

Application Note

高质量低压降稳压器测量技术



Hannah Grace

摘要

本应用手册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，包括但不限于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：带接地夹的探头与 SMA 探头的比较.....	3
3.2 充分采样.....	5
3.3 可视化.....	6
3.4 使用电流探头进行测量.....	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 线路瞬态.....	8
4.3 电源抑制比.....	9
4.4 输出噪声电压.....	9
5 总结	11
6 参考资料	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

线性和低压降 (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](#)。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。为此，需要进行更多基础测量，以用于调试等目的。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。典型的测量包括但不限于负载瞬态和线路瞬态。

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. 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. 确保在测量中为每个通道设置了正确测量所需的每个条件，例如 VIN、VOUT、电流等。
 - b. 根据指定的测量条件，在示波器上标记这些通道，将有助于轻松识别每个通道
2. 根据需要，将 LDO 端子连接到每个示波器通道。确认示波器处于高阻抗模式且具有直流耦合。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. 选择用于测量的示波器探头可能是一项艰巨的任务。选择示波器探头时，为正确的测量选择正确的探头非常重要。有关选择示波器探头的其他信息，请参阅“常见示波器问题”部分。
 - b. 使用长导线探头时要小心。较长的布线可能会在测量中引起寄生效应，从而影响测量读数。如需详细了解电路中寄生效应的影响，请参阅“电感的影响”。
3. 启动示波器，请注意此过程可能需要较长时间。
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观察，有助于显示目标信号活动周围的完整波形。有关示波器缩放不正确的示例，请参阅“常见示波器问题”部分。
 - 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. 配置并触发示波器后，就可以获取所需的测量数据了！
 - 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 和偏移。
 - b. 此外，请确保在输出中正确设置触发电平，以启用或定位到正在观测瞬态变化的引脚。
 - c. 通过应用水平延迟，可以让波形显示在屏幕中央附近，避免偏离屏幕范围。
6. 请阅读示波器用户指南，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

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，但实际上寄生效应会对测量产生意外影响，并可能影响到数据的采集。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。

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. 微带覆铜线迹是具有铜平面的传输线路，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。通常情况下，电容寄生效应是通过散热器产生的。
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，但通常会产生电容寄生效应，并允许布线之间的信号电容耦合（也称为串扰）。

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。此外，应使用较短的直接信号布线来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，大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。通过 SMA、同轴电缆、双轴电缆等线缆来减少外部布线，可更大幅度地降低高频测量中产生寄生效应的风险。

3 常见的示波器问题

开始测量之前，对测量进行合理的设置，对于确保器件的精度和规格参数的准确性至关重要。

3.1 选择示波器探头：带接地夹的探头与 SMA 探头的比较

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。选择示波器探头时，请注意选择带宽至少为 LDO 带宽 10 倍或以上的示波器探头。生产环境中的电流 LDO 的带宽最高可达 3-5MHz，因此您选择的示波器探头的带宽必须达到 30-50MHz 或更高。

在进行示波器测量时，寄生参数已被无数次提及；而设置/选择示波器探头时，寄生参数同样不容忽视。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额外的不必要的噪声。

本节中，我们在进行负载瞬态测量时评估了两个示波器探头，一个 SMA 探头和一个带有接地夹的探头。图 3-1 显示了使用带有接地夹的探头进行的负载瞬态测量。图 3-3 显示了使用 SMA 探头的负载瞬态测量。如图 3-1 所示，当使用带有接地夹的示波器探头时，在瞬态测量中可以看到更多的振铃，而 SMA 探头产生的振铃和振荡更少。带接地夹的示波器探头充当接地环路，可能会在测量中增加显著的电感量。增加额外的电感量会影响测量性能，并可能导致测量误差。使用带接地夹的 Teledyne LeCroy 示波器探头时，测量的峰值间电压误差可能高达 40%。

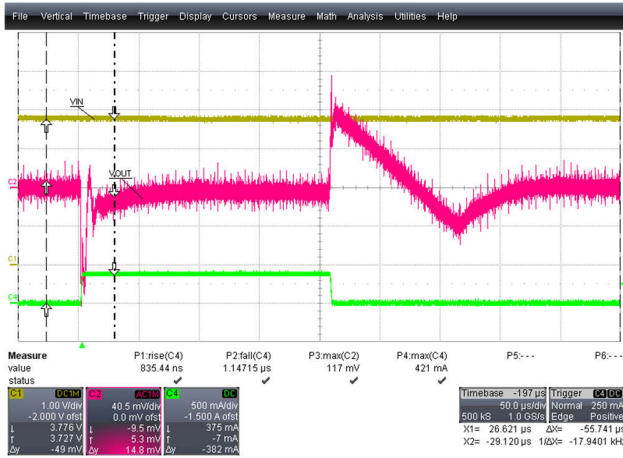


图 3-1. 使用带接地夹连接的 TLV737 负载瞬态

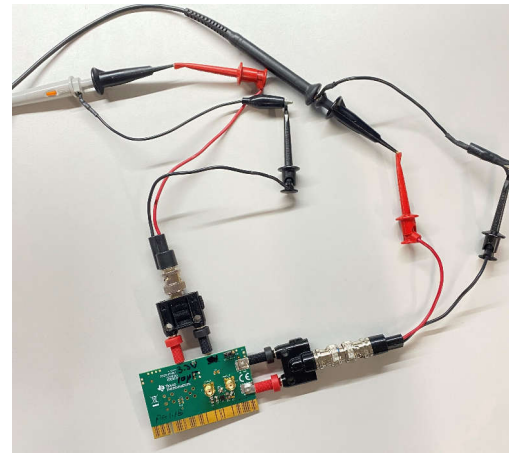


图 3-2. TLV737 上的接地夹设置

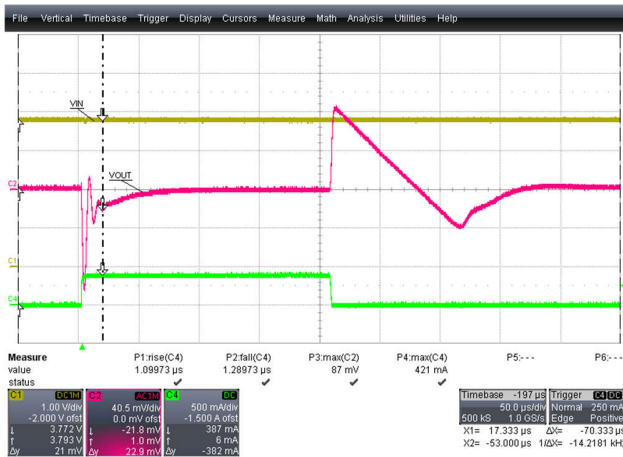


图 3-3. 使用 SMA 连接的 TLV737 负载瞬态

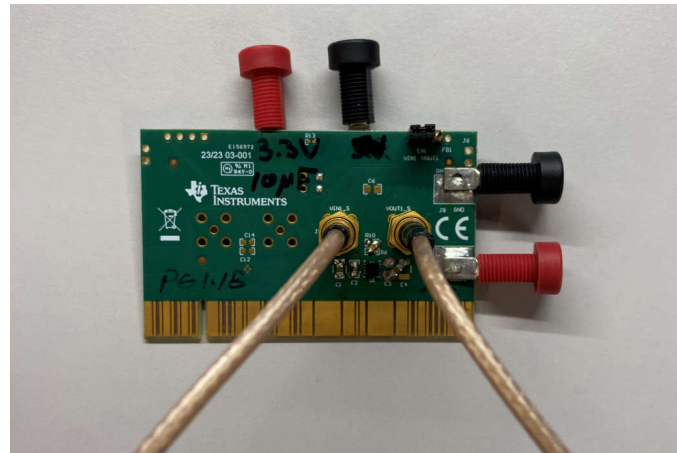


图 3-4. TLV737 上的 SMA 设置

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。混叠现象可能导致测量结果显示触发不良，且波形在水平方向上发生偏移。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，采样不足也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 3-5](#) 所示。

此外，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 3-5](#) 中有 500 个样本，[图 3-6](#) 中有 1600 万个样本，由于 [图 3-5](#) 中只有 500 个样本，因此更难对每个通道进行可视化。

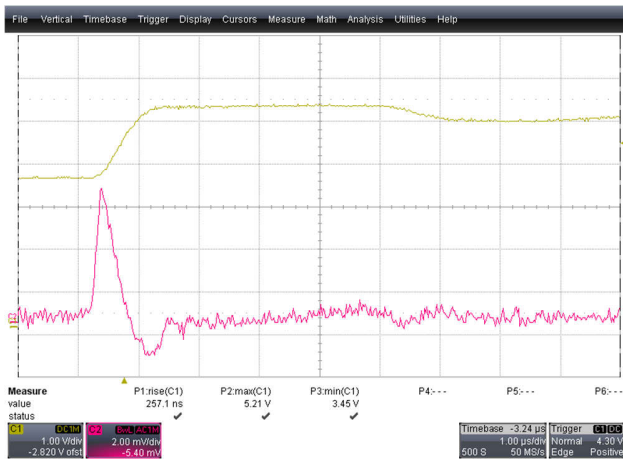


图 3-5. 500 个样本

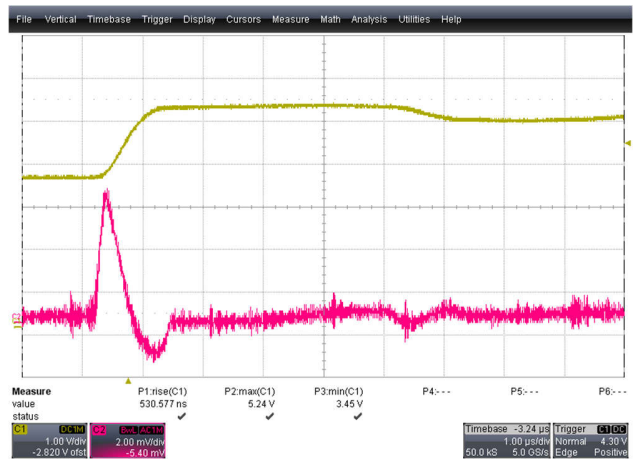


图 3-6. 1600 万个样本

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

此外，波形必须处于视觉焦点，以防止图像分辨率损失。波形不处于视觉焦点时，很难区分上升沿和下降沿的数据。当波形不清晰时，只能看到部分波形。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 3-7 显示了一个负载瞬态测量，但时间基准设置不正确，导致测量结果难以辨认。图 3-8 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 3-8 是一张满足可视化要求的图像。

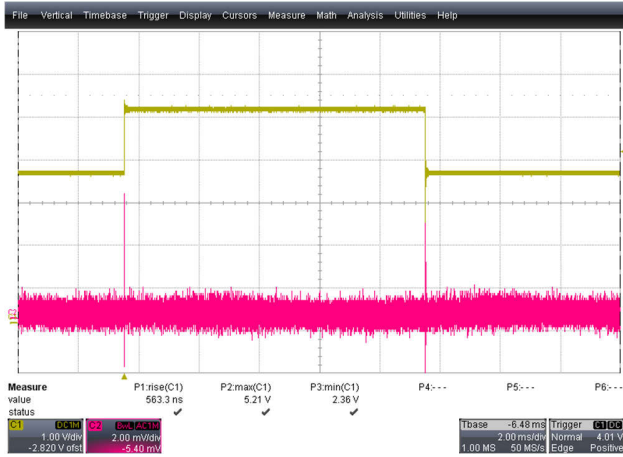


图 3-7. 可视化效果不佳

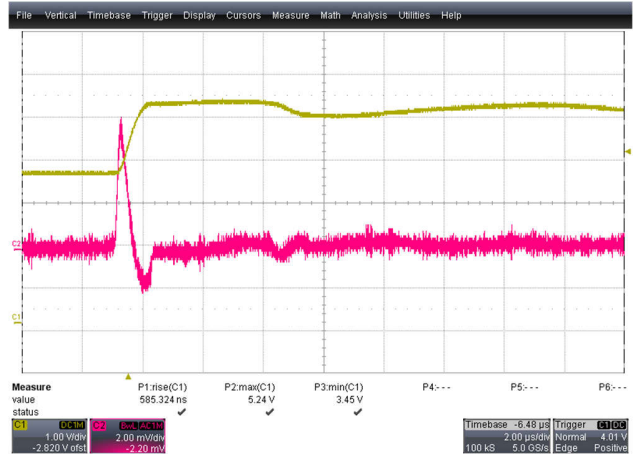


图 3-8. 聚焦于上升沿

3.4 使用电流探头进行测量

另一种常见的测量是使用电流探头来测量输入和输出电流。通常使用电流探头进行瞬态测量。如果电流探头电流路径中引入了寄生效应，示波器屏幕截图上可能会出现虚假峰值，最终导致采集的数据不准确。我们使用电流探头在 TPS793 器件上进行了负载瞬态测量，绿色信号迹线表示输出电流。图 3-9 显示了使用长布线进行的负载瞬态测量，其中会引入显著的寄生效应。如图 3-9 所示，在器件输出端会得到虚假的数据峰值。与图 3-10 相比，该负载瞬态测量所使用的布线明显更少，电感也极小，因此输出端的测量数据更准确。

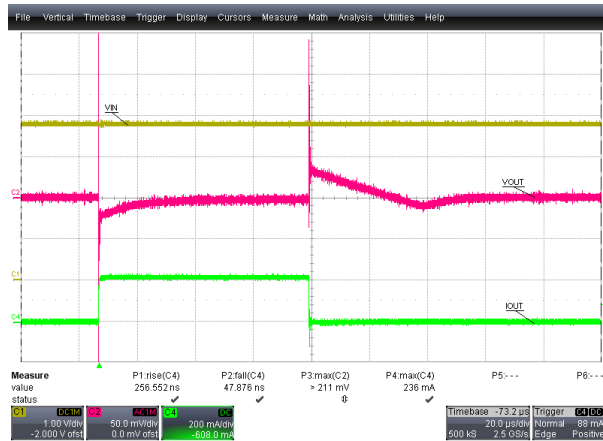


图 3-9. 使用长布线的电流探头测量

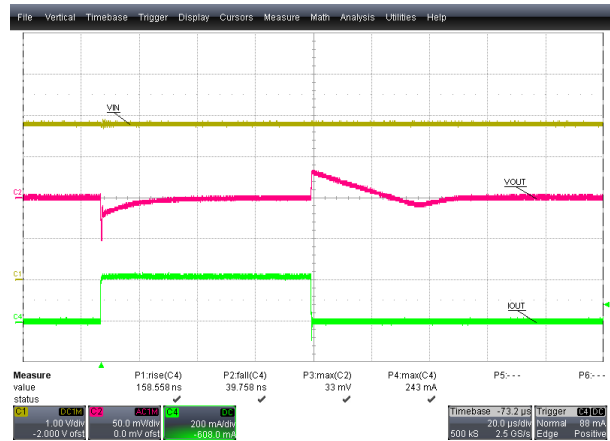


图 3-10. 使用短布线的电流探头测量

3.5 带宽限制和均值计算

最后，在波形中集成带宽限制和均值计算会导致图像整体质量下降。虽然带宽限制能有效降低波形中存在的额外噪声，但同时也可能削弱波形中对于调试而言至关重要的特征（比如过冲和下冲），可能会导致测量结果不准确，如图 3-11 所示。

在波形中集成均值计算也可能降低完整波形示波器快照的质量。均值计算会显示一个看似更优但实际不然的峰值间测量结果，如图 3-12 所示。

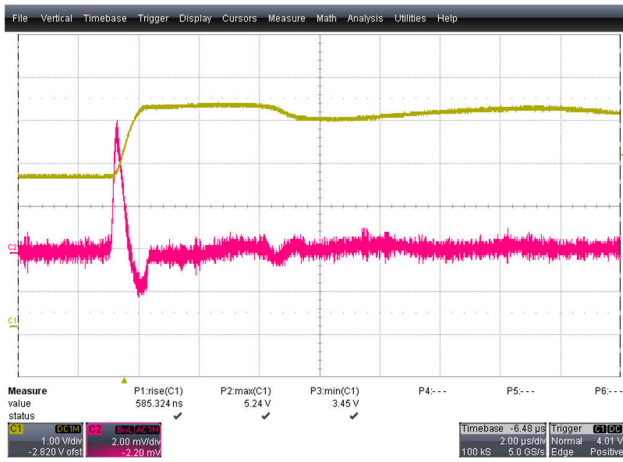


图 3-11. 带宽限制

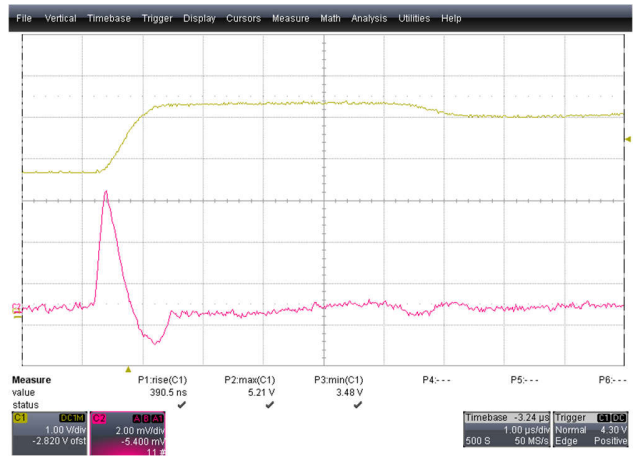


图 3-12. 均值计算

4 寄生效应对常见测量的影响

4.1 负载瞬态

负载瞬态是指负载需求突然变化，而 LDO 会相应地对此情况做出响应。当存在显著的负载瞬态时，LDO 输出端可能会出现意外压降。通常，对于较大的电压瞬态，可能会导致 LDO 运行出现问题。负载瞬态响应的效应，是由 LDO 内部补偿、输出电容和输出电容器寄生效应共同作用的直接结果。由于 LDO 内部补偿是固定的，瞬态响应可能因电路的输出电容器和寄生效应而变化。如何知道线性稳压器是否对负载瞬态做出了良好的响应？线性稳压器应以平稳且受控的方式对负载瞬态做出响应。有关负载瞬态的更多信息，请参阅 [了解 LDO 的负载瞬态响应](#)。

在下一节中，我们将介绍两个负载瞬态设置情形。我们使用器件 TPS7A96（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 所示的情形一使用 BNC 线缆，图 4-2 所示的情形二使用闭合 SMA 连接。如以下负载瞬态情形所示，布线越短，示波器测量中发生的过冲越少。图 4-1 显示了最大输出电压稳定在 39mV，图 4-2 显示了最大输出电压稳定在 11mV。减少该特定负载瞬态的寄生效应，可将输出电压过冲降低 28mV。总体而言，在该示例中，减少寄生效应可将电压过冲降低 71%。

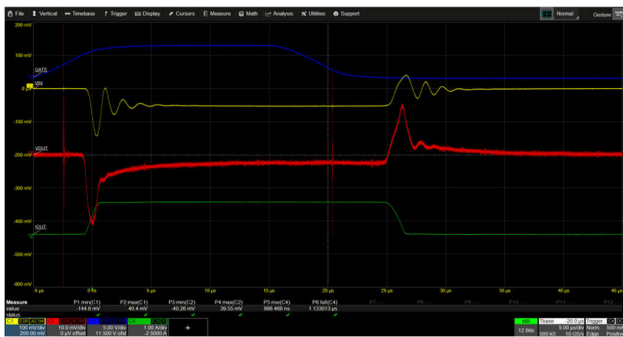


图 4-1. 具有额外寄生效应的 TPS7A96 负载瞬态



图 4-2. 具有有限寄生效应的 TPS7A96 负载瞬态

4.2 线路瞬态

线路瞬态是指线路需求突然变化，而 LDO 会相应地对此情况做出响应。有关更多信息，请参阅 [了解 LDO 稳压器的术语和定义](#)。

在下一节中，我们将介绍两种线路瞬态设置情形。我们使用器件 TLV773 测试了各种情形，尽管该器件在市场上并非以高速 LDO 为卖点，但当 PCB 寄生效应有限时，仍可以观察到明显的变化。图 4-3 显示了由于 PCB 布局不佳而产生的显著迹线寄生效应，而图 4-4 中迹线寄生效应有限且直接连接到被测器件。图 4-3 显示了与图 4-4（突出了迹线寄生效应有限的情况）相比，迹线寄生效应增加与较慢的上升时间和略高的过冲直接相关。图 4-4 显示引入寄生效应后的上升时间约为 846nS，而去除图像中寄生效应的影响后，上升时间降至 584nS。通过减少此特定线路瞬态测量中的寄生效应，上升时间缩短了 262nS。

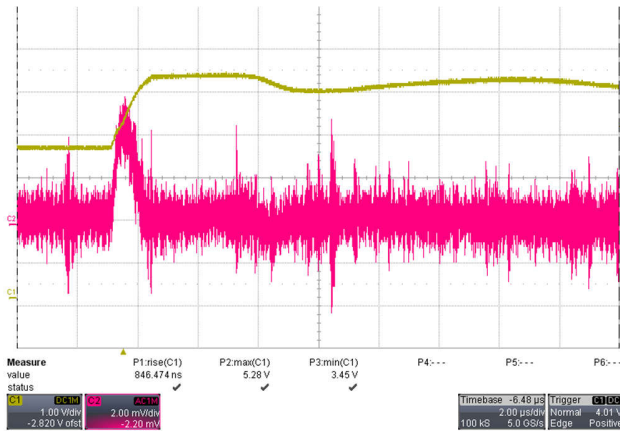


图 4-3. 具有额外寄生效应的 TLV773 线路瞬态

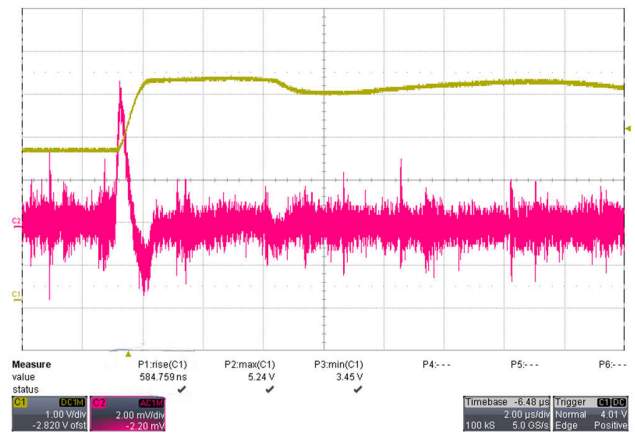


图 4-4. 具有有限寄生效应的 TLV773 线路瞬态

4.3 电源抑制比

电源抑制比 (PSRR) 用于衡量电路对注入器件 (特别是 LDO) 输入端的纹波的抑制能力。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 4-5](#) 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。

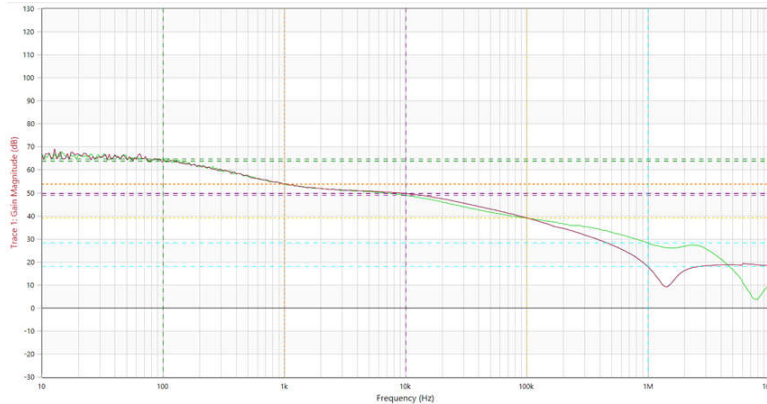


图 4-5. 具有额外寄生效应的 TPS793 PSRR

4.4 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 4-6](#) 显示了使用明显更长的布线进行的噪声测量, 而 [图 4-7](#) 显示了使用明显更短的布线进行的噪声测量。如 [图 4-6](#) 所示, 噪声测量中引入了寄生效应时, 会引入更多布线, 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 4-6](#) 中收集到的噪声为 69.9uVrms, 而 [图 4-7](#) 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。

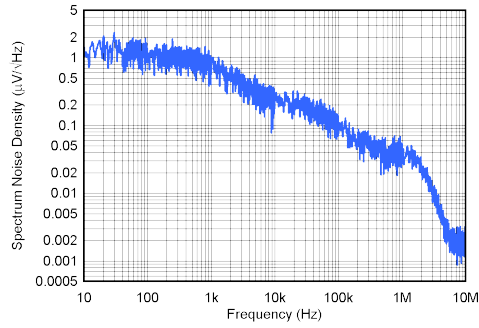


图 4-6. 具有额外寄生效应的 TPS793 输出电压噪声

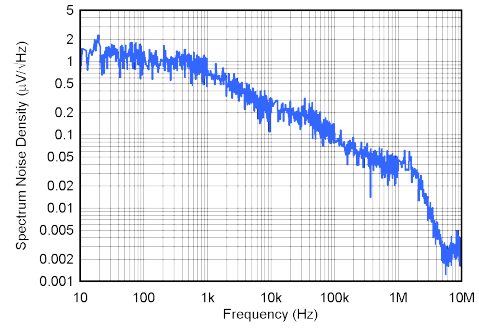


图 4-7. 具有有限寄生效应的 TPSS793 输出电压噪声

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失真的测量条件。避免带宽限制和均值计算，这可能会导致数据不真实；避免采样不足，这会引起混叠和可视化效果不佳；还要避免选择不正确的示波器探头，因为这可能会在测量中产生额外的振铃现象。限制电路电感，缩短布线，以减少电压过冲。最后，务必根据可视化需求，通过对齐水平和垂直刻度，正确校准示波器。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。

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