

精确测量电源轨的四个技巧

在当前的电子设计领域，电源分布网络（PDN）已经成为一个技术重点。形成这一趋势的背后有哪些推动因素？首先是电源轨的电压在不断降低，而且容限越来越严苛。原来的电源轨电压为 5 V，容限为 5%，而现在降低到了 1.2 V 甚至更低，容限仅为 1% ($\pm 0.5\%$)。这意味着用户需要分析幅度仅为几毫伏的信号($1.2V \times 0.5\% = 6mV$)。其次，直流电源系统正成为系统抖动的重要来源，在解决系统问题时不得不对电源分布网络给予更多的关注。因此，用户必须选择适合的工具，以便在不改变电源轨特性的情况下，有足够的带宽来查看周期干扰和随机干扰。

电源分布网络可能包括 10 到 30 个电源轨。有些电源轨的电压是独一无二的，有些则是相同的。电压值最低只有几百毫伏，最高超过 10 伏。由于 PDN 连接到所有用电器件上，所以电源轨上的噪声或瞬态特征也会传播到整个系统中。因此，电源轨上的噪声和耦合成为造成系统抖动的首要原因。

为了提高测量的准确性，电源完整性测量（例如测量纹波和噪声，以及查找瞬态干扰和周期干扰的来源）的要求变得更加苛刻。原因何在？电源轨电压越低，其容限也就越苛刻，但这往往被示波器和探头的噪声所掩盖。用户无法获得足够的偏置以放大显示测量结果。连接方法也会在无意中改变直流电压值。

业界已经出现专为电源轨测量而设计的探头。结合使用具有带宽限制和丰富测量功能的低噪声示波器，工程师能够执行更精确的电源完整性测量。下面是使用示波器精确测试电源分布网络的四个重要技巧。

1. 首先选择噪声最小的示波器和探头。

当您测量摆幅只有几毫伏的信号时，如果噪声也差不多大小，那么肯定不会得到满意的测量结果。示波器和探头的噪声可能会掩盖掉周期性干扰和随机性干扰。所有示波器都带有前端，它会产生一定的噪声并添加到信号中。示波器显示的测量结果实际上包含被测信号和示波器噪声两部分。与示波器上的 $1 M\Omega$ 路径相比， 50Ω 路径的噪声小得多，因此 50Ω 路径更适合电源轨测量。

确定您的示波器有多大噪声很容易。在 1 GHz 带宽下，噪声最高的示波器与噪声最低的示波器其噪声电平相差好几倍。断开所有输入，然后测量每种垂直标度设置下的 $V_{AC\ rms}$ 。测试电源轨的工程师通常更关注峰峰值噪声测量，因为电源轨上的纹波和噪声一般是用峰峰值来测量。在您将要使用的每个垂直灵敏度下重复执行噪声测量。测量结果会得到一个图形，如图 1 所示。对于电源轨测量，最常用的垂直标度设置都 $<=50 mV/\text{格}$ 。如果您用的示波器不是太老，您通常可在制造商提供的技术资料中查出示波器本底噪声指标。如果您有两种不同的示波器候选，可以根据测量结果来决定使用哪种示波器。如果您只能使用某一台示波器，那么可以利用测量判断哪个通道的噪声最低，最适合用来做电源轨测量，在每个垂直标度设置下，不同通道的噪声略有差异。如果您更喜欢使用 ADC 分辨率超过 8 位的示波器，在验证其本底噪声时，您就会发现当垂直灵敏度小于 $20 mV/\text{格}$ 或 量程小于 $160mV$ 时，示波器本底噪声的影响比示波器的 ADC 分辨率更重

要，这时影响测量结果显示的最大因素不是分辨率，而是噪声，所以示波器的前置放大器等技术也很重要，最后要看示波器的综合指标，图 1 中的蓝色曲线代表 Infiniium S 系列示波器的本底噪声，虽然是业界本底噪声最低的示波器，但在小量程下和理想的 ADC 分辨率仍由较大差距。

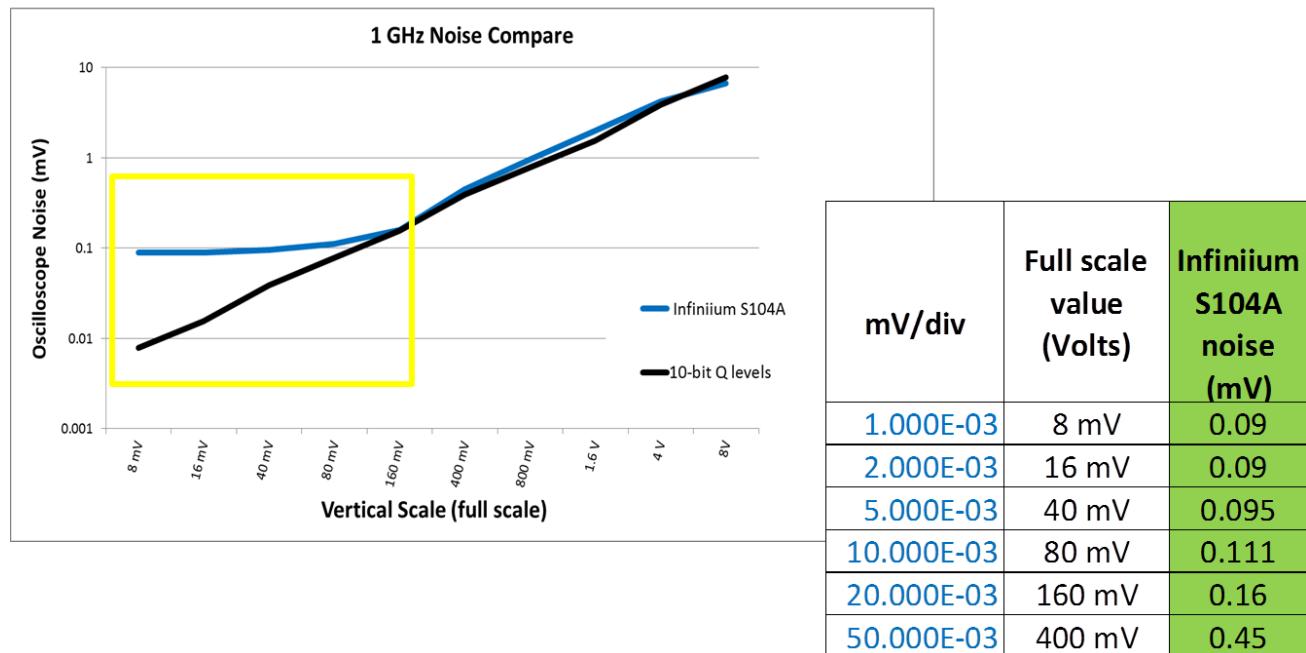


图 1. 花几分钟评估示波器的噪声。图中显示了 Keysight Infiniium S 系列示波器在 1 GHz 带宽下的噪声特性。在最灵敏的垂直标度设置下，噪声最小。因此，最好将垂直标度设置为最小，让电源轨波形满屏显示。

图中文字中英对照

1GHz Noise Compare	1GHz 噪声比较
Oscilloscope Noise (mV)	示波器噪声 (mV)
Vertical Scale (full scale)	垂直标度 (满量程)
Infiniium S104A	Infiniium S104A
10-bit Q levels	10 位 Q 电平
Full scale value (Volts)	满量程标度值 (V)
Infiniium S104A noise (mV)	Infiniium S104A 的噪声 (mV)

除了示波器所引发的噪声外，连接的探头或电缆也会增加噪声。与衰减比较高（例如 10:1）的探头相比，衰减比较低（例如 1:1）的探头其噪声也较低，因此在电源轨测量中更常用。图 2 的例子中有 2 个探头，分别连接到同一台示波器。一个探头在示波器噪声上只增加了非常小的噪声；而另一个探头对总体噪声的影响是前者的 10 倍。如需测试探头噪声，可以将探头连接至将要使用的示波器通道。然后将探针接地，并测量 V_{acrms} 或峰峰值电压。这就是示波器和探头的噪声。示波器厂商通常不公布探头噪声指标，因此您需要咨询供应商或自己实测。

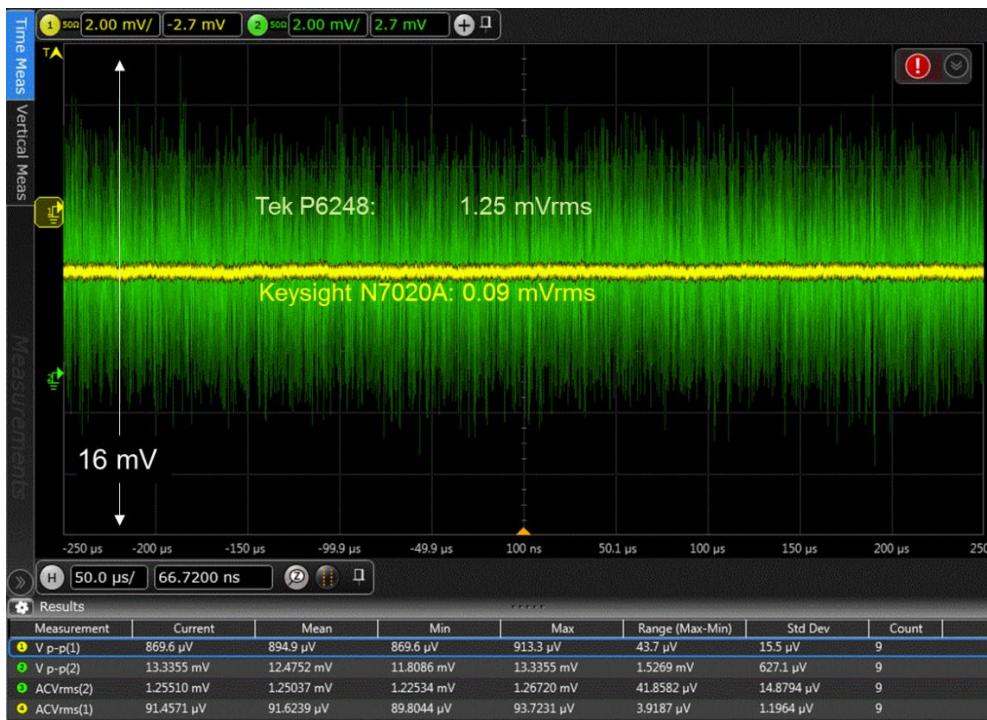


图 2. 探头噪声添加到示波器噪声上。屏幕上显示的是电源轨测量可能使用的两个不同探头的噪声。Tek P6248 探头的噪声是 Keysight 7020 电源轨探头的 10 倍。

选择低噪声的探头甚至比选择低噪声的示波器更重要。探头的噪声通常比示波器更大。例如，Keysight N7020A 电源轨探头添加的噪声就非常小，与 Infiniium 示波器连接时，只增加了 10% 的噪声，示波器性能好，但探头性能若不好，实际的测量结果就不会好。

2. 使用降噪技术。

在特定示波器中，最大的噪声部分是宽带噪声。断开示波器的所有输入，对频域中的噪声结果实施 FFT 运算。图 3 给出了一个实例。如果对 4 GHz 带宽的 Infiniium S 系列示波器执行 FFT 运算，结果显示在示波器的整个带宽范围内噪声密度都是一致的。对 FFT 下的区域进行积分运算，您将得到与时域结果相同的噪声值。

打开带宽限制或带宽滤波器可以降低宽带噪声，得到更准确的测量结果。如果您的测量不需要使用示波器的全部带宽，那么尽量限制所使用的带宽大小。不过，带宽限制滤波器的缺点有哪些？当您需要查看较高频率的信号时，必须保证没有对带宽做太多限制。请看图 3 中的例子，如果您使用 35 MHz 带宽的探头，那么就看不到信号源输出的频率分量超过 35 MHz 的干扰或串扰。虽然纹波的频率通常是 kHz 级的，但来自耦合信号源和快速信号边沿的周期性失真可能包含超过 1 GHz 的频率成分。



图 3 显示了 2.5 GHz 带宽的电源轨测量和另一个带宽限制为 20 MHz 的电源轨测量。在高带宽下，您可以清晰地看到高频干扰，但是在打开 20 MHz 带宽限制后就看不到了。

另一种降低噪声的方法不是很引人注目，但是一样重要。前面提到过，示波器的带宽和垂直灵敏度都对噪声有影响。垂直灵敏度越低，噪声就越小。以 1 GHz 带宽的 Keysight S 系列示波器为例，示波器的噪声在 50 mV/格标度下为 450 μ V，在 20 mV/格下只有 160 μ V，在 2 mV/格下更是降低到 90 μ V。因此关键是要使用能够实现最高信噪比的灵敏度。这意味着您应把电源轨测量的量程设定为满屏显示。如果您需要同时查看两个电源轨，可以把它们上下分屏(grid)显示，每一个电源轨尽量占示波器每个分屏(grid)的满屏显示，这样不会导致噪声增加，如果您的示波器不支持多个分屏(grid)功能，您让两个波形在一个屏中显示，每个占 4 个格，这样您牺牲了 1-bit 的 ADC 分辨率，导致噪声增加。

3. 使用符合偏置要求且具有最高直流输入阻抗的探头

电源轨测量要求用户在示波器屏幕中心位置显示轨电压的波动，并放大显示以测量纹波和观察瞬态特性。示波器通常支持一定范围内的偏置，并随着垂直标度变化而变化。在小量程设置时，示波器自身的偏置范围通常无法满足测试需求。例如在 Infinium S 系列上，在 80 mV 量程

设置下，可用偏置仅有 24 mV 。这使它不可能显示 3.3 V 、 1.6 V 或其它电压的电源轨测量结果。您将发现大多数示波器都是这种情况。解决这一问题有两种办法。

许多工程师选择使用隔直流电容来滤除直流值。这种方法的好处在于它使用户能够只查看信号的交流分量，但主要缺点是无法查看直流漂移和电压缓慢下降的情况。直流值可能会随着器件的开启和关闭而发生变化，用户除了要知道交流特性外，了解直流值也非常重要的。因此通常不建议使用隔直流电容器。

达到偏置要求的更好办法是使用具有偏置的探头。探头制造商通常在探头设计中加入偏置功能。这种偏置可以很好地补充示波器偏置的不足。例如在前面提到的例子中，示波器只能提供 $+-24 \text{ mV}$ 的偏置，结合使用 N7020A 电源轨探头可以将偏置范围扩大到 $+-24\text{V}$ 。这个偏置范围覆盖了绝大多数电源轨直流值，使用户能够以最小 1 mV/格 的标度放大信号，不会给偏置增加任何限制。

4. 使用大输入阻抗的探头

我们在前面说过，要获得最低噪声，最好使用示波器的 50Ω 输入端。您是直接将同轴电缆连接到 50Ω 输入端，还是使用探头连接？哪种方法的优势更大？答案与连接方法的输入阻抗有关。电源轨的阻抗通常小于 1Ω 。当用户用 50Ω 同轴电缆连接示波器和电源轨时，会发生两件事。首先， 50Ω 连接会构成电阻分压网络。部分电流现在将会通过同轴电缆流向示波器。部分电流将会被吸离目标系统，影响目标系统的运行状态。其次，示波器因为探头负载效应的存在，您实际测出的电压值是小于实际值的，这种方法测到的直流值是不准确的，因此，即使您的示波器本身支持足够大的偏置范围，也最好不要使用还是使用 50Ω 同轴电缆来测量，而应该使用直流输入阻抗较大的探头。

目前，市面上已经出现专门为电源轨测量而设计的探头。电源轨探头专为电源完整性测量而设计，具有最精确的电源轨测量能力和特性，这些特性包括低噪声（ $1:1$ 衰减比）、高偏置范围、高直流输入阻抗以及用于查看瞬态特性的足够带宽。Keysight N7020A 电源轨就是电源轨探头的一个例子。这款探头拥有 $50 \text{ k}\Omega$ 的直流输入阻抗。与前面使用 50Ω 同轴电缆直接连接 50Ω 示波器输入端的例子相比，它对负载的影响小 1000 倍。

随着电源电压的不断降低以及电源分布网络的日趋复杂，用户对更精确测量电源轨的需求将继续增长。能够出色地完成电源完整性测量的示波器和探头组合并不多，选择和使用正确的工具以及其他相关技术将有助于用户实现最精确的电源轨测量。