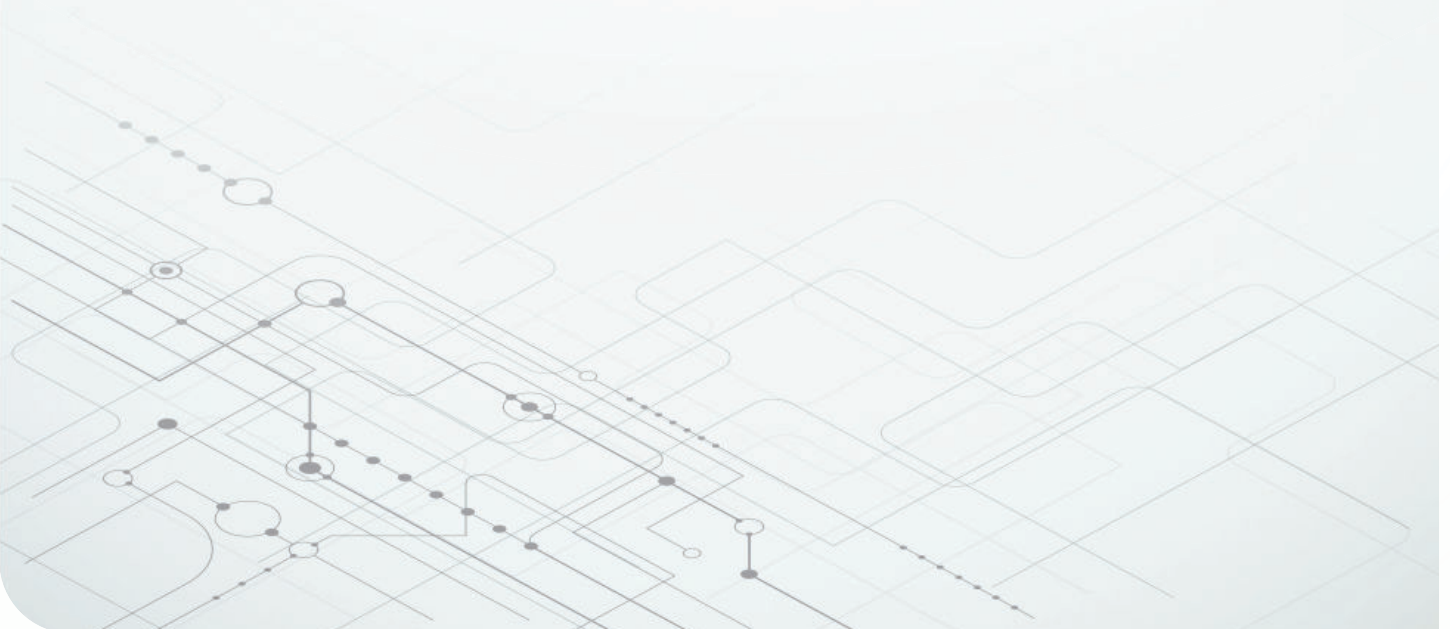


通过低噪声功率器件简化电源架构



Marcoo Zamora
System Engineer
Linear Power



降低固有噪声和系统噪声对于在严苛的电子系统中实现高精度信号链至关重要。低噪声功率器件的创新有助于降低系统噪声，并提高准确性和精度。

内容概览



1

定义电源架构中的噪声和精度

噪声通常是应用特定的，但在本文中，噪声是指源自热噪声、1/f 噪声和低频振荡（最高约 100kHz）的任何不必要的信号。



2

在低噪声和低功耗电压基准方面的创新

降低电源架构中的噪声有助于提高模数转换器的分辨率和精度，但会带来功耗、印刷电路板 (PCB) 尺寸、制造流程和成本方面的设计挑战。



3

在精密电池监测方面的创新

拥有创造性的器件技术解决方案使设计人员能够优化其电源架构和电池系统。

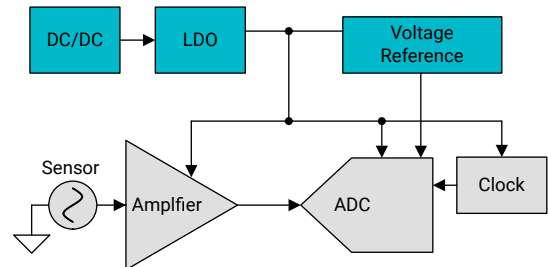


图 1. 通用信号链电源架构。

噪声和 ADC

ADC 中的噪声可能会导致精密电压测量出现误差。您必须考虑信号链中内部和外部噪声源的总体影响。总噪声通常是 ADC 热噪声、ADC 量化噪声、放大器噪声、电压基准噪声和电源噪声的组合。

方程式 1 描述了 ADC 输入端的总参考噪声（在满量程电压下），因为它根据图 1 测量传感器。主要的设计挑战是优化所有噪声源以实现应用所需的噪声目标。在方程式 1 中，ADC 的电源抑制比 (PSRR) 降低了电源噪声，该噪声被绘制为 1MHz：

随着业内趋向突破分辨率和精度的限制，在信号链中实现超低噪声至关重要。在突破这些限制时，不仅要考虑模数转换器 (ADC) 和放大器等信号链元件的噪声，还要考虑开关稳压器和低压降稳压器 (LDO) 等电源产品。得益于器件技术的进步，试图在电源拓扑中实现低噪声和高精度时不需做出过多权衡。

24 位 Δ - Σ ADC 的新趋势是采样速度有所提高，而且功耗更低。新型低噪声电源和低噪声电压基准可以利用这些趋势，助力 ADC 在低功耗应用中实现高分辨率测量。

为了实现尽可能低的噪声，让我们回顾一下信号链和电源架构中的噪声源。图 1 显示了一个以 ADC 为中心的典型信号链应用，该应用需要外部电压基准、时钟和信号调节电路。图 1 中的每个元件都会对系统噪声产生影响，因此需要优化。

$$\text{ADC 总噪声} = \sqrt{\text{ADC 热噪声}^2 + \text{ADC 量化噪声}^2 + \left(\text{电源噪声} \times 10^{-\frac{\text{PSRR}}{20}} \right)^2 + \text{电压基准噪声}^2} \quad (1)$$

鉴于存在不相关的噪声源，总噪声是所有噪声源的平方和根，在很大程度上相当于最大噪声源。一个噪声分量可能会严重影响测量结果。例如，如果电压基准比 ADC 和电源产生更多的噪声，则降低电压基准上的噪声是降低系统噪声的理想方法，如图 2 和图 3 所示。此外，ADC 噪声类型随分辨率不同而不同：16 位 ADC 主要产生量化噪声，但 24 位 ADC 不然。

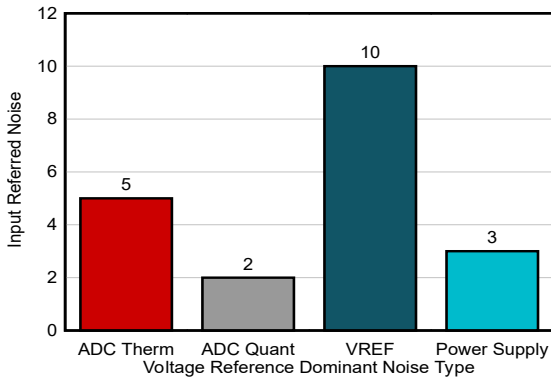


图 2. 电压基准主要噪声。

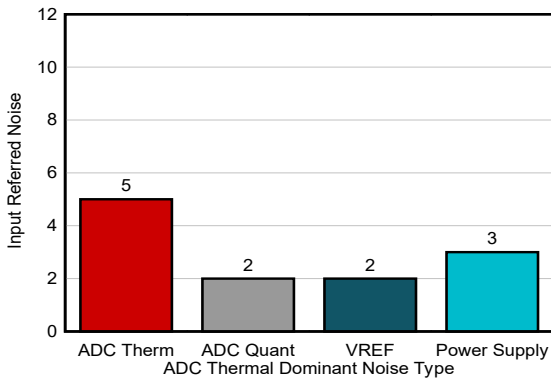


图 3. ADC 热主要噪声。

定义电源架构中的噪声和精度

电源噪声是随机的，而且在所有半导体功率器件和电源拓扑中都会出现。本白皮书重点介绍低于 100kHz 的信号，因为高于该频率的信号通常由开关纹波或电磁干扰 (EMI) 产生。噪声还可以进一步分为低频噪声 (0.1Hz 至 10Hz)

和 100Hz 至 100kHz 的高频噪声，它们具有不同的要求和设计挑战，如图 4 所示。

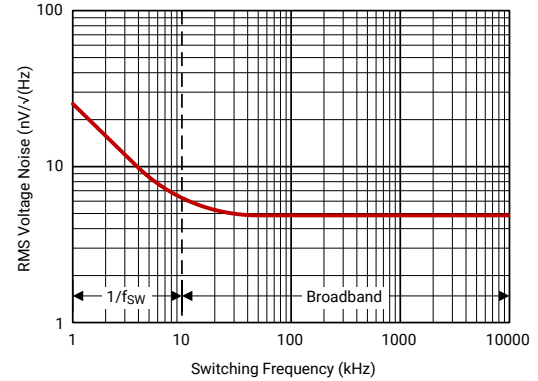


图 4. 噪声频谱。

低频噪声通常是指，在器件属性和设计架构的共同影响下，半导体器件自然产生的 0.1Hz 至 10Hz 之间的峰峰值噪声。当以高分辨率放大电压轨时，通常可以在示波器中看到这种低频噪声 (如图 5 所示)，这种噪声通常会导致精密直流测量出现误差。将低频噪声作为关键规格的 ADC 应用包括电池测量、电能计量、地震测量甚至半导体测试测量。

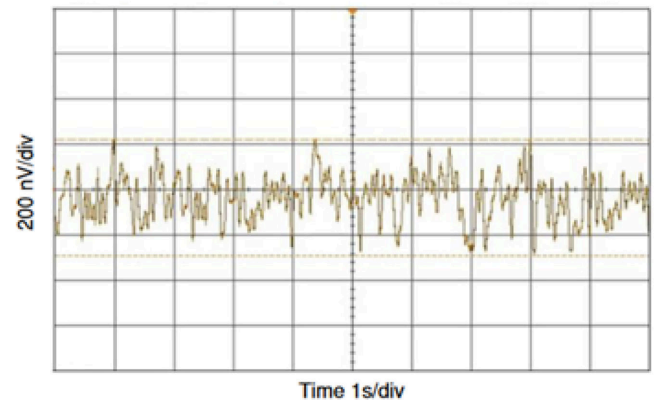


图 5. 示波器上的低频噪声。

另一种是 100Hz 至 100kHz 频带的高频噪声，包括白噪声、开关噪声和时钟抖动，如图 6 所示。高频噪声源也可以来自环境 (通过 EMI 耦合)。例如，ADC 可能会因高噪

声电源而产生误差。同一高噪声电源产生的 EMI 会导致时钟抖动增加，如果抖动过多，则会降低信噪比性能。

降低数字电路中由时钟频率增加引起的高频噪声变得越来越重要，因为数字电路更容易受到抖动的影响。将高频噪声作为关键规格的 ADC 应用包括电力线质量监测器、数字信号处理应用和射频 (RF) 通信设备。

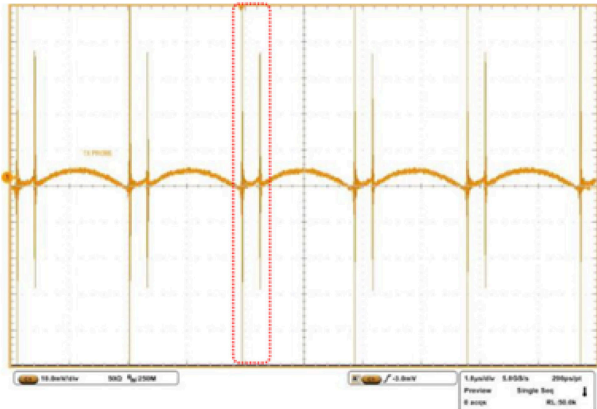


图 6. 降压稳压器开关噪声。

在低噪声和低功耗电压基准方面的创新

降低噪声的一种方法是增加系统功率，但通常存在功率预算，因此有必要在有限的功率下最大限度地提高噪声性能。TI 的低噪声电压基准产品系列包括 REF33、REF34 和 REF35 系列等低功耗产品，它们具有高精度，可以使低功耗 ADC 在有限的功率下提高噪声性能。静态电流 (I_Q) 较低的电压基准有利于便携式或边缘应用，例如功率预算有限的两线制发送器。

高效带隙电路和输出缓冲器的创新提高了电压基准的功率噪声比。REF33、REF34 和 REF35 是 TI 低噪声和低功耗电压基准产品系列中的主要器件。图 7 比较了它们的噪声和功率，并强调了 REF35 的创新。

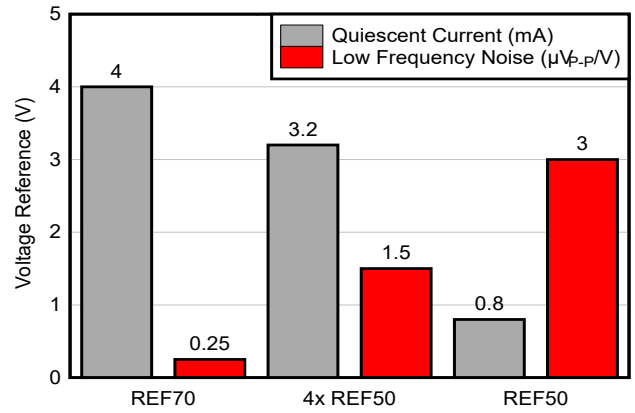


图 7. 电压基准功率和噪声。

低噪声的一种常见应用是便携式医疗设备，例如便携式心电图机。ADS124S08 系列 24 位 ADC 的功耗低至 $280\mu\text{A}$ ，可更大限度地减少功率预算有限的现场仪器和边缘器件的功耗。表 1 将 REF35 与内部 ADS124S08 电压基准进行了比较，并突显了更出色的精度和 I_Q 。REF35 的低噪声和高精度可改善量化误差和增益误差，同时降低系统功耗。电压基准的灵活电压优势可实现进一步优化，更大限度地增加 ADS124S08 的满标量程范围。

器件	REF35	ADS124S08 内部电压基准
电压电平	1.25V 至 5V	2.5V
低频噪声	$8.5\mu\text{V}_{pp}$	$9\mu\text{V}_{pp}$
I_Q	$0.65\mu\text{A}$	$280\mu\text{A}$

表 1. 外部电压基准与内部电压基准。

REF35 还与 ADS127L11 搭配使用，后者是一款专门提高直流精度的低功耗 ADC。与 REF34 相比，REF35 的电源电流减少到原来的十分之一，这使其在低速模式下与 ADS127L11 搭配使用功能更强大。这种组合使 ADS127L11 能够在需要高精度的电能质量分析仪系统，或需要低功耗以平衡解决方案尺寸、分辨率和带宽的机器振动系统中确保精确性。

埋入式齐纳电压基准的创新

许多类型的电压基准都提供超低噪声电压电平。然而，埋入式齐纳电压基准具有特别低的噪声，因此尤为突出。埋入式齐纳电压基准通常不需要增益即可产生输出电压，因而可降低噪声。埋入式齐纳电压基准通常用于为高精度系

统提供“黄金”电压电平。电压基准用于校准或超精密数据转换器，如 **DAC11001B**，如图 8 所示。

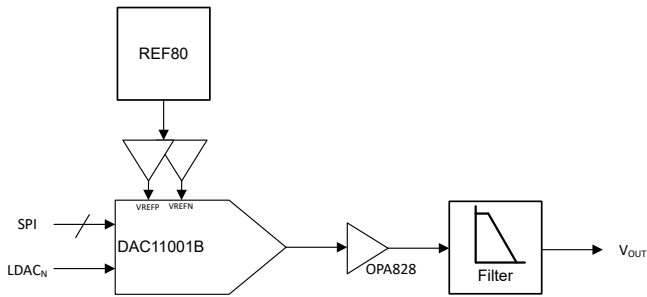


图 8. REF80 用作带有基准缓冲器的 DAC11001B 的电压基准。

使用埋入式齐纳器件进行校准时，需要考虑三个主要参数：温度漂移、长期漂移和噪声。校准期间，系统数据转换器使用由埋入式齐纳电压基准（如 **REF80**）提供的稳定低噪声电压来确定 ADC 或 DAC 的增益和失调电压误差。REF80 具有超低的 0.16ppm_{p-p} 噪声规格。为了进行精确校准，电压电平不能随时间或温度变化，提供的值必须具有低噪声，以确保可以有效补偿校准期间观察到的误差。

当 REF80 与 DAC11001B 一起使用时，必须对其进行缓冲，从而获得良好的动态性能。这些缓冲器会增加基准电路的噪声，从而增加整个信号链的噪声。因此，必须使用低噪声运算放大器来保持低噪声。**OPA828** 是一种低噪声运算放大器，1kHz 时的噪声为 4nV/√Hz，常用于基准缓冲电路。

为了确保 REF80 的噪声主要来自基准电压，使用低噪声低压降 (LDO) 为 REF80 供电也很重要。REF80 的独特之处在于它有一个内部加热器。无论周围环境如何，该加热器都能使芯片保持稳定的温度。该加热器可实现 REF80 的低漂移规格。加热器和基准电源彼此独立。因此，加热器 (HEATP) 和 VDD（漏极电源）都需要一个电源。图 9 展示了 REF80 的引脚排列。

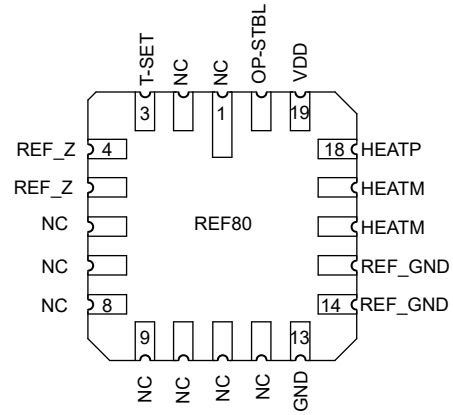


图 9. REF80 LCCC 20 引脚封装引脚排列。

REF80 的加热器在启动时通常会消耗高达 335mA 的电流，之后会稳定在 18mA 至 75mA 之间，而 VDD 通常只需要 15mA 的静态电流。此外，REF80 (REF_Z) 电压输出的噪声取决于埋入式齐纳电路，而不是加热器。REF80 的架构决定了只有埋入式齐纳基准对输出噪声有重大影响，而加热器的影响则微乎其微。图 10 显示了经过简化的方框图。

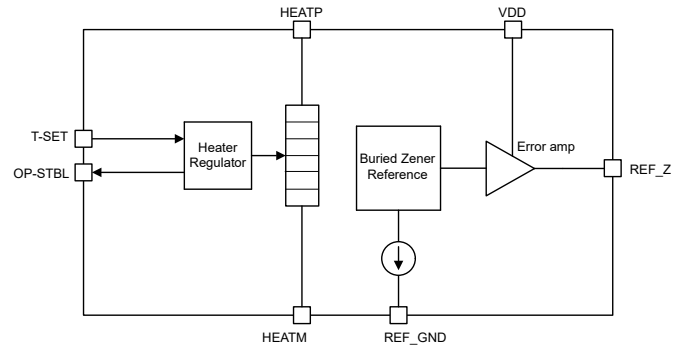


图 10. REF80 功能方框图。

因此，为了尽可能降低噪声，为埋入式齐纳基准供电的 VDD 引脚必须使用低噪声 LDO 来供电。在 REF80 评估模块 **REF8EVM** 中，VDD 采用宽输入电压、超低噪声 LDO **TPS7A49**。对于加热器，使用电流更高但噪声也更高的 **LM317**。图 11 展示了 REF8EVM 电源配置的方框图。

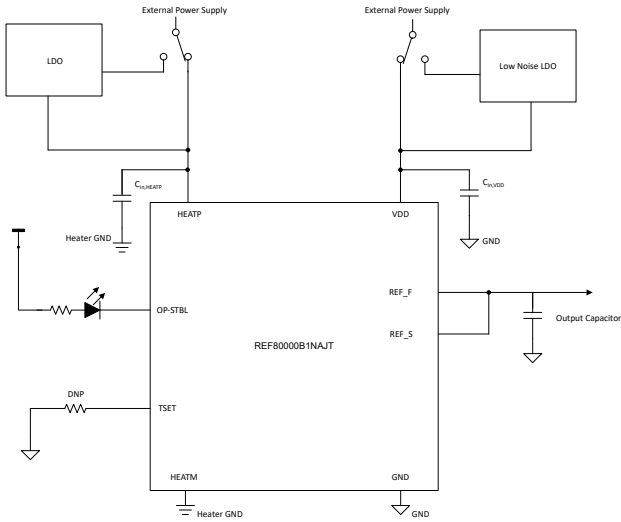


图 11. REF80 通用应用和电源树方框图。

此外，可以选择使用一个 LDO 同时为 VDD 和加热器供电。如果需要，另一个不错的选择是 TPSA4701，它具有超低噪声和更高的输出电流能力，可同时为 VDD 和 HEATP 供电。

对于超高精度的技术和应用，埋入式齐纳电压基准是可考虑的理想选择之一。REF80 等埋入式齐纳器件的低漂移和低噪声至关重要，需要重点关注信号链和校准噪声。

在超低噪声电压基准方面的创新

高分辨率 ADC 对电压基准噪声更加敏感，由于它们直接连接到数据转换电路，因此会直接影响电压测量。超低噪声电压基准有助于高分辨率 ADC 充分发挥其分辨率潜力。REF70 具有超低 $1/f$ 噪声，可与需要超低噪声的产品连接，例如高分辨率 ADC 或多通道模拟前端（例如 AFE2256）。在电压基准的输出上添加低通滤波器可降低宽带噪声，从而降低系统噪声，如图 12 所示。

设计低通滤波器时，务必要确保输出阻抗不会降低交流性能。在电阻器-电容器低通滤波器中，如果较大的串联电阻影响输出电流波动引起的负载瞬变，可能会发生这种情况。选择 10Hz 以下的低通滤波器带宽截止频率以限制宽带噪声的影响。

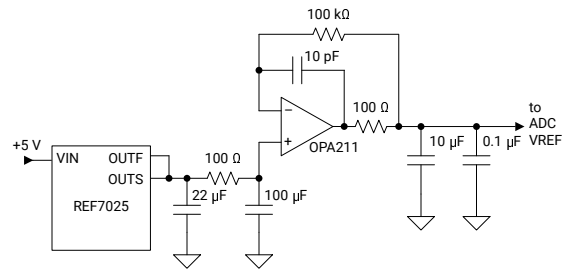


图 12. 带有外部低通滤波器的 REF7025 应用。

通过简化的电源架构提高噪声和热性能

为时钟、数据转换器或放大器供电的传统设置是使用直流/直流转换器（或模块），然后是使用 LDO，之后是使用铁氧体磁珠滤波器，如图 13 所示。这种设计方法更大限度地减少了电源噪声和纹波，并在负载电流低于 2A 左右时保持良好的性能。然而，随着负载增加，LDO 中的功率损耗会引发效率和热管理问题，例如，后置稳压 LDO 在典型的模拟前端应用中会增加 1.5W 的功率损耗。

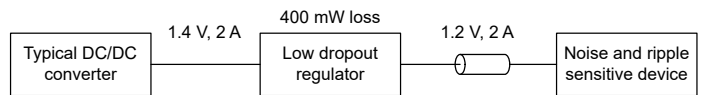


图 13. 使用直流/直流转换器、LDO 和铁氧体磁珠滤波器的典型低噪声架构。

典型电源架构中 LDO 的优势是提供精确的电压轨，同时通过高 PSRR 降低高频噪声区域中的开关噪声。使用 LDO 的代价是热量和功耗增加。既能确保低噪声又不会增加功率损耗的一种有效方法是，使用低噪声直流/直流降压转换器代替设计中的 LDO，如图 14 中所示。这种无 LDO 的设计可降低功耗并改善散热效果，同时实现低噪声。

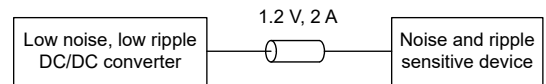


图 14. 使用低噪声降压转换器（无 LDO）。

TPS62912 和 TPS62913 系列的低噪声降压转换器，以及 TPSM82912 和 TPSM82913 模块使用降噪/软启动引脚连接电容器，使用集成的 R_f 和外部连接的 $C_{NR/SS}$ 组成一个低通电阻器-电容器滤波器，如图 15 所示。该实现本质上模拟了 LDO 中带隙低通滤波器的行为，允许输出电压纹波低于 $10\mu V_{RMS}$ 。TPS62913 还可以利用 2.2MHz 开关频率和可选的第二级铁氧体磁珠电感器-电容器滤波器，在没有典型开关噪声的高频区域实现低本底噪声。

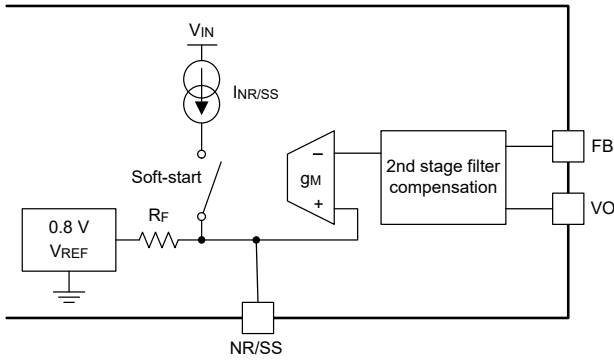


图 15. 具有带隙噪声过滤功能的低噪声降压转换器方框图。

ADC12DJ5200RF 是一款射频采样 ADC，可在直流至 10GHz 范围内进行采样，功耗为 4W。PSRR 可以衰减任何电源纹波和噪声，但任何残余纹波和噪声都会出现在 ADC 输出频谱上，从而导致误差。ADC12DJ5200RF 对模拟电压轨的电源要求更敏感，因此需要低噪声。与直流/直流加 LDO 组合相比，将 TPS62912 用于低噪声和高功率模拟轨可实现简化且高效的电源架构，同时更大限度地降低功率损耗。

LDO 电源轨实现高电流低噪声

LDO 的最大固有噪声源是其内部电压基准。为了降低噪声并提高整体系统性能，TI 产品系列中的各种 LDO 都通过 NR 引脚实现了降噪功能。在 NR 引脚添加电容器 ($C_{NR/SS}$)，可与 V_{REF} 节点处的内部电阻一起构成电阻器-电容器滤波器，如图 16 所示。

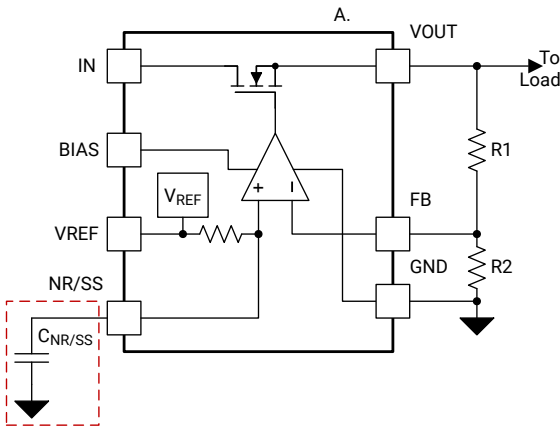
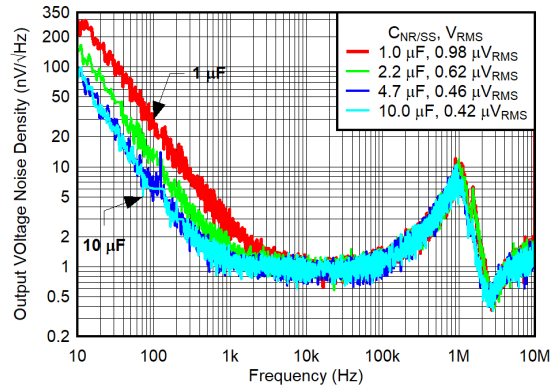


图 16. 具有 NR/SS 引脚的 N 沟道金属氧化物半导体 LDO。

A.
$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \quad (2)$$

较新的 LDO 后跟误差放大器可实现高度精确的高精度和低噪声电流源，实施单位增益配置还可以在整個输出范围内确保低噪声。**TPS7A94** 是此类高精度低噪声 LDO 的一个很好的示例，它可以在 10Hz 至 100kHz 带宽范围内实现 $0.46\mu V_{RMS}$ 。图 17 展示了输出噪声密度，以及将 $C_{NR/SS}$ 从 $1\mu F$ 增加到 $10\mu F$ 所产生的影响。



$V_{OUT} = 3.3V$ $C_{IN} = C_{OUT} = 10\mu F$
 $I_{OUT} = 500mA$ $10Hz \leq f_{SW} \leq 100kHz$

图 17. TPS7A94 的输出噪声与 $C_{NR/SS}$ 的关系。

TPS7A94 的特性组合代表新一代低噪声 LDO 能够实现出色的电压精度和超低噪声。当 TPS7A94 是高分辨率信号链的主要电源时，这一点很重要，因为分辨率更高的 ADC 对噪声更敏感。在图 18 中所示的典型应用中，TPS7A94 是 ADC、运算放大器、时钟和外部电压基准这些高性能器件的主电源。该信号链旨在利用 TPH210 和 REF70 的超低输入电流噪声和低 $1/f$ 噪声，更大程度改善 ADS127L11 的总谐波失真、信噪比和增益误差。TPS7A94 的低噪声和高 PSRR 提供了一条干净的电源线，限制了可能耦合到 TPS210、ADC127L11 和 REF70 有源电路并且会降低性能的任何噪声。

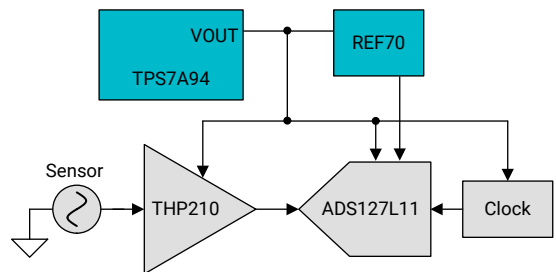


图 18. 为信号链供电的 TPS7A94。

在精密电池监测方面的创新

用于电动汽车的电池监测器的电池电压测量精度为 1mV。在这种更高的准确度和精度下，汽车原始设备制造商能够在不增加电动汽车电池包成本或容量的情况下提供更长的续航里程。正如所预期的那样，许多系统和环境因素都会导致电压测量不准确，包括随温度和寿命的漂移、电源噪声，以及电路板弯曲引起的芯片应力。

TI 在单个芯片上集成了多种技术，以减少环境影响并提高电压测量精度。例如：

- 埋入式齐纳二极管将结埋入表面以下，不易受到热载流子的影响。该二极管可在集成电路 (IC) 的温度和使用寿命内提供非常稳定的电压基准。
- 将电池监测器焊接到 PCB 时，PCB 的弯曲会导致芯片轻微弯曲，从而导致电压测量不准确。集成式应变仪可测量该弯曲并校正电压测量结果。
- 集成式电芯均衡场效应晶体管和电源会导致芯片升温，从而产生温差导致电压测量误差。

BQ79718 和 **BQ79731-Q1** 等专用 IC 可以帮助解决单芯片中的系统级问题，使系统设计人员能够在不影响产品面市时间的情况下实现出色性能。

结论

低噪声 ADC 和模拟前端的传统低噪声电源架构通常面临功耗和热性能方面的挑战。使用低噪声电压基准和电源进行设计，有助于设计人员简化电源架构，并满足严格的功率预算。REF35 等电压基准的创新正在帮助设计人员将边缘器件的低噪声和低功耗提升到新的水平。在射频采样 ADC 等噪声敏感型应用中，与采用 LDO 的传统开关稳压器相比，TPS62913 等低噪声开关稳压器发热量更低。

其他资源

- 有关低噪声和高精度的更多信息，请访问 [低噪声和高精度](#)。
- 阅读技术文章 [如何通过低噪声和低纹波设计技术来增强电源和信号完整性](#)。
- 下载电子书 [精密 ADC 噪声分析的基本原理](#) 和 [LDO 基础知识](#)。
- 参阅应用手册 [通过 TPS62913 低纹波和低噪声降压转换器为敏感型 ADC 设计供电](#) 和 [通过 TPS62913 低纹波和低噪声降压转换器为 AFE7920 供电](#)。
- 阅读白皮书 [电池管理系统创新如何提高电动汽车采用率](#)。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司