

【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】
任意波形发生器的基本输出波形及其
相关参数

文档编号：HWTT0045



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】任意波形发生器的基本输出波形及其相关参数

方浩

深圳市鼎阳科技有限公司 副总裁助理
鼎阳硬件智库网站运营负责人

Think Tank 按语

“愈熟悉,愈陌生”。正弦波,方波,三角波,锯齿波,高斯白噪声,也许您曾经在很久很久以前就了解这些典型特征的波形,但只是在书本上,在仿真中。这些波形的产生曾经是作为大学课题设计的一部分。

怎么评价这些波形的“好”与“坏”?这是一个问题。产生这些波形的仪器之前是模拟器件实现的,现在多是基于FPGA以数字方式实现的。模拟时代称之为函数发生器。当采用数字方式产生这些波形的仪器风起云涌时,数字方式实现的本身的优势就被突出了:“想要什么波形就发出什么波形”,给你一纸笔,你画出一个波形,任意波形器就可以产生这个波形。如此任性?!是的,否则为什么叫任意波形发生器。现在的函数发生器和任意波形发生器就成为了合二为一的仪器。

本文是青年才俊方浩先生的任意波形发生器系列文章的第二篇。他娓娓道来各种波形的那么些细节,读之怡然!

传统的函数发生器可以输出正弦波、方波、三角波等标准波形,但是在实际的测试场景中,为了模拟产品在实际使用过程中的复杂情况,往往需要人为地去制造一些“不规则”的波形,或者是在标准波形的基础上添加一些数量和类型已知的畸变,在这样的场景中,函数发生器已经无法满足要求,任意波形发生器因其能发出更多类型的信号而流行开来。

任意波形发生器可以实现函数发生器能够实现的所有功能,能够输出包括正弦波,方波,三角波,除此之外,还能输出脉冲,噪声以及DC直流等信号类型,支持调制信号(Modulation),扫频信号(Sweep)和突发脉冲(Burst)的输出。当前市面上的多款任意波形发生器都标配了任意波形绘制软件,通过这个软件,理论上可以远程操控任意波形发生器输出所有在测试过程中需要的信号。

那么,任意波形发生器可以输出哪些类型的波形呢?每种波形又有哪些参数可以自由设置?如何衡量输出波形的好坏?还需要进一步探讨。



1. 正弦波/余弦波

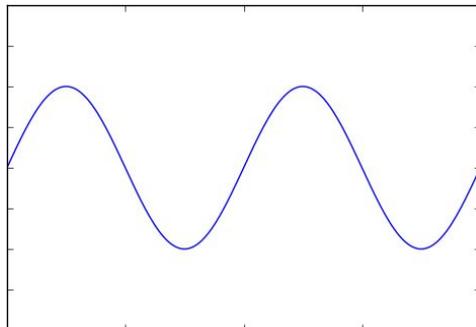


图1 正弦波/余弦波

正弦波和余弦波是我们最熟悉的两种波形，它们伴随了我们整个求学生涯，根据我们熟悉的概念，正弦波/余弦波可按下式定义。

$$f(t) = A \cos(\omega_c t + \phi_0) \quad (\text{公式1})$$

或：

$$f(t) = A \sin(\omega_c t + \phi_0) \quad (\text{公式2})$$

其中，A 代表正弦波的幅度， ω_c 代表角频率，与正弦波的周期和频率之间具有换算关系， ϕ_0 代表初始相位，初始相位在一般的计算中可以略去。通过观察波形可以发现，正弦波和余弦波本质上是一致的，只是初始相位 ϕ_0 相差 90° 而已。

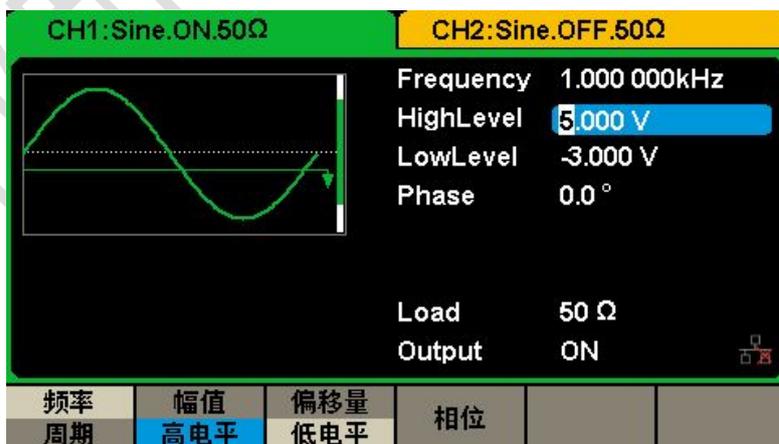


图2 SDG2000X 中的正弦波设置界面

这三个参数体现在任意波形发生器上如图2所示。在任意波形发生器中可以设置与 ω_c 角频率相关的频



率和周期，它们之间的换算关系为：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{公式 3})$$

SDG2000X 函数/任意波形发生器正弦波的频率最大可设置为 120MHz，值得一提的是，任意波形发生器标称的最大输出频率指标，往往指的就是其正弦波输出的最大频率。

在这个界面中还可以设置幅值 A，在输出阻抗设置为“高阻”状态时，SDG2000X 的最大输出幅度可达 20V_{pp}。SDG2000X 可以支持高电平和低电平分别可调，如图 2 所示，此时高电平设置为 5V，低电平设置为 -3V。

初始相位可以点击【相位】菜单对应的按钮进行设置，初始相位可设置的范围介于 -360° 到 +360° 之间。

从时域来看，正弦波和余弦波的参数和波形都相对简单。但是，所有的电子设备都或多或少的存在失真，任意波形发生器也不例外，我们尝试着从频域来观察正弦波和余弦波。

公式 1 代表的时域函数对应的傅立叶变换为：

$$F(\omega) = \pi \cdot [\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)] \quad (\text{公式 4})$$

公式 3 代表的频谱图如下图所示：

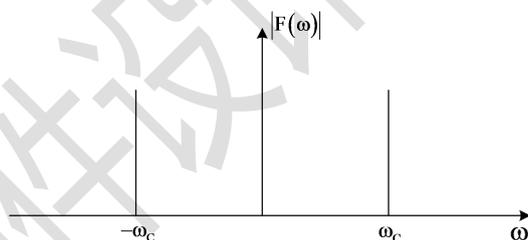


图 3 cos 频谱图

观察图 3 的 cos 频谱图可以发现，正弦波/余弦波在频谱上可用单一谱线表示，因此又被称为“单音信号”。

工程上由于电路的非线性等不理想特性，产生的正弦波往往不是理想的“单音”信号，而是会附带输出一些谐波和谐波以外的杂散，统称为“失真”。

1.1 谐波失真

谐波失真是信号的功率与最大谐波的功率的比值，通常单位为 dB，如下图：



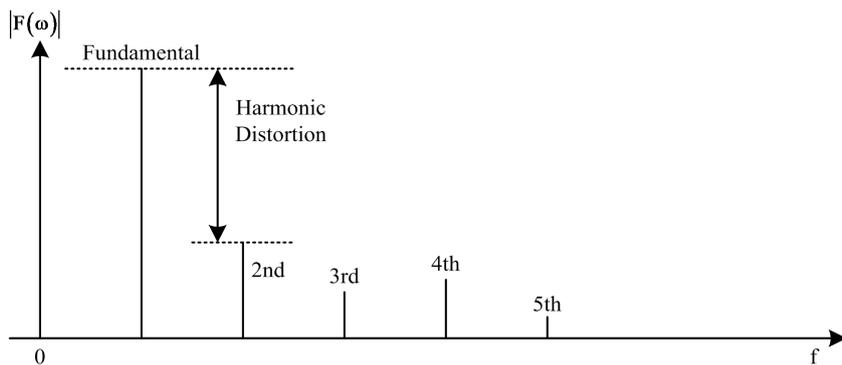


图 4 谐波失真示意图

衡量谐波失真性能的另一个指标是总谐波失真（THD），指的是各次谐波（工程上通常取到 6 次）的幅度的均方根与信号幅度的比值，如公式 5 所示，通常用%表示。SDG2000X 在输出 0dBm, 10Hz~20kHz 的正弦波时，总谐波失真最大为 0.075%。

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_s} \quad (\text{公式 5})$$

1.2 非谐波杂散

非线性导致的失真除了谐波，还可能是一些其他频谱分量，如信号（或其谐波）与时钟信号的交调产物，因此需要定义另外一个指标——非谐波杂散，来量度这些分量。

杂散的大小通常用无杂散动态范围（SFDR）来表示（如图 5），指的是信号功率和最大杂散功率的比值，单位通常用 dB。注意有些地方对杂散的定义包括了谐波和非谐波杂散，但是在我们的任意波形发生器中，杂散仅仅指谐波以外的失真。

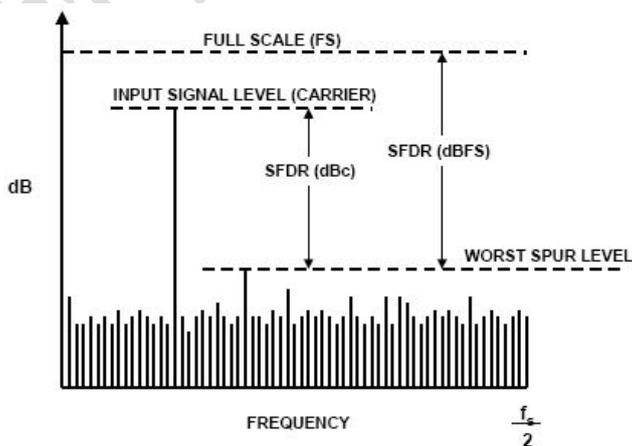


图 5 SFDR 示意图



2. 方波/脉冲

3.

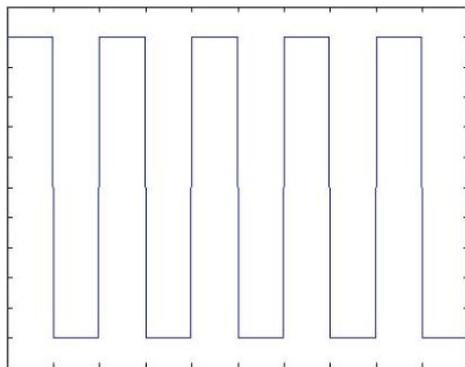


图 6 方波/脉冲示意图

方波的时域波形可以用下图表示：

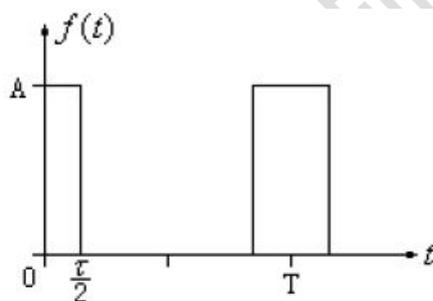


图 7 方波时域图

在一个周期内方波的表达式为：

$$f_T(t) = \begin{cases} 0, & -\frac{T}{2} \leq t < -\frac{\tau}{2}, \\ A, & -\frac{\tau}{2} \leq t < \frac{\tau}{2}, \\ 0, & \frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (\text{公式 6})$$

其中， T 是方波的周期， τ 是一个周期内高电平所占的时间长度。 $\frac{\tau}{T}$ 就是方波的占空比。



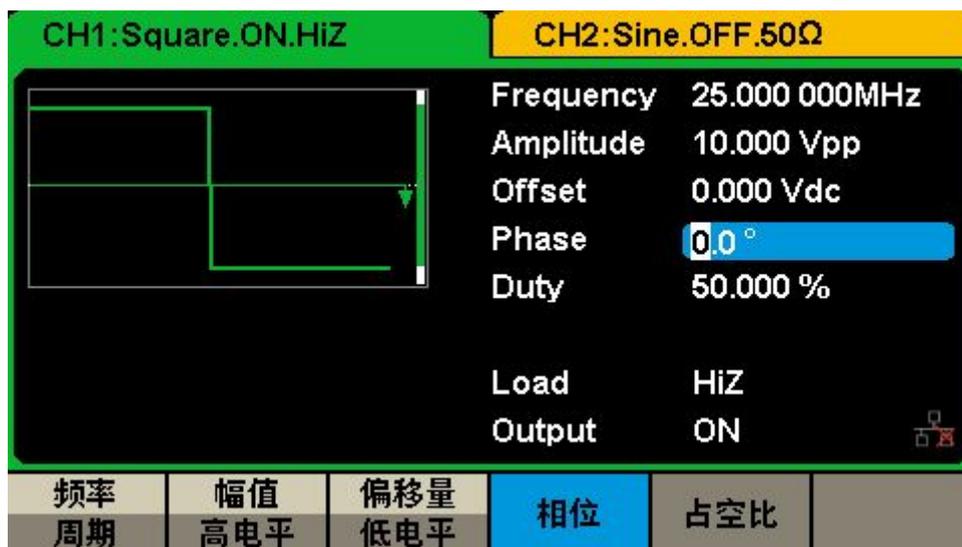


图 8 SDG2000X 的方波设置界面

在方波设置界面中，除了可以设置正弦波/余弦波可设置的全部参数，还增加了占空比设置的选项，但是，在任意波形发生器中，占空比的设置范围一般会受到频率设置的限制。

公式 6 表达的 $f_T(t)$ 实际上就是一个矩形函数，其频谱可表示为：

$$F_T(\omega) = \frac{2A}{\omega} \sin \frac{\omega\tau}{2} = A\tau \cdot \text{sinc} \left(\frac{\omega\tau}{2} \right) \quad (\text{公式 7})$$

是一个以 $A\tau$ 为幅度的辛克函数。

由于方波是矩形函数以 T 为周期的拓展，根据数字信号处理理论，一个函数在时域的周期化，对应频

域的离散化，因此方波的频谱实际就是 $F_T(\omega)$ 以 $\omega = n \frac{2\pi}{T}, n \in Z$ 为取样点取样后的频谱。从直观上来看，就是辛克函数包络下的方波的角频率 ω_1 及其各次谐波分量。

下图是幅度 A ， $T = 5\tau$ 的方波对应的频谱，其中 ω_1 为方波的基频角频率：

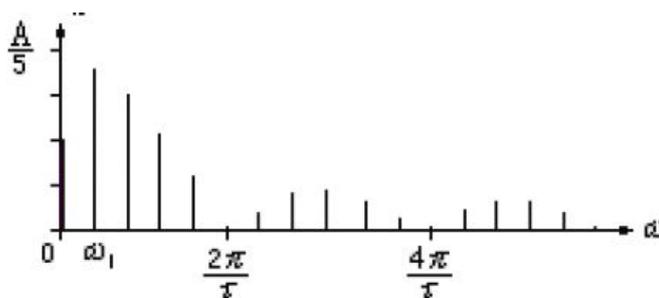


图 9 方波频谱图





可见，方波的频谱是无限宽的。如果让方波经过一个低通滤波器，只保留其部分谐波成分，则对应域上的波形将发生畸变。由下图可以看出，经过低通滤波后的方波，不但信号沿变缓，而且产生了上下过冲，这种过冲现象就是“吉布斯效应”。

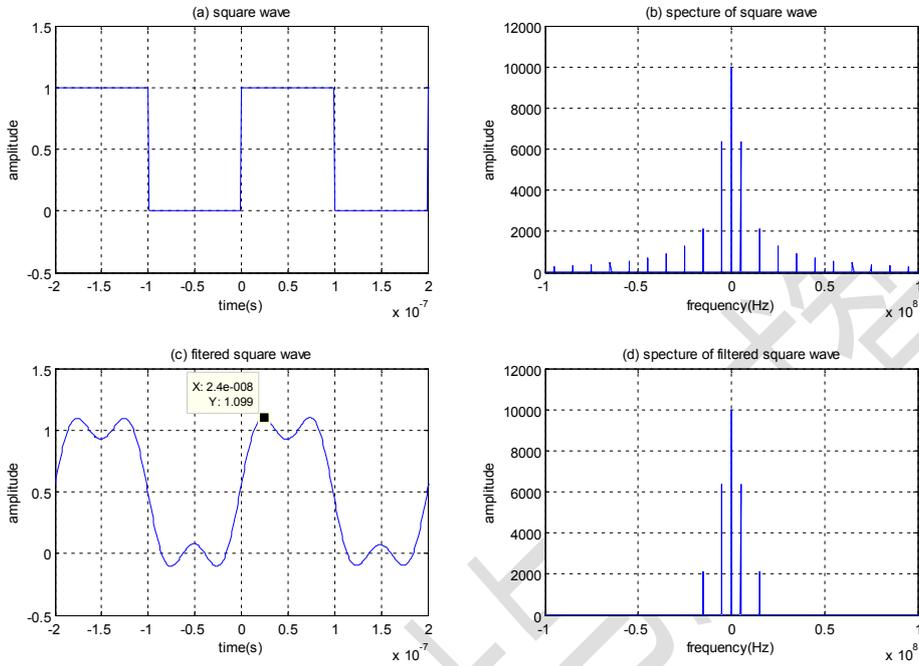


图 10 5MHz 方波，50%占空比，保留三次谐波

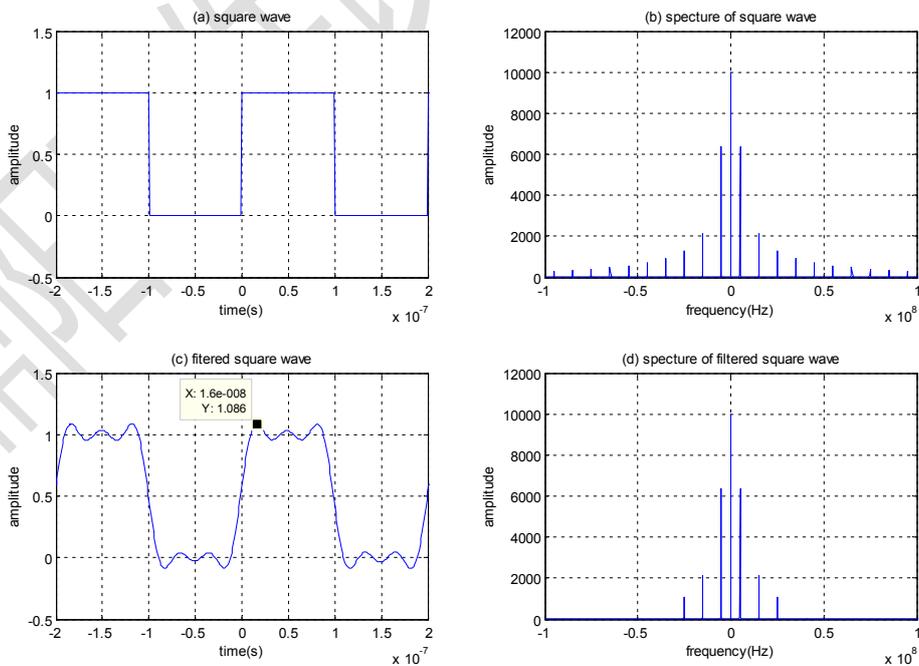


图 11 5MHz 方波，50%占空比，保留五次谐波





经过低通滤波后的方波，其保留频谱分量占滤波前总频谱能量的比重越大，方波的失真就越小。对于窄脉冲，由于其辛克函数包络展得很宽，频谱能量分散，往往要保留很多阶的高次谐波才能较小的失真。如下图，同样是 5MHz 频率，保留 5 次谐波，但 20ns 的窄脉冲已经出现了幅度上的失真。

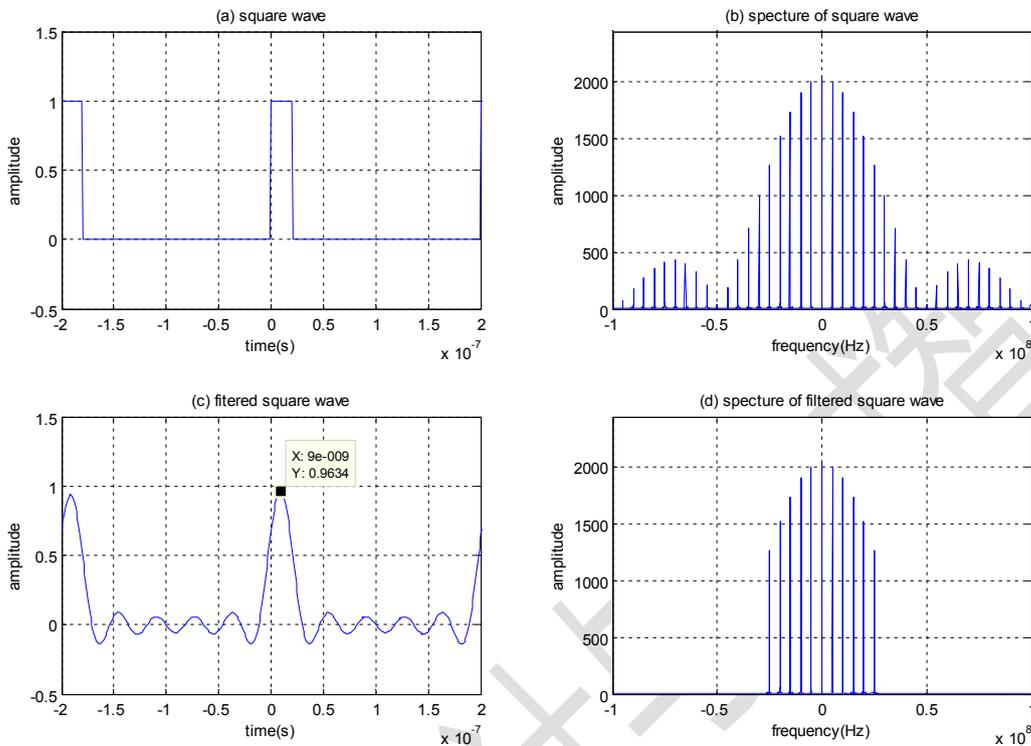


图 12 5MHz 脉冲，20ns，保留五次谐波

对于 50% 占空比的方波来说，如果要显示方波效果，至少要保留 3~5 次谐波。因此任意波形发生器方波频率一般达不到其最大输出频率指标。如 SDG5000 函数/任意波形发生器，最大输出频率 160MHz，但方波最大频率为 50MHz。

2.1 抖动

方波/脉冲经常被用来作为时钟信号使用，因此我们必须关注时钟信号的一个关键指标——抖动。抖动可以定义为一个信号在跳变时，相对其理想时间位置的偏移量。

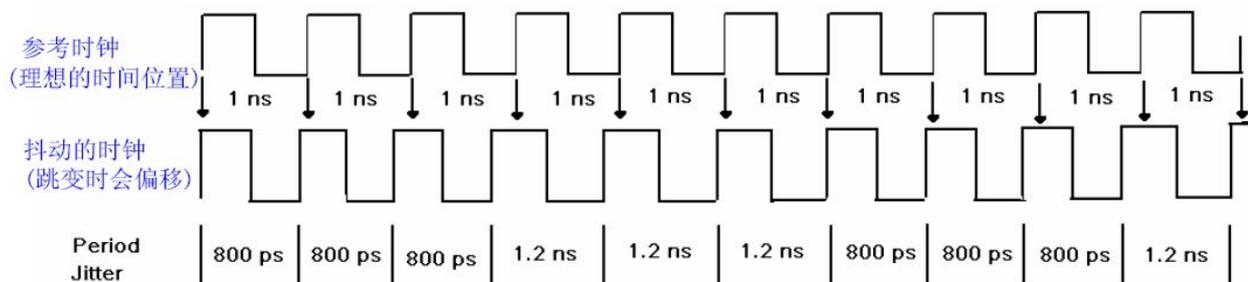


图 13 周期抖动示意图

一个信号抖动的成分较为复杂，主要分为确定性抖动和随机抖动两部分。其中随机抖动服从高斯分布，





确定性抖动又由多种成分构成，例如在任意波形发生器中，使用 DDS 方法产生的方波/脉冲，可能产生 1 个采样周期的确定性抖动。SDG5000/SDG2000X 中采用了独特的 EasyPulse 技术，可以消除这个抖动，关于 EasyPulse 技术，我们会在后面的章节中详细阐述。

抖动的时域测量通常有三种方式：Period, cycle-cycle 和 TIE。我们测量抖动时采用方法的是 cycle-cycle。由于抖动的成分中含有服从高斯分布的随机成分，因此一般按统计的方法，取均方根值 (rms) 来衡量抖动的大小，采用了 EasyPulse 技术的 SDG2000X 系列函数/任意波形发生器在输出 1Vpp，输出负载设置为 50Ω 时，抖动可以小于 150ps，有效克服了 DDS 技术会产生较大周期抖动的缺陷。

3. 三角波

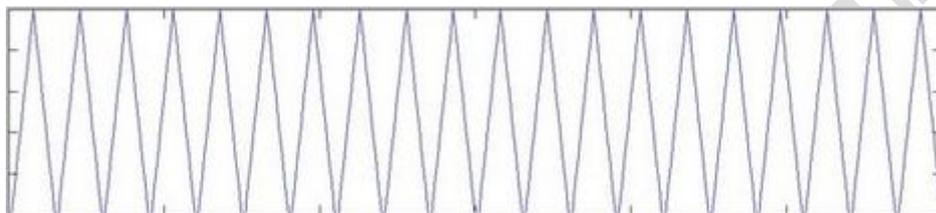


图 14 三角波示意图

对称度为 50%的三角波的时域波形如下图：

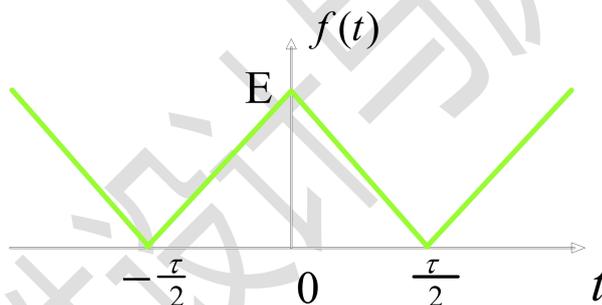


图 15 三角波时域波形

其周期为 τ 。三角波在一个周期内的表达式如下，我们称之为三角脉冲：

$$f_T(t) = E(1 - \frac{2}{\tau}|t|) \quad (|t| < \frac{\tau}{2}) \text{ 公式 8}$$

对应的频谱表达式为：

$$F_T(\omega) = \frac{E\tau}{2} \text{sinc}^2(\frac{\omega\tau}{4}) \text{ 公式 9}$$

类似于方波，三角波是三角脉冲以 $T = \tau$ 为周期的拓展，因此三角波的频谱实际就是中 $F_T(\omega)$ 以

$\omega = n \frac{2\pi}{T} = n \frac{2\pi}{\tau}$, $n \in Z$ 为取样点取样后的频谱。从直观上来看，就是辛克函数平方包络下的方波的角频率





ω_1 及其各次谐波分量。对应的频谱图如下。可以看到，由于辛克函数平方包络在 n 为偶数时等于 0，因此三角波频谱实际只包含奇次谐波。

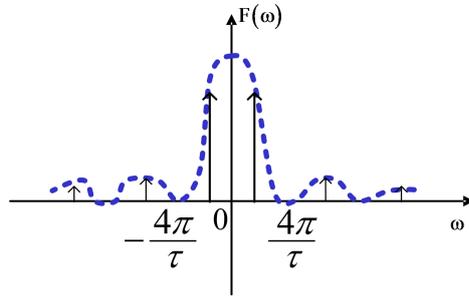


图 16 三角波频谱图

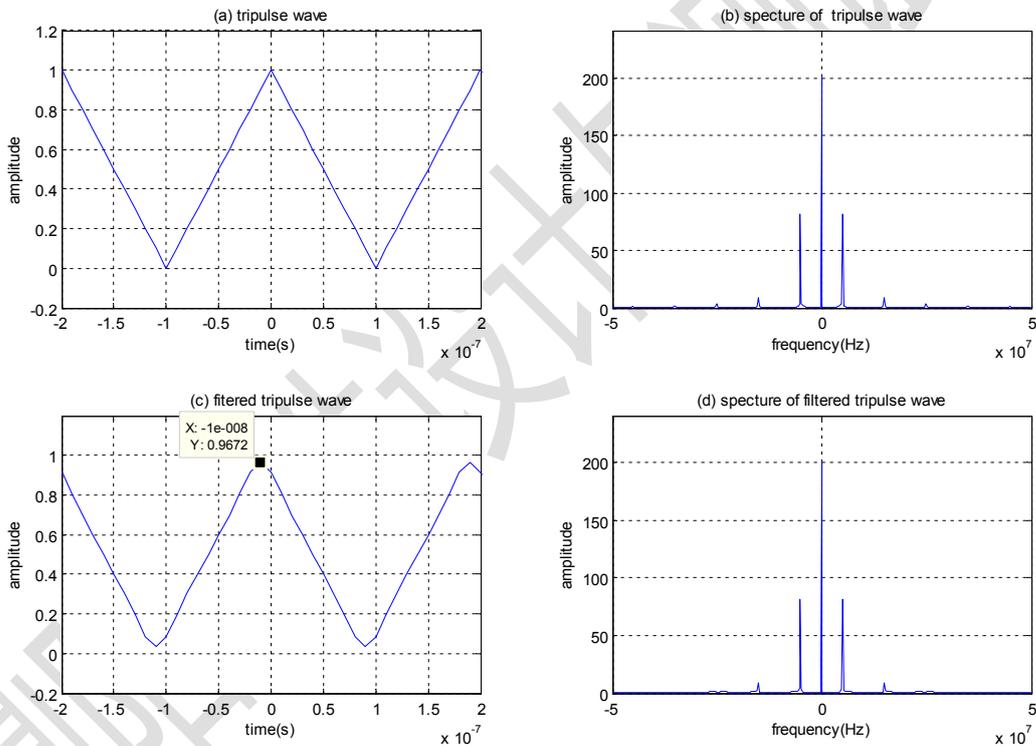


图 17 5MHz 三角波，经过 20MHz 低通滤波

在三角波的设置界面中，可以针对三角波的对称性进行设置，设置的范围从 0%到 100%，当对称性的值不为 50%时，任意波形发生器将输出锯齿波。



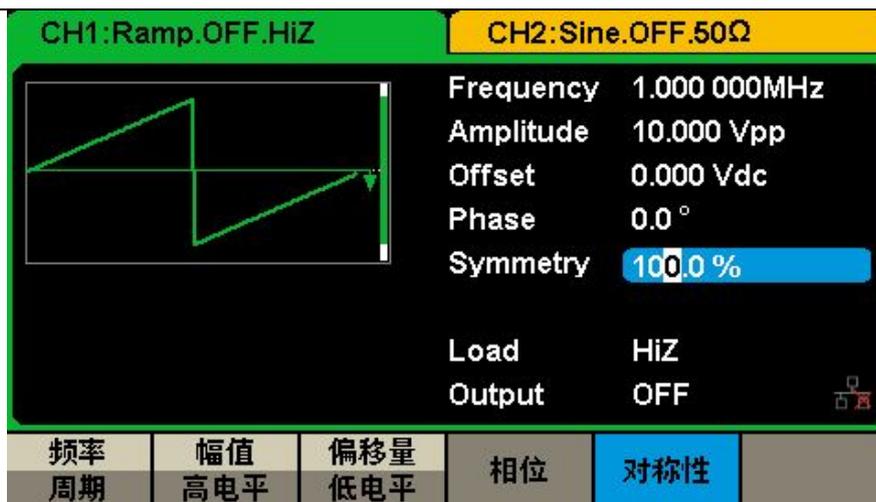


图 18 SDG2000X 三角波参数设置界面

4. 锯齿波

锯齿波就是“不对称的三角波”，最极端的情况，对称性甚至为 0%或者 100%，此时锯齿波在时域上存在跃变，对应频谱上的频谱就会展得很宽。类似于窄脉冲，要保留很多阶的高次谐波才能拥有较小的失真。

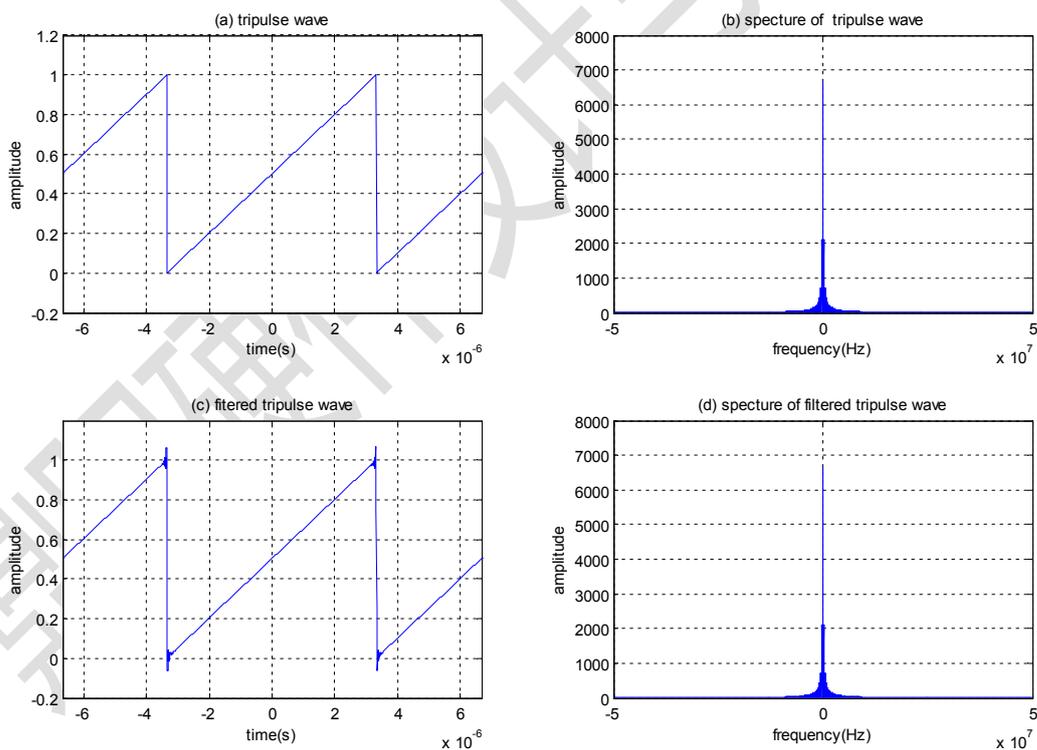


图 19 150kHz 锯齿波，经过 20MHz 低通滤波

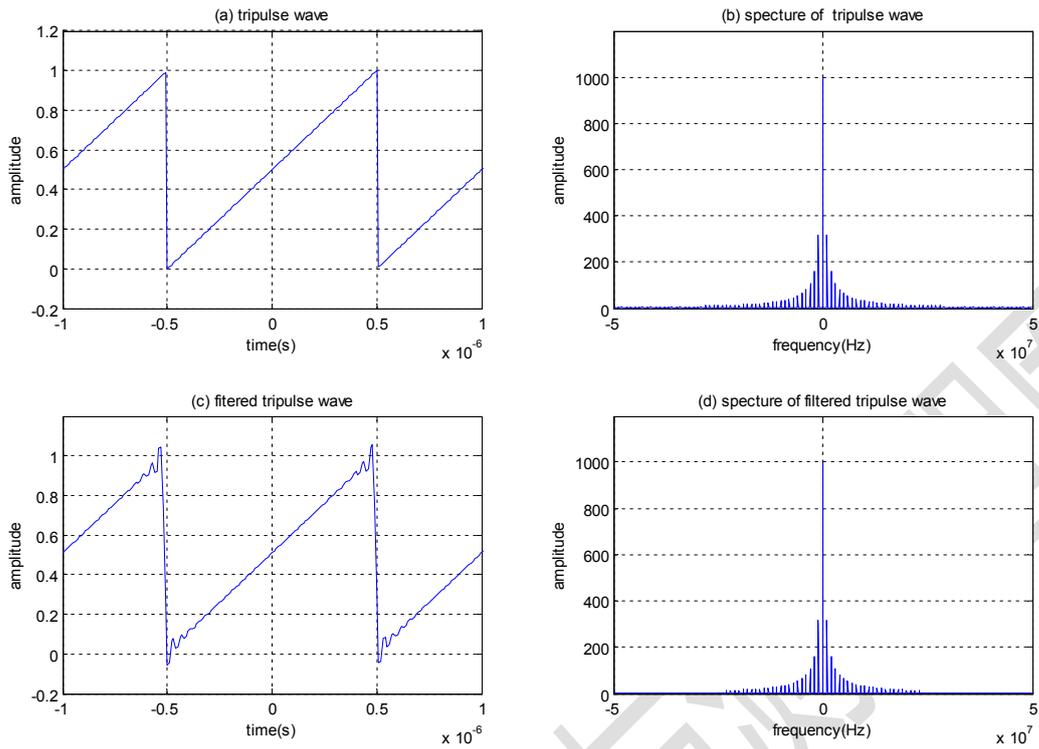


图 20 1MHz 锯齿波，经过 20MHz 低通滤波

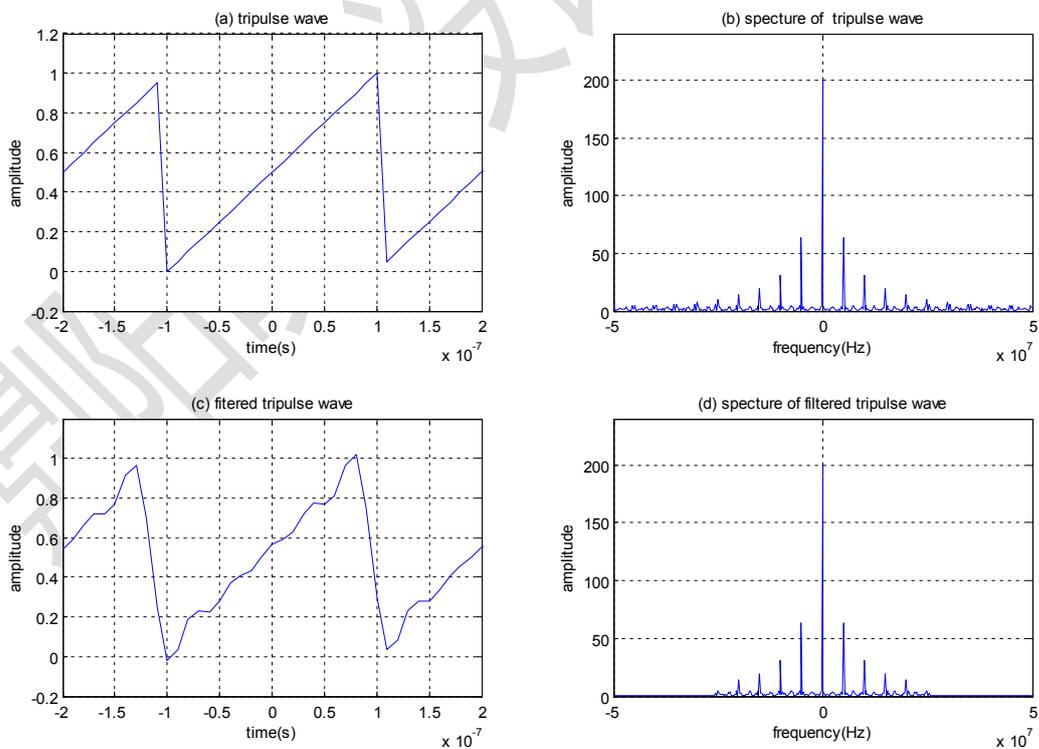


图 21 5MHz 锯齿波，经过 20MHz 低通滤波



5. 高斯白噪声

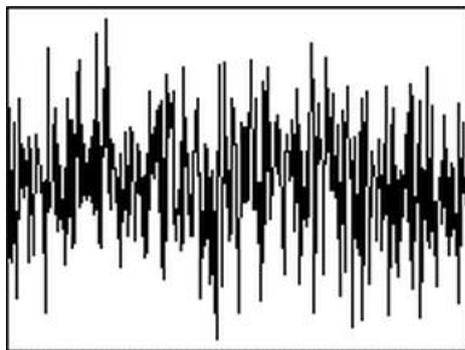


图 22 噪声示意图

如果一个噪声，它的幅度分布服从高斯分布，并且它的功率谱密度又是均匀分布的，则称之为高斯白噪声，自然界的热噪声就是高斯白噪声。

高斯噪声的幅度是随机数，无法用确定的值来给出。所以我们使用高斯分布的两个统计参数：均值（ μ ）和标准偏差（ σ ）来衡量高斯噪声的幅度。

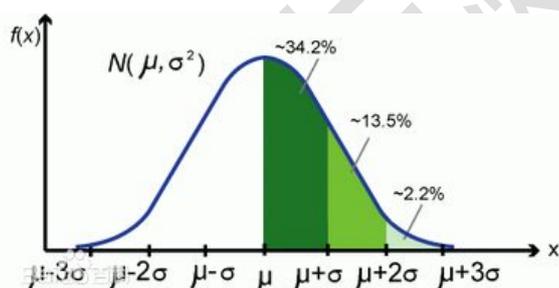


图 23 高斯噪声的均值，标准差示意图

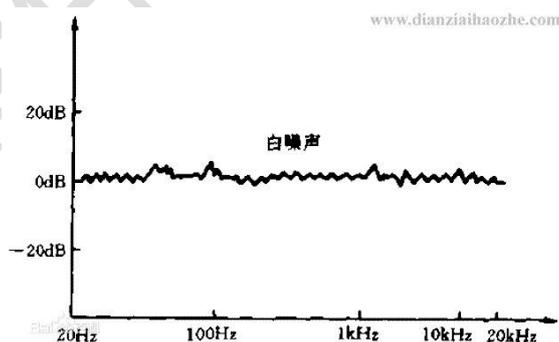


图 24 白噪声功率谱示例

在任意波形发生器中，可以对输出噪声的均值和标准差这两个参数进行设置。





图 25 SDG2000X 中的噪声设置界面

任意波形发生器的模拟通道是一个低通道，因此高斯白噪声经过模拟通道后，就变成了限带高斯白噪声，一般用-3dB 截止点来衡量它的带宽。

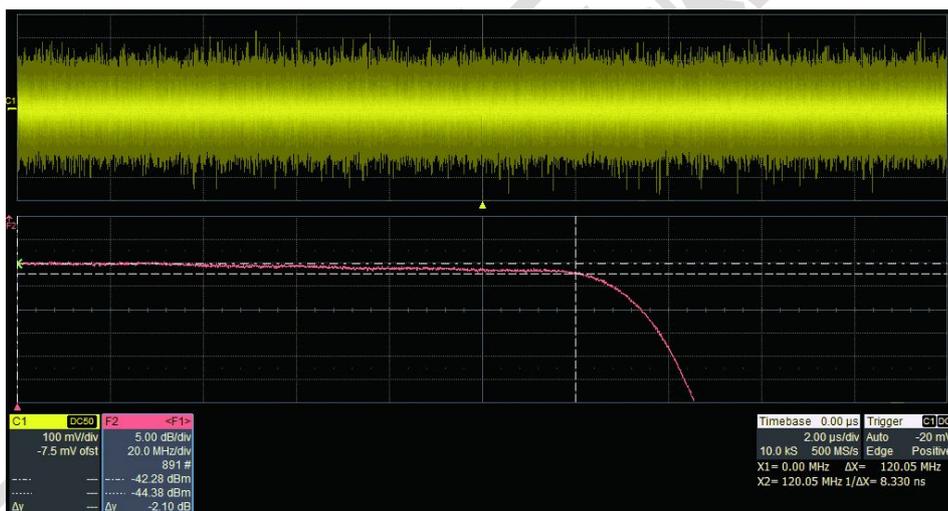


图 26 用高斯白噪声测试 SDG2000X 的模拟通道频响

由于高斯白噪声本身的频谱是均匀的，因此它通过低通道生成的限带高斯白噪声的频率响应，实际上就是该低通道的频率响应。利用这个特性，可以用高斯白噪声来测试任意波形发生器的模拟通道频响。

SDG5000/SDG2000X 的噪声由专门的高斯白噪声发生器产生，其重复周期超过 100 年，工程上可以认为是真正意义的随机噪声。



6. 任意波形输出

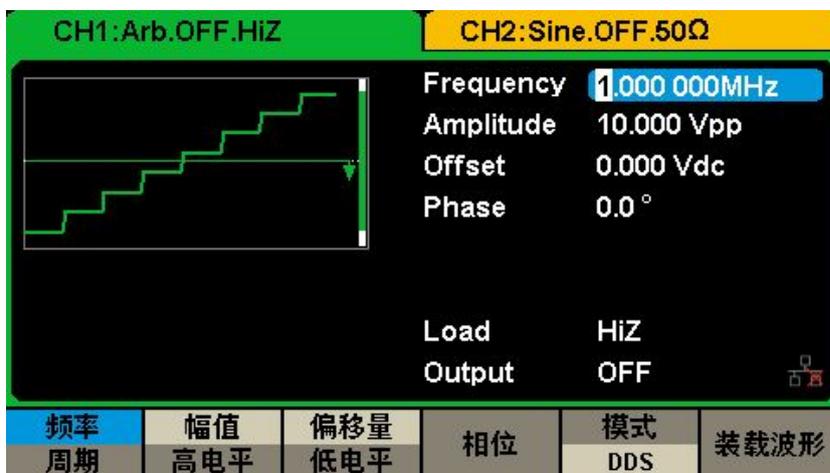


图 27 SDG2000X 任意波形设置界面

任意波形发生器除了可以输出以上描述的几种基本波形，还可以在“任意波形”模式中构建许多特殊的波形，设置的方式有三种，我们可以在函数/任意波形发生器中载入内建波形，同时我们可以通过 Matlab 等工具生成 CSV 文件导入任意波形发生器，此外还可以通过任意波形绘制软件绘制内建波形中不包含的波形。在 SDG2000X 系列函数/任意波形发生器中，任意波形的最大长度可以达到 8Mpts，输出频率范围在 1 μ Hz 到 20MHz 之间。



图 28 SDG2000X 内建波形调取界面

内建波形的选取界面如图 28 所示，系统按照常用、数学、工程和窗函数/三角函数四种类别对内建波形进行分类，载入内建波形之后，同样可以对频率，幅值和偏置等参数进行设置。

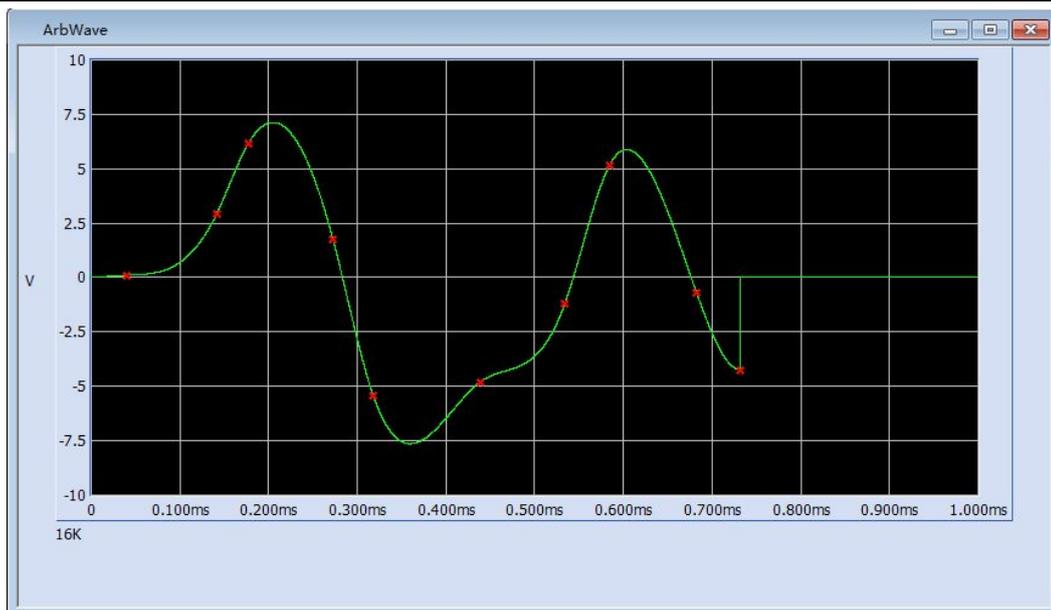


图 29 EasyWave 任意波形绘制界面

鼎阳科技出品的全系列任意波形发生器都可以支持 EasyWave 任意波形绘制软件，在 EasyWave 中，可以通过手动绘图，方程式绘图，坐标绘图，标准波形等方式绘制您想要的波形，还有丰富的工具对绘制完成的波形进一步处理，波形文件可以一键导入任意波形发生器。

至此，我们已经对任意波形发生器输出基本波形的类型及其相关参数进行了相对详尽的描述，在接下来的文章中，我们将会对任意波形发生器的模拟调制输出，扫频输出和 Burst 输出相关的概念和参数进行阐述，敬请期待。

欢迎交流：

如果您想和本文作者进行进一步的技术交流，敬请发送电子邮件到 specialist@hwthinktank.com。如果您想要本文章的 PDF，请直接在微信对话框中回复您的电子邮箱地址，工作人员将在两个工作日内发送本文的 PDF 版本给您。

版权声明：

本微信所有文章皆为鼎阳硬件设计与测试智库专家呕心沥血之原创。希望我们的经验总结能够帮助到更多的硬件人，欢迎转载！我们鼓励分享，但也坚决捍卫我们的权益。引用请注明出处——“鼎阳硬件设计与测试智库”微信号（SiglentThinkTank）。鼎阳硬件设计与测试智库将保留追究文章非法盗用者法律责任的权利！”

【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。

【关于鼎阳硬件设计与测试智库】

鼎阳硬件设计与测试智库（简称鼎阳硬件智库）由深圳市鼎阳科技有限公司领衔创办，是中国第一家“智力众筹”模式的硬件智库。

鼎阳硬件智库顺势顺势，倡导“连接-分享-协作-创造”的理念，高举志愿者服务的大旗，相信互联网是“爱”的大本营，相信人们都有发自内心分享的愿望。

鼎阳硬件智库选择硬件领域最普遍的七类问题：电源，时钟，DDR，低速总线，高速总线，EMC，测试测量进行聚焦。寻找“最针尖”的问题进行研讨，针对“最针尖”的问题组织专家答疑，将硬件大师积累的宝贵知识和经验变成公众财富，惠及更多硬件人。

鼎阳硬件智库的运作载体包括“线上”的微信公众号分享，微信群，网站，网络社区论坛，博客，邮件群等多种互联网工具和“线下”的专家论坛和专家把脉。“线上”的分享坚持原创，坚持干货，保持专注和深耕。“线下”专家论坛邀请硬件相关的一线实战派专家分享“最干货”的硬件设计与测试知识与经验，面对面相互研讨；“线下”的专家把脉，通过大数据连接，促使具体问题和最熟悉这个具体问题的专家“精准匹配”，远程问诊和现场解决问题相结合。

鼎阳硬件智库，群策群力，连接所有硬件人。

有硬件问题，找鼎阳硬件智库。

