

## Application Note

## 将隔离式放大器与 SAR AD 转换器配对



Jiri Panacek

## 摘要

AMC0311 或 AMC0330 等隔离式放大器常与逐次逼近寄存器 (SAR) 模数转换器 (ADC) 搭配使用。许多高压系统使用多路复用 ADC 来快速扫描多个通道，并将信息传递给控制器。这一设计对时序提出了严格要求，同时缩短了每个通道的允许转换时间。本应用手册举例说明了运算放大器的选型如何影响信号链的直流和交流特性，以及违反时序要求时会产生何种后果。

## 内容

1 简介.....	2
2 信号链.....	4
2.1 多路复用 SAR ADC 内部.....	4
2.2 使用放大器驱动 ADC.....	4
3 实验结果.....	5
3.1 直流特性.....	6
3.2 交流特性.....	8
4 总结.....	11
5 参考资料.....	12

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在需要通过电隔离实现电路两部分电气隔离的系统中，隔离式放大器是不可或缺的核心构建块。需要电隔离的典型系统包括高压 DC/DC 转换器、电机驱动器、混合动力电动汽车 (HEV) 和纯电动汽车 (EV) 牵引逆变器等。隔离放大器最常见的应用是检测电流或电压，并将该信息跨越电隔离屏障传输至控制器。隔离式放大器的功能与  $\Delta-\Sigma$  调制器相似；但二者的输出形式不同，隔离式放大器输出模拟信号，而调制器输出数字信号。模拟输出特性为许多系统及工程师带来便利，让系统实现与测试流程更易理解，并且无需微控制器 (MCU) 辅助即可工作。

通常，隔离式放大器的输出端与 SAR ADC 相连。

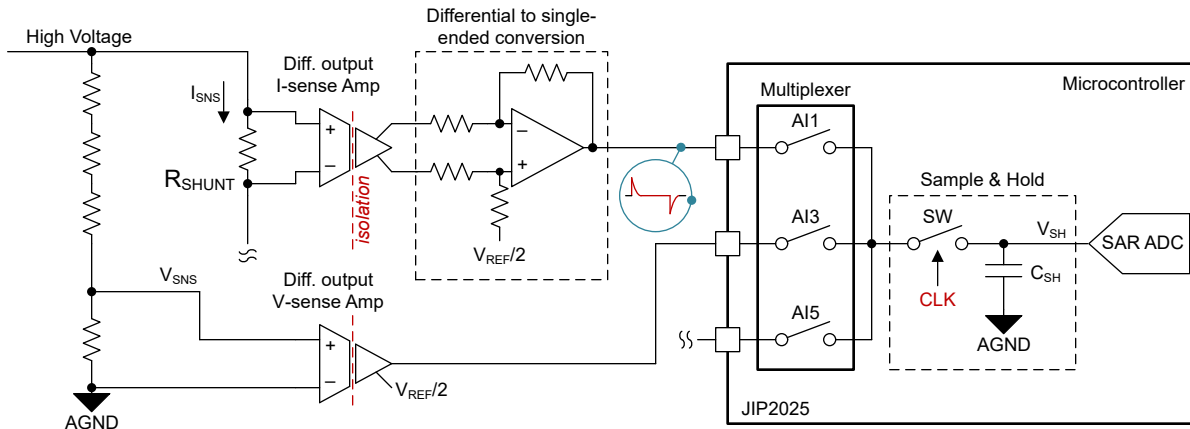


图 1-1. 隔离式放大器与 SAR ADC 连接

SAR ADC 是 MCU 中最常见的类型。分辨率范围从低成本的 10 位到高端微控制器的 16 位。该实现方案的关键问题在于：在数据采集过程中，SAR ADC 的采样保持 (S/H) 电路会暂时干扰模拟信号链的正常工作。MCU 具备多个模拟输入通道，但仅集成 1 个、2 个或 3 个 ADC 块。因此，多个模拟输入通道需通过模拟多路复用器来共享 ADC。多路复用系统增加了设计难度，原因是  $C_{SH}$  电容器通常不会复位，因此会留存前一通道的状态信息。图 1-1 举例展示了一个简化示意图。

模拟放大器有两种可能的输出类型。

**差分输出** (图 1-2) 是一种首选方案，适用于隔离式放大器与 ADC 之间物理距离较长或需要经过连接器的系统。传递给控制器的信息是两个互补输出之间的电压差，而不是相对于公共接地的绝对值。因此，这种输出能够有效抑制可能进入 ADC 与隔离式放大器之间电路的共模噪声。缺点是，许多 ADC 无法直接与差动信号配合工作。在这种情况下，会在靠近 ADC 的位置进行差动到单端的转换。差分放大器会将信号转换给 ADC，但同时会引入额外的测量误差，并增加系统的复杂性。

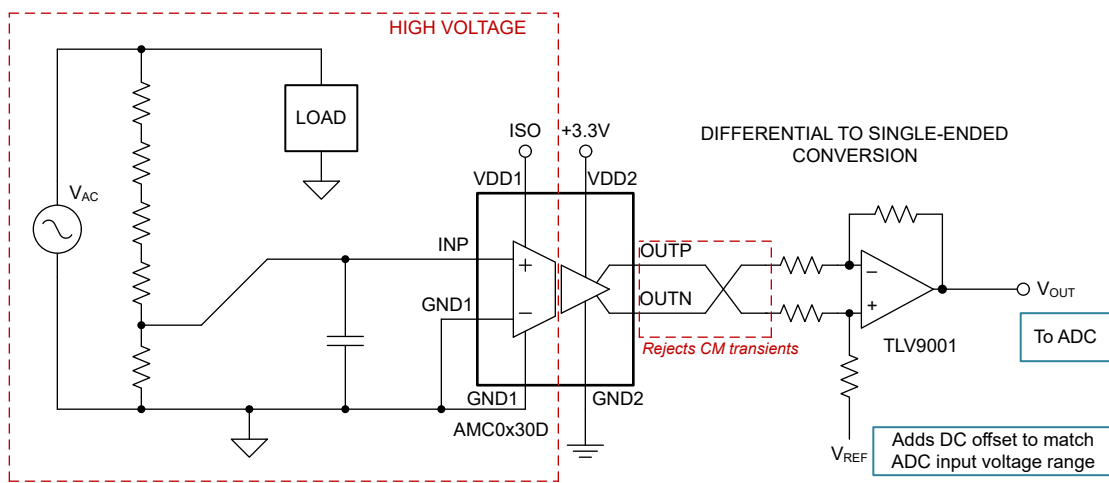


图 1-2. 差分输出隔离放大器

单端输出 (图 1-3) 可以直接与 ADC 接口连接, 而不需要差分放大器。通常, 该器件具有一个基准电压输入 (REFIN), 用于为输出 (OUT) 添加失调电压或设置增益。该方案更易实现, 但无法抑制共模噪声。因此, 这种类型的输出是首选设计, 适用于 ADC 与隔离式放大器之间距离相对较短 (<10cm) 的情况, 或能够接受由共模噪声带来的性能下降的情况。

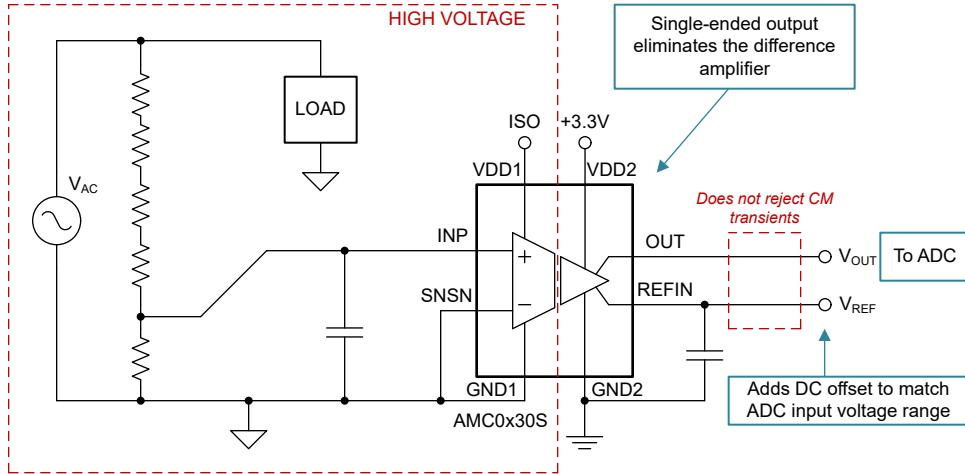


图 1-3. 单端输出隔离放大器

对于上述两种输出类型, 工程师均需深入理解采样过程的工作原理, 以避免信号链的交流和直流性能损失。

## 2 信号链

### 2.1 多路复用 SAR ADC 内部

图 2-1 展示了带输入多路复用器的 SAR ADC 转换器的简化示意图。本示例中，采样顺序为 AI1 通道起始，经 AI3 通道，至 AI5 通道结束。之后循环此过程。

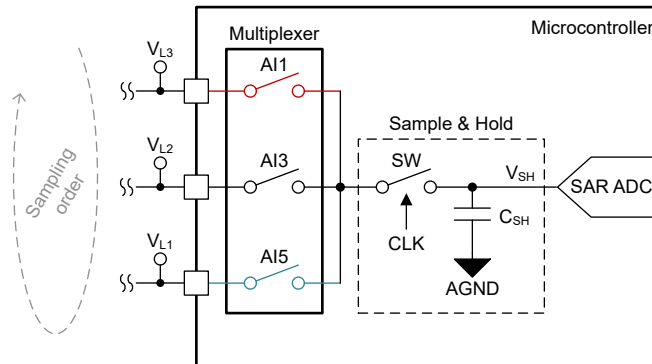


图 2-1. SAR ADC 功能方框图示例

对于每个通道，多路复用器先闭合对应 AIx 开关，随后 ADC 闭合开关 SW，持续时间称为采样（或采集）时间  $t_{SMPL}$ 。采样时间结束后，开关 SW 再次断开，AD 转换启动。转换结束后，ADC 继续处理下一个通道，如图 2-2 所示。

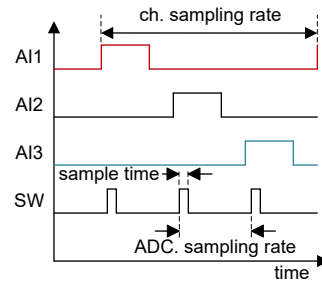


图 2-2. 使用多路复用 ADC 进行重复采样的时序图

### 2.2 使用放大器驱动 ADC

图 2-3 展示了运算放大器或单端隔离放大器输出驱动 ADC 模拟输入端的应用场景。当采样保持开关 SW 将采样保持电容  $C_{SH}$  接入放大器输出端时，模拟放大器的输出会产生瞬态响应。

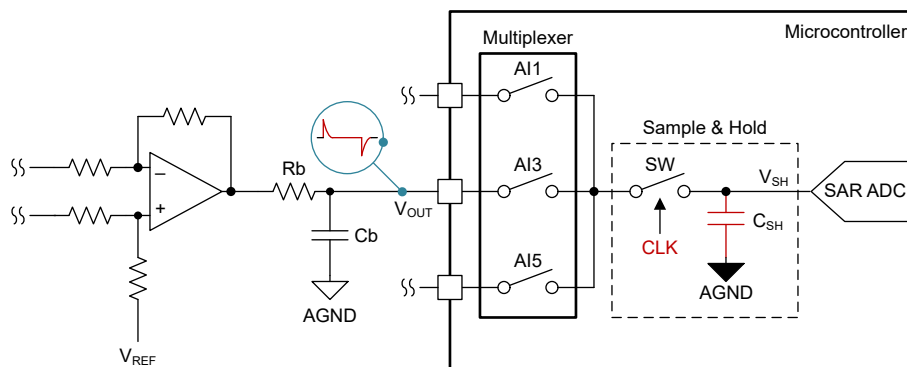


图 2-3. 驱动多路复用 ADC 输入的运算放大器

在采样保持过程中,放大器必须快速将采样保持电容器  $C_{SH}$  重新充电至目标电平  $V_{OUT}$ 。但该过程并非完全可控。大多数 ADC ( 但并非所有 ) 在每次转换间隔内不会复位采样保持电容器。这意味着电容器会保持上一次通道转换产生的残余电压 ( 电荷 )  $V_{SH}$ 。由此可能出现以下三种情况 :

1.  $V_{SH} > V_{OUT}$  会导致过冲, 因为外部放大器必须将  $C_{SH}$  放电至较低的电压
2.  $V_{SH} = V_{OUT}$  不会导致任何瞬变, 因为电压相同
3.  $V_{SH} < V_{OUT}$  会导致下冲, 因为外部放大器必须将  $C_{SH}$  充电至较高的电压

添加电荷桶滤波器 (  $R_b$ 、 $C_b$  ) 在一定程度上有助于控制输出瞬态。不过, 滤波器无法提高放大器的稳定速度。其仅能用于调节趋稳时间与过冲/下冲幅度之间的平衡关系。

### 3 实验结果

图 3-1 展示了用于获取测试数据的实验板。该实验板具有三款输出类型各异 ( 单端固定增益、单端比例式输出和差分输出 ) 的隔离式放大器。此外, 该电路板包含不属于本应用手册讨论范畴的调制器器件。

图 3-2 和图 3-3 展示了两种不同运算放大器在相同配置下的性能表现, 该配置以 TMS320F28P650 微控制器为核心, 搭配 16 位 1-MSPS 多路复用 ADC。采样保持时间为  $t_{SMPL}=425ns$ 。

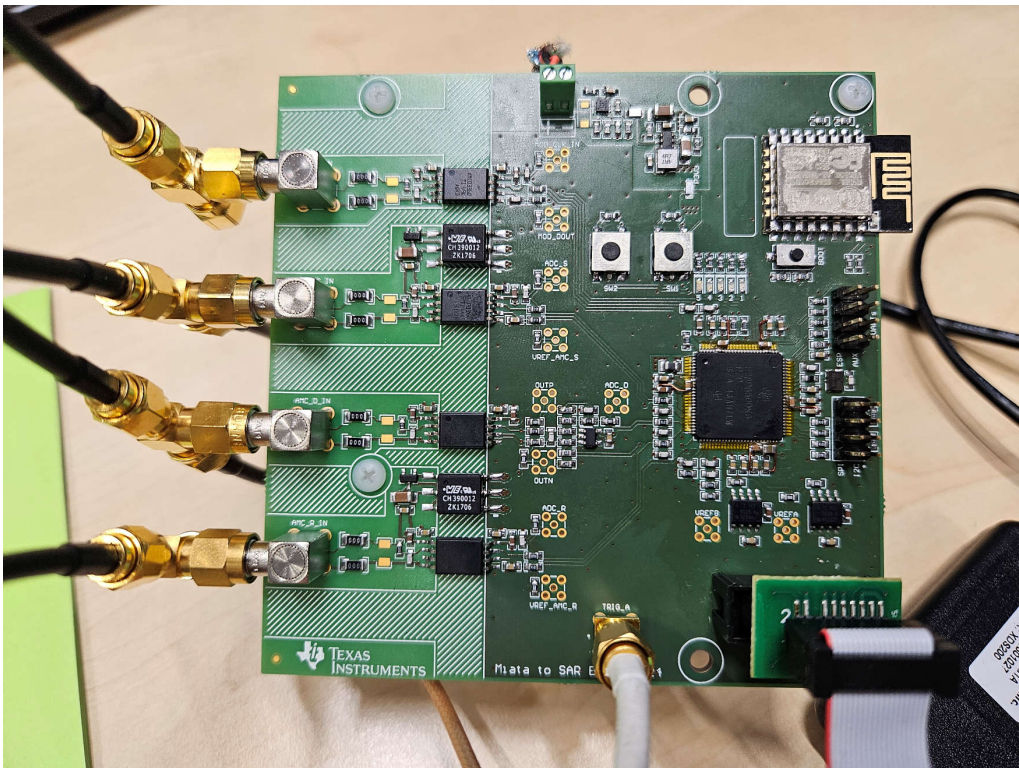


图 3-1. 实验测试设置

图 3-2 中的波形代表的是 OPA365。一款高性能、高带宽 (50MHz) 的轨到轨运算放大器。从之前描述的三种工况波形可见, 该运算放大器的输出趋稳时间小于 150ns。图 3-3 中的波形代表的是 TLV9001, 这是一款低成本、带宽为 1MHz 的轨到轨运算放大器。可以看出, 在相同的三种测试工况下, 该运算放大器的输出趋稳时间需超过 800ns。因此, 采样保持开关会在 ADC 输入信号趋稳前断开。这种现象在  $V_{SH} < V_{OUT}$  的下冲工况中尤为明显。在此工况下, 用于 AD 转换的电压比实际所需电压高 30mV。对于系统中采用 3V 基准电压的情况, 这会导致 1% 的读数误差。

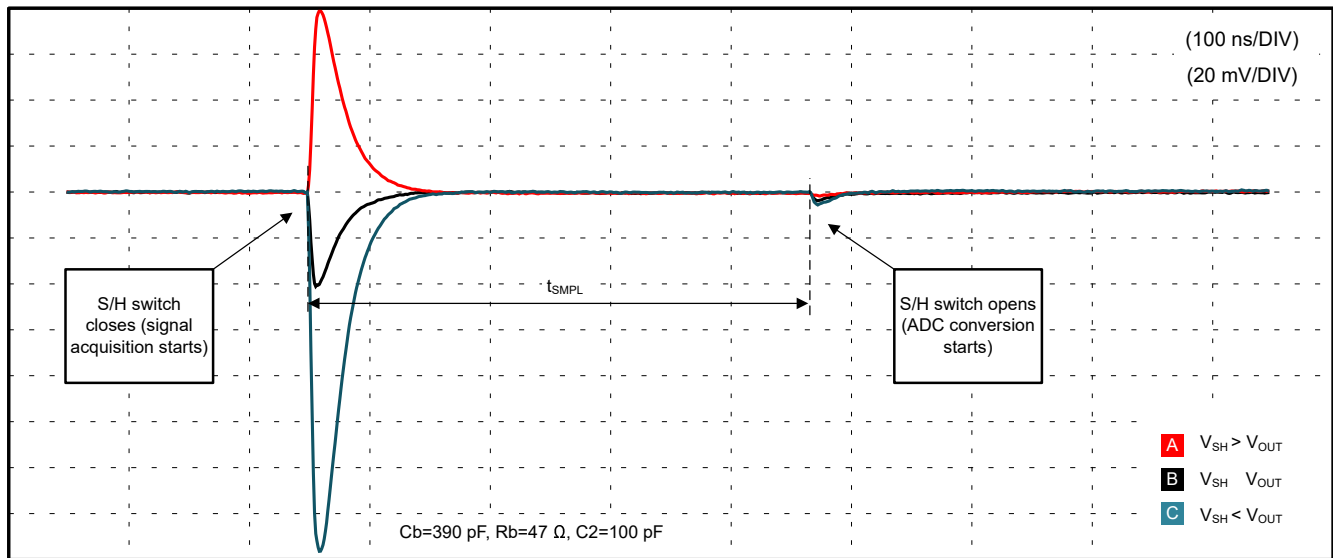


图 3-2. 搭载 OPA365 时的输出趋稳过程

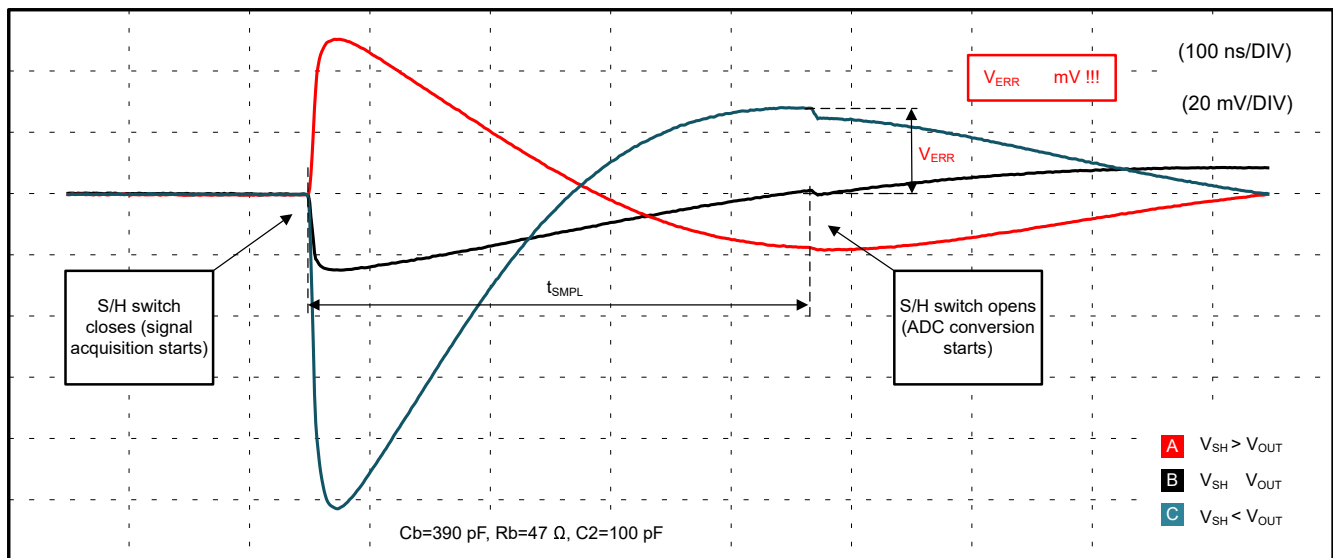


图 3-3. 搭载 TLV9001 时的输出趋稳过程

### 3.1 直流特性

误差电压  $V_{ERR}$  并非恒定值，其大小会随不同工作条件发生变化。误差的主要来源是上一次采样电压 ( $V_{SH}$ ) 与驱动电压  $V_{OUT}$  之间的差异。此外，输入电压、温度波动、元件容差以及接近电压轨的工作状态均会对误差产生影响，导致该误差难以校准。

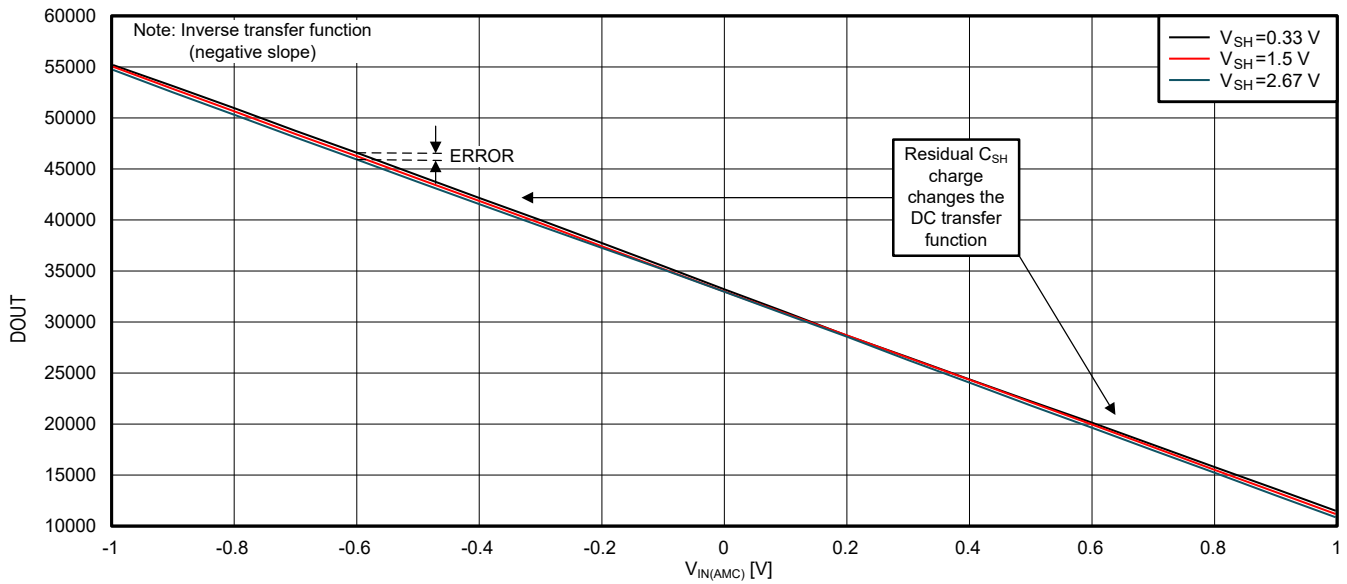


图 3-4. AMC0330D 与 TLV9001 构成的信号链的传递函数， $t_{SMPL}=425\text{ns}$

图 3-4 展示了由 AMC0330D 与基于 TLV9001 的差分放大器构成的完整信号链的传递函数。X 轴表示进入隔离放大器的输入电压 ( $V_{IN(AMC)}$ )。Y 轴表示 ADC 的数字输出 (DOUT)。 $V_{SH}$  的三个不同条件对应上一次采样通道的值。从图形上看，该误差并不明显，难以从图中直接读取。图 3-5 是一个更清晰的图，可直观呈现  $V_{ERR}$  的负面影响。该图展示了在模拟输入电压范围内的系统积分非线性 (INL)。此外，该误差也等于传递函数最佳拟合线与实际转换读数之间的偏差。该图显示，相对于残余电压  $V_{SH}$ ，系统总满量程误差最大波动可达 1.06%。

图 3-6 展示了针对速度更快的、基于 OPA365 的差分放大器的完全相同的分析。测试采用了完全相同的硬件，仅将运算放大器由 TLV9001 替换为 OPA365。在此示例中，满量程误差变化小于 0.26%，比采用 TLV9001 的电路提高了 4 倍。

为确保完整性，图 3-7 展示了使用隔离式放大器单端型号 (AMC0330S) 的信号链。相较于 AMC0330D 搭配基于 OPA365 的差分放大器的组合方案，该方案的小幅性能提升源于放大器的全片上集成设计。高集成度消除了差分放大器分立式实现中的其他误差因素。

可以看出，驱动 ADC 输入的放大器的趋稳时间会对信号链的直流传递函数及线性度产生影响。如果放大器的趋稳时间长于 ADC 的采样时间，则会在测量中引入显著误差。

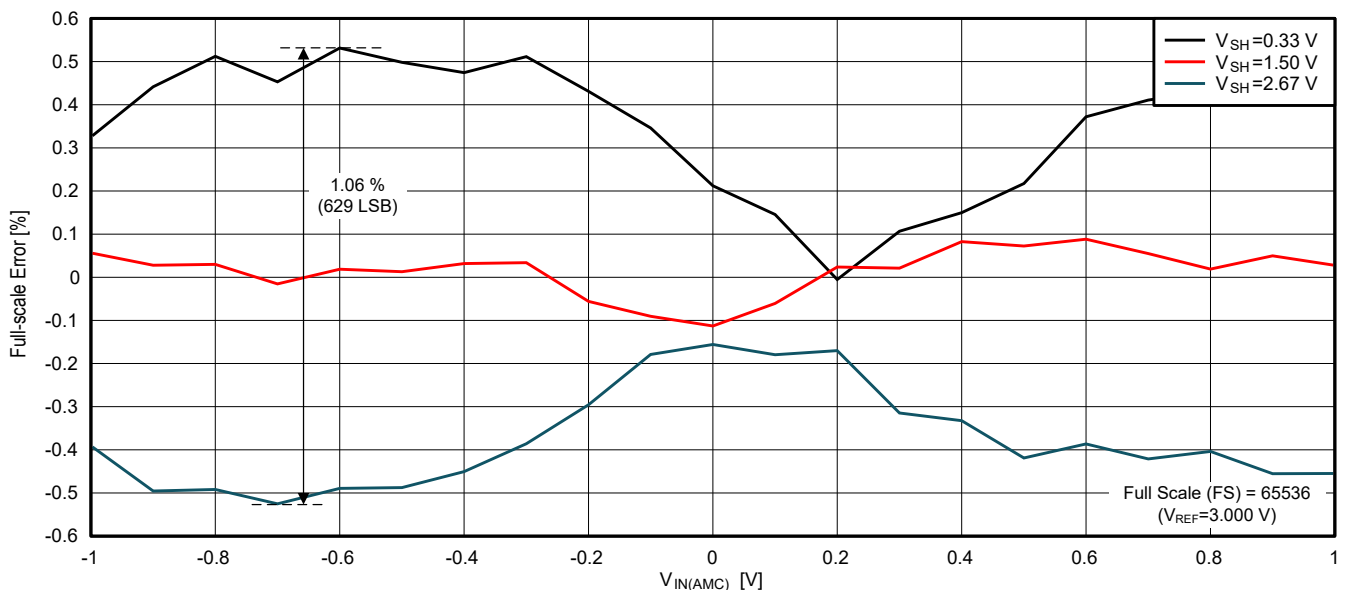


图 3-5. 由 AMC0330D 与 TLV9001 构成的信号链的积分非线性， $t_{SMPL}=425\text{ns}$

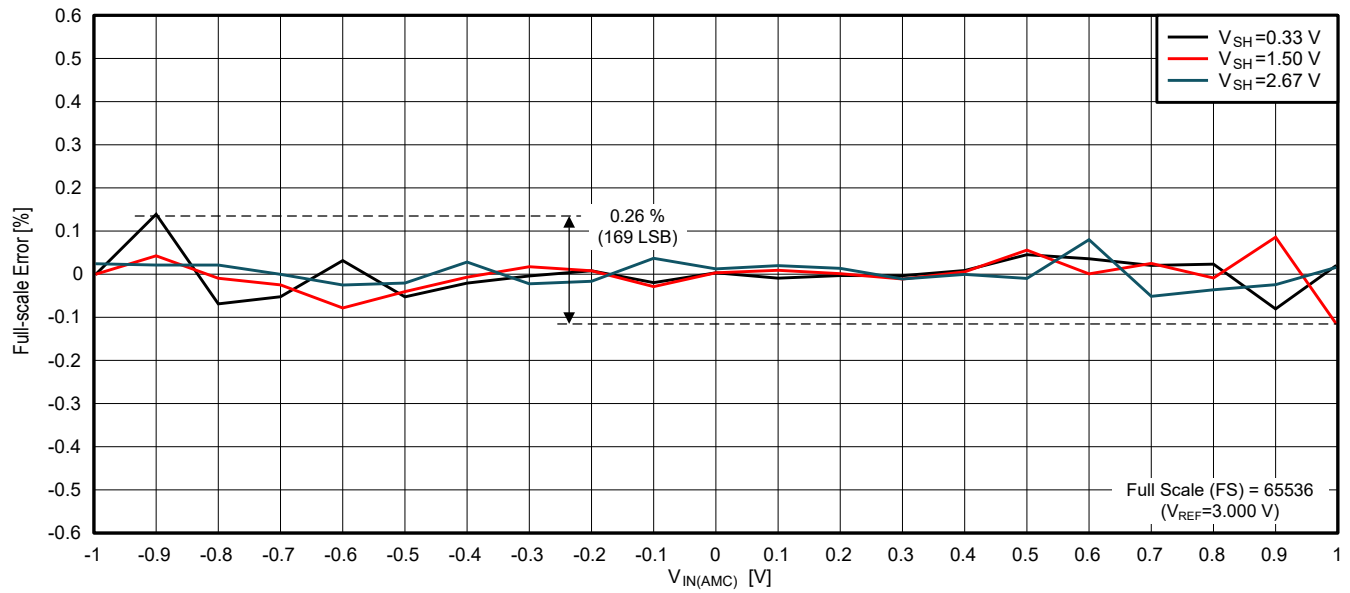


图 3-6. 由 AMC0330D 与 OPA365 构成的信号链的积分非线性， $t_{SMPL}=425ns$

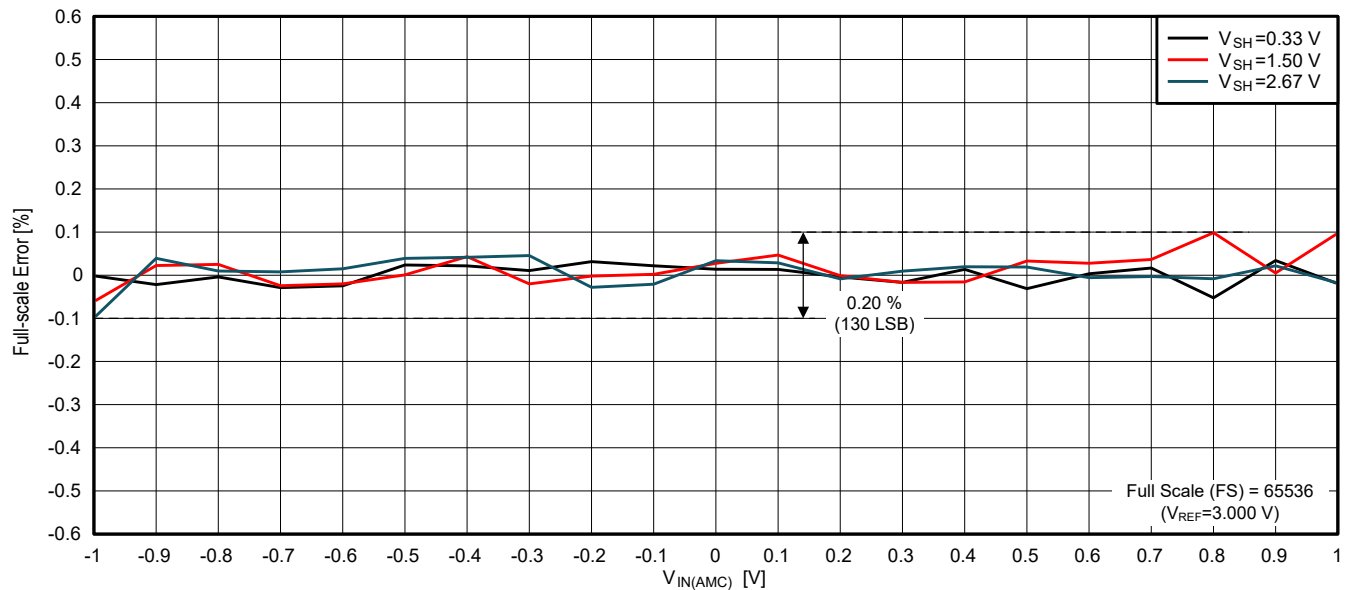


图 3-7. 采用单端输出 AMC0330S 放大器的信号链的积分非线性， $t_{SMPL}=425ns$

### 3.2 交流特性

直流传递函数的非线性会转化为交流特性中的谐波失真。

图 3-5、图 3-6 和图 3-7 展示了 8192 个数据样本的快速傅里叶变换 (FFT)。有效采样频率为 312.5kHz，具有 16 位分辨率，并且采样时间与直流特性讨论中一致 ( $t_{SMPL}=425ns$ )。输入信号 (载波) 是振幅为 1V 的 10kHz 正弦波。FFT 使用 Hanning 窗来抑制频谱泄漏。

我们在直流特性中观察到的负面影响在交流域中同样存在。基于 TLV9001 的差分放大器会引入载波频率整数倍的杂散谐波。在被噪声淹没前，至少可观察到 10 次谐波。采用 OPA365 或 AMC0330S 的系统，性能明显更优。



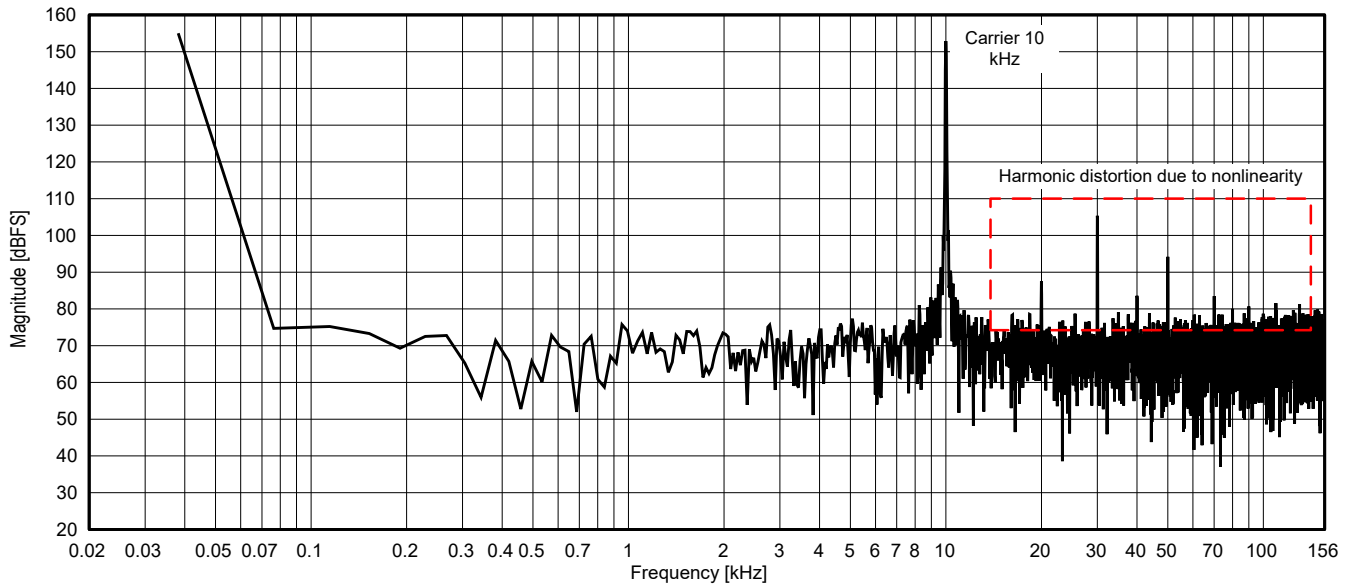


图 3-8. AMC0330D 与 TLV9001 构成的信号链的输出频谱

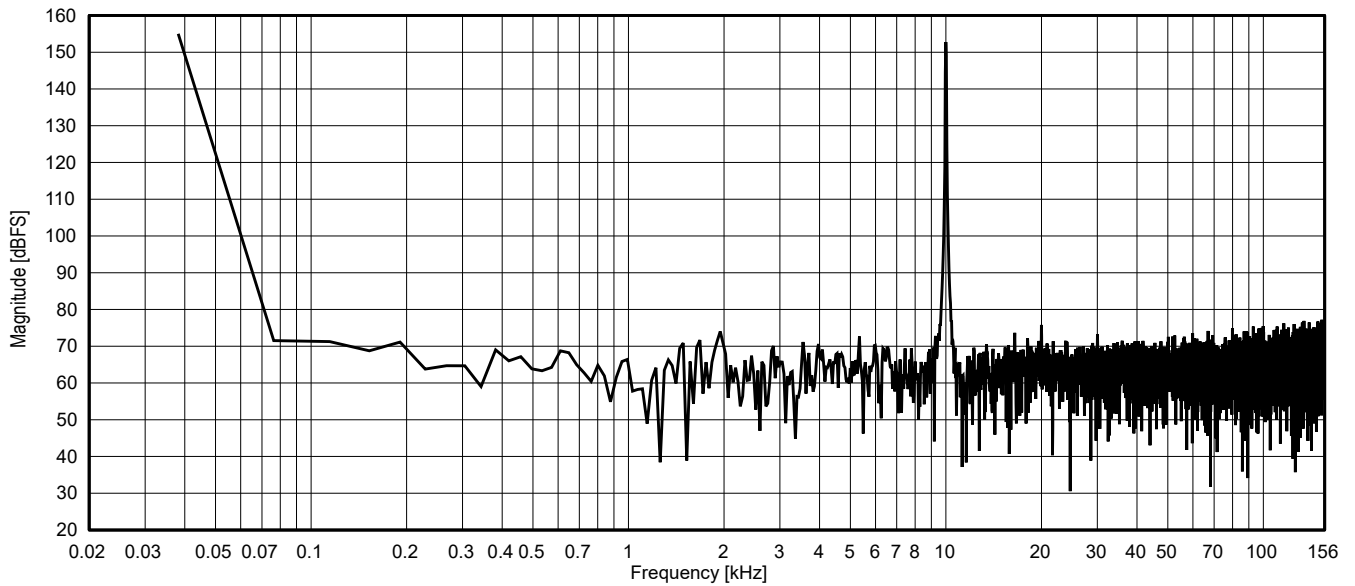


图 3-9. AMC0330D 与 OPA365 构成的信号链的输出频谱

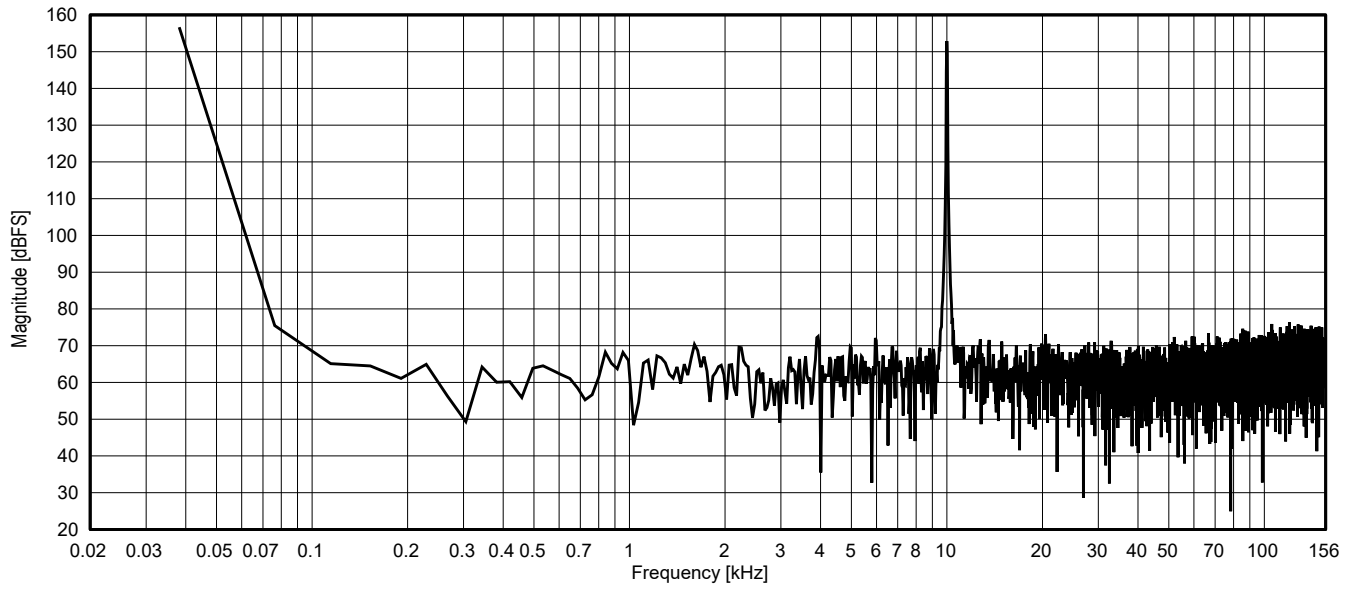


图 3-10. 采用单端 AMC0330S 的信号链的输出频谱

## 4 总结

表 4-1 列出了测量结果汇总。无伪波动态范围 (SFDR) 在通信行业中更为相关，但它同样是一个实用的性能指标，在频域中可直观观测。基于 TLV9001 的差分放大器与基于 OPA365 的差分放大器在性能上的差异，源于测试板的时序规格。在允许较长采样时间的系统中，TLV9001 运算放大器是合理选择，可确保差分放大器在采样保持开关 (SW) 断开前完全稳定。但这会降低转换速率，因为其他通道必须等待最慢的通道。或者，如果 MCU 中集成两个 ADC，可将慢速通道与快速通道分配至不同 ADC。

表 4-1. 测量汇总

参数	TLV9001	OPA365	AMC0330S	单位
SFDR	48	76	81	dB
INL	0.53	0.14	0.1	%
INL	346	91	65	LSB

对于需要更快 ADC 采样速率的系统，选用更高带宽的运算放大器 (如 OPA365 或 TLV365) 可显著提升性能。当隔离放大器与 ADC 之间的距离较短时，最经济的选择是采用单端输出隔离放大器 (如 AMC0330S 或 AMC0330R)。

以下列出了在设计和验证与 SAR ADC 连接的隔离式信号链时的建议：

- 当共模噪声无需重点考虑时，选用单端输出隔离放大器 (AMC0330R、AMC0330S)
- 务必在 ADC 输入前端配置电荷桶滤波器
- 针对前一次采样信号的不同工况，测量放大器在采样过程中的瞬态响应
- 在时域和频域中对采样信号进行分析 (采用 FFT)
- 与固件实施人员紧密协作，确保开发过程中采样顺序及时序不发生变更
- 采用能够在 ADC 的采样时间内使输入稳定的运算放大器 (例如 OPA365、TLV365)
- 切记，运算放大器的交流特性会影响直流精度
- 利用 pSpice 等工具对采样过程进行仿真，以优化系统性能及电荷桶滤波器参数
- 即使更换的运算放大器属于同一系列，仍需重新测试系统性能

表 4-2 列出了适用于 TMS320F28P650 MCU 且 ADC 工作在 16 位分辨率单端模式下的系统的高性能元件参数。

表 4-2. 搭载 TMS320F28P650 的实验板所用元件参数

采样保持开关电阻 $R_{SW} = 425 \Omega$ 采样保持电容 $C_{SH} = 42.5 \text{pF}$				
参数	TLV9001	OPA365	AMC0330(R/S)	单位
Rb	47	47	47	$\Omega$
Cb	1000	390	2200	pF
趋稳时间	2	0.1	0.4	us

## 5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [AMC0x30S 精密、 \$\pm 1V\$  输入、具有固定增益单端输出的基础型和增强型隔离放大器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [AMC0x30D 精密、 \$\pm 1V\$  输入、具有固定增益差分输出的基础型和增强型隔离放大器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [TLV900x 适用于成本敏感型系统的低功耗、RRIO、1MHz 运算放大器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [OPAx365 50MHz、零交叉、低失真、高 CMRR、RRIO、单电源运算放大器](#) 数据表。

## 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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月