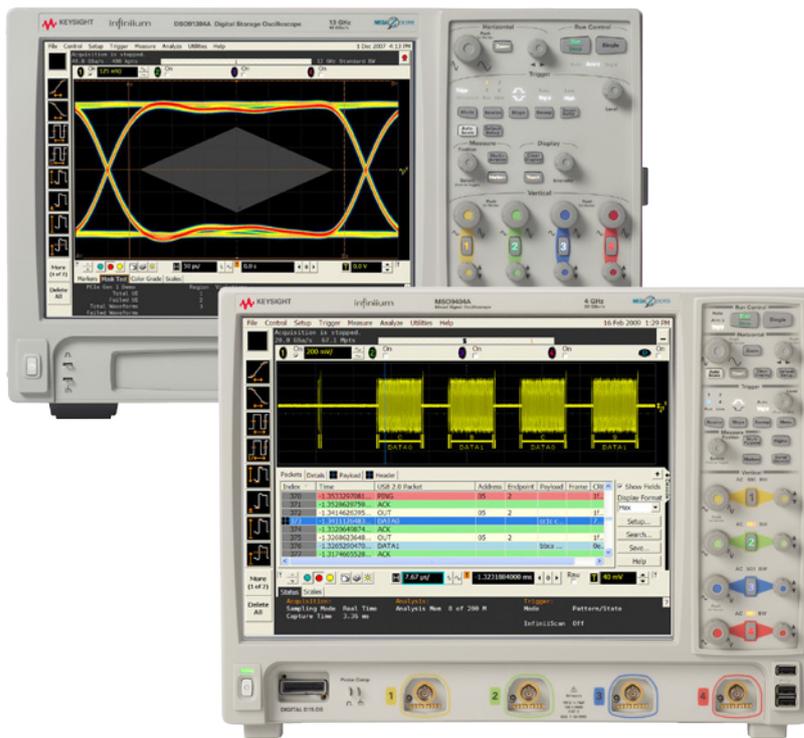


是德科技

正确理解测评示波器质量过程中所用的指标

应用指南



引言

示波器是当前任何工程师都不可或缺的工具。借助示波器的信号电压查看功能，工程师能够诊断电子设备的故障并检查科学、医疗、工程和电信等行业中各种应用所使用的电子器件。当然，选择恰当的示波器是有技巧的，需要测评其性能。带宽、采样率和存储器深度等标示技术指标为比较不同厂商的示波器提供了一个基础。然而，即使一台示波器具有优异的标示技术指标，也不见得就能提供当前工程师所需的精确测量结果。

理解示波器精度

为什么精确的性能对示波器至关重要？要想回答这个问题，需要考虑到：在工作期间，示波器的前端可以调节采集到的信号，以便模数转换器 (ADC) 对信号进行适当地数字化转换。该前端包括衰减器、前置放大器和路径路由。

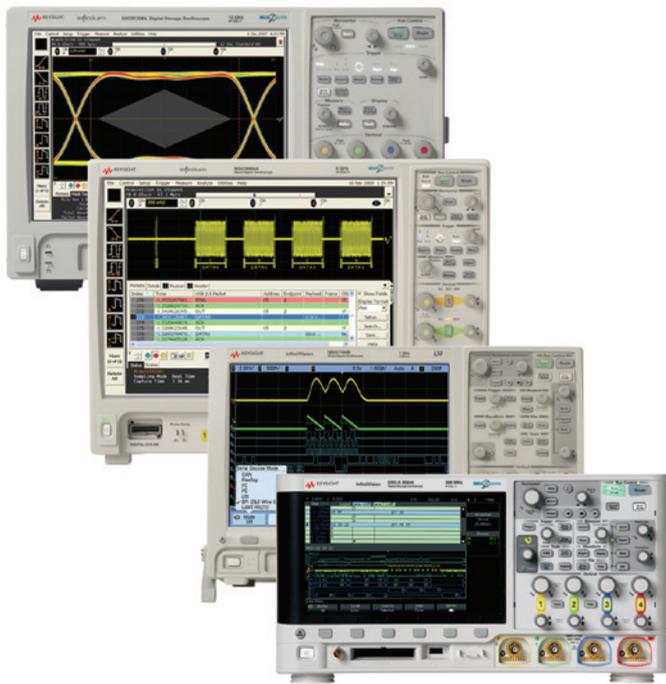
设计高精度示波器时，设计人员需要考虑整个信号路径，包括前端和 ADC 模块。他们可能需要几年的时间来设计具有平坦的频率响应、低噪声和高带宽的前端芯片。此外，由于示波器需要前沿的 ADC 技术，特别是在高 GHz 范围内工作的示波器，因此示波器厂商通常会设计自己的 ADC 芯片。此类开发设计工作需要几年的时间并需耗费几百万美元。这项投资非常值得付出努力，设计团队会尽量使前端和 ADC 技术模块在被测信号中发生最小变化，以获得最佳的示波器精度。

为了精确地测评示波器的质量，工程师必须考虑标示技术指标和非标示技术指标，例如更新速率、测量本底抖动、本底噪声和测量可重复性。有效位数 (ENOB) 是另一个技术指标，它在此次测评中非常有用，而且各个厂商通常将其宣传为测量示波器“完好性”的最好方法。工程师能否只通过 ENOB 测评示波器，或者它只是需要考虑的大量品质因数之一？让我们深入了解一下。

测评示波器测量质量

用于测评示波器测量质量的关键指标之一是本底噪声。为了确保精确的信号测量结果，示波器必须具有很低的本底噪声。要想更好地理解这一要求，我们设想如下场景：对数字信号的实时眼图进行裕量测试。在本例中，示波器噪声将降低眼图高度并影响眼图宽度，因为它会减少上升时间和增加测量本底抖动。这将导致伪噪声 (ghost noise)，而影响器件的合格或不合格测试。

通常，示波器的带宽越高，产生的内部噪声越大，因为示波器会接收来自高频的累积噪声，而窄带宽示波器的低频会抑制这些噪声。示波器噪声会添加不必要的抖动并减少设计裕量，因此精确的测量要求示波器具有较低的本底噪声。



理想状态下，应该在不同的垂直和偏置条件下，表征示波器的本底噪声。这将使工程师知道示波器前端和 ADC 转换器的噪声性能。可使用以下步骤测量示波器噪声：

1. 断开示波器通道的所有输入，与如图 1 所示的测量屏幕类似。
2. 开启一个信号通道。
3. 选择所需测量的垂直设置。例如，100 mV/div 是非常典型的垂直设置。
4. 选择采样最少 500 kpts 的数据。
5. 将时间尺度更改为 500 ns/div。注意每个厂商的时间尺度不同。确保采样率保持恒定 (图 2)。

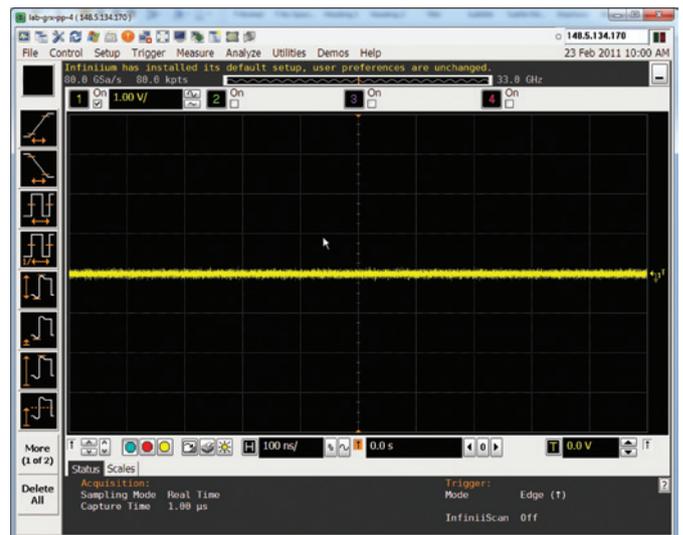


图 1. 未测量任何输入的示波器屏幕

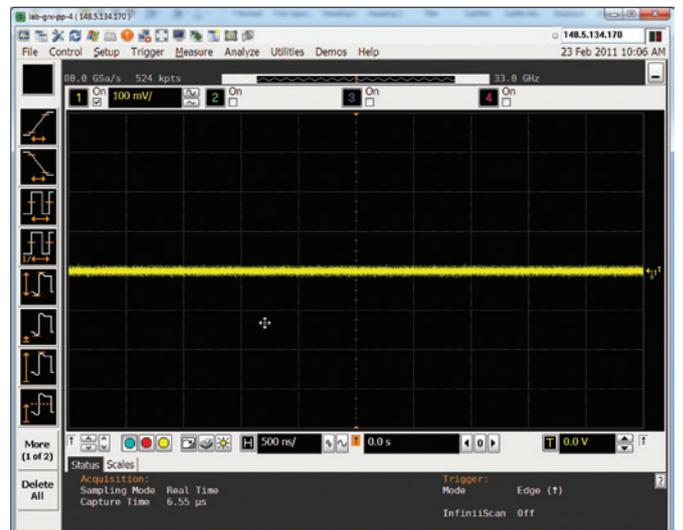


图 2. 在本例中，采样率是 80 GSa/s

测评示波器测量质量 (续)

6. 执行 AC RMS 电压测量。这项测量非常必要，因为垂直直方图并非适用于所有示波器。确保将执行的测量设置为“single cycle”。对于 Tektronix 70000C 示波器，应在示波器缺省的“pulse mode”时启动“眼图模式”。对于 LeCroy 示波器，应启动“平坦”频率响应，以确保同级比较。
7. 是德科技和 Tektronix 都提供垂直直方图功能，这是将结果与 AC RMS 测量值进行比较的最佳方法。这些厂商的示波器都能够进行垂直直方图测量。对于是德科技示波器，可通过以下选择完成测量：Analyze → Histogram → Enable Histogram → Orientation to Vertical(图 3)。使用直方图窗口的 Std Dev 测量，请注意它应与 AC RMS 测量值相同。

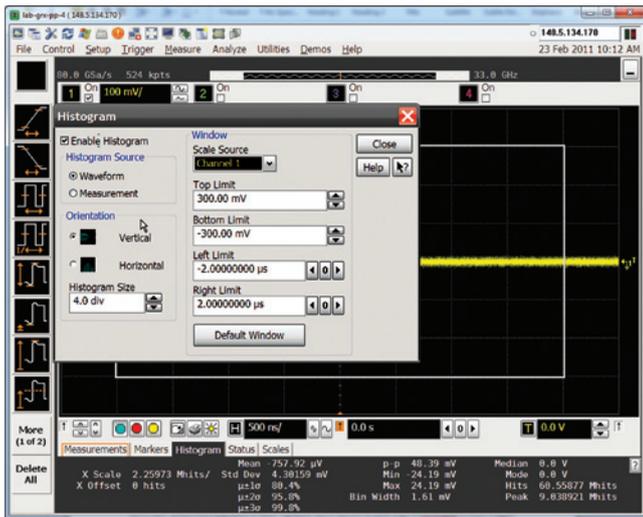


图 3. 是德科技示波器的直方图测量窗口

8. 记录测量结果。
9. 在各个带宽点重复步骤 3 到 8，以根据带宽曲线获得真实的噪声。
10. 通过将屏幕上的信号向上移动一格来更改偏置，如图 4 所示。
11. 重复第 3 步到第 9 步。

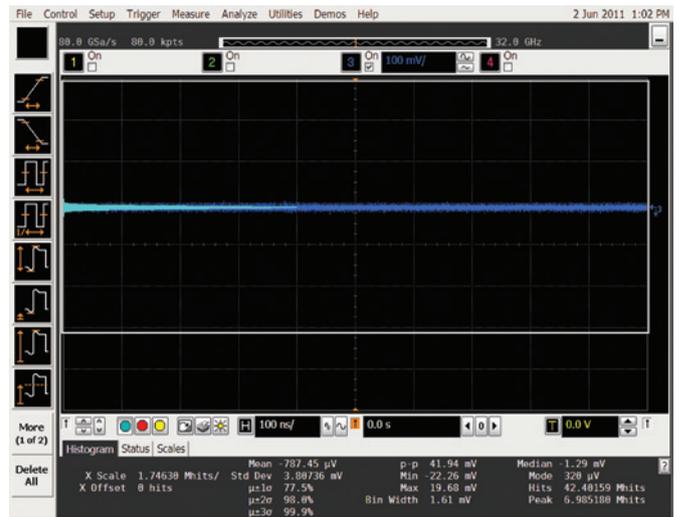


图 4. 通过将信号向上调节一格可更改偏置

理解 ENOB

虽然本底噪声技术指标在确定示波器的测量质量时非常有用，但它仍旧只是执行该项测评的一种方法。IEEE 在 20 世纪后期定义了另一种方法，依靠 ENOB 技术指标来确定示波器 ADC 的“完好性”。事实上，ENOB 总结了整个系统的位分辨率并代表频率范围内的累积误差。ENOB 随频率的增加而降低。

现代示波器通常使用两种 ADC 体系结构之一：流水线型或快闪型。流水线型 ADC 使用两个或多个分级以实现更高的采样率。例如，90000 X 系列示波器具有一个 20 GSa/s ADC，该 ADC 综合了 80 个 256 MSa/s 的分级，以实现高采样率。相比而言，快闪型 ADC 有一组比较器，可以采样并行输入信号，并且每个比较器具有各自的解码电压范围。比较器组形成一个逻辑电路，为每个电压范围生成一个编码。注：每种 ADC 技术都有其自身的局限性。快闪型 ADC 出现线性误差的几率较高，而流水线型 ADC 通常会出现更多交叉误差。

为了确定 ADC 限制，各个厂商常常表征示波器系统的总 ENOB。所得的系统 ENOB 低于独立 ADC 的 ENOB。由于示波器 ADC 是整个系统的一部分，不可独立使用，因此只有整个系统的 ENOB 结果才有用。注：ENOB 结果随频率变化，每个示波器型号都有其独有的 ENOB 图 (图 5)。

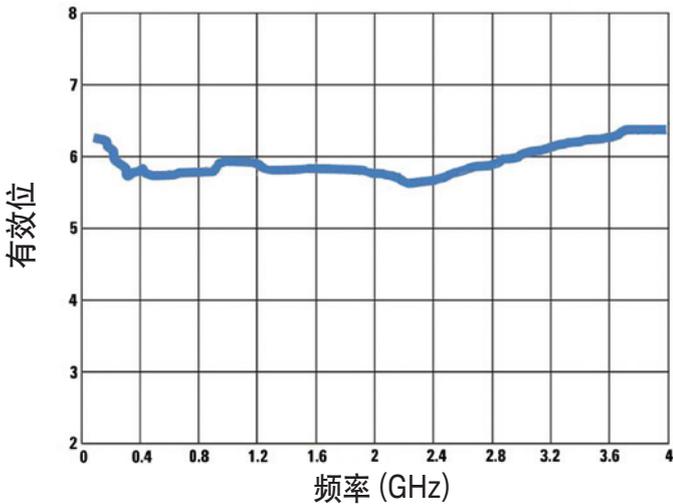


图 5. 显示 Keysight Infiniium 9000 系列示波器的实例 ENOB 图。该图显示的是整个示波器系统的 ENOB，而非示波器 8 位 ADC 的 ENOB。

大多数现代示波器通常都是 8 位，说明可以显示 256 级。尽管工程师很难实现全 8 位分辨率的示波器性能。为了最大程度地实现示波器的有效位数，信号必须使用整个垂直范围。当然，缺点是会有太多信号进入 ADC，导致信号饱和并引发不利效应。例如，对于占垂直范围 90% 的信号，工程师必须将示波器的 8 位转换器降低至 7.2 位 (0.90×8 位)。即使在最佳情况下，示波器用户通常处理的都是小于全 8 位的信号。鉴于此，以及导致示波器损耗的前端噪声、谐波失真和交叉失真等实际环境，ENOB 测量结果会进一步降级。

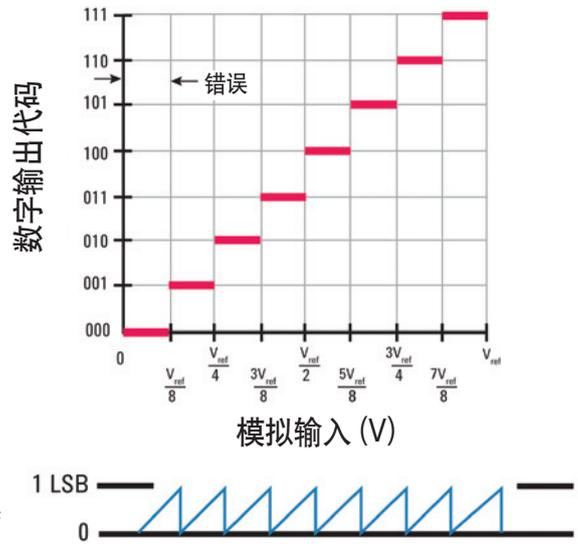


图 6. 从 0 到 1 LSB 的误差幅度范围。

图 6 显示具有高达 8 个量化电平的 3 位 ADC。在本例中，信号电压增加时，信号的量化误差也会以 $V_{ref}/(2^3)$ 增加。您可以看到的最大误差是 $V_{ref}/8$ 或 $\pm 1/2$ 最低有效位。系统拥有的位越多，误差对系统的影响越小。通过检测 8 位和 14 位 ADC 之间最大误差的差异，可以清晰地了解到这一事实 (表 1)。

表 1. 位数越多的系统受到误差的影响越小

分辨率的位数	量化电平	1 V 全量程 1 LSB =
8 位	256	3.9 mV
10 位	1,024	976 μ V
12 位	4,096	244 μ V
14 位	16,384	61 μ V

测量 ENOB

通过固定幅度正弦波进行频率扫描可测量示波器的 ENOB。然后捕获所得的电压测量结果，并使用后期处理工具（例如 MathWorks MATLAB）进行测评。用户可以在时域或频域中执行测量。使用时域方法测评信号时，通过从测得的结果中减去理论上最合适的电压 / 时间来计算 ENOB。计算相减的结果就是噪声，噪声可能来自示波器的前端，由随频率扫描的相位非线性和幅度变化等原因引起。噪声也可能来自 ADC 的交叉失真。在频域中测评相同的信号时，可以通过在整个宽带功率中减去与基带相关的功率来计算 ENOB。得出的算法如下：

1. 将射频正弦波应用于给定通道，而且频率在其带宽范围内（图 7）。
2. 注意正弦波的 V_{pp} ，因为在每一步都使用相同的信号输入非常重要。
3. 将示波器存储器深度设置为 2000 pts 并保存该文件。
4. 将文件载入到 MathWorks，并计算数据的均方误差。注：是德科技为其示波器用户提供计算均方误差和 ENOB 的脚本。
5. 在不同的正弦波频率上重复第 1 步到第 4 步，确保 V_{pp} 在每一步都相同。这是非常重要的一步，因为 V_{pp} 变化会导致 ENOB 偏高或偏低。

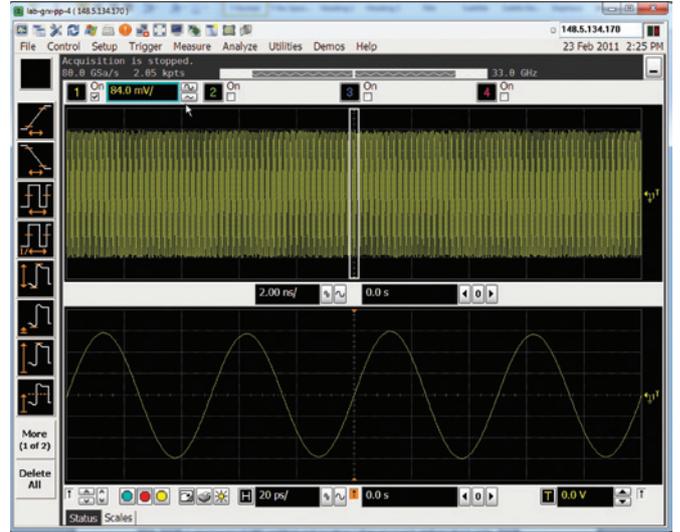


图 7. 将正弦波应用于通道，其频率可生成此波形

示波器厂商常常提醒用户在执行或分析 ENOB 测量时，所有仪器设置保持相同的重要性。如果仪器设置不同，ENOB 结果可能受到所用信号源频谱纯度的影响。信号源和相应的滤波器应确保信号源的 ENOB 大于示波器的 ENOB。其次，ENOB 值取决于源信号与示波器全屏幅度的幅度比。因此，源信号占全屏的 75%（大多数用户在这种设置下运行示波器）与占全屏的 90%（JEDEC 标准推荐）所得出的 ENOB 值是不同的。对 ENOB 进行比较或测试必须考虑测试信号幅度以及频率的影响。

使用 ENOB 衡量质量

虽然 ENOB 提供良好的测量结果，可以显示 ADC 如何受到示波器内部误差导致的外部效应的影响，但并不表示可以作为选择适当示波器的独立指标。理论上讲，如果示波器具有良好的 ENOB，它将具有最低的计时误差、频率杂散（通常由交叉失真造成）以及低宽带噪声。因此，如果一个应用主要取决于正弦波，那么可以说 ENOB 是进行示波器选择的有效指标。

不幸的是，虽然 ENOB 可以为工程师提供示波器 ADC 和前端“完好性”的指标，但它忽略了几个特性。它没有考虑偏置、相位不一致或频率响应失真，而且未包括幅度或相位平坦度效应。为了更清楚地理解这一限制，请参见图 8 中的波形，即输入信号及其在两台不同示波器上显示的波形。两台仪器具有相同的 ENOB，但其中一台仪器显示的波形更接近该输入信号。

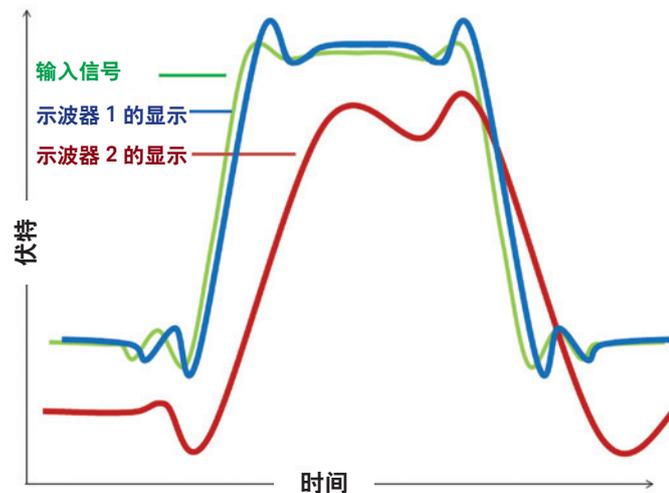


图 8. 示波器 1 和示波器 2 具有相同的 ENOB，但示波器 2 的偏置和相位失真误差限制了正确显示输入信号的能力。

ENOB 没有考虑到的另一个因素是示波器可能注入的偏置误差。鉴于此，具有相同 ENOB 的两台示波器可能显示相同的波形偏置，但绝对电压不同。在这种情况下，调整偏置、测量噪声或直流增益技术指标将提供更适宜的测评指标。

理想情况下，示波器都将具有相同的频率响应和相位。这使工程师能够在做出购买决策之前，轻松地测评仪器的性能。厂商提供的技术资料中通常不包括相位和频率图。相反，他们会使用平坦频率响应和线性相位图或高斯滚降响应和线性相位图等。每台示波器的 ENOB 都不会考虑任何频率响应或相位不一致。

假设两个标称带宽为 6 GHz 的示波器。测量同一个 2.1 GHz 正弦波时，两台仪器显示不同的波形。一台示波器可能具有较慢的带宽下降速度和最低相位校正算法，另一台示波器在幅度下降前在 6GHz 处出现峰值，且拥有大幅相位校正算法。示波器具有较高的 ENOB 并不一定就能提供更精确的输入信号显示。

总结

与本底噪声一样，ENOB 是测评示波器的基本指标之一。然而，其计算结果未考虑涉及示波器质量的许多关键参数。ENOB 能否作为选择适当示波器的指标，将取决于测量的对象及 ENOB 是否影响测量结果。例如，对于主要为基础正弦波的信号，ENOB 可作为出色的质量指标，而且工程师将想要查看针对问题示波器型号的 ENOB 图。由于 ENOB 将随频率变化，获知所选示波器在整个标称带宽内的有效位性能非常重要。

ENOB 图应与本底噪声测量结果一起考虑。这是因为高速串行数据在特定频率会出现谐波，谐波通过示波器时几乎不会受到有效位降低的影响。在这种情况下，示波器本底噪声能够更好地反映测量精度。总之，ENOB 和本底噪声指标能够确保对示波器质量进行精确的测评，从而帮助工程师选择适当的仪器。



myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
个性化视图为您提供最适合自己的信息!



www.axiestandard.org
AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) 是基于 AdvancedTCA 标准的一种开放标准, 将 AdvancedTCA 标准扩展到通用测试半导体测试领域。是德科技是 AXIe 联盟的创始成员。



www.lxistandard.org
局域网扩展仪器 (LXI) 将以太网和 Web 网络的强大优势引入测试系统中。是德科技是 LXI 联盟的创始成员。



www.pxisa.org
PCI 扩展仪器 (PXI) 模块化仪器提供坚固耐用、基于 PC 的高性能测量与自动化系统。



3年保修
www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty
是德科技卓越的产品可靠性和广泛的3年保修服务完美结合, 从另一途径帮助您实现业务目标: 增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。



是德科技保证方案
www.keysight.com/find/AssurancePlans
5年的周密保护以及持续的巨大预算投入, 可确保您的仪器符合规范要求, 精确的测量让您可以继续高枕无忧。



www.keysight.com/go/quality
Keysight Technologies, Inc.
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

是德科技渠道合作伙伴
www.keysight.com/find/channelpartners
黄金搭档: 是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息, 请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表, 请访问: www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线
热线电话: 800-810-0189、400-810-0189
热线传真: 800-820-2816、400-820-3863
电子邮件: tm_asia@keysight.com

是德科技(中国)有限公司
北京市朝阳区望京北路3号是德科技大厦
电话: 86 010 64396888
传真: 86 010 64390156
邮编: 100102

是德科技(成都)有限公司
成都市高新区南部园区天府四街116号
电话: 86 28 83108888
传真: 86 28 85330931
邮编: 610041

是德科技香港有限公司
香港北角电器道169号康宏汇25楼
电话: 852 31977777
传真: 852 25069233

上海分公司
上海市虹口区四川北路1350号
利通广场19楼
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200080

深圳分公司
深圳市福田区福华一路6号
免税商务大厦裙楼东3层3B-8单元
电话: 86 755 83079588
传真: 86 755 82763181
邮编: 518048

广州分公司
广州市天河区黄埔大道西76号
富力盈隆广场1307室
电话: 86 20 38390680
传真: 86 20 38390712
邮编: 510623

西安办事处
西安市碑林区南关正街88号
长安国际大厦D座501
电话: 86 29 88861357
传真: 86 29 88861355
邮编: 710068

南京办事处
南京市鼓楼区汉中路2号
金陵饭店亚太商务楼8层
电话: 86 25 66102588
传真: 86 25 66102641
邮编: 210005

苏州办事处
苏州市工业园区苏华路一号
世纪金融大厦1611室
电话: 86 512 62532023
传真: 86 512 62887307
邮编: 215021

武汉办事处
武汉市武昌区中南路99号
武汉保利广场18楼A座
电话: 86 27 87119188
传真: 86 27 87119177
邮编: 430071

上海MSD办事处
上海市虹口区欧阳路196号
26号楼一楼J+H单元
电话: 86 21 26102888
传真: 86 21 26102688
邮编: 200083

