

【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】 示波器的带宽越高越好吗？

汪进进
鼎阳硬件设计与测试智库发起人之一
深圳市鼎阳科技有限公司

文档编号：HWTT0017



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



示波器的带宽越高越好吗？

进进按语

关于示波器带宽的选择，从事示波器销售的销售人员几乎每天都会和用户交流。这个示波器的“第一指标”在示波器行业充满“政治性”，主要因为一些行业协会给出这个指标要求时显得相互矛盾，譬如测量 USB2.0 早期要求是 4GHz, 后来又 是 2GHz, 1.5GHz, 测量 PCI-Express2.0, 3.0 对带宽的要求和测量 HDMI 对该指标的的要求的标准又不一样，因为协会主导方是不一样的。这就给我们带来困惑，这些协会难道不够权威吗？是权威的，因为被冠以了“xx 协会”的名义。但是，又不权威，因为带有“政治性”。

本文只是给出了很多选择带宽的“说法”，在众多权威人物和权威的协会给出带宽选择的“黄金规则”和具体规范要求最低指标之后，我无法再给出明确的“黄金法则”，想罗列这些说法，促使大家明白本质就是那么点浅浅的东西。

诸位看官阅读此文，明白选择带宽的总原则就没那么迷惑了。选择带宽和选择示波器一样，都需要“拿来主义”，忘记那些所谓的权威。就那么点浅浅的东西，有什么好扯的嘛！当我写下这句时，内心似乎有点激愤，我更想强调的是，选择示波器也需要拿来主义精神。

汪进进

鼎阳硬件设计与测试智库发起人之一
深圳市鼎阳科技有限公司

“示波器的带宽当然是越高越好”。这句话从某种意义上是正确的：带宽越高，意味能够准确测量被测信号的带宽越高，价值越大，也越值钱。但是，从使用角度来说，带宽越高未必越好。

1. 感兴趣的信号的上升时间是带宽选择的关键因素

示波器带宽的理论虽然极其简单，但在具体购买和使用示波器的过程中到底该怎么选择带宽，却是个没有统一答案的复杂问题，经常被讨论。从事示波器的销售人员会发现，其实每天都要和用户谈这个话题。

经常被讨论是因为示波器带宽的选择是相对的，它取决于感兴趣的信号的类型以及测量准确度的要求。

任何信号都可以分解成无数次谐波的叠加。从频域来理解，带宽选择的总原则是：**带宽能覆盖被测信**





号各次谐波 99.9%的能量就足够了。带宽难以选择的根源就在于：我们不能直观地知道被测信号能量的 99.9% 对应的带宽是多少。感兴趣的信号的能量主要取决于上升沿的快慢，上升沿越陡，信号包含的高次谐波含量越丰富，带宽就要越高。因此感兴趣的信号的上升时间是关键因素。

强调的是**感兴趣的信号**，因为很多时候我们关心的是方波信号的尖峰毛刺而不仅仅是方波信号的整体上升时间。譬如电源开关管 MOSFET 的 V_{ds} 信号的上升时间高达 100ns，但是感兴趣的尖峰信号的上升时间可能只有 5ns，甚至更小。

2. 带宽和示波器本身的上升时间之间的关系

示波器本身存在上升时间。示波器的上升时间可定义为示波器阶跃响应的时间，如图 1 所示，对于上升沿无限快的阶跃信号经过 RC 低通滤波器之后，其上升沿变缓。RC 低通滤波器是示波器放大器的等效简化分析模型。从 RC 模型来理解，电容的存在必然导致上升沿变缓。

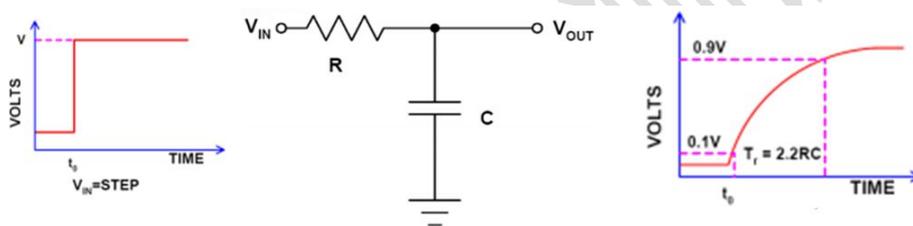


图 1 上升时间是示波器阶跃响应的时间

示波器的上升时间和带宽存在反比的关系，上升时间和带宽的乘积是一个常数，使用 RC 电路模型可以推导出这个常数是 0.35。基于图 1 的模型可以推导出这个 0.35 常数。

根据 RC 电路模型得出输出电压和输入电压之间的关系式(1)如下。该关系式是一个高斯函数。

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= V_{IN}(1 - e^{-T/RC}) & (1) \\
 e^{-T/RC} &= 1 - V_{OUT}/V_{IN} \\
 T &= -RC * \ln(1 - V_{OUT}/V_{IN})
 \end{aligned}$$

上升时间一般定义为信号幅值的 10%-90%之间的时间。

$$\begin{aligned}
 T_{10\%} &= 2.3RC & T_{90\%} &= 0.1RC \\
 t_{rise_scope} &= T_{10\%} - T_{90\%} = 2.2RC = 2.2 / 2\pi f = 0.35/f & (2)
 \end{aligned}$$

关系式 (2) 对于一般的理论分析是有用的，但不能根据这个关系式计算的结果标定为示波器真实的上





升时间。因为示波器的真实的放大器并不会是简单的 RC 模型，而是更加复杂些，还取决于示波器幅频特性曲线的形状，特别是幅频特性曲线的下降部分“尾部”的滚降系数(Roll-Off Rate)。示波器本身的上升时间是通过计量得到的。

3. 被测信号真实的上升时间和示波器测量到的上升时间之间的关系

因为示波器本身存在着上升时间，示波器测量到的上升时间也就是示波器屏幕上显示的上升时间并不等于被测信号真实的上升时间。它们之间存在着另外一个非常著名的关系式(3)，如下。

$$t_{rise_measure}^2 = t_{rise_scope}^2 + t_{rise_probe}^2 + t_{rise_signal}^2 \quad (3)$$

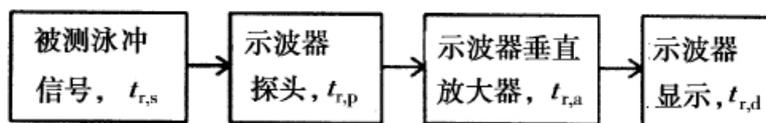


图2 示波器测量上升时间的通用模型

在参考文献[1]中给出了示波器测量上升时间的通用模型，如图2所示，并对关系式(3)的推导给出说明：

示波器测量上升时间时可视为一个线性级联系统。据信号与系统的相关结论可知：级联系统的冲激响应等于组成级联系统的各子系统冲激响应的卷积(convolution)。对多个冲激响应求卷积是其方差(variance)相加。方差是标准偏差(standard deviation)的平方，脉冲的标准偏差与其宽度成正比，冲激响应的宽度和与之相应的阶跃响应的上升时间成正比，因而方差与上升时间成正比。于是用“上升时间的平方”代替卷积特性中的“方差”可得关系式(3)。可以证明，仅当图2所示系统每个部分的脉冲响应都是高斯型的(Gaussian)(示波器的阶跃响应往往视为高斯型的)，关系式(3)才严格成立。对其他类型的脉冲响应，关系式(3)是近似的，但误差不大。

4. 带宽选择的 N 种说法

业内一直流传着很多种带宽选择的说法，甚至在诸多文献中称之为法则(Rule of Thumb)。这里笔者将流传的几种选择带宽的方法罗列出来。我们可以在“**带宽能覆盖被测信号各次谐波的 99.9%的能量就足够了**”的总原则下判断对错即可。但是，实践中却很纠结。还是那句话，我们不能直观地知道被测信号能量的 99.9% 对应的带宽是多少，或者说，我们不能轻易确定被测信号的能量在多少次谐波之后被衰减到 0.1%。

说法 1: 3-5 倍法则





流传最广的是 3-5 倍法则，即要求示波器的带宽是被测信号最高频率的 3-5 倍，就是说能覆盖被测信号的 3 次到 5 次谐波以上。这个法则在早期示波器培训的 PPT 文档中比比皆是，但笔者一直没有找到这个著名法则的原始出处。这个法则没有强调和说明被测信号的类型和上升时间，容易造成误导。假设测量的信号是正弦波，是否还需要 3-5 倍呢？假设被测信号是上升沿特别快的差分时钟信号，3-5 倍远远不够的。有些信号基频较低，却具有快速的上升时间！

更快的上升时间会引入振铃现象，同时意味着更高的频率成分，信号的高次谐波分量所占能量比重更大。如图 3 所示，假设被测信号是左边灰色的波形，使用 5 倍带宽后，测量出来的信号失真，表现为上升沿变缓，过冲消失了，如图中的黑色线标识。

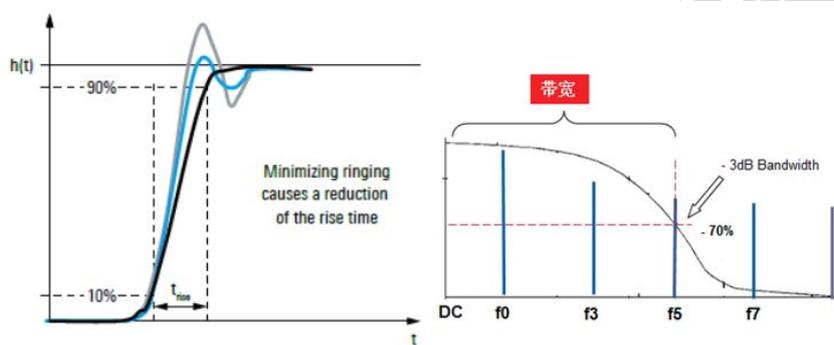


图 3 带宽对测量的影响示意图

说法 2：3 倍正弦波频率

这个法则的表达是：如果被测信号是正弦波，那么带宽是正弦波频率的 3 倍。但是，笔者认为 3 倍是不必要的。如图 4 是鼎阳科技的电商专品 SDS1102E 的幅频特性曲线，表 1 是其对应的计量数据。对于 100MHz 带宽的示波器，80MHz 以内的幅频特性曲线是很平滑的。譬如对于输入 80MHz 的正弦波，100MHz 带宽的 SDS1102E 就足够了。但是如果被测信号是 100MHz 的正弦波，SDS1102E 的带宽略显不足，测量 100MHz 正弦波的幅值会有 3% 的误差，这个误差也并不大！不同幅频特性曲线的“拐点”不一样，以 2 倍正弦波频率的裕量是足够的了。



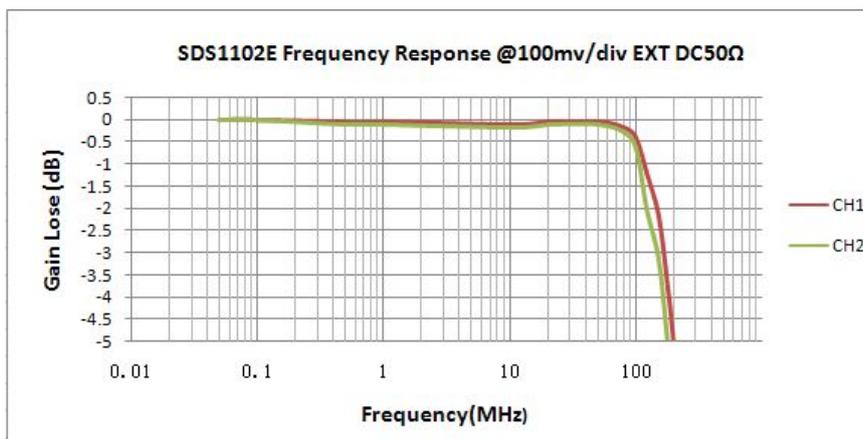


图4 鼎阳 SDS1102E 的幅频特性曲线

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

说法3: 信号带宽是1.8倍测试信号的比特率, 示波器带宽是信号带宽的2倍

在参考文献[2]中从数学上分析了串行信号的"通道带宽"和上升时间的关系。结论如表2所示。

Rise time (in percent of UI)	Channel Bandwidth (as multiple of bit rate)
0	∞
10	3.497
20	1.748
30	1.166
40	0.874
50	0.699
60	0.583
70	0.5
80	0.437
90	0.389
100	0.35

表 2 串行数据的带宽选择依据

当被测信号的上升时间等于 20% 的 UI 时，信号的带宽只要能达到被测信号比特率的 1.8 倍，该带宽就能覆盖信号能量的 99.9%。当被测信号的上升时间等于 30% 的 UI 时，信号带宽只要是被测信号比特率的 1.2 倍就可以覆盖信号能量的 99.9%。UI 表示 Unit Interval，是串行信号比特率的倒数，是一个数据比特位的时间长度，譬如 8Gbps 的 PCI-E 3.0 信号，其 UI 等于 125ps。这个选择依据可以解释为什么对于 PCI-E 3.0 信号，虽然数据比特率达到 8Gbps，但在做一致性测试时，规范中要求带宽是 12.5GHz 就可以了。因为一致性测试是通过测试夹具进行的，8Gbps 的串行信号经过夹具和电缆之后的上升时间已经没有 20% UI 了，按 30% UI 对应的 1.2 倍关系一般都可以了，就是说实际上可能不需要 12.5GHz，规范要求 12.5GHz 留有一定的裕量。

时钟信号可以理解一种码型是标准的 0101 的串行数据，100MHz 的时钟信号的比特率是 200Mbps，对应的 UI 是 5ns，如果上升时间是 1ns，对应的是 20%UI，信号带宽是 400MHz(1.8*200Mbps)以上，建议示波器带宽是 2 倍信号带宽，800MHz。选择 1GHz 示波器是合适的。但是很多时钟信号是差分的，上升沿特别快，100MHz 时钟的上升时间只有 500ps，刚好是 10% UI，根据表 2，对应的信号带宽就需要 3.5 倍比特率，需要更高带宽示波器。

说法 4：示波器本身的上升时间小于信号上升时间的 1/3

对于脉冲方波信号，在参考文献[3]中，信号完整性之父 Dr. Howard Johnson 给出了表 3 所示的基于上升时间的带宽选择法则。Howard 建议先确定示波器的上升时间，再根据上升时间来确定带宽。]

Ratio $t[\text{scope}]/t[\text{signal}]$	General accuracy
< .1	better than 0.5 %
1/3	5%
1/2	12%
1	40%
>1	do not attempt

表 3 基于上升时间的带宽选择法则

如果示波器的上升时间小于被测信号上升时间的 1/3，测量的精度为 5%。为了获得更准确的测量结果，示波器的上升时间应更小一些。再根据上升时间和带宽的关系来确定带宽。

要重申的是，表 3 是根据式 (3) 得来的，但是式 (3) 是基于一个纯高斯曲线的假设，存在一定的误差。

对于 100MHz 的时钟信号，假设上升时间是 1ns，根据该法则，选择示波器的上升时间是 333ps，对应的带宽大约 1GHz。

说法 5：更高带宽试探法

先使用比理论计算更高的带宽测量，再使用更低一定的带宽来比较，看看波形的形状，特别是上升沿和尖峰毛刺是否有变化。但是，在实践中用户未必有条件使用不同带宽的示波器。现在有些示波器具有数字滤波器功能，可以任意设定数字滤波器的带宽进行这种试验。

如图 5 所示，利用中国首款智能示波器 SDS3054 测量频率为 10MHz，上升时间为 20ns 左右的方波信号，分别将带宽限制到 200MHz 和 20MHz，可以看出，20MHz 带宽将导致信号上升沿变缓，测量到的上升时间为 25ns，误差很大，如图示黄色波形。

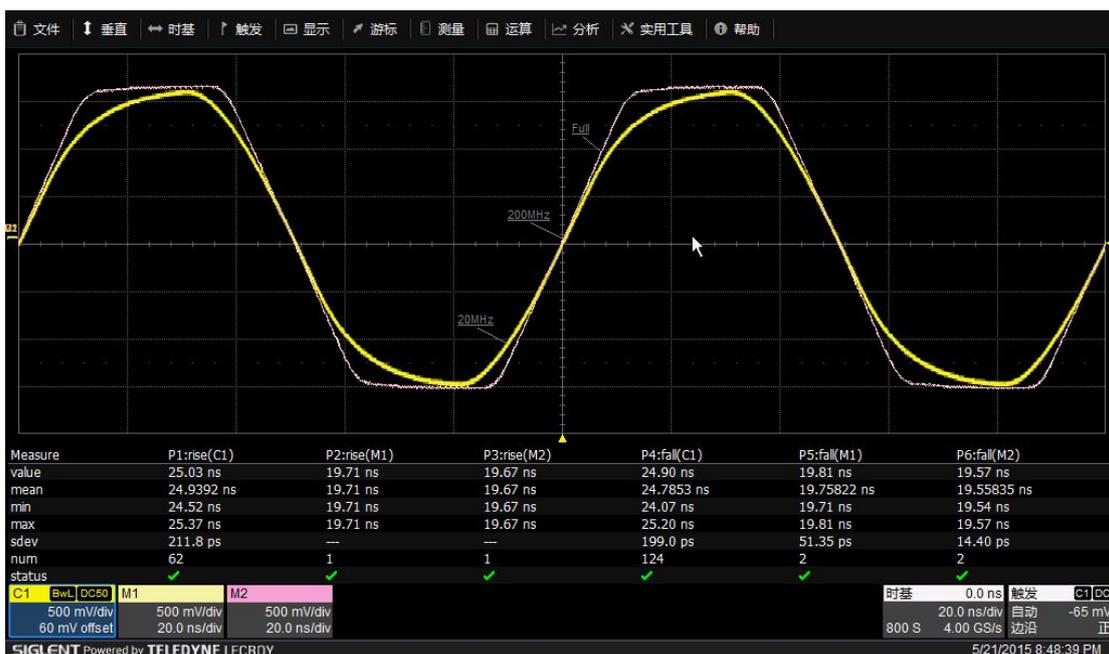


图 5 基于鼎阳示波器 SDS3054 在不同带宽限制下的测量结果比较

5. 带宽的选择并不是越高越好

示波器的带宽越高，那么示波器的上升时间越小，根据式 (3)，测量出上升时间的准确度越高，因此，示波器的带宽越高越好。这似乎很符合逻辑，而且基于严格推导的公式得出的结论！但这个逻辑是一种误导！公式只是纯理论上的公式，重要的事实是示波器的放大器和测量系统不是一个纯理想的 RC 电路。

在不确定信号分解到第 N 次谐波的时候能量衰减到 99.9%，在选择和使用示波器时可以留下足够的带宽裕量，但是带宽过高会造成一个严重问题是：引入的噪声能量超过了同等带宽范围内的信号自身的能量，也会导致测量结果不准确。这就是测量中反复要提及的信噪比 (SNR) 的问题。

假如使用 500MHz 的示波器能覆盖被测信号 99.9% 的能量，测量精度可以达到 5% 以内，但是我们偏要使用 1GHz 的示波器，那么在 500MHz-1GHz 频率范围内引入的噪声能量远远大于 500MHz-1GHz 范围内覆盖的被测信号剩下的 0.1% 的能量。测量的结果在时域上就表现为波形上叠加了很多高频成分的随机噪声，影响到一些参数的测量结果。因此，反而用 500MHz 测量的结果更准确！！这也就是为什么在测量电源纹波的时候，我们要将带宽限制为 20MHz。

示波器本身和测量系统引入的噪声主要包括：示波器放大器和 ADC 的本底噪声；测量系统的地（一般是探头的接地）引入的地环路的传导噪声；探头的地线和探头的各种配件组成的环路感应的空间辐射噪声。这三种噪声特别是后两种在缺少必要的抑制措施的情况下会成为测量中诸多问题的根源。



参考文献：

- [1]用示波器测量上升时间的讨论，王秀杰，周胜海，信阳师范学院学报，Jul,2008
- [2]Eye Patterns in Scopes， Peter J. Pupalaikis, Eric Yudin, Teledyne LeCroy Corp., 2005
- [3] Adequate Bandwidth, Dr. Howard Johnson

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。

