

Application Note

高质量低压降稳压器测量技术



Hannah Grace and Nicholas Butts

摘要

本应用手册详细介绍了关于采集低压降 (LDO) 稳压器的高质量测量数据的最佳实践。本文档重点介绍了相关测量，包括线路和负载瞬态及有关正确设置示波器的其他信息。

内容

1 简介.....	2
1.1 示波器基础知识.....	2
2 寄生效应的影响.....	3
3 常见的示波器问题.....	3
3.1 选择示波器探头.....	3
3.2 充分采样.....	5
3.3 可视化.....	5
3.4 使用电流探头测量电流.....	6
3.5 带宽限制和均值计算.....	6
4 寄生效应对常见测量的影响.....	8
4.1 负载瞬态.....	8
4.2 电源抑制比.....	8
4.3 输出噪声电压.....	9
5 总结.....	10
6 参考资料.....	10
7 修订历史记录.....	10

插图清单

图 3-1. 采用鳄鱼接地夹连接的 TLV773 负载瞬态.....	4
图 3-2. TLV773 上采用鳄鱼接地夹设置的探头.....	4
图 3-3. 采用接地弹簧连接的 TLV773 负载瞬态.....	4
图 3-4. TLV773 上采用接地弹簧设置的探头.....	4
图 3-5. 使用 SMA 连接的 TLV773 负载瞬态.....	5
图 3-6. TLV773 上的 SMA 设置.....	5
图 3-7. 500 个样本.....	5
图 3-8. 50k Samples.....	5
图 3-9. 可视化效果不佳.....	6
图 3-10. 聚焦于上升沿.....	6
图 3-11. 使用长布线的电流探头测量.....	6
图 3-12. 使用短布线的电流探头测量.....	6
图 3-13. 全带宽 (500MHz) 上升沿信号.....	7
图 3-14. 受限带宽 (20MHz) 上升沿信号.....	7
图 3-15. 未计算均值的负载瞬态.....	7
图 3-16. 计算 5 次采样均值的负载瞬态.....	7
图 4-1. TPS7A57 输入和输出端具有额外寄生效应的负载瞬态.....	8
图 4-2. TPS7A57 输入和输出端寄生效应极低的负载瞬态.....	8
图 4-3. 具有额外寄生效应的 TPS793 PSRR.....	9
图 4-4. 具有额外寄生效应的 TPS793 输出电压噪声.....	9
图 4-5. 具有有限寄生效应的 TPSS793 输出电压噪声.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

低压降 (LDO) 稳压器将较高的输入电压调节至较低的输出电压，这一点与开关稳压器类似。但与开关稳压器不同的是，LDO 可用作噪声滤波器件，在现代设计中实现起来要简单得多。要了解有关 LDO 工作原理的更多信息，请参阅 [了解线性和低压降稳压器 \(LDO\) 的基础知识](#) 视频。随着高频电源系统应用对低噪声器件的需求不断增长，LDO 在满足需求方面发挥着重要作用。实现这一作用意味着需要实施更多基础测量以便调试，并且了解如何正确进行高质量测量变得越来越重要。进行测量可能是一项具有挑战性的任务，因此在测量之前，请密切注意硬件设置和器件配置。典型测量项目包括但不限于负载瞬态、线路瞬态、短路测试和欠压测试。

1.1 示波器基础知识

在进行示波器测量时，请记住以下关键基础知识：

1. 启动示波器，请注意此过程可能需要较长时间。例如，部分示波器可能需要 30 分钟或更长时间才能达到指定的精度。
2. 在进行测量之前，请了解所要进行的测量。条件是什么？使用的是哪些通道？
 - a. 确定要测量的条件，例如 V_{IN} 、 V_{OUT} 、负载等。
 - b. 在示波器的通道上添加标签，有助于轻松识别每个通道。用户很可能需要向其他用户展示采集到的波形，养成在每个通道上标记波形的习惯有助于其他人了解这些信息。
3. 根据需要，将 LDO 端子连接到每个示波器通道。将通道设置为高阻抗终端模式 ($1M\Omega$) 是理想之选，除非待测信号也使用 50Ω 端接，否则建议选用高阻抗模式。确定交流耦合或直流耦合是否适用于每个通道，待测信号是否是叠加在 10V 直流信号上的 10mV 交流信号？如果是，使用直流耦合时很难查看 10mV 信号，在这种情况下适合使用交流耦合。为瞬态测量选择与示波器带宽匹配的探头。根据 LDO 设置的电平，验证每个示波器通道是否显示了正确的电压和电流电平。
 - a. 示波器测量探头选型颇为困难，因此在选择示波器探头时，请选择合适探头进行正确的测量。有关选择示波器探头的其他信息，请参阅 [选择示波器探头](#)。
 - b. 连接长导线探头时要格外小心。从探头尖端经过接地夹返回探头的较长返回路径会拾取额外噪声，进而影响测量读数。了解电路中寄生效应影响的更多信息，请参阅 [寄生效应的影响](#)。
4. 示波器启动后，屏幕上会显示先前配置的示波器水平系统时间刻度和垂直系统电压刻度的状况。调整水平时间刻度 (秒/格)，可在时间刻度上进行缩放。
 - a. 调整水平时间刻度相当于对波形进行放大或缩小，有助于显示目标信号活动周围的完整波形。例如，如果用户要测量带宽约为 100kHz 的控制环路脉冲响应，则将时间刻度设置为 $10\mu s/div$ 是理想选择。有关示波器缩放不当的示例，请参阅 [可视化](#)。
 - b. 查阅示波器用户指南，有助于进行设置调整，以便与测量值保持一致。
5. 确定适合触发示波器捕获的理想信号。对于 LDO，触发相关瞬态行为的信号通常是使能 (EN) 信号的上升沿或下降沿，亦或是负载电流的变化。确定触发信号后，进入示波器触发设置页面，然后选中与触发信号对应的通道。随后，将触发器设置为介于最小值和最大值之间的约半程电压或电流电平下，用于检测信号边沿 (可以是上升沿或下降沿，具体取决于所执行的测试)。例如，如果 EN 信号从 0V 上升到 2V，则设置触发器以检测电压超过 1V 时与 EN 波形对应通道上的上升沿。
6. 配置并触发示波器后，是否得到所需的测量数据？
 - a. 如果没有得到所需的测量数据，请继续调整垂直刻度和水平刻度，并配置每个通道的 Volts/div (伏特/格) 和 offset (偏移量)。
 - i. 此外，还需检查信号路径补偿。如果需要直流测量精度，则建议运行自校准。示波器制造商提供了有关自校准运行频率的建议。
 - b. 用户可以通过实施水平延迟 (例如向左移动波形)，而非在屏幕中央捕获触发事件，来提高屏幕空间利用率。
7. 请参阅示波器用户指南，了解正确测量的示例。

- a. 示波器制造商的网站上还会提供其他资源。例如，如果使用的是 Teledyne LeCroy 示波器，请参阅 [LeCroy 彩色数字示波器实践指南](#)。

备注

现代示波器中的所有通道共用一个接地端。要格外留意，切勿让示波器探头的接地端造成电路短路。

2 寄生效应的影响

在设计电路时，我们经常会忽略寄生效应，但实际上寄生效应始终存在，并会导致预期情况出现偏差，影响到数据的采集。当这些意外效应发生时会怎么样？设计印刷电路板 (PCB) 时，设计人员必须记住，所有迹线都略微带有电阻、电容和电感特性。这些效应也称为寄生效应。尤其是在高频测量中，设计时考虑到寄生效应，对于验证 LDO 是否符合预期非常重要。电阻寄生效应会导致增益误差，产生直流电压误差，导致 LDO 中的增益放大器输入端产生不匹配。电容和电感寄生效应可能会导致出现不必要的噪声和信号耦合。电容寄生效应还会导致电路不稳定。电感寄生效应会增加返回环路电感并产生 LC 谐振，导致瞬变期间出现振荡。

对于 LDO，进行高频测量时，噪声耦合和不稳定尤为需要注意。由于电路中存在寄生效应，高频测量中可能会存在额外的振铃、振荡以及通过电源接地平面产生的不必要的噪声耦合。电路中可能存在寄生效应的示例如下：

1. 微带覆铜线迹：
 - a. 微带覆铜线迹是以铜平面为基准的传输线路，通常用于高频信号。
2. 并行铜平面
 - a. 并行铜平面是 PCB 中用于电源信号的大面积铜区域，将承载数百毫安至数安培的电流。并行铜平面被用作电源或接地的低阻抗通路，但通常会产生电容寄生效应。
3. 过孔
 - a. 过孔用于连接 PCB 上不同层之间的信号，但通常会产生电容和电感寄生效应。
4. 相邻覆铜线迹
 - a. 相邻覆铜线迹允许布线到 PCB 周围的相关信号组，但通常会产生电容和电感寄生效应，并允许布线之间的信号耦合（也称为串扰）。布线彼此越靠近，耦合就越强。

进行测量之前，我们强烈建议控制电感和电容寄生效应。为了控制电感和电容寄生效应，应切断敏感测试节点下的铜平面和覆铜线迹，并尽量减少关键信号迹线上使用的过孔。如果在电源布线中无法避免过孔，则使用多个过孔有助于减弱寄生效应。此外，应使用较短的直接信号布线来更最大限度地减少不必要的噪声耦合，并在相邻迹线之间放置接地覆铜以尽可能减少串扰，这在使用双输入或双输出 LDO 进行设计时尤为重要。为了降低电感，高频瞬态电流的返回路径需要与载流迹线并联，但这会导致电路中的寄生电容增加。最后，我们建议减少连接到被测器件的布线 (DUT)。

3 常见的示波器问题

示波器设置对测量精度有重大影响，以下是一些需要注意的常见测量问题。

3.1 选择示波器探头

在进行测量之前，请为要进行的测量选择正确类型的示波器探头。示波器和探头的真实带宽必须至少等同于待测信号的带宽，以免测量结果出现失真。由于大多数示波器和探头并未指定采用真实带宽，而是指定为 -3dB 带宽，因此使用带宽至少是待测信号带宽 10 倍的示波器和探头，方可确保信号不失真。例如，在 10ns 内线性上升的信号具有 $0.35/10\text{ns} = 35\text{MHz}$ (Bogatin 公式) 的带宽，因此将示波器设置为 350MHz 或更高数值，并使用带宽为 350MHz 或更高的探头就足够了。

选择示波器探头时，需注意探头也容易受到寄生效应的影响。在瞬态测试中，较长的探头布线可能会导致压降显著增大。电容式 10X 探头可能会在 LDO 输出信号中引入额外的噪声。此外，在使用 10X 探头的情况下引入长接地环路，可能会在测量中增加不必要的噪声。10X 探头还可以有效提高信噪比，因为探头将信号衰减到十分之一，然后示波器以数字方式将信号增益 10 倍。因此在测量小信号时，有时亦可使用 1X 探头。使用 1X 探头时，需注意输入示波器通道的电压没有衰减，因此必须小心避免超过示波器通道的额定电压。

本节中，在进行负载瞬态测量时评估了两个示波器探头，分别为 SMA 探头和带有接地夹的探头。

图 3-1 显示了使用带有标准鳄鱼接地夹的探头进行的负载瞬态测量。图 3-2 显示了标准鳄鱼接地夹的设置，其中并无可连接探针尖端和接地夹的便捷测试点。可用的香蕉连接器用于将导线延伸连接到探头。图 3-1 显示了在使用标准鳄鱼夹时会出现较大的测量噪声，并且用户可以得出结论：器件噪声比数据表规定数据高得多。

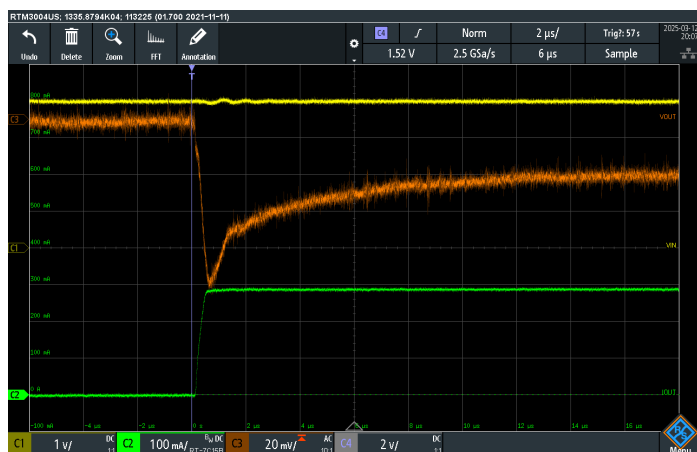


图 3-1. 采用鳄鱼接地夹连接的 TLV773 负载瞬态

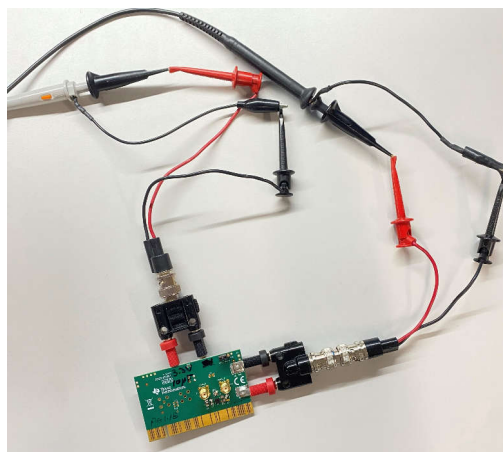


图 3-2. TLV773 上采用鳄鱼接地夹设置的探头

图 3-3 显示了示波器探头使用接地弹簧附件时的负载瞬态。图 3-4 显示了如何使用每个示波器探头自带的接地弹簧连接器。如果电路板上无 SMA 连接器，则在使用标准示波器探头时，采用此接地弹簧连接器是获得最短接地返回回路路径的理想选择，并且可以更大限度地减少耦合到测量中的噪声。图 3-3 显示了使用接地弹簧连接器实现的低噪声测量。

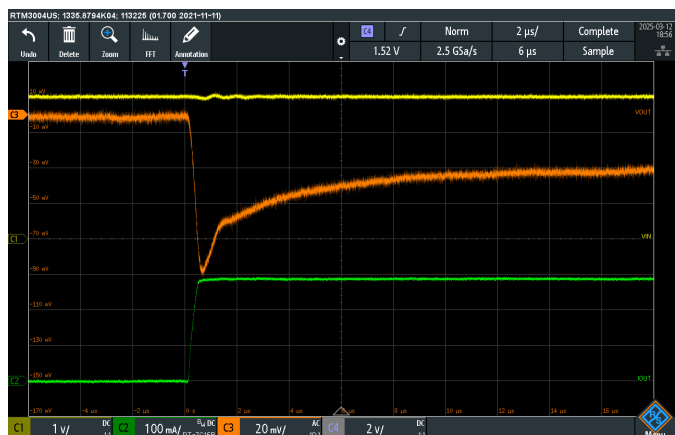


图 3-3. 采用接地弹簧连接的 TLV773 负载瞬态

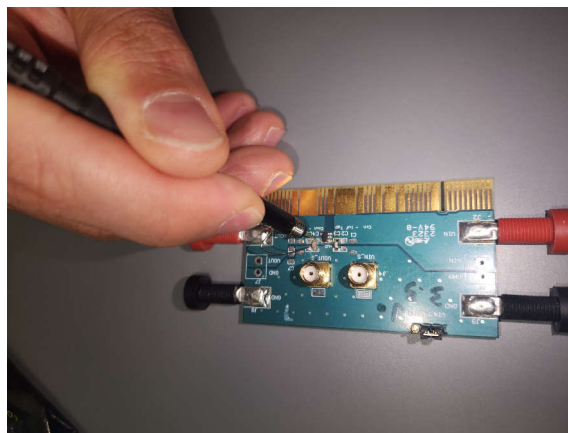


图 3-4. TLV773 上采用接地弹簧设置的探头

图 3-5 显示了使用 SMA 连接器时的负载瞬态，图 3-6 则显示了使用 SMA 连接器的设置。图 3-5 显示了噪声最小的测量结果。SMA 连接器采用屏蔽设计，可降低耦合到电缆上的噪声，并可显著缩小接地返回环路。最终实现了噪声极低的测量。只要可能，TI 均建议使用 SMA 连接器以实现超低噪声测量功能。TI 的许多先进 LDO EVM 都采用 SMA 连接器来测量关键节点，例如器件引脚附近的输入和输出电压。



图 3-5. 使用 SMA 连接的 TLV773 负载瞬态

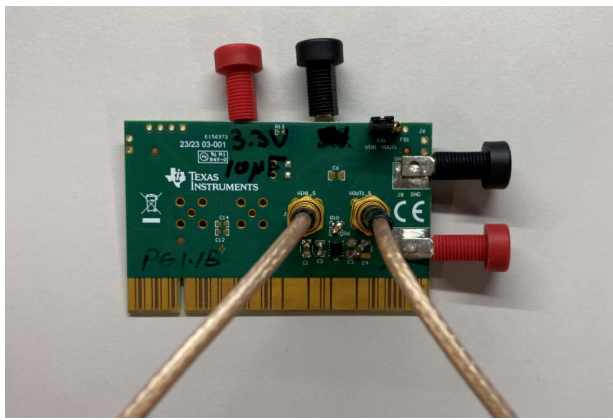


图 3-6. TLV773 上的 SMA 设置

3.2 充分采样

在示波器上进行测量时，必须对峰值瞬变进行足够的采样。如果进行波形测量时采样不足，测量中可能会出现混叠，从而导致采集的数据不一致。混叠会影响触发器，并导致波形位置水平移动。要了解有关混叠的更多信息，请参阅 [Teledyne LeCroy 示波器基础知识：采样速率](#)。在进行瞬态测量时，采样不足可能导致显示虚假的峰值，从而提供错误的测量数据。采样不足也会导致在某些信号峰值处采集的数据缺少信息，如 [图 3-7](#) 所示。

当波形中的采样不足时，每个通道的可视化将变得更加困难。比较以下图像，[图 3-7](#) 中有 500 个样本，[图 3-8](#) 中有 5 万个样本，由于 [图 3-7](#) 中只有 500 个样本，因此更难对每个通道进行可视化。

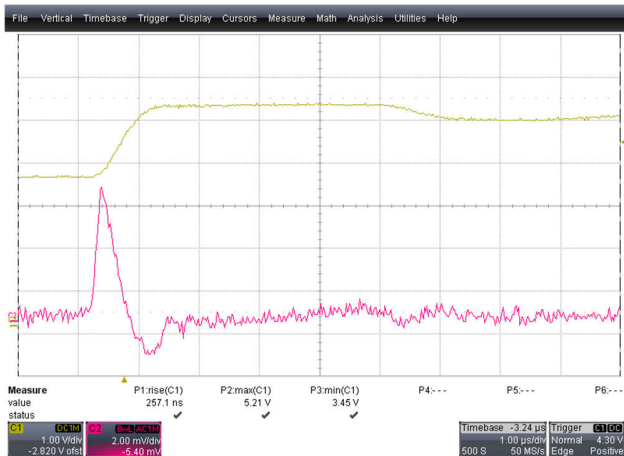


图 3-7. 500 个样本

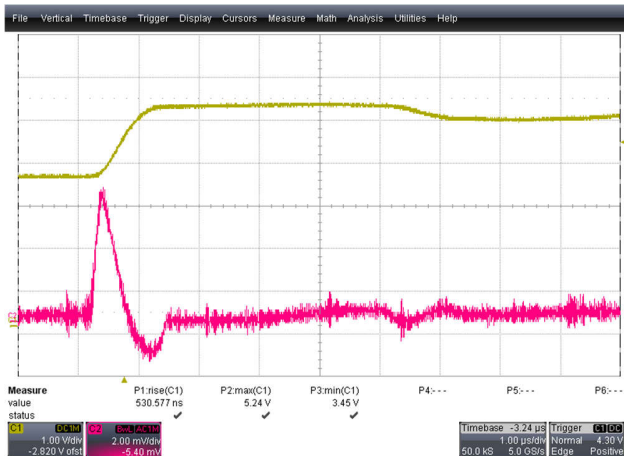


图 3-8. 50k Samples

备注

并非每个示波器都是相同的！有些示波器的有效带宽和/或采样率会在多个通道间分配，因此在使用更多通道时，这些参数可能会降低。

3.3 可视化

示波器能够在几个数量级之间进行缩放，从 1s/div 到 500ps/div，高性能示波器甚至可达到更细微级别。因此，选择适当时间刻度对于有效显示捕获的波形非常重要。波形不处于视觉焦点时，很难区分上升沿和下降沿的数据。当波形难以辨认时，可能会丢失电气特性的细节。如果测量时可视化效果不当，可能会给未来开发的测量调试工作带来隐患。[图 3-9](#) 显示了一个负载瞬态测量结果，但时间刻度过度放大，导致测量结果难以辨认。[图 3-10](#) 显示了一个负载瞬态测量，时间基准已校正，以便区分上升沿的数据。[图 3-10](#) 是一张满足可视化要求的图像。

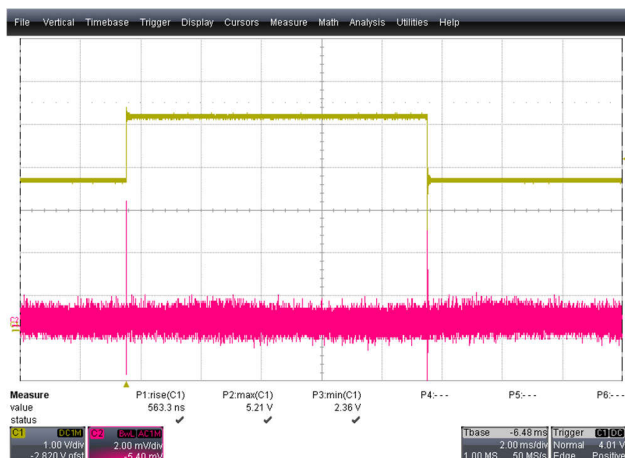


图 3-9. 可视化效果不佳

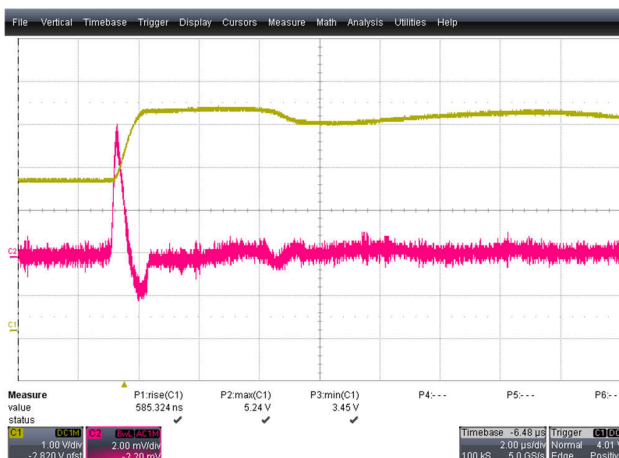


图 3-10. 聚焦于上升沿

3.4 使用电流探头测量电流

另一种常见的 LDO 测量方式是使用电流探头来测量输入和输出电流。电流探头通常难以测量电流，因为其要求电流路径穿过探头。为此，有时需要延长导线形成可以连接电流探头的环路，这会引入寄生电感。任何程度的寄生电感都会影响瞬态波形的形状，而寄生电感足够大时会导致较大的谐振电压尖峰，从而使器件的实际特性失真。我们使用电流探头在 TPS793 器件上进行负载瞬态测量，展示了图 3-11 中通道 4（绿色）的输出电流。负载瞬态使用长布线进行采集，其中会引入显著的寄生效应。额外寄生电感会在器件输出端引起较大的谐振电压尖峰。图 3-12 所示负载瞬态测量使用的布线明显更少，电感也极小，因此测量数据更准确。图 3-12 显示了实际器件对负载阶跃的响应，而图 3-11 没有显示。

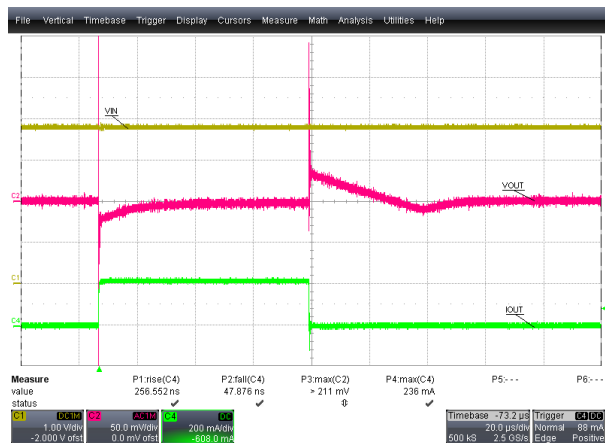


图 3-11. 使用长布线的电流探头测量



图 3-12. 使用短布线的电流探头测量

3.5 带宽限制和均值计算

带宽限制和均值计算是减少测量中噪声量的实用工具，但必须谨慎使用。这两种工具如果使用得当都有优势，但如果使用时未结合测量情况多加考虑，则会导致结果出错。

虽然带宽限制能有效降低波形中存在的高频噪声，但同时也可能削弱或滤除波形中对于调试而言至关重要的成分，比如过冲和下冲。这可能导致测量读数不准确，如图 3-13 和图 3-14 所示。如果预期测量中无预计的高频成分，可以使用带宽限制来更清楚地了解电路的电气特性并减少噪声，但在某些情况下，由于欠阻尼滤波器或寄生效应会产生噪声耦合或谐振，可能会出现意外的高频信号。我们建议从全带宽开始，仅在有一定把握表明测量结果中不存在重要的高频成分后，再限制带宽。

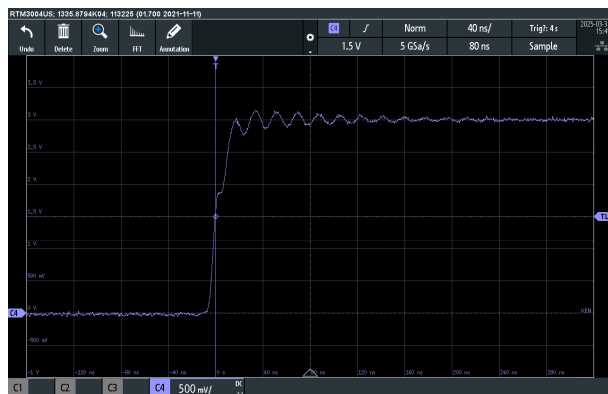


图 3-13. 全带宽 (500MHz) 上升沿信号

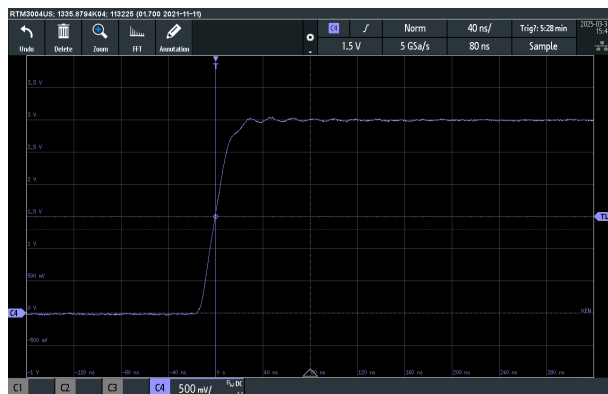


图 3-14. 受限带宽 (20MHz) 上升沿信号

当无法通过长测量线路降低噪声时，均值计算是一项实用工具。这种方法要求待测波形在两次测量之间保持一致。图 3-16 显示了如何通过通道 3 上负载瞬态下对 5 个样本求均值来降低如 图 3-15 所示测量结果的噪声。

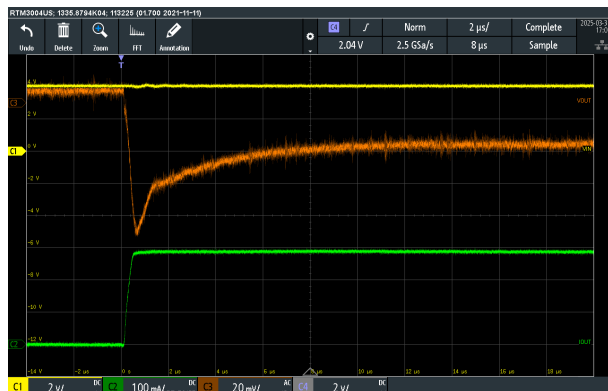


图 3-15. 未计算均值的负载瞬态

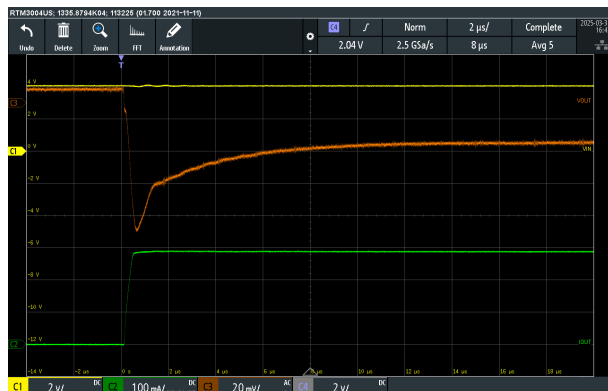


图 3-16. 计算 5 次采样均值的负载瞬态

4 寄生效应对常见测量的影响

4.1 负载瞬态

负载瞬态是负载电流的突然变化，LDO 对负载瞬态的响应是 LDO 的一个重要特性。负载瞬态响应受 LDO 内部补偿、内部误差放大器的动态带宽以及输出电容和寄生效应的影响。负载瞬态响应不佳（过度欠冲、过冲或振铃）会影响 LDO 供电元件的运行。有关负载瞬态的更多信息，请参阅[了解 LDO 的负载瞬态响应模拟设计期刊](#)。

下一节介绍了两种负载瞬态设置情形。我们使用器件 TPS7A57（一款高速 LDO）测试了各种情形。使用高速 LDO 时，在瞬态测量中，额外的电路电感变得很明显。其中一种情形下，因布线较长，迹线的寄生效应相当明显；而另一种情形下，迹线的寄生效应有限，并且与被测器件的连接更近。

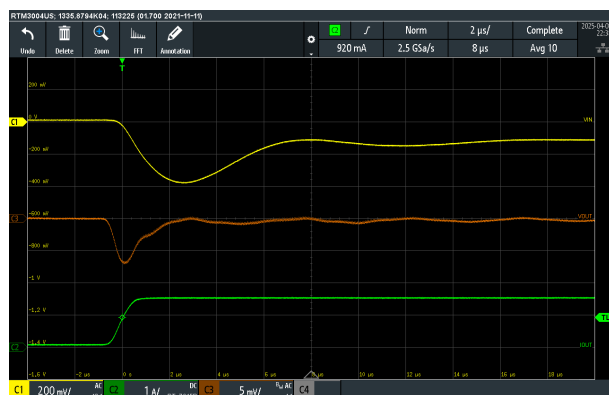


图 4-1. TPS7A57 输入和输出端具有额外寄生效应的负载瞬态

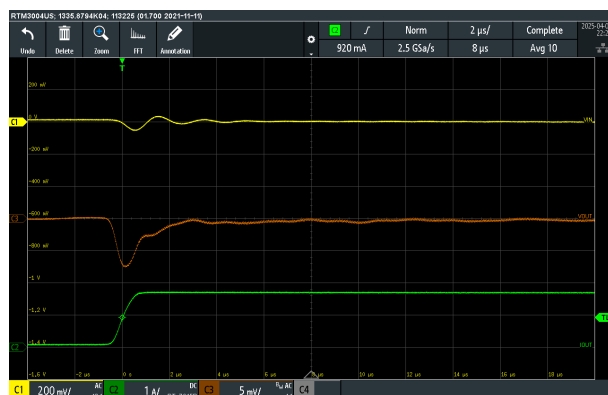


图 4-2. TPS7A57 输入和输出端寄生效应极低的负载瞬态

4.2 电源抑制比

LDO 的电源抑制比 (PSRR) 用于衡量输入端小信号纹波在输出端的衰减程度。要详细了解 PSRR 及如何进行 PSRR 测量，请参阅[LDO PSRR 测量简化](#)。

在下一节中，我们将介绍使用 TPS793 器件得到的两种 PSRR 测量设置情形，如[图 4-3](#)所示。情形一（如红色迹线所示）显示了明显更长布线下进行的 PSRR 测量，而情形二（如绿色迹线所示）显示了明显更短布线下进行的 PSRR 测量。如红色迹线所示，当 PSRR 测量中引入寄生效应时，在较高频率下收集到的 PSRR 测量数据偏低。在较高频率测量时，尤其是对于 PSRR，输出电容器特性会显著影响测量结果。随着更多的寄生效应与输出电容器相关联，在高频下收集的数据将反映出引入这些寄生效应后的电容器特性。

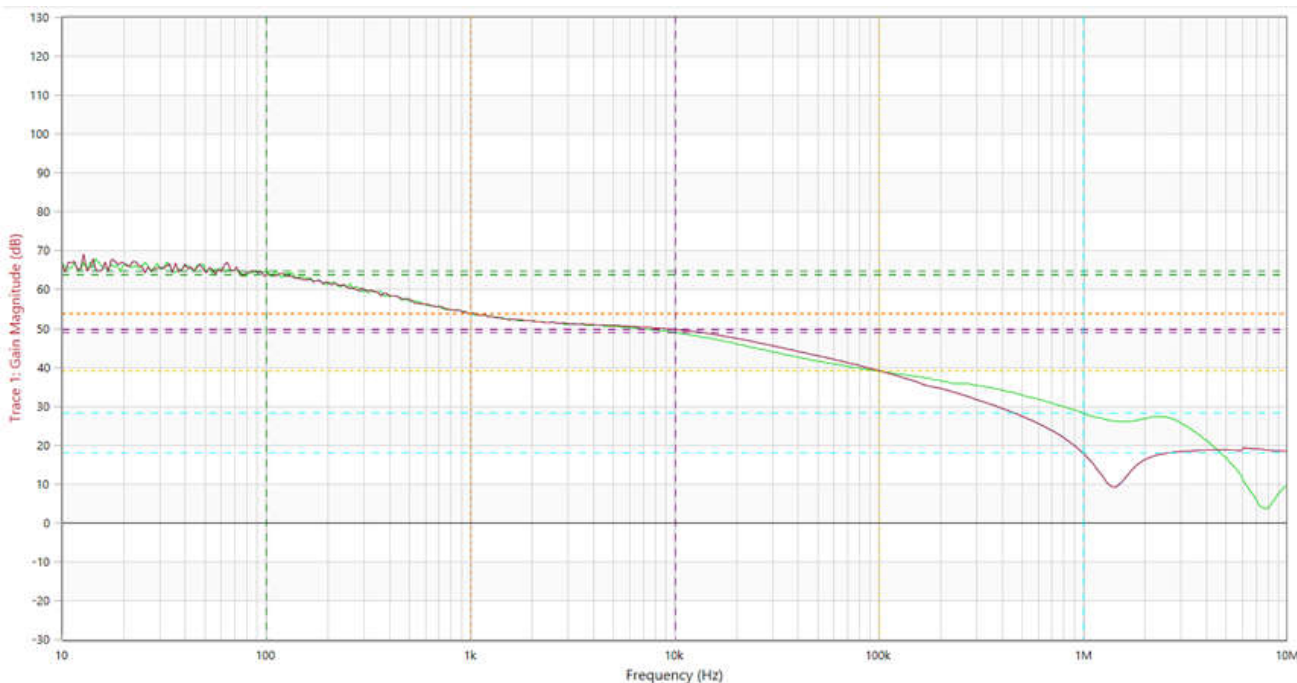


图 4-3. 具有额外寄生效应的 TPS793 PSRR

4.3 输出噪声电压

输出噪声电压是给定频率范围 (通常为 10Hz 至 100kHz) 内的 RMS 输出噪声电压。噪声是在恒定输出电流和无纹波输入电压的条件下测量的。要详细了解输出噪声电压及如何进行 LDO 噪声测量, 请参阅[如何测量 LDO 噪声](#)。

以下各节介绍了两种噪声测量设置情形。在 TPS793 器件上测试了各种情形。图 4-4 显示了使用明显更长的布线进行的噪声测量, 而图 4-5 显示了使用明显更短的布线进行的噪声测量。如图 4-4 所示, 噪声测量采用更多布线时, 会引入寄生效应, 这意味着测量中存在更多噪声, 而这与最终收集到的数据是相符的。存在寄生效应时, 图 4-4 中收集到的噪声为 69.9uVrms, 而图 4-5 具有很小的寄生效应, 显示的数据为 68.9uVrms。尽管对于此特定应用, 噪声似乎没有显著变化, 变化幅度只有 1uVrms, 但对于噪声较低的应用, 1uVrms 之差可能对器件的性能产生重大影响。

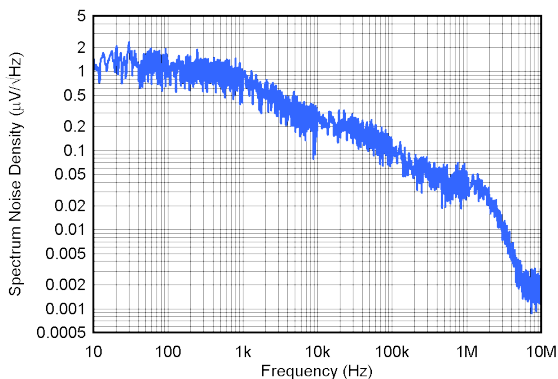


图 4-4. 具有额外寄生效应的 TPS793 输出电压噪声

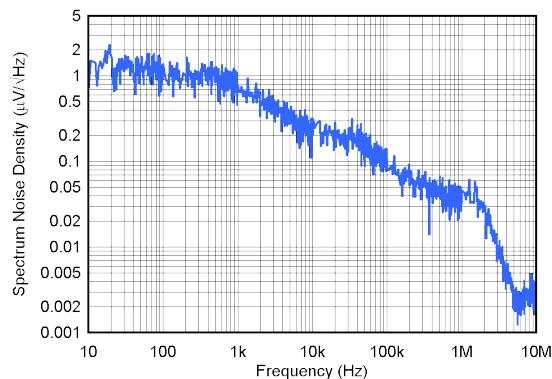


图 4-5. 具有有限寄生效应的 TPS793 输出电压噪声

5 总结

在验证 LDO 器件的规格精度时，测量的设置非常重要。在进行测量之前，请注意某些可能导致测量数据产生偏差或失真的测量条件。确保充分采样以避免混叠和可视化效果不佳。限制电路电感，缩短布线，以减少谐振振铃。最后，务必根据测量结果显示需求，通过调整水平和垂直刻度，正确调整示波器。在对 LDO 器件进行测量之前，请先验证测量的设置是否正确。

6 参考资料

- Teledyne LeCroy，[示波器基础知识：采样速率](#)。
- 德州仪器 (TI)，[了解 LDO 的负载瞬态响应](#)技术文章。
- 德州仪器 (TI)，[了解 LDO 电压稳压器的术语和定义](#)应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[LDO PSRR 测量简化](#)应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[如何测量 LDO 噪声](#)应用手册。
- Bogatin, Eric. “回归基础：带宽和上升时间。” 《信号完整性期刊》(Signal Integrity Journal) 2020 年 7 月 29 日，www.signalintegrityjournal.com/blogs/12-fundamentals/post/853-back-to-basics-bandwidth-and-rise-time。

7 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (February 2025) to Revision A (July 2025)	Page
• 更新了文档以体现技术准确性.....	1

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司