

# 关于示波器的幅频特性曲线

汪进进 深圳市鼎阳科技有限公司



# 关于示波器的幅频特性曲线

汪进进

深圳市鼎阳科技有限公司

## 1, 基于 RC 理论模型的示波器幅频特性曲线

示波器的带宽被称为示波器的第一指标，而示波器的幅频特性曲线则直接证明了示波器带宽指标是否符合要求，表征了示波器模拟前端放大器的重要特性。

当示波器输入幅值恒定但频率变化的正弦波时，示波器测量到的峰峰值将随着输入频率而变化，这种幅值随频率变化的关系就是示波器的幅频特性。其实和示波器的幅频特性相对应的还有相频特性，在高端示波器信号保真度的讨论中时有提及。

从数学的角度，示波器的频率响应函数  $H(j\omega)$  等于输出  $y(t)$  的傅氏变换  $Y(j\omega)$  与输入  $x(t)$  的傅氏变换  $X(j\omega)$  的比值： $H(j\omega) = Y(j\omega) / X(j\omega)$ ，一般  $H(j\omega)$  是一个复数，它的模是“幅频特性”，它的幅角就是“相频特性”。通过对数坐标表示幅频特性的图形称为波特图。

众所周知，示波器的模拟前端放大器是低通滤波器特性。低通滤波器用一阶 RC 电路模型等效之后如图 1 所示。

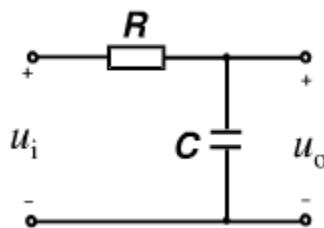


图 1 低通滤波器的一阶 RC 电路模型

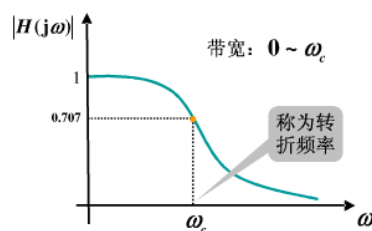


图 2 低通滤波器的幅频特性曲线

该 RC 电路的传递函数是：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

假设：

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau}$$

则传递函数可写成：

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$$

幅频特性为：

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

据此画出一阶 RC 电路的幅频特性曲线如图 2 所示。图示中的转折频率点就是输出电压降低到输入的 70.7% 的频率，也就是 -3dB 频率点。示波器的模拟带宽就是以此转折频率点来确定的。

## 2，幅频特性曲线的不同形状之八卦

特别强调的是 图 2 的幅频特性曲线只是一种基于 RC 电路推导得到的传递函数获得的理论上的幅频特性曲线，其形状是高斯响应曲线。实际上的示波器的幅频特性曲线的形状不可能是如此完美的高斯响应。不同型号的示波器可能采用了不同形状的幅频特性曲线形状，有的采用砖墙式（矩形）幅频特性曲线，有的采用四阶 Bessel 曲线，有的采用高斯曲线。但只是逼近这些理想曲线的形状。

早些年，有示波器供应商撰文强调砖墙式曲线是最完美的，因为测量低频信号幅值的失真度很小，但随之受到的攻击是砖墙式曲线的相位失真很严重，而也有示波器供应商则强调高斯曲线是最适合于测量脉冲快沿信号，因为带宽的“尾巴”很长，可以包含更多的信号能量，但受到的攻击是高斯响应是测量高速信号眼图的“梦魇”，因为高速信号的中频部分被严重衰减，但高速信号最主要的频率成分在中频部分以下。还有示波器厂商长篇累牍地说明四阶 Bessel 是最适合测量高速串行信号的。

为了可以针对不同的应用采用不同的幅频特性，有示波器供应商干脆让用户在示波器的菜单中选择某种幅频特性曲线，为此，该供应商发表了一篇严肃的技术白皮书来说明 DSP 在修正示波器模拟前端端的幅

频特性曲线形状上的应用。但是，该公司的做法在中国市场的局部竞争中又遇到麻烦，友商因此“攻击”说该公司的示波器模拟前端是用“软件”实现的，所以肯定有问题。之类云云……。这些无理无聊的攻击往往还是能被部分客户接受的。这给人的启发是，当有些示波器供应商试图通过“Marketing Talking”的工具将用户带入高级认知模式去深入了解示波器的细节的时候，可能会适得其反。

我们可以进一步推导出示波器的上升时间和带宽之间的关系： $\text{上升时间} = 0.35 / \text{带宽}$ 。这里面 0.35 也是基于 RC 电路推导的。但是，实际的示波器模拟前端并不可能是标准的 RC 电路模型，幅频特性曲线形状各异，实际的上升时间和带宽之间可能是 0.4, 0.45, 0.5 等不同的数值关系。不同的幅频特性曲线可能对应不同的上升时间。真实的示波器幅频特性曲线和上升时间都是通过计量标定得到的。

### 3，幅频特性曲线的绘制方法之江湖纷争

幅频特性曲线绘制方法，笔者在江湖上遇到过的有四种：扫频点描法，扫频 FFT 法，快沿 FFT 法，底噪 FFT 法。（需要说明一下：这些方法的命名是笔者个人定义的，大家不要去搜索这几个词了。）

其中，底噪 FFT 法就是示波器不输入任何信号，仅对示波器本底噪声做 FFT 运算，因为本底噪声是随机噪声，可能包括了各种不同的频率成分，因此其 FFT 结果的高频成份越丰富，说明示波器带宽越高。这种方法存在的漏洞非常明显，是一种典型地在中国市场上示波器供应商忽弄用户的。

真正在计量上认可的方法只有一种，就是扫频点描法。下面重点介绍这种方法。

#### 3.1，扫频点描法（幅频特性曲线的计量方法）

所谓扫频点描法就是逐渐增大示波器的输入频率，示波器测量每个频率点的电压幅值。将频率作为横坐标，每个频率点测量到的电压值作为纵坐标就绘制出幅频特性曲线。在大学实验教学中有这样的实验项目来要求学生绘制幅频特性曲线。

但是一谈到“计量”这个词，人们就会陷入鸡和蛋的深渊。该“相信”谁？相信信号源的输出幅值还是相信示波器测量的结果？溯源是关键。幅频特性曲线的“计量”需要正弦波信号源（高频时使用射频信号源），需要计量过的电缆，计量过的功分器，计量过的功率计。使用功率计是因为从计量上来说并不“相信”信号源的读数输出，而是相信功率计，因为功率计的精度远远大于示波器。使用功率计只是保证在低频和高频时的功率是一样的，并不是将功率计的结果和示波器的结果进行逐一比较。专用的示波器检测仪

器的探头上带有功率计，保证了信号源输出功率的一致，就不需要功分器了。具体计量时的连接示意图如图 3 所示。

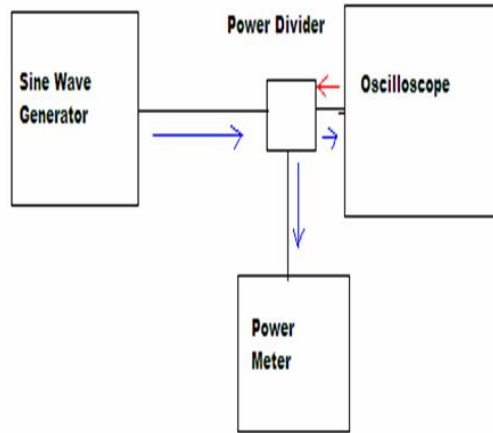


图 3 示波器幅频特性曲线的计量连接示意图

完成这样连接之后，有一种快速了解示波器的幅频特性是否满足要求的方法是，查看低频时和高温时的示波器的幅度差别是否在-3dB 以内，譬如在低频时信号占满示波器的 6 格，在高频时应占满 4.2 格。

**幅频特性曲线的计量和示波器的垂直量程有关，不同的量程得到的幅频特性曲线不一样，因此，需要计量不同量程时的幅频特性曲线；和采样率有关，因为采样率会影响到幅值测量的准确性，一般要将采样率设置为最大；和连接信号源与示波器接口之间的电缆有关，因为高频时存在衰减和反射问题，和输入信号的幅值大小有关，因此要用功率计来保证不同频率时的输出功率相同；和示波器的输入通道有关，不同输入通道相同量程下的幅频特性曲线可能不一样。**

考虑到计量科学的严谨性，还有几个细节问题需要讨论：

#### (1) 不同量程下输入正弦信号的幅值如何定义？

标定在不同量程下的幅频特性曲线需要输入不同幅值的正弦波信号，否则对于有些量程，波形会超出示波器屏幕，而有些量程下波形只占屏幕的一小部分，量化误差很大。

输入信号的幅值大小一般以尽量占满栅格为准。据说有规范上要求是以低频时占满栅格的 6 格为准。具体做法就是：在输入很低频率时调节信号源的输出幅值，使信号占满 6 格，用功率计测量此时信号的功率，然后逐渐增加频率，在每一个频率点都用功率计标定，确保输入到示波器输入端口的能量始终是相同的，然后再测量每个频率点的幅值。

#### (2) 幅频特性曲线的纵坐标的测量参数该使用示波器测量的幅值，峰峰值还是标准偏差值？

这个问题似乎不应该讨论，但却一直在小范围内争论不休，没有结论。有的计量专家要求是以幅值为准，也有专家认为用峰峰值更合适，但也有认为最合理的是用标准偏差（sdev）。对于低带宽示波器，其实不管采用哪个测量参数，因为裕量比较大，争议比较少，但在高端示波器，采样率不是特别大的情况下，测量峰峰值和幅值的差别会比较大。但是，对于现在有些低带宽示波器，譬如在 100MHz 带宽下，采样率只有 250MS/s，计量时用幅值或峰峰值的影响也一样很大。

采用幅值的方法被称为众数法，就是以正弦波的顶部和底部出现概率最大的位置作为测量的依归，如图 4 所示 top 和 base 的算法原理。这样会去掉了顶部的一些样本，以略低于顶部的位置来读数。但是峰峰值却可能把随机噪声也采样进去。笔者认为采用 sdev 更合理，但是这个测量参数不能被采纳为计量标准，因为有些低端示波器并没有 sdev 这个测量参数。

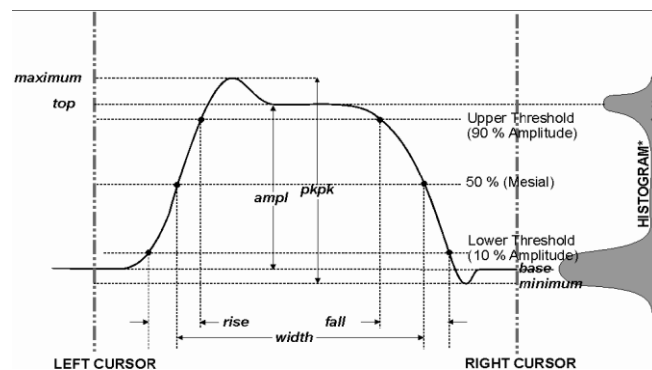


图 4 幅值算法的来源

### (3) 是将实时采样率设置为最大，还是等效采样率设置为最大？

如果按照现在有些专家坚持采用幅值来作为计量依据，根据图 4 的算法，**幅值的测量精度强烈依赖于采样样本数的大小**。如果采用等效采样方式，可以在顶部和底部通过等效采样的算法原理“产生”更密集的样本，虽然这些样本并不一定完全代表真实样本，这对于计量中使用信号源输出的正弦信号信号未必也不是一种好方法。但是由于等效采样毕竟不是完全代表真实的样本信息，该方法也并没有被专家们采纳。

### (4) 是否可以采用正弦插值，插值多少个点是允许的？

在实时采样前提下采用正弦插值同样会增加幅值测量的准确性。笔者了解到正弦插值是可以被接受的，但是具体插值的样本数的数量目前在计量界也没有统一的说法。示波器打开正弦插值时默认的插值样本数对于不同型号的示波器并不一样，但是插值的样本数量会影响到幅值测量精度。不同的插值样本数可能带来计量结果上的些微偏差。



### (5) 带宽范围以内的幅频特性曲线和理想曲线之间的偏差，光滑度如何定义？

这个问题揭示了示波器测量的一个最大的误差来源。在示波器行业，并没有一个规范来要求示波器的幅频特性曲线在带宽范围以内和理想曲线之间偏差控制在多大。只要在带宽范围以内，任何量程下的任何频率点的正弦信号的输出电压大小不降低到输入的 70.7% 以下都认为该示波器的带宽是满足要求的。譬如 100MHz 带宽的示波器，输入 100MHz，1V 的正弦波，在 20MHz 时的输出电压是 0.8V，在 50MHz 时是 1.2V，在 80MHz 时是 0.73V，在 100MHz 时是 0.71V。这个示波器是合格的！这样的数字化方式来表达这个概念让人印象深刻，但也让人觉得很郁闷。

#### 3.1.1 鼎阳 SDS3054 的幅频特性曲线

鼎阳科技不同系列示波器的幅频特性曲线的光滑度都非常好，而且在不同通道，不同量程下的一致性也非常地好。如图 5 所示是基于扫频点描法得到的 SDS3054 的幅频特性曲线。其横坐标是频率的对数  $\lg(f)$ ，图中标识 100 表示该处对应的是 100MHz，但在绘制时是以  $\lg(100)$  得来的；纵坐标是  $20\lg(V_{out}/V_{ref})$ ， $V_{out}$  表示输入不同频率时的示波器测量结果， $V_{ref}$  表示在起始最低频率(该例中为 50KHz) 时的示波器测量结果。可以看出在 100MHz 之前都很接近 0dB，在 300MHz 时也仅衰减约 -0.25dB，输出电压降低到输入大约 97.2%。在 -3dB 的转折频率点为 600MHz，就是说 SDS3054 的标称带宽实际上达到了 600MHz！而且更难能可贵的是，四个通道的幅频特性曲线的一致性非常好！

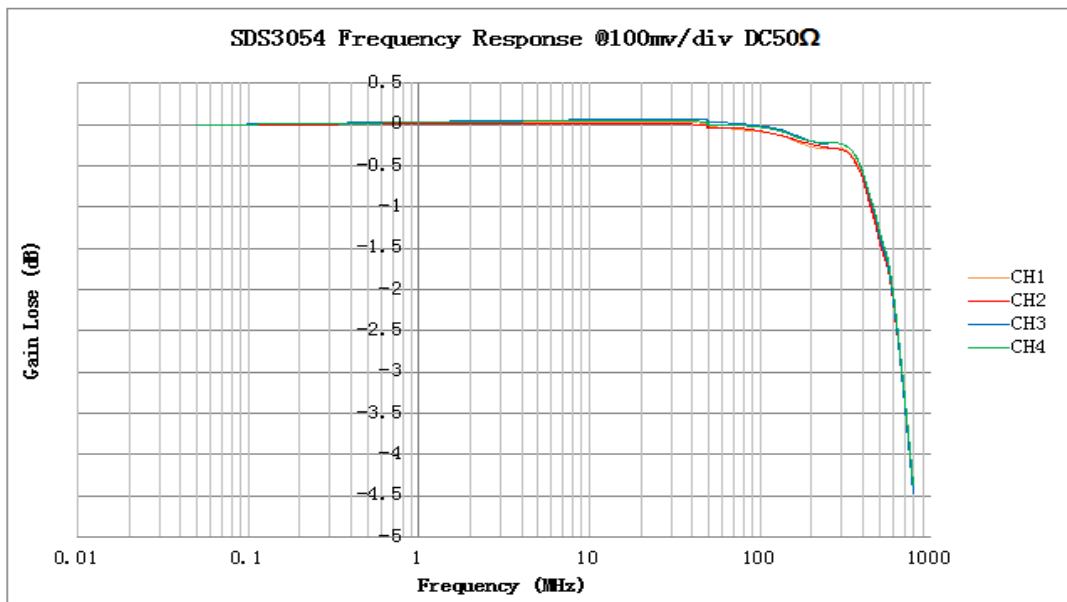


图 5 鼎阳 SDS3054 的幅频特性曲线

#### 3.1.2 鼎阳 SDS1102E 的幅频特性曲线

如图 6 所示为鼎阳科技新推出的电商专品示波器 SDS1102E 的幅频特性曲线。可以看出，在 100MHz

范围内，其幅值的稳定度非常好。在 100MHz 到 200MHz 由于刻度步进比较大，无法确认在-3dB 时的具体带宽是多少，但从图中可以肯定是大于 150MHz。

示波器厂商都会有自动化软件来自动获得幅频特性曲线图形。笔者将产生这个图形的 Excel 数据公布如下表 1。通过表格数据，我们可以确认，SDS1102E 的实际带宽可以达到 120MHz 以上。在 120MHz 时的幅值衰减还不到 2dB。

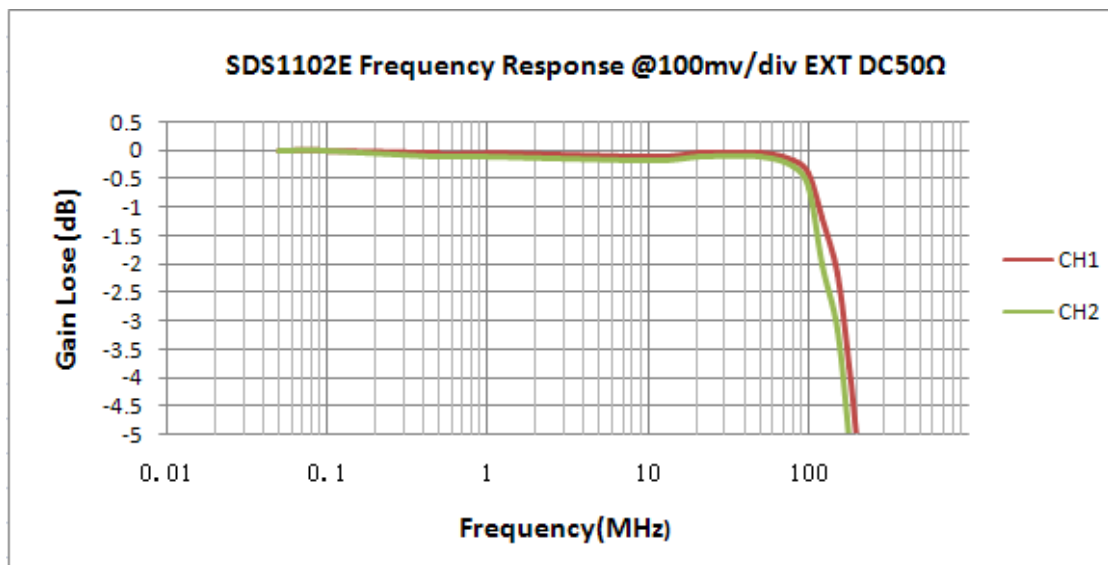


图 6 鼎阳 SDS1102E 的幅频特性曲线



input(MHz )	CH1	CH2	CH1	CH2
0.05	0.596	0.604	0	0
0.1	0.596	0.604	0	0
0.5	0.592	0.596	-0.05849	-0.11581
1	0.592	0.596	-0.05849	-0.11581
11	0.588	0.592	-0.11738	-0.1743
21	0.592	0.596	-0.05849	-0.11581
51	0.592	0.596	-0.05849	-0.11581
81	0.584	0.584	-0.17667	-0.29248
101	0.568	0.56	-0.41796	-0.65698
121	0.52	0.48	-1.18486	-1.99591
151	0.464	0.42	-2.17457	-3.15575
181	0.384	0.336	-3.8183	-5.09395
201	0.332	0.292	-5.08216	-6.31308

表 1 鼎阳 SDS1102E 的幅频特性曲线的计量数据

### 3.2 扫频 FFT 法

扫频 FFT 法就是逐渐改变信号源的信号频率，利用示波器的 FFT 运算结果来表征示波器的带宽。由于带宽的影响，示波器测量到的正弦波信号的幅值降低，相应 FFT 的基波最大值也会降低，查看降低到-3dB 的频率点就是带宽。

示波器中的 FFT 运算结果和 FFT 的具体算法，FFT 的窗函数的选择，FFT 的输出结果类型，FFT 的输出单位等有关。FFT 算法本身在不同厂商示波器上会不一样，这个算法带来了计量上的“变量”。因此该方法是一个“民间”常用的方法以快速知道大概的频响。

如图 7 所示为鼎阳 SDS1102E 的 FFT 扫频结果。在 150MHz 时，衰减才只有-3.2dB，在 100MHz 时的率减远小于 3 dB。

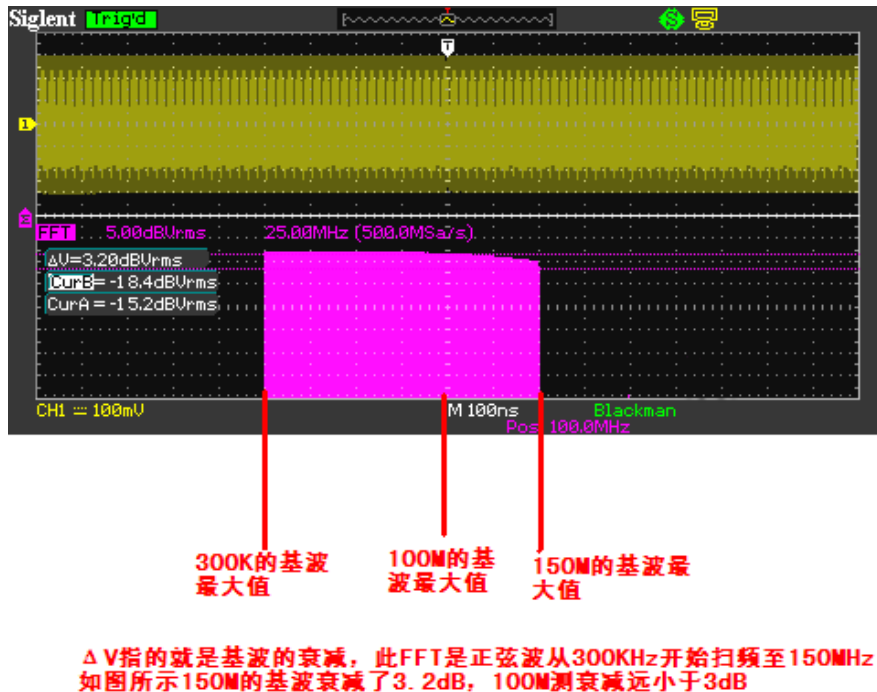


图 7 鼎阳 SDS1102E 的扫频 FFT 结果

示波器和探头及探测通路的任何连接部件都会影响带宽。示波器和探头等一起构成“系统带宽”。系统带宽受限于连接通路的最低带宽的部件。相同带宽的示波器和探头组成的系统带宽要更小。一个 100MHz 的示波器连接 100MHz 的探头的系统带宽只有大约 70MHz。作为一款电商专品，鼎阳科技在 SDS1102E 的带宽设计上留下足够的裕量，实际带宽超过 120MHz，确保客户在即使使用不同类型的 100MHz 探头 的情况下，系统带宽都可以达到 100MHz。

### 3.3 快沿 FFT 法

快沿 FFT 法就是示波器输入上升时间远小于示波器自身上升时间的快沿脉冲信号 然后对该信号做 FFT 运算，查看 FFT 运算的结果。快沿脉冲信号包含了超过示波器带宽的频率成分，FFT 的结果就反应了超过带宽范围的高频成分被抑制。但是这种方法存在更多计量上的“变量”，不能作为计量带宽的方法，只能作为一种粗略近似的快速查看。

快沿脉冲信号要求脉冲非常的窄，能量集中在一个点上，才能真实反应系统频率响应。通常做法是需

要先对快沿信号进行积分运算，再对积分运算的结果做 FFT。对快沿这样的阶跃信号做积分以产生快沿脉冲信号。脉冲响应反应的是系统的传递函数，对脉冲做 FFT 就得出系统的频率响应。

图 8 是基于 SDS3054 的快沿 FFT 运算结果。这突出反应了智能示波器对运算后的结果进行再运算 (math on math) 的能力。



图 8 鼎阳 SDS3050 的快沿 FFT 运算

## 【关于鼎阳】

鼎阳科技 (SIGLENT) 是一家专注于通用电子测试测量仪器及相关解决方案的公司。

从 2005 推出第一款数字示波器产品至今, 10 年来鼎阳科技一直是全球发展速度最快的数字示波器制造商。历经多年发展, 鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、函数/任意波形发生器、频谱分析仪、台式万用表、直流电源等通用测试测量仪器产品。2007 年, 鼎阳与高端示波器领导者美国力科建立了全球战略合作伙伴关系。2011 年, 鼎阳发展成为中国销量领先的数字示波器制造商。2014 年, 鼎阳发布了中国首款智能示波器 SDS3000 系列, 引领“人手一台”型实验室使用示波器由功能示波器向智能示波器过渡的趋势。目前, 鼎阳已经在美国克利夫兰和德国汉堡成立分公司, 产品远销全球 70 多个国家, SIGLENT 正逐步成为全球知名的测试测量仪器品牌。