观测重复性的周期电压波形,不能用于只出现一次的单次事件波形的观测^[26,29]。

由于阴极射线管中电子枪电子渡越时间的限制,模拟示波器所能测量信号的带宽极限约为1 GHz左右,故能见到的大多数宽带模拟示波器的带宽仅为500 MHz以下^[30]。

上述各个组成部分的性能高低及质量优劣,例如线性扫描电路的扫描线性度,阴极射线管显示位置的线性度和噪声等,均是模拟示波器检定规程

的主要校准指标,模拟示波器检定规程将其技术特性分为四大类系统,以此体现出其全面性和系统性特征。

1) 触发系统

该部分的性能被认定为对量值准确度要求不高的辅助特性,以触发特性检查方式呈现。包括:(1)内触发同步特性检查;(2)外触发同步特性检查;(3)触发延迟时间范围检查;(4)触发延迟时间晃动比检查。该四项检查执行完毕,基本可以获得其触发同步的稳定性和触发延迟时间范围。

2) 水平系统

该部分检定特性参数包含水平时间系统的误差和线性度部分,包括:(1)扫描时间系数检定;(2)扩展扫描时间系数检定;(3) Δt 时间测量误差检定;体现出水平时间轴上的量程、误差、非线性特性。

3) 垂直系统

该部分检定特性参数包含垂直幅度系统的误差、线性度、响应特性部分,以及电路匹配特性;对应的检定包括:(1)垂直偏转系数检定(实际是直流增益误差检定);(2)垂直位移线性误差检定(实际是线性度检定);(3) ΔV 幅度测量误差检定;(4)输入电阻检定(为匹配特性检定);(5)频带宽度检定;(6)脉冲瞬态响应(上升时间、上冲量、顶部不平度、下垂量)检定。

4) 校准信号

特指示波器自身携带的用于日常检查示波器是否工作正常的方波校准信号,它可用于调整探头匹配特性的检定,对应的检定主要包括:(1)校准信号幅度检定;(2)校准信号频率检定。

共计14项检定项目,4项检查项目。全部使用屏幕直接测量读取方式进行技术操作,方法简单明确、易操作,但准确度受视觉分辨力和视觉误差等限制,不易获得高准确度结果。

模拟示波器检定所需标准仪器设备为:示波器校准仪(含时标信号发生器、直流电压源、快沿脉冲源、幅度比较器、交流电压源);稳幅正弦信号发生器;通用计数器;脉冲幅度测量仪(脉冲电压表);数字电压表;高灵敏度示波器;正弦信号发生器;功率分配器;功率计;同轴固定衰减器;电子秒表。

2 数字存储示波器校准规范

与模拟示波器不同,数字示波器并非是将所观测的信号直接引导到阴极射线管的屏幕上进行显示和观测,而是首先通过采样环节对连续的模拟电压信号波形进行等时间间隔抽样,将每一个样本点经过 A/D 转换器进行幅度量化后,转换成数据序列进行循环存储,一旦示波器被触发,则停止采样量化过程,将存储过的测量数据序列以波形方式显示到示波器屏幕上。因而,从本质上,数字示波器并非是一种实时测量仪器。并且,其数据序列一旦形成,测量误差即已经确定,与显示系统并无任何关系。由此也导致数字示波器的带宽不受显示环节的影响和制约,而依赖采样速率,目前已经有几十吉赫兹带宽的通用数字示波器产品,其带宽几乎与取样示波器相同。

如上所述,触发是结束测量的特点,导致数字示波器不仅可用于重复性周期信号波形的观测,也适用于只出现一次的单次信号波形的获取、显示和测量。当然,这也完全依赖于其强大而复杂的触发系统的触发功能与性能的保障。正因如此,触发功能特性在数字示波器中的地位远比其在模拟示波器中更加重要。

与模拟示波器检定规程的不同,数字示波器校准规范并未依显示特性将其分为水平系统和垂直系统,而是以 A/D 转换为核心,将其特性分为:静态特性、动态特性、瞬态特性、时基特性、矢量特性、噪声及抗干扰特性、匹配特性、触发特性,另加校准信号部分^[27,31]。

其静态特性包括:1)直流增益;2)直流偏移;3)线性度;4)误差限;5)标准差;6) ΔV 测量误差;7)垂直偏转系数及误差。

其动态特性包括:1)频带宽度;2)交流增益;3)探极衰减比;4)动态有效位数。

其瞬态特性包括:1)上升时间;2)过冲;3)顶部不平度。

其时基特性包括:1)采集速率;2)扫描时间因数;3) Δt 测量误差。

其矢量特性指:通道间延迟时间差。

其噪声及抗干扰特性包括:1)随机噪声;2)通道隔离度;3)差分输入共模抑制比。

其匹配特性指:输入电阻。

其触发特性包括:1)触发延时;2)最窄触发脉宽;3)最小触发沿斜率;4)触发幅度灵敏度。

其校准信号特性包括:1)方波幅度;2)方波

频率。

共计 28 项指标参数纳入校准。由于可以获得测量数据序列,该规范所用的校准方法使用了准确度和稳定性更高的数据处理方式,而没有依赖于被校准数字示波器自身的测量功能与算法。具体为:1)使用最小二乘直线拟合方式获得主要静态特性,如直流增益、直流偏移、线性度;2)使用正弦波最小二乘拟合方式获得动态特性等参数,如交流增益、采集速率、动态有效位数、频带宽度、通道间延迟时间差等;3)使用众数法进行阶跃响应顶值和底值估计,进而获得上升时间等瞬态响应参数;4)为了兼顾直接观察测量的传统习惯,也特别提供了一些直接屏幕观察测量方法,但仍然有一些指标参数,如动态有效位数无法绕过数据处理方式直接屏幕获取。

若参照模拟示波器指标分类方式,除了触发系统和校准信号系统外,有:

1)水平系统

包括:(1)采集速率;(2)扫描时间因数;(3) Δt 测量误差;(4)通道间延迟时间差。

2)垂直系统

包括:(1)直流增益;(2)直流偏移;(3)线性度;(4)误差限;(5)标准差;(6) ΔV 测量误差;(7)垂直偏转系数及误差;(8)频带宽度;(9)交流增益;(10)探极衰减比;(11)动态有效位数;(12)上升时间;(13)过冲;(14)顶部不平度;(15)随机噪声;(16)通道隔离度;(17)差分输入共模抑制比;(18)输入电阻。

数字示波器校准所需标准仪器设备为:

1)直流电压源;2)正弦信号发生器;3)快沿脉冲源;4)共模信号发生器;5)通用计数器;6)三角波信号发生器;7)毛刺信号发生器;8)方波信号发生器;9)数字多用表;10)电子计算机。

3 数字示波器检定规程

从所列出的检定参数看,数字示波器检定规程受 JJF1057-1998 校准规范的影响较大^[27-28],将检定项目分类为静态、动态、瞬态、噪声及抗干扰、时基、矢量、触发、匹配几方面特性,外加校准信号特性。共计有:1)直流增益;2)直流偏置;3)频带宽度;4)上升时间;5)过冲;6)本底噪声;7)通道隔离度;8)时基;9)通道间延迟时间差;10)触发灵敏度;11)输入电阻;12)输入电容;13)探极衰减比;14)校准信号幅度;15)校准信号频率。

共计 15 项指标参数纳入检定,但在指标细节上

体现出自己的特点:

1)将带宽指标细分为3种不同参数,即与采样速率直接相关的“实时带宽”,直接体现硬件频率响应特性的“重复(模拟)带宽”,体现数字化补偿技术拓展频带效应的“数字增强带宽”。

2)将瞬态阶跃响应相应细分为上述3种带宽下的参数,即“实时上升时间”、“重复上升时间”、“数字增强上升时间”。相应的过冲也是如此。

3)时基检定,沿用了模拟示波器的理念,并未使用采样速率的计量理念。由于实现的难度,采用了三种不同的方式方法。其一为使用延迟功能,使用光标读取时标误差进行时基检定,结果会受到延迟误差的影响。其二为使用降低水平偏转系数法获得欠采样信号波形方式进行时基检定,属于时基被改变的一种方式,含义受局限。其三为引出采样脉冲进行直接测量法。

4)通道间时间差检定,测量时使用变动时基测量时间差法进行检定。相当于改变了重要影响量,采样间隔的影响被忽略。

5)通道间隔度检定,没有考虑剔除本底噪声和偏移的影响因素,不易获得高精度结果。

本规程在计量思想上,完全延续了模拟示波器检定的理念,即放弃使用复杂困难的数据处理手段,全部采用屏幕直接测量读取方式获得检定结果,并适当借助于被检数字示波器自身的功能和算法给出结果。

其优点是简单、易实现、先期技术门槛低、便于推广,缺点是检定精度受到局限,使用示波器自身功能时,会造成不同厂商示波器校准结果含义存在不统一、不可控问题。另外一些参数无法用直接屏幕读取法实现检定,将造成检定项目不全。

检定所用标准仪器设备为:

1)直流电压源;2)方波信号发生器;3)时标信号发生器;4)稳幅正弦信号发生器;5)快沿脉冲信号发生器;6)合成信号发生器;7)电阻测量仪;8)频率计;9)功率计;10)LCR测试仪;11)功率分配器。

4 分析与讨论

4.1 模拟示波器检定规程

综上所述, JJG 262-1996《模拟示波器检定规程》,四大系统的规划使得其指标全面完整,全部使用屏幕读取直接测量方法进行检定,操作简洁容易,能够完全满足模拟示波器主要性能指标的计量检定

和校准需求。

其所用仪器设备较多,还可以进行优化和删减,以降低计量溯源成本。另外,其附录中有关数字示波器的项目撰写得比较简单粗略,用途有限,可以删除。

4.2 数字存储示波器校准规范

JJF 1057-1998《数字存储示波器校准规范》,其涉及的主要技术指标及参数基本齐全完整,并与模拟示波器的校准思想体现出明显不同,走的是数字化精确测量的路径,更加偏重于A/D转换器有关的性能指标^[32-35]。

其核心技术指标分别以最小二乘直线拟合,及最小二乘正弦波拟合为主实施,特点是可以高精度稳定获得所需校准的指标参数,但需要进行先期基础性软件工作的支撑,技术门槛较高。不过这也是国际通行的技术做法,有关的国际标准文件涉及到A/D转换器时,均使用最小二乘拟合方法进行计量,并无例外^[32-35]。

对于触发功能与性能参数,研究人员给予了足够重视,虽然仍无法进行众多触发功能和性能的检查、计量,例如电平触发、边沿触发、事后触发、事前触发、漏失触发、延迟触发、逻辑图触发、掉电触发、毛刺触发等多种触发形式,但仍然对于其基本的边沿、电平、脉宽和斜率等触发特性进行了定量计量。其它大多数触发功能皆来源于这些基本触发特性的组合运用。

所列的与屏幕显示测量有关的技术参数,例如, ΔV 测量误差、垂直偏转系数及误差、扫描时间因数、 Δt 测量误差,并无技术必要性,明显受模拟示波器计量思想习惯影响,可以予以删除。

另外,数字示波器的幅频响应特性曲线没有列入计量校准,属于缺失项。进而,其相频特性及传递函数等的计量校准也属于缺失项,有待未来技术发展予以解决。

有关数字示波器中众多的测量功能,由于太过复杂多样,常见的约有几十种之多,并未能被列入该规范的计量校准内容中。

例如,典型测量功能有:

1)幅度参数测量。包括求脉冲波形的极值、顶值、底值、最大值、最小值、平均值、中值、均方根值、幅度值、峰峰值、包络值;

2)时间参数测量。包括求频率、周期、上升时间、下降时间、负脉冲宽度、正脉冲宽度、面积、占

空比、延时、群延时、通道延迟；

3) 谱参数测量。包括 FFT 谱、互谱、倒谱、功率谱、功率密度；

4) 功率参数测量。包括功率因数、有功功率、无功功率；

5) 相关性参数测量。包括互相关、自相关、李萨育图形；

6) 特征参数测量。包括信号带宽、相位、抖动、眼图、直方图、信噪比、失真度等；

7) 波形运算功能。包括波形的乘、除、加、减、微分、积分。

上述包含了时域测量、统计分析、频域测量、变换域测量、平滑、数字滤波、包络分析、趋势分析等众多功能。很少有人将其用全,但多数功能被使用时,都被当作“绝对准确”的手段应用,等同于“理想的虚拟仪器”,没有误差和不确定度的信息和意识。

该校准规范校准方法选择时,充分考虑到了计量成本问题,实际上构建计量装置仅仅需要示波器校准仪、函数信号发生器、数字多用表、时间频率计数器和电子计算机几台仪器设备即可完成全部校准,废除了梳状时标脉冲信号作为标准信号检时基的做法,尽管该仪器经济便携,可自动化计量。

4.3 数字示波器检定规程

GJB 7691-2012《数字示波器检定规程》,由于刻意避免使用数据处理方式进行计量校准,只使用屏幕直接读取测量方式,无法使用模型化数据处理方法,不能应用模型参数执行校准,因而限制了其计量检定手段的发挥,未能充分彰显数字示波器的测量数据完整性优势,导致其最重要的综合性技术参数动态有效位数无法检定。

除了有效位数指标外,交流增益、采样速率、线性度、测量误差这几项极为重要的指标参数缺失,没有列入该规程,属于缺失。

另外,将带宽细分为实时带宽、重复带宽、数字增强带宽的做法,增加了计量成本且效果不明显,意义不大,可以仅计量重复带宽。上升时间和过冲也是如此,不必细化为三种,因为有关数字示波器的带宽存在多种不同定义^[30],例如:模拟带宽、数字实时带宽、单次带宽、实时带宽、有效带宽、重复带宽、存储带宽、系统带宽等,带宽很少作为精确指标特性被使用,故而全面计量意义不大,仅仅计量模拟带宽就足够了。

时基与采样速率在数字示波器中属于同一概念

内涵,采用速率检定将更加直观好用,且与测量序列直接密切相关。

通道间延迟时间差除了与信号路径有关,其测量结果的分辨力要受采样间隔的影响,故其与采样时间间隔(时基)也有关联,尤其是通道间延迟量值比较小时影响更大。故本规程中使用变动时基测时间差的做法,受采样间隔影响不易获得高精度,且变化了测量条件,将与实际测量条件不一致。

使用数字示波器相位差测量功能获得 A、B 两通道间相位差 $\Delta\phi_{AB}$ 后,再换算成通道间延迟时间差 $\Delta\tau_{AB}$ 可能效果会更好些^[27],如式(1)所示。

$$\tau_{AB} = \frac{\Delta\phi_{AB}}{2\pi f} \quad (1)$$

式中, f 为所加载的正弦信号频率; $\Delta\phi_{AB}$ 为被同时加载到 A、B 两个不同通道的同一正弦波测量序列之间的相位差。

本规程将 JJF 1057-1998 中模拟示波器特征明显的四项参数 ΔV 测量误差、垂直偏转系数及误差、扫描时间因数、 Δt 测量误差剔除是合理的。但其坚决不使用数据处理方法进行检定则是其缺点和局限,导致其检定参数不可能齐全完整,并且很不利于依据其进行自动化计量检定的实施。

另外,该规程对于触发特性的计量检定不够重视,要求比较薄弱,无法呈现一些基本的触发特性。

5 结论

从上述分析与讨论可见,有关通用示波器的 3 个规程规范,其计量指标既有公共部分,也有各自不同部分。具体的计量取舍,要看指标应用与否,以及所需的精度要求。

针对模拟示波器,无论是检定还是校准,执行模拟示波器检定规程已经足够。

针对数字示波器的检定,按规定只能执行 GJB 7691-2012。而若是校准,其选择具有多样性,若针对高精度测量用途的数字示波器, JJF 1057-1998 将是其最佳选择。

对于测量精度要求不是特别高的测量应用场合,以及仅仅是粗略定量、主要为定性观测的应用场合。或者先期工作基础比较薄弱,没能编制相应的数据处理软件,可以使用 GJB 7691-2012 执行数字示波器校准,但校准项目不够齐全。

对于仅仅是观察波形用,而不特别强调测量结果的应用场合,使用 JJG 262-1996 进行数字示波器

部分参数校准也是可行的选择。此时,其用途与模拟示波器没有本质区别。

参考文献

- [1] 汪铁华, Warren Wang. 宽带示波器校准的实用方案 [J]. 上海计量测试, 2000(2): 49-51.
- [2] 沈怀洋. 数字示波器的校准 [J]. 计量技术, 2005(5): 38-40.
- [3] 郑小云. 宽带数字存储示波器校准方法探讨 [J]. 火控雷达技术, 2000, 29(3): 54-57.
- [4] 梁志国, 曹英杰, 蔡新泉, 等. 数字存储示波器的总体评价 [J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 545-550.
- [5] 梁志国, 孙璟宇, 郁月华. 数字示波器计量校准中的若干问题讨论 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 628-632.
- [6] 方天驰, 吴石林, 汪静, 等. 数字示波器校准技术评论 [J]. 计量技术, 2013(2): 58-61.
- [7] 郭伟民, 邓晓莉, 李莉, 等. 数字示波器检定方法研究 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004, 2(1): 65-69.
- [8] 杜亮. 数字示波器计量校准与实际应用中若干问题讨论 [J]. 计量技术, 2005(6): 13-16.
- [9] 梁志国. 数字存储示波器计量标准建立中的几个问题 [J]. 宇航计测技术, 1999, 19(4): 41-46.
- [10] 杜亮. 数字示波器计量校准与应用中须注意的若干问题 [J]. 中国测试, 2005, 31(6): 72-74.
- [11] 宋剑波, 李坚, 刘洪贺, 等. 《JJF1057-1998 数字存储示波器校准规范》中扫描时间因数校准过程及存在问题探讨 [J]. 计量技术, 2013(6): 42-44.
- [12] 梁志国, 朱济杰. 数字存储示波器时基及触发特性的精确评价 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(4): 412-415.
- [13] 梁志国. 模拟示波器扫描线性的测量不确定度 [J]. 计量技术, 2005(6): 37-39.
- [14] 李孝辉, 王丹妮, 边玉敬. 示波器通道时延偏差校准与时基误差估计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(3): 75-78.
- [15] 梁志国, 孟晓风. 数字存储示波器时基失真与采样抖动的研究 [J]. 计量学报, 2008, 29(4): 358-364.
- [16] 梁志国. 数字存储示波器触发点电平和延迟的精确校准 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1403-1409.
- [17] 朱江森, 郑香蕊, 赵科佳, 等. 数字示波器宽带探头系统的校准研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 33-38.
- [18] 陈曦, 李庄伟. 关于数字示波器电压测量准确度校准方法研究 [J]. 上海计量测试, 2006, 33(5): 30-33.
- [19] 梁志国. 数字示波器大触发延迟时间的量子化测量方法 [J]. 计量学报, 2018, 39(1): 94-98.
- [20] 梁志国, 杨仁福. 数字示波器大触发延迟时间的变频测量方法 [J]. 计量学报, 2018, 39(2): 268-271.
- [21] 张文娟, 马春雷, 吕燕. 示波器校准仪自动计量检定系统的实现 [J]. 宇航计测技术, 2011, 31(3): 8-11.
- [22] 叶川, 陈强, 刘晓勇. 基于多种仪器总线多通道示波器校准系统 [J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 77-80.
- [23] 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(S2): 70-72.
- [24] 郭庆花. 示波器校准装置的不确定度评定 [J]. 电子测量与仪器学报, 2004(z1): 505-515.
- [25] 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]. 计量与测试技术, 2013, 40(8): 79-80.
- [26] 国家技术监督局. 模拟示波器检定规程: JJG 262-1996[S]. 北京: 中国计量出版社, 1996.
- [27] 国家技术监督局. 数字存储示波器校准规范: JJF1057-1998[S]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [28] 中国人民解放军总装备部. 数字示波器检定规程: GJB 7691-2012[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2012.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局. 阴极射线示波器通用规范: GB/T 6585-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [30] 梁志国, 孟晓风. 数字存储示波器的校准思想及技术述评 [J]. 测控技术, 2007, 26(6): 71-75.
- [31] 国家质量监督检验检疫总局. 数字存储示波器通用规范: GB/T 15289-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [32] IEEE. IEEE standard for digitizing waveform recorders : IEEE Std 1057-2017 [S]. New York, 2017.
- [33] IEEE. IEEE standard for terminology and test methods for Analog-to-Digital Converters : IEEE Std 1241-2000 [S]. New York, 2001.
- [34] IEEE. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters: IEEE Std 1241-2010s [S]. New York, 2011.
- [35] IEC. Performance characteristics and calibration methods for digital data acquisition systems and relevant software : IEC 62008-2005 [S]. Geneva, 2005.

本文编辑: 霍伟炜