

选择精密运算放大器作为 ADC 驱动器

Soufiane Bendaoud, senior business development manager
Texas Instruments

选择运算放大器来驱动模数转换器 (ADC) 并非易事。ADC 的选择通常取决于终端设备, 并需要在多个参数之间进行权衡。即使在同一领域或细分市场中, 对 ADC 的要求也可能各不相同。例如, 在测试测量领域, 可以看到逐次逼近寄存器 (SAR) 与 Δ - Σ ADC 混合使用的情况。SAR ADC 在参数测量装置、存储器测试仪和电池化成测试仪中较为常见。

Δ - Σ ADC 则通常用于振动分析、数据采集和科学仪器仪表。根据整体系统要求, 某些应用两者皆可使用。高精度称重秤更适合采用 Δ - Σ ADC, 因为其分辨率更高; 而消费级和低端型号则依靠 SAR 架构来最大限度降低功耗。

同样, 数据通信光模块倾向于使用 SAR ADC, 而电信光模块则多采用 Δ - Σ ADC, 尽管这两类应用同属数据中心领域。

仔细关注运算放大器 (或模拟前端) 的直流和交流规格, 有助于避免 ADC 性能下降并减少误差。

电路配置与带宽及其他误差

反相电路配置的优点是能避免共模调制误差, 因此不需要很高的共模抑制比。但该配置会降低输入阻抗, 使之等于输入电阻与反馈电阻的并联值, 并且反馈电阻会引入增益误差。非反相配置通常能提供高得多的输入阻抗。运算放大器的闭环带宽或有效带宽取决于噪声增益 (或非反相增益), 而不是信号增益。

在图 1 中, TI 的 OPA325 增益带宽积为 10MHz。在正单位增益 (缓冲器) 配置下, 带宽为 18MHz。超出的带宽来自增益峰化, 在 TINA-TI™ 宏模型中, 这是由输入电容和开环输出阻抗引起的。在这种情况下, 信号增益为 -1, 噪声增益为 1。

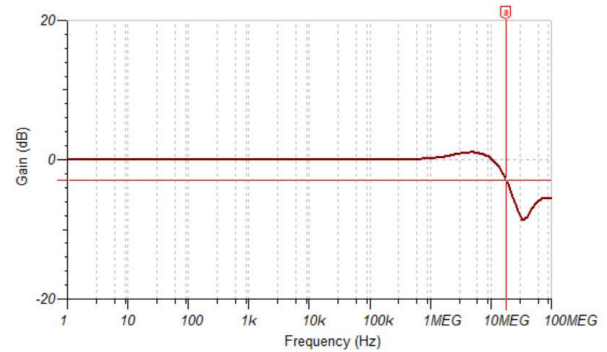
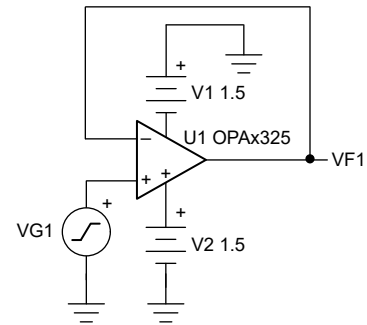
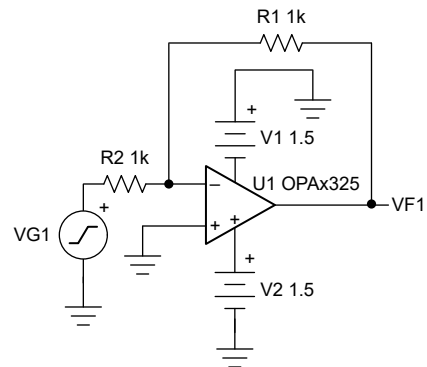


图 1. 缓冲器配置下的 OPA325

另一方面, 图 2 中所示电路的带宽为 6.7MHz, 约为图 1 中缓冲器带宽的三分之一。在图 2 中, 信号增益为 -1, 但噪声增益为 2。请注意, 即使在增益仅为 2 的反相配置中, 增益峰化也远没有那么明显。增益越高, 增益峰化就越低。



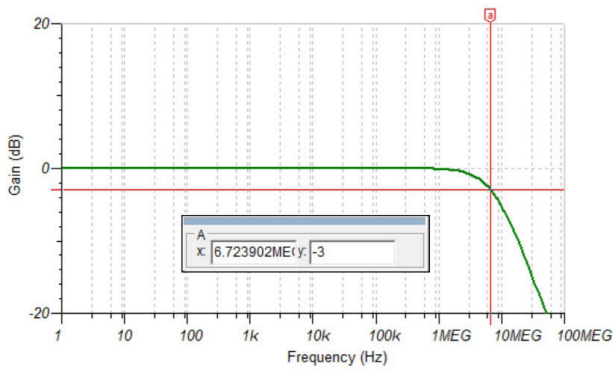


图2. 噪声增益为 2 时的 OPA325

DC 增益误差

开环增益 (Aol) 对直流增益精度起着重要作用。以图 2 所示的反相电路为例，在 12 位系统中，Aol 必须至少为 78dB (即 8,192)，也就是 $2^{12} \times 2$ 。现代通用运算放大器几乎都能达到 78dB 的 Aol。如果要求达到 16 位精度 (在噪声增益为 2 的情况下)，最低 Aol 必须达到 102dB，这在大多数情况下都需要使用精密器件。请记住，Aol 也取决于输出负载，因为末级增益取决于 $g_m \times R_L$ 。在反相电路中，反馈电阻器 (图 2 中的 R1) 是负载。

输出限制与线性度

运算放大器规格表列出了输出摆幅，对于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 器件，摆幅通常离电源轨 10mV 至 20mV，这一测试通常称为极限摆幅测试。为确保运算放大器保持在线性区域，请关注 Aol 规格的条件，以确定允许的最大电压摆幅。由于 ADC 具有高输入阻抗，因此应关注最大负载条件。

例如，OPA328 在 10kΩ 负载下的电压输出摆幅为 $\pm 100\text{mV}$ 。当与采用 3.3V 单电源的 ADS8860 搭配使用时，OPA328 的线性范围为 0.1V 至 3.2V，而 ADS8860 的输入范围为 0V 至 3.3V。显然，这并未利用全部动态范围，因此造成了码值浪费。使用 LM7705 负偏置发生器 (-0.23V) 并将正电源提高至 3.5V，可解决此问题。考虑到 OPA328 的 $\pm 100\text{mV}$ 输出限制，并在加入 LM7705 后，有效输出范围变为 -0.1V 至 3.4V，完全覆盖 ADS8860 的输入范围，且不违反其绝对最大额定值 (-0.3V 至 3.6V)。

噪声与 ENOB

在驱动高分辨率 ADC 时，运算放大器噪声起着至关重要的作用。低噪声放大器有助于为整个系统实现更高的有效位数 (ENOB)。换句话说，运算放大器噪声越低，ENOB 的劣化就越小，精度也越高。需注意，低噪声放大器通常需要较高的静态电流，而静态电流又与带宽成正比，其关系可表示为：

$$BW = \frac{g_m}{2\pi C_c} \quad (1)$$

在电流相同的情况下，双极性运算放大器能实现更宽的带宽 (或者换句话说，效率更高)。

总噪声 (含电压基准) 的计算公式如方程式 2 所示：

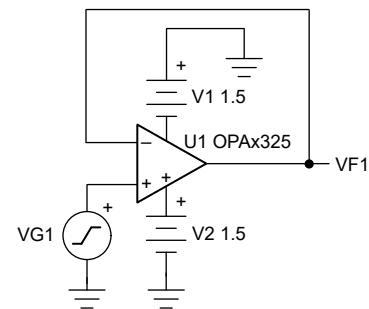
$$V_{n\text{total}} = \sqrt{V_{n\text{ADC}}^2 + V_{n\text{opa}}^2 + V_{n\text{ref}}^2} \quad (2)$$

首先以 ADS8860 为例，使用 $5 / (2 \times \sqrt{2})$ 将满量程范围 (5V) 转换为均方根值 (RMS)，得到 1.76V。ADS8860 均方根噪声的计算公式如方程式 3 所示：

$$V_{n\text{ADC}} = \frac{V_{\text{FSR}_{\text{rms}}}}{10^{\left(\frac{\text{SNR}_{\text{ADC}}}{20}\right)}} = \frac{1.76}{10^{\left(\frac{93\text{dB}}{20}\right)}} = 39.6\mu\text{Vrms} \quad (3)$$

仿真显示，OPA328 在正单位增益下的总噪声为 47μVrms，在反相增益 2 (噪声增益) 下约为 83μVrms。

图 3 和图 4 显示了相应仿真结果。



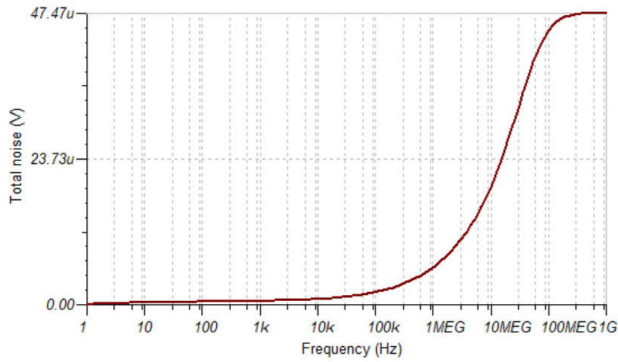


图3. OPA328 在正单位增益下的 RMS 噪声

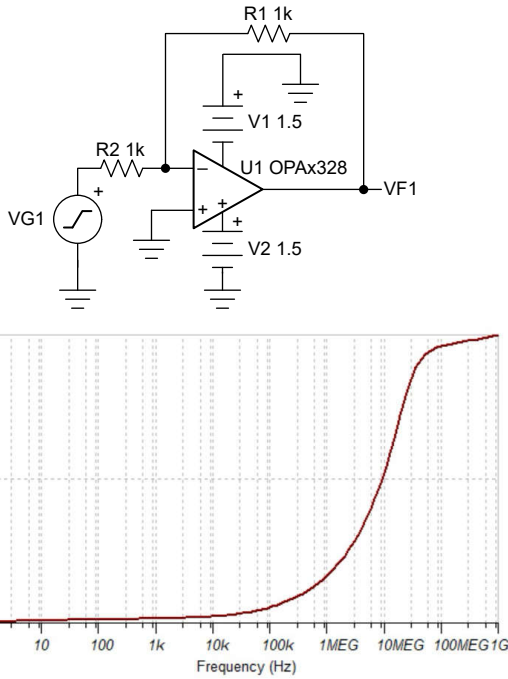


图4. OPA328 在反相配置下的 RMS 噪声

在相同电路中使用 OPA325，得到的噪声分别为 $39\mu\text{Vrms}$ 和 $55\mu\text{Vrms}$ 。

虽然选择噪声最低的运算放大器看似理所当然，但必须记住，低噪声放大器的噪声表现还取决于其带宽。换句话说，宽电压噪声密度为 $6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 OPA328，其噪声比宽电压噪声密度为 $9\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 OPA325 高出约 20%。OPA328 的带宽是 OPA325 的四倍。

仿真总噪声 (RMS) 是分析中的关键一环，也是提升系统 ENOB 的一个简便途径。

例如，在图 5 的噪声曲线图中，要将噪声降至 ADS8660 相关参数的 $39\mu\text{V}$ 的一半（即 1/2 最低有效位 (LSB)），需将带宽限制在约 2MHz。

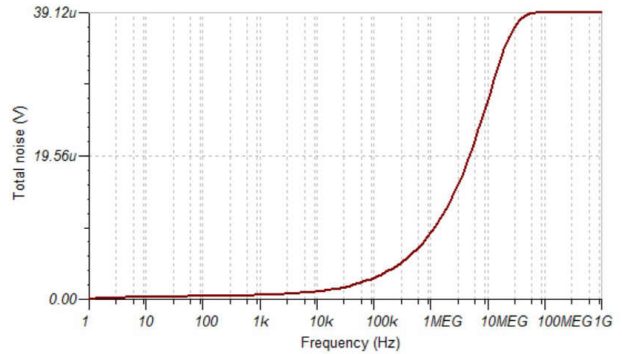
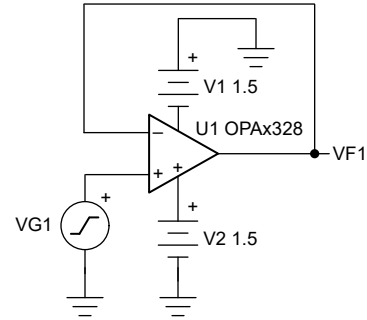
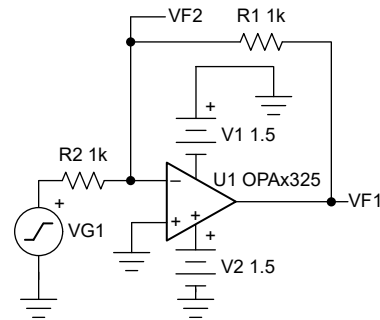


图5. OPA325 在正单位增益下的 RMS 噪声

图 6 展示了 OPA325 在反相配置下的 RMS 噪声仿真结果。



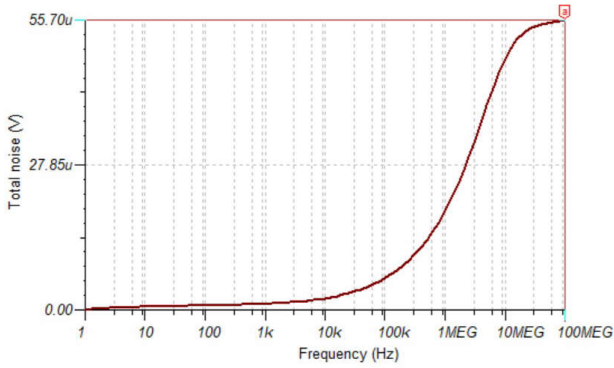


图6. OPA325 在反相配置中的 RMS 噪声

图7 显示 REF7050 的总噪声 (RMS) 约为 2.2μV，对系统总噪声的影响极小。将其纳入方程式 2 后，得到的总噪声为 55.7μV。如果忽略电压基准噪声，公式 1 给出的结果为 55.6μV。如果将 OPA325 的带宽限制在 2MHz，其噪声约为 18μV，系统总噪声为 43μV，显然 ADS8860 的噪声占主导。

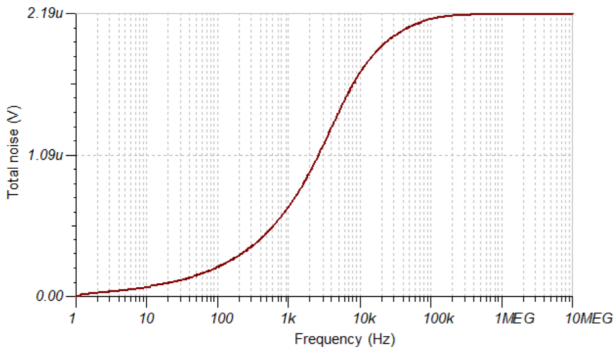
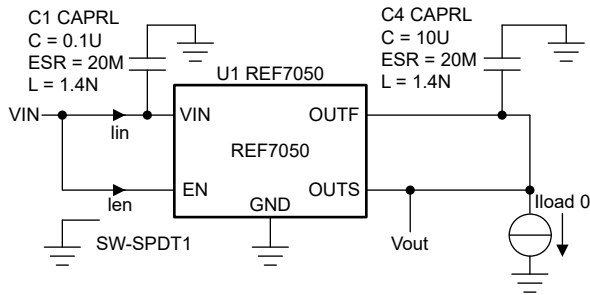


图7. REF7050 RMS 噪声

方程式 4 将系统的总信噪比 (SNR) 表示为:

$$SNR_{total} = 20 \log \left(\frac{V_{FSR_{rms}}}{V_{ntotal}} \right) \quad (4)$$

总噪声为 55.6μV 时，总 SNR 为 90dB。若将 OPA325 的带宽滤波限制在 2MHz，总 SNR 为 92.2dB，相比 ADS8860 原本 93dB 的 SNR，劣化程度不足 1dB。

输入偏移电压与漂移

运算放大器的偏移电压是误差来源之一，会影响系统精度。在 5V 满量程电压范围内，ADS8860 (16 位) 的量化误差为 $5 / (2^{16} + 1)$ ，即 76μV。为避免量化误差并保持系统精度，请将目标设定为 LSB 的一半，即 38μV。虽然输入偏移电压可以通过校准消除，但偏移电压漂移的校准方法更为复杂。汽车和井下钻探等应用对温度的要求远高于实验室和现场仪器仪表、测试测量以及医疗仪器。现代高精度运算放大器采用零漂移或 e-trim™ 等技术，具有极低的偏移电压和漂移，其数值远低于理想的 LSB 值，有助于实现更高的系统精度。

表 1 列出了 TI 提供的一些采用各种技术的精密运算放大器。

器件	技术	Vs (V)	Vos 最大值 (μV)	TCVos, 典型值 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	带宽 (MHz)	宽带电压噪声 ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
OPA392	e-trim™	1.7-5.5	10	0.18	13	4.4
OPA325	激光修整, 零交越	2.2-5.5	150	2	10	9
OPA328	E-trim™, 零交越	2.2-5.5	50	0.15	40	6.1
OPA383	零漂移	2.7-5.5	5	0.025	2.5	32
OPA192	E-trim™, 多路复用器友好型	4.5-36	25	0.1	10	5.5

表 1. 用于驱动高分辨率 ADC 的低噪声精密运算放大器

趋稳时间

具有高转换率、低输出阻抗和高相位裕度的宽带放大器趋稳更快。驱动 ADC 时，应选择趋稳时间能达到所需分辨率并与 ADC 的采集时间相匹配的运算放大器。请记住，采集时间等于采样时间减去转换时间。降低采样率有助于放宽对运算放大器趋稳时间的要求。

理想情况下，运算放大器应趋稳在 ADC LSB 的一半内，以避免误差。不过，很少有运算放大器数据表会规定高达 16 位 (0.0015%) 的趋稳时间。开环输出阻抗是一项常被忽视的规格。低开环输出阻抗意味着相位裕度更高，进而意味着趋稳时间更快。此外，开环输出阻抗的形状也会影响电路稳定性。平坦（阻性）的开环输出阻抗运算放大器更易于补偿。运算放大器输出端的电荷桶式电阻器-电容器滤波器会引入一个极点，降低相位裕度，但同时能最小化采样期间的输出压降。根据极点位置的不同，可能会观察到过大的振铃（过冲），从而影响趋稳时间。

图 8 展示了一个使用 OPA328 驱动 ADS8860 的电路。采样率设置为 500kSPS。ADS8860 的采集周期为 $T_{acq} = 2\mu\text{s} - 710\text{ns} = 1,290\text{ns}$ 。

将采样率降至 500kSPS，电路趋稳时间可加快至 425ns，远低于 LSB 的一半。

图 9 展示了 OPA328 与 ADS8860 的配对连接，并利用该电路对趋稳时间进行了仿真（图 10）。

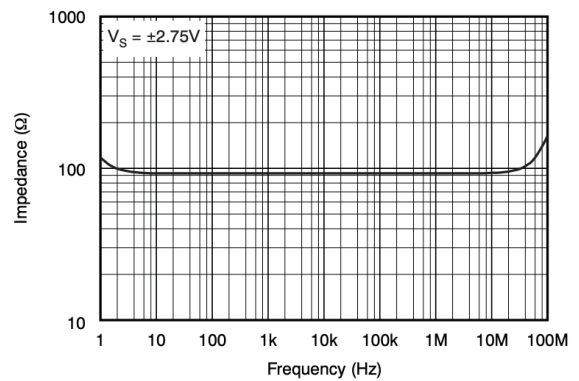


图 8. OPA328 开环输出阻抗与频率间的关系

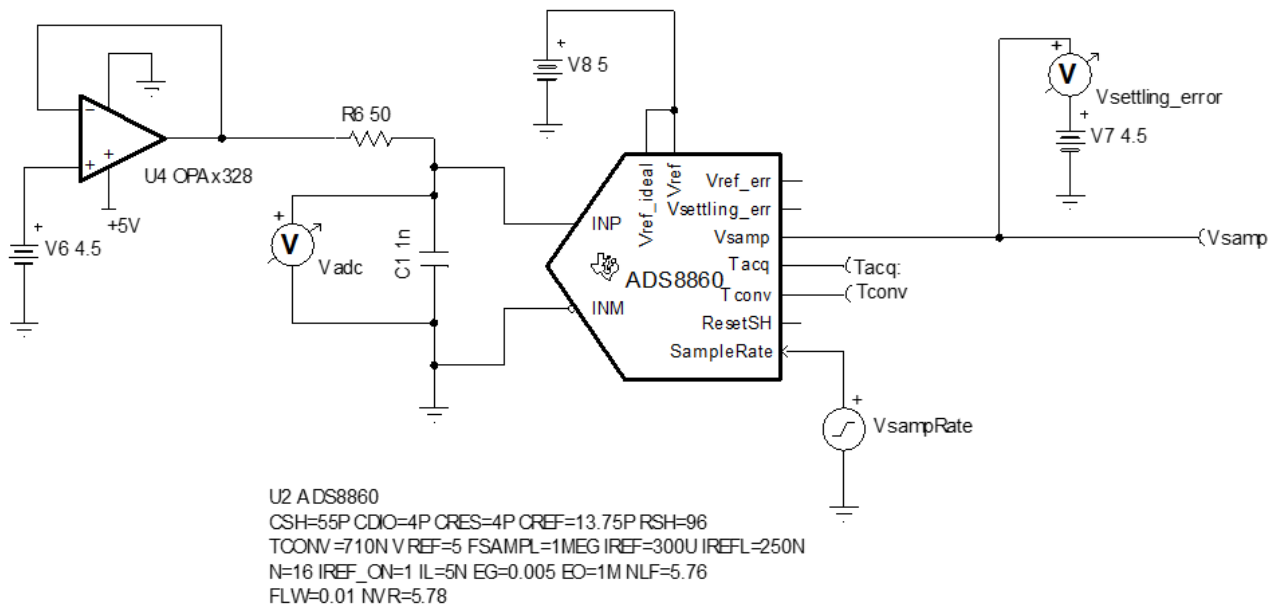


图9. OPA328 驱动 ADS8860

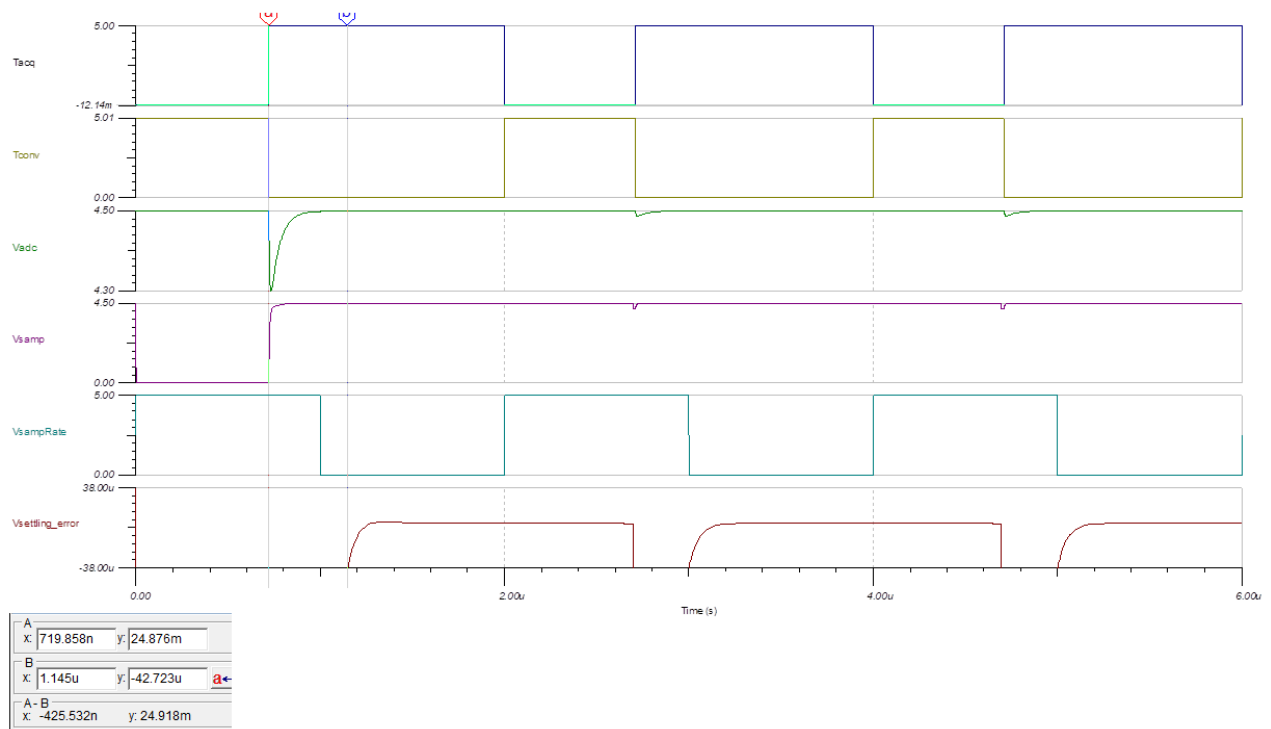


图10. OPA328 驱动 ADS8860 时的趋稳时间

稳定性

优化电路的趋稳时间和噪声性能，不能以牺牲稳定性为代价。本文讨论的运算放大器均具有低且平坦的开环输出阻抗，这大大简化了补偿设计。

图 11 展示了驱动 1nF 电容器的 OPA328，在反馈环路外使用 50Ω 隔离电阻器（与驱动 ADS8860 所用电阻器相同）。相位裕度为 61 度，确保了设计的稳定可靠性。

运算放大器的稳定性至关重要。如果运算放大器不稳定或处于不稳定的边缘，出现严重振铃和过冲，其他一切都无从谈起。

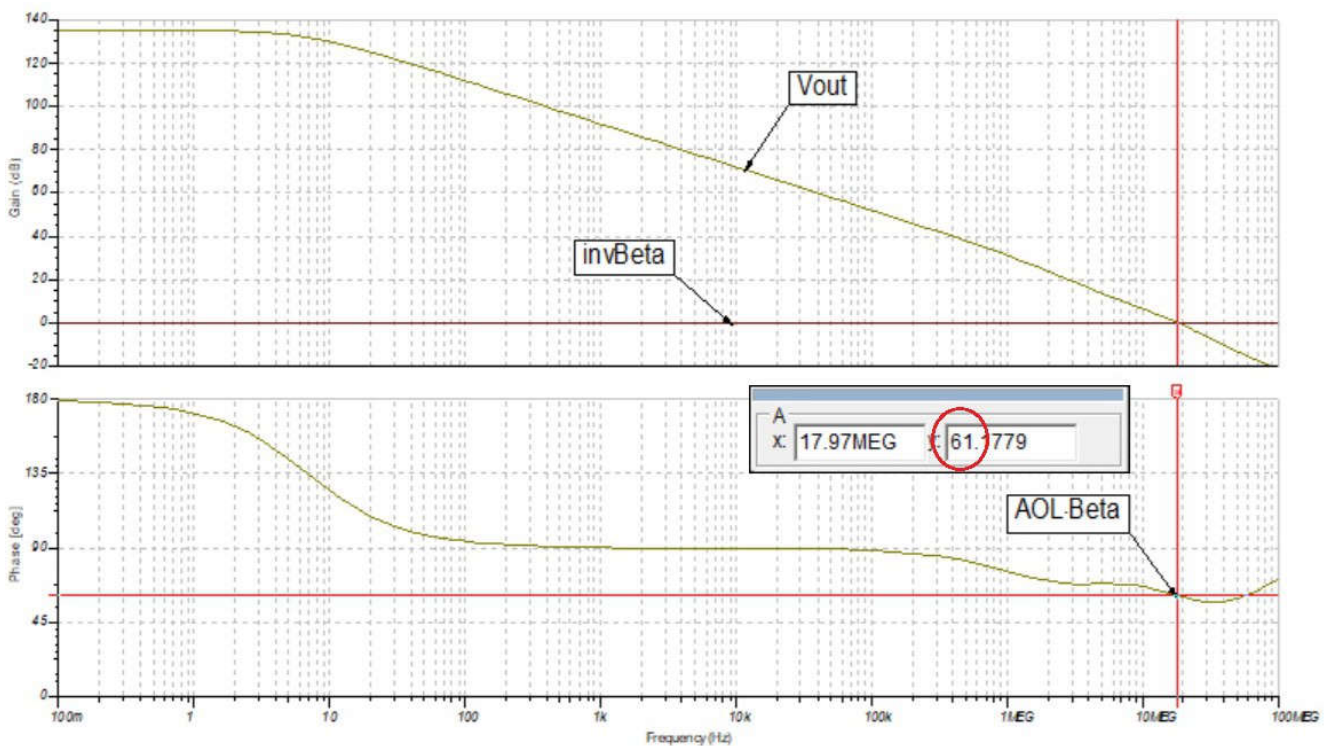
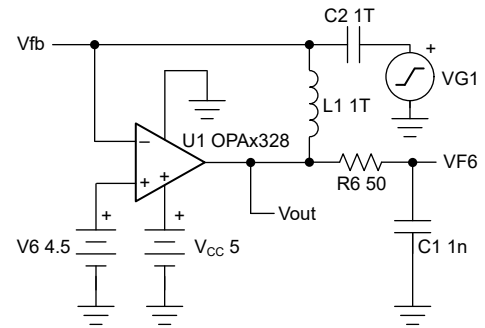


图 11. 带重电容负载时的 OPA328 开环增益与相位裕度

结语

选择运算放大器作为 ADC 驱动器，必须从具体应用出发。便携式测试测量设备、医疗器械和条码扫描仪都依赖低功耗；而天然气勘探、位移测量及半导体测试设备则需要更高的分辨率，因而需要低噪声精密运算放大器。在为给定 ADC 选择运算放大器时，没有万全之策；只能针对某方面进行优化，并在其他方面做出取舍。

关于作者

Soufiane Bendaoud 是德州仪器 (TI) 精密放大器业务拓展经理，在模拟信号链领域拥有超过 25 年的专业经验。他撰写了 60 多篇技术文章、应用手册和论文，并定期为世界各地的工程师提供技术培训。

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。

TINA-TI™ and e-trim™ are trademarks of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月