

Design Guide: TIDA-010945

集成、低漂移数字万用表和数据采集信号链参考设计



说明

此参考设计介绍了高性能直流测量信号链的原理、设计方法及测试过程。其主要目标应用是数字万用表 (DMM)，但该设计也同样适用于数据采集 (DAQ) 和状况监控等其他应用。此设计使用高性能 24 位模数转换器 ADS127L21 和低噪声可编程增益放大器 PGA855 实现了高直流精度，其典型非线性误差仅为 $\pm 2.4\text{ppm}$ ，且温漂很低。这些器件高度集成，从而简化了整个信号链设计。

资源

TIDA-010945	设计文件夹
ADS127L11	产品文件夹
ADS127L21	产品文件夹
PGA855	产品文件夹
REF7040	产品文件夹



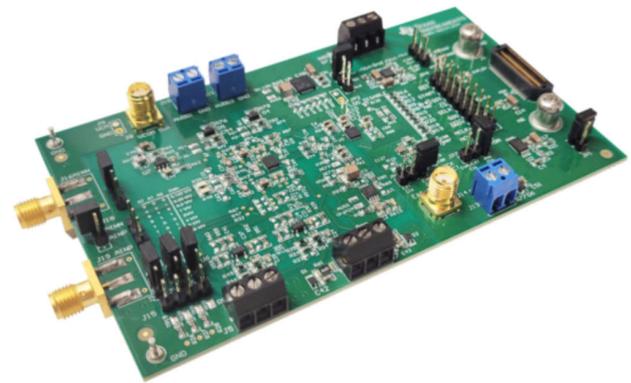
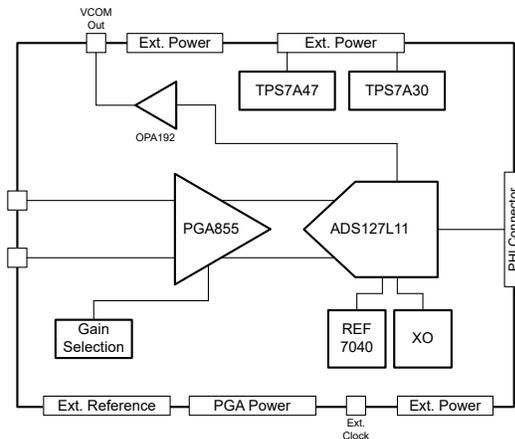
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 0.125V/V 至 16V/V 的可编程增益
- 高带宽：357kHz (Sinc3 滤波器，最大速度)
- ADC 的可配置数字滤波器设置
- 110dB 的 SNR (Sinc4 滤波器)，无需高速 ADC 输入驱动器和基准缓冲器
- 低增益漂移和非线性可实现高直流校准后精度
- 在满量程输入上：25°C \pm 5°C (校准后)
 - 估算的典型值：TUE = $\pm 6\text{ppm}$ ，INL $\pm 2.4\text{ppm}$
 - 估算的最大值：TUE = $\pm 32\text{ppm}$ ，INL $\pm 12.2\text{ppm}$
 - 估算的温度漂移 (典型值)
 - 温漂：350nV/°C
 - 增益漂移：1.5ppm/°C
 - 从 1 个单元测得 (校准后)
 - TUE： $\pm 9\text{ppm}$

应用

- 数字万用表 (DMM)
- 数据采集 (DAQ)
- 状况监控



1 系统说明

此设计采用一个易于选择的输入增益级，支持各种输入信号。这对于 DMM 等具有多个输入范围的应用很有利，因为增益之间的切换相对简单。

PGA855 在无需额外 ADC 驱动器的情况下驱动 ADS127L21 输入，而 ADS127L21 有集成输入和基准缓冲器，因此无需外部放大器。集成度大大简化了设计并节省了空间。该系统具有宽带宽、高动态范围以及低非线性，可实现出色的交流精度和直流精度。

1.1 主要系统规格

主要系统规格

表 1-1 列出了本参考设计实现的主要系统规格。

表 1-1. 规格

参数	规格
输入信号范围	0V 至 32.768V (具有 0.125V/V 增益)
增益选项	0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、16V/V
数字滤波器选项	宽带、低延迟、可编程 IIR 和 FIR
分辨率	24 位
数据速率	高达 512kSPS (宽带滤波器) 高达 1.365MSPS (低延迟滤波器)
SNR (1kHz, 增益 = 1V/V)	108dB (宽带滤波器) 110dB (低延迟滤波器)
THD (1kHz, 增益 = 1V/V)	-121.4dB (宽带滤波器) -121.4dB (低延迟滤波器)
带宽	224kHz (宽带滤波器) 357kHz (低延迟滤波器)
计算得出的典型直流精度	失调电压误差: $\pm 76 \mu\text{V}$ 增益误差: $\pm 360\text{ppm}$
计算得出的典型温度漂移精度	温漂: $350\text{nV}/^\circ\text{C}$ 增益温漂: $1.1\text{ppm}/^\circ\text{C}$

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了系统方框图。

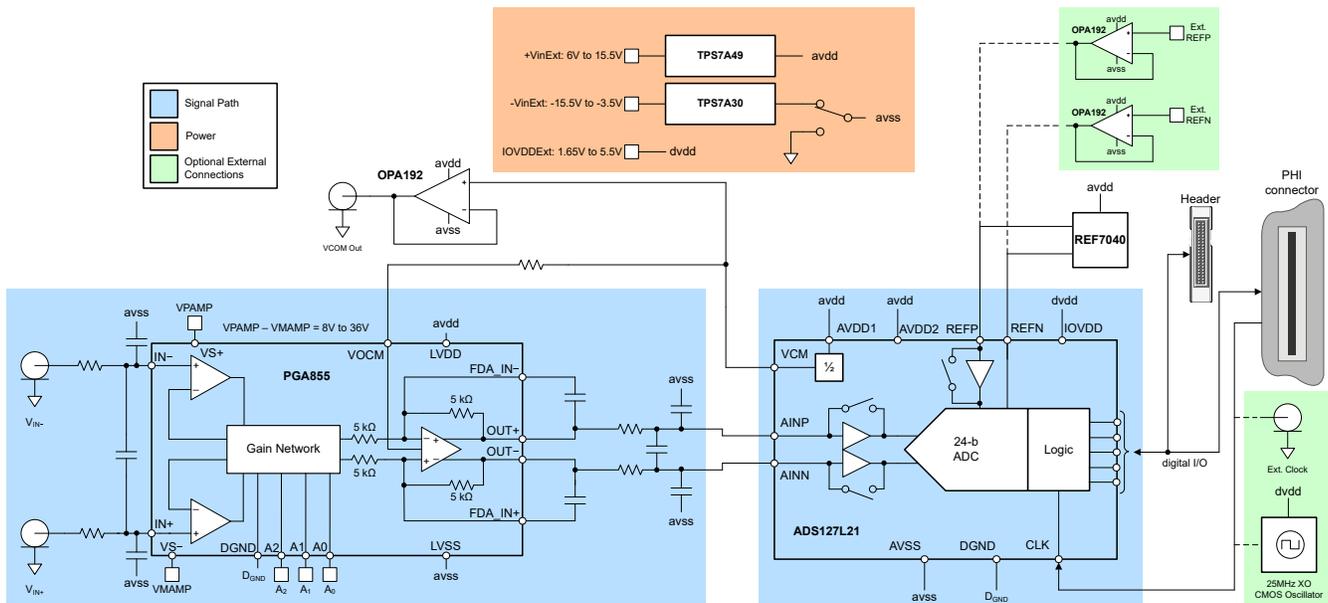


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

该设计旨在与精密主机接口 (PHI) 板配合使用，从而轻松连接 ADS127L21 GUI。PHI 板是用于连接多个德州仪器 (TI) Δ - Σ ADC 的 GUI 的外设。此电路板无法单独订购，而是在购买 ADS127L11EVM-PDK 或 ADS127L21EVM-PDK 时提供。默认情况下，ADC 电源和时钟来自 PHI 控制器。该参考设计还包含一个板载高精度 4.096V 系列基准，用于最大限度地扩大 ADC 的动态范围。但是，用户可以选择使用外部基准、时钟和电源，具体取决于系统规格。无论 ADC 如何供电，PGA855 都必须由外部供电。此外，电路板上有一个接头，如果不使用 PHI 控制器板，则可以从 ADC 访问数字线路。

ADC 有两个输入范围：1 倍和 2 倍，其中 1 倍范围由 $V_{IN} = \pm V_{REF}$ 定义，2 倍范围由 $V_{IN} = \pm 2 \times V_{REF}$ 定义。当使用 2.5V 或更低的基准电压时，2 倍输入范围将可用范围加倍。2 倍输入范围通常可在使用 2.5V 基准时将 SNR 提高 1dB，但也需要驱动 5V 电源轨的输入，以便实现全动态范围。通过使用 4.096V 或 5V 基准电压（将 ADC 编程为高基准范围模式），可实现出色的动态范围（通常可提高 4dB）。

由于采用了 PGA855 增益设置，此设计具有较宽的输入范围。到电路板的最大输入信号取决于 PGA855 电源、PGA 增益设置以及 ADC 上的输入范围选择。PGA855 的最大建议电源为 36V 单极或 $\pm 18V$ 双极。例如，若采用 4.096V 基准电压，当 PGA855 由 $\pm 18V$ 电源供电时，系统满量程为 $\pm 0.256V$ （16V/V 增益）至 $\pm 32.768V$ （1/8V/V 增益）。

2.3 主要产品

2.3.1 ADS127L21

ADS127L21 是一款具有可编程数字滤波器的 24 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)，使用宽带滤波器时数据速率高达 512kSPS，使用低延迟滤波器时数据速率高达 1365kSPS。该器件具有出色的交流性能、直流精度和低功耗。

可编程无限和有限脉冲响应 (IIR 和 FIR) 数字滤波器支持自定义滤波器配置文件，例如 A 加权补偿和频率陷波滤波器。宽带或低延迟滤波器选项可在一个器件中优化交流信号性能或直流信号的数据吞吐量。

低漂移调制器可实现出色的直流精度和低宽带噪声，从而提供出色的交流性能。电源可扩展架构提供四个速度模式来优化数据速率、分辨率和功耗。信号和基准输入缓冲器可降低驱动器负载，实现更高的精度。

2.3.2 PGA855

PGA855 是一款具有全差分输出的高带宽可编程增益仪表放大器。PGA855 具有八种二进制增益设置 (从 0.125V/V 的衰减增益到最大 16V/V)，可以通过三个数字增益选择引脚进行选择。使用 VOVM 引脚单独设置输出共模电压。

PGA855 架构经过优化，可驱动高分辨率、精密模数转换器 (ADC) 的输入。输出级电源与输入级去耦，可保护 ADC 或下游器件免受过驱损坏。

超 β 输入晶体管提供超低的输入偏置电流，进而提供 $0.3\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的超低输入电流噪声密度，因而 PGA855 成为几乎任何传感器类型的通用选择。低噪声电流反馈前端架构即使在高频下也能提供出色的增益平坦度，得益于此，PGA855 是一款出色的高阻抗传感器读出器件。输入引脚上的集成保护电路可处理超出电源电压高达 $\pm 40\text{V}$ 的过压。

2.3.3 REF70

REF70 系列是高精度串联电压基准，具有超低的噪声 ($0.23\text{ppm}_{\text{p-p}}$)、非常低的温度漂移系数 ($2\text{ppm}/^\circ\text{C}$) 和高精度 ($\pm 0.025\%$)。REF70 提供高 PSRR、低压降以及出色的负载和线路调节功能，有助于满足严格的瞬态要求。这种精度和特性的组合专门为测试和测量等应用而设计，这些应用需要与精密基准精确配对，并需要高分辨率数据转换器，例如 ADS8900B、ADS127Lx1 和 DAC11001A，从而实现出色的信号链性能。

3 系统设计原理

前端是数字万用表以及许多数据采集系统的关键构建块。数字万用表可在多种量程范围内进行测量。具有各个范围的单个增益电阻器的开关矩阵会占用大量空间，尤其是在多通道数据采集系统中。

PGA855 增益设置可实现宽输入范围，并由三个数字信号控制，从而更轻松地在此增益之间切换。DMM 具有多个不同的输入范围，例如 100mV、1V、10V 和 100V。因此，当可以使用一个输入级处理多个输入范围时，设计会得到简化。PGA855 增益由 3 条数字线路控制，因此使用微控制器或处理器时，在增益级之间切换相对容易。

该放大器必须能够准确地将信号缩放到数据转换器的满标量程，而不影响数据转换器的分辨率。准确度和精度是任何 DMM 设计的关键因素。仪表的读数需要接近真实值并且可重复。大多数初始直流误差可以相对轻松地进行校准，但非线性度、漂移和噪声必须很低，才能实现高精度和准确度。

本设计中可加入针对高压输入的额外输入调节以及输入保护功能，从而完全完成模拟前端信号链。

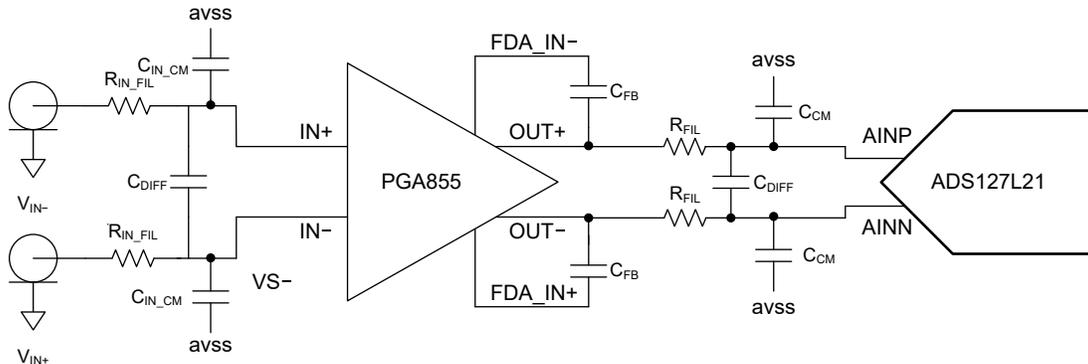


图 3-1. PGA 和 ADC 输入滤波器

PGA 输入端的 R-C-R 差分低通滤波器（如图 3-1 所示）有助于降低 EMI/RFI 高频外部噪声。此滤波器可根据带宽和应用要求进行定制。为差分电容器 C_{IN_DIFF} 与共模电容器 C_{IN_CM} 使用 10:1 的电容器比值可提供良好的差分 and 共模噪声抑制。另外，此比值也往往对滤波电容器的容差变化和失配不太敏感。

反馈电容器 C_{FB} 与 PGA855 输出级内部 $5k\Omega$ 反馈电阻并联（请参阅图 2-1），旨在实施额外的噪声滤波。内部电阻的绝对电阻变化为 $\pm 15\%$ ，在实施噪声滤波时必须考虑到这一变化。在该电路板上， C_{FB} 设置为 $25pF$ ，可提供 $1MHz$ 的典型 $f - 3dB$ 转角频率。在考虑到反馈电阻变化的情况下，该电路的估计最小 $f - 3dB$ 转角频率范围约为 $904kHz$ 到 $1.119MHz$ 。ADS127Lx1 输入端的滤波器用作电荷库以过滤 ADC 的采样输入。电荷库减少了放大器的瞬时电荷需求，保持了低失真和低增益误差，否则会因放大器未完全稳定而降低性能。ADC 输入预充电缓冲器可显著降低输入电荷，从而提高 ADC 输入阻抗以减小增益误差。

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件说明

图 4-1 展示了 TIDA-010945 硬件，其中指示了系统方框图中的不同电路块、连接器和接口。

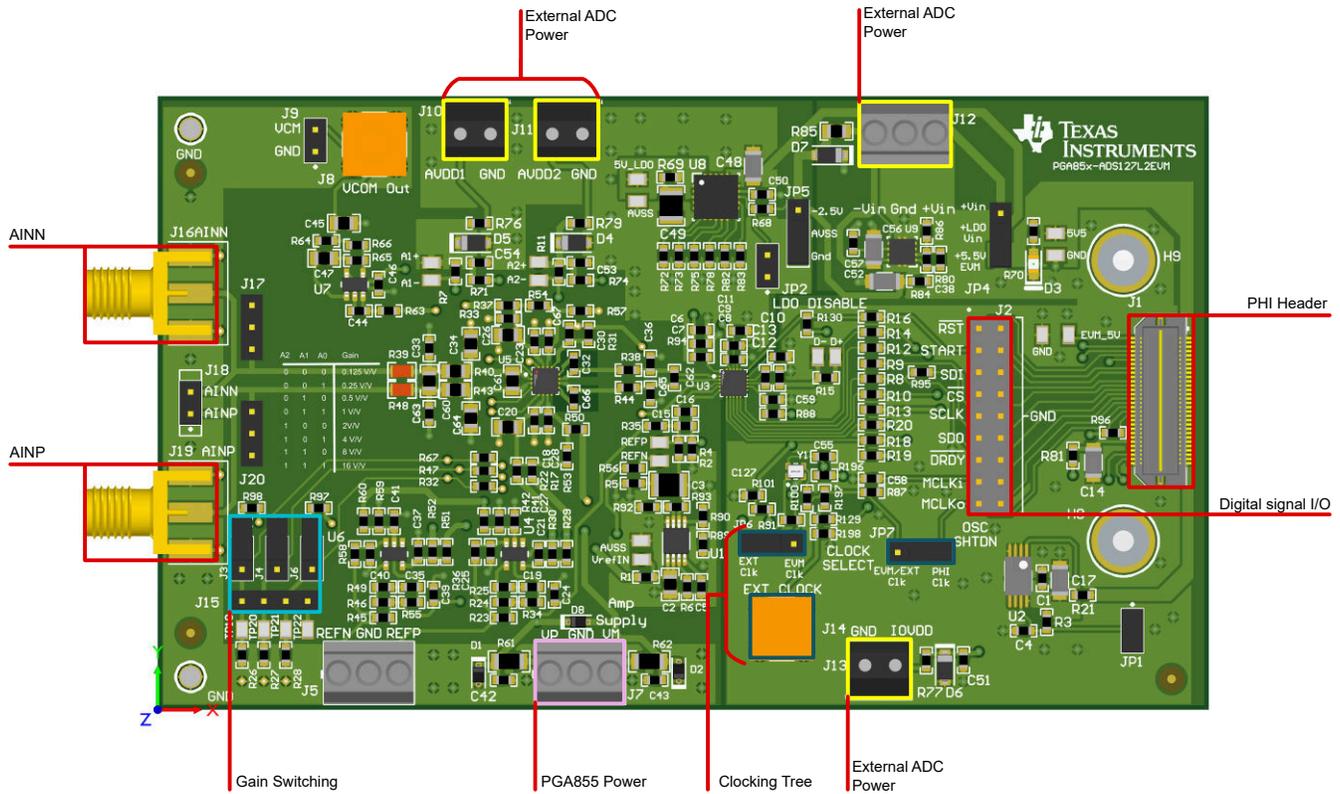


图 4-1. 电路板布局布线和接口

4.1.1 电路板接口

表 4-1. 电路板连接器和接头

连接器	说明
J1	QSH 连接器连接到 PHI，最佳实践是在连接前给电路板供电
J2	SPI 信号接头，用于调试和探测，或连接到另一块板（如果没有 QSH）
J3、J4、J6	用于 PGA 增益控制。请参阅表 4-2
J15	用于探测增益控制引脚
J16	负输入
J19	正输入
J18	用于将输入短接在一起
J17、J20	用于将输入短接至地
J7	PGA855 的正负电源轨输入
J10、J11、J12、J13	用于从外部为电路板供电。有关更多详细信息，请参阅节 4.1.2。
JP4、JP5	用于选择板载 LDO 或外部电源
J5	用于连接外部基准
J9	Vcm 信号的测试点
J8	用于将来自 ADC 的 Vcm 信号连接到外部设备
J14	外部时钟输入

表 4-1. 电路板连接器和接头 (续)

连接器	说明
JP6、JP7	用于选择板时钟或外部时钟
JP1	EEPROM 使能
JP2	LDO 使能

可以通过在增益控制引脚上添加和移除跳线来调整 PGA 增益。

表 4-2. 增益设置

增益 (V/V)	A0 (J3)	A1 (J4)	A2 (J9)
0.125	0	0	0
0.25	1	0	0
0.5	0	1	0
1	1	1	0
2	0	0	1
4	1	0	1
8	0	1	1
16	1	1	1

4.1.2 电源

TIDA-010945 硬件的默认状态是使用来自 PHI 控制器的 USB 电源生成所有 ADC 电源。PGA 必须由连接器 J7 的外部电源供电。PGA855 可由单电源 (8V 至 36V) 或双电源 ($\pm 4V$ 至 $\pm 18V$) 供电。请参阅 [PGA855 低噪声、宽带宽、全差分输出、可编程增益仪表放大器数据表](#)，了解详细的电源建议和规格。该设计板配备了 36V 二极管 D1、D2 和 D3。这样，只要电源处于建议的工作条件内，便可支持 $\pm 18V$ 双极电源以及非对称双极电源。

在 PHI 不提供所需电压的情况下，可以使用外部电源连接。例如，PHI 不提供双极电压，因此如果需要双极电源，则需要外部电源。更改 0Ω 电阻器连接 (R71、R74 和 R81) 以将外部电源连接用于 AVDD 和 IOVDD。J10 用于为 AVDD1 供电，J11 用于为 AVDD2 供电，J13 用于为 IOVDD 供电。有关详细规格，请参阅 [ADS127L21 数据表](#) 中的建议运行条件。可以选择使用连接器 J12 为板载 5V 和 -2.5V 稳压器供电。在这种情况下， $-V_{inExt}$ 的允许电压范围为 $-15.5V < -V_{inExt} < -3.5V$ ， $+V_{inExt}$ 的允许电压范围为 $6V < +V_{inExt} < 15.5V$ 。

使用低噪声 TPS7A4700 LDO 将来自 PHI 的 5.5V 电压调节至 5V。默认情况下，将分流器放置在跳线 JP4 上的位置 1-2 会将 5.5V 从 PHI 路由到 LDO。通过将 (JP4) 上的分流器移到位置 2-3，也可以通过 J12 上的外部电源为 5V LDO 供电。5V LDO 输出用于 AVDD 连接，可以使用 R72、R73、R75、R78、R82 和 R83 重新编程为不同的输出电压。另一个 LDO 使用低噪声 TPS7A3001 LDO 为 AVSS 生成 -2.5V 电压。该 LDO 仅由 J12 上的外部电源供电。默认情况下，AVSS 通过 (JP5) 1-2 上的分流器连接到 GND。如果 AVSS 必须设置为 -2.5V，则将外部负电源连接到 J12，并将 (JP5) 上的分流器移至位置 2-3。

外部基准可通过连接器 J5 连接至电路板。电路板上具有适当的缓冲器和连接用于外部基准。如果使用了板载电压基准 (REF7040)，则无需执行此操作。REF7040 足以满足 [ADS127L21 512kSPS、可编程滤波器、24 位宽带 \$\Delta-\Sigma\$ ADC 数据表](#) 中的规格要求

该电路板配置了 REF7040，但是，该电路板可轻松替换为 TI 精密串联电压基准目录中的其他精密基准，例如 REF6241。交换基准电压可能需要填充 R90 和 R92，而非 R89 和 R93，因为某些基准电压不完全引脚对引脚兼容。

4.1.3 时钟树

该板支持三种不同的时钟选项：

- PHI 时钟 (无外部连接)
- 本地时钟 (无外部连接)
- 用户提供的外部时钟

跳线 (JP7) 的默认位置是 2-3，用于将 PHI 数字控制器板时钟路由到 ADS127L21 (U3) 上的 CLK 引脚。如果在没有 PHI 控制器的情况下使用电路板，则可以将跳线移动到位置 1-2，以将本地时钟直接路由到 ADS127L21。

跳线 (JP6) 2-3 可启用电路板上的本地 32.768MHz 振荡器 (Y1)，这是与 ADS127L21EVM-PDK-GUI 软件配合使用时所需的默认位置。如果处于非活动状态 (JP6) 1-2，则允许在 SMA 连接器 (J14) 上提供外部时钟。

默认情况下，ADS127L21EVMPDK-GUI 软件使用 32.768MHz (Y1) 振荡器，但也可以选择 24MHz PHI 时钟源。可以通过将跳线 JP6 放置在 1-2 位置来使用外部时钟源。必须在 ADS127L21 指定范围内的频率下使用振幅等于 IOVDD (使用 PHI 板时为 2.5V) 的 CMOS 方波信号。

4.2 软件要求

此参考设计旨在与专用软件配合使用：[ADS127L21 EVM-PDK-GUI](#)，如图 4-2 所示。有关如何使用该软件的信息，请参阅 [ADS127L21EVM-PDK 用户指南](#)。

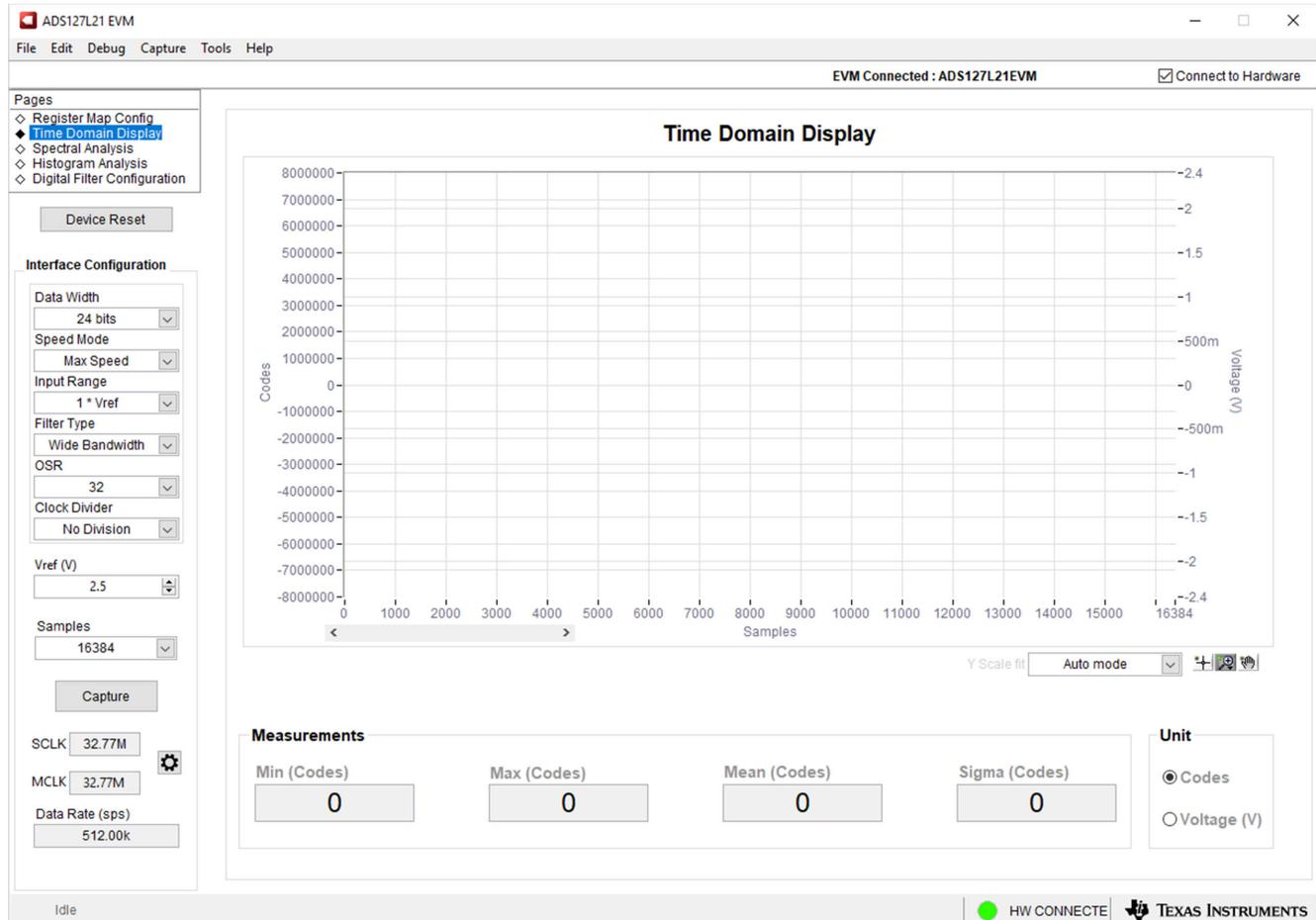


图 4-2. ADS127L21 GUI

4.3 测试设置

使用图 4-3 中的基本设置评估 PCB。该电路板通过 PHI 板进行评估，连接到运行 ADS127L21EVM-PDK-GUI 软件的 PCB。GUI 中的默认基准电压值为 2.5V，必须更新为 4.096V。

运行所有测试需要以下元件：

- 参考设计 PCB
- PHI 电路板
- 运行 ADS127L21 软件的 PC
- $\pm 15V$ 电源

- 低噪声直流电源
- 6.5 位数字万用表
- 对于温度漂移测量：温度室

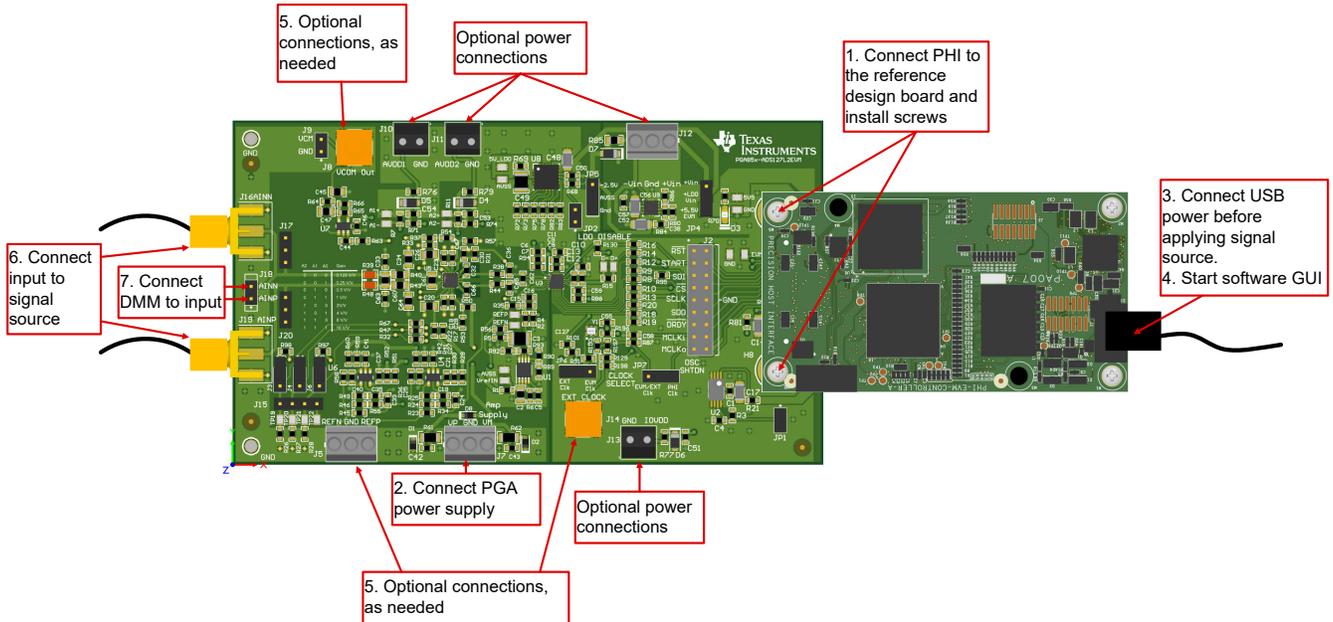


图 4-3. 直流精度测试设置

按图 4-3 所示连接硬件并加电。

使用双绞线或 SMA 连接器，使用尽可能短的连接方式将精密直流电源连接到信号链的输入端。这可以减少耦合到信号链中的噪声量，从而实现高精度测量。

要测试单端信号，请使用跳线 J17 将负输入 (AINN) 直接接地，并使用 SMA 连接器 (J19) 或其中一个引脚连接器 (J18 引脚 2 或 J20 引脚 1) 将所需信号连接到正输入 (AINP)。

4.4 测试结果

本节介绍示例测试结果。所有测试结果都是在以下 ADC 条件下得出的：

设置	配置
速度模式	高速
数据速率	11.72kSPS
滤波器	Sinc4
OSR	1024
时钟配置	PHI 时钟 (24MHz)
电压基准范围	高基准范围
VCM 输出	启用
基准缓冲器	启用
模拟正输入缓冲器	启用
模拟负输入缓冲器	启用
PGA 功率	±15V

对 ADS127L11 使用相关的 GUI 执行了这些测试；但是，其性能与 ADS127L21 的性能非常类似。所有测试都使用单端输入信号。

4.4.1 直流精度测试

漂移和非线性是直流精度的主要规格，因为它们与增益和偏移误差等初始误差不同，它们无法通过两点或三点校准轻松校准。在本节中，我们将测量信号链的增益和偏移漂移以及非线性，以计算信号链后校准所实现的直流精度。

使用跳线 J18 将输入短接在一起，以测量偏移误差。使用 GUI 捕获数据以生成类似于图 4-4 的图形。由于输入短接在一起时输出为零，任何非零输出就是偏移误差。读取图 4-4 中的柱状图时，偏移误差为 27.7 μ V。

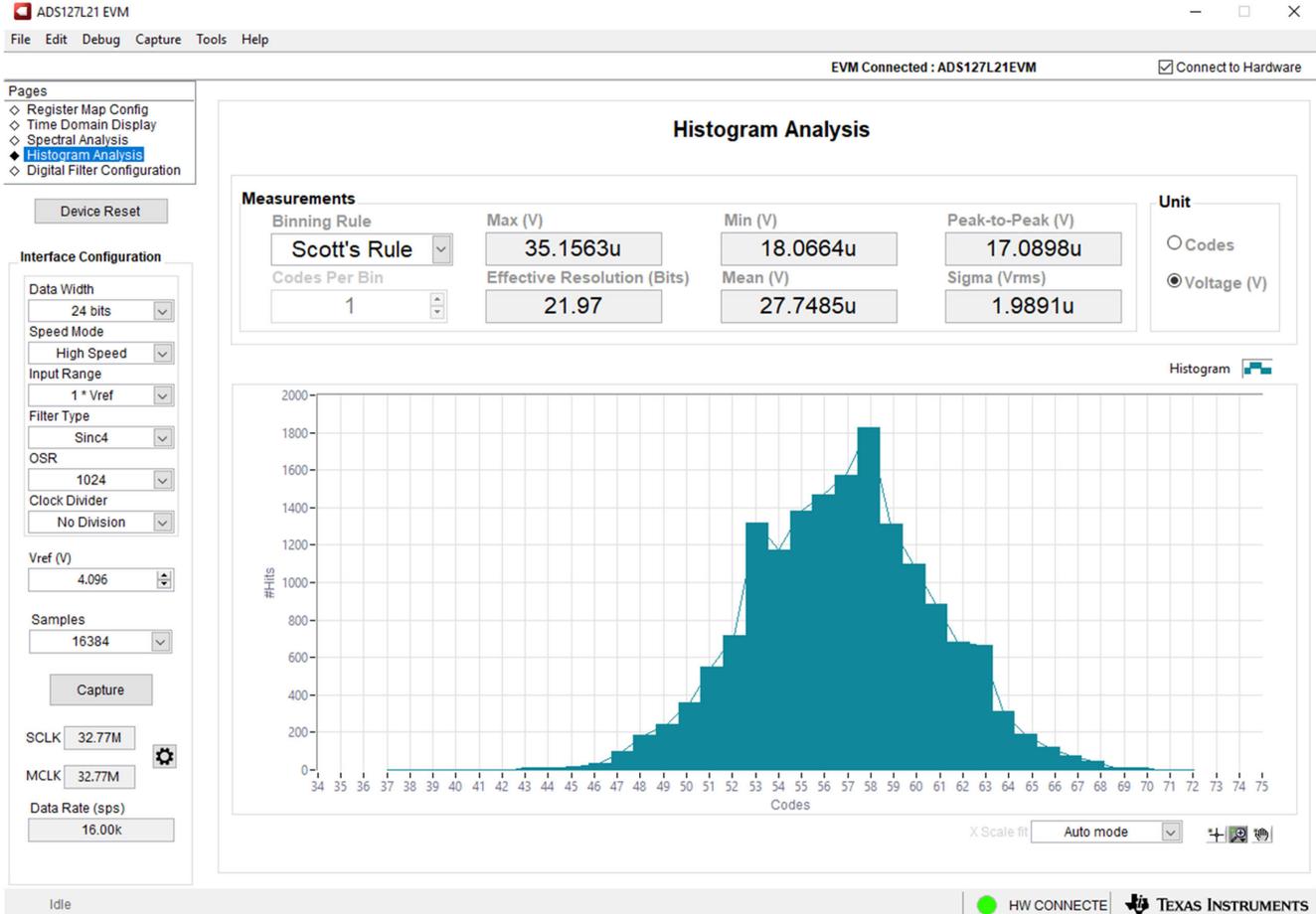


图 4-4. 偏移测量 (G = 1 , T_A = 25°C)

移除 J18 的短路，并收集 0V 至 \pm 满标量程范围内的数据。满标量程 (FSR) 取决于基准和增益设置，可通过以下公式计算：

$$FSR = \frac{2V_{ref}}{Gain} \quad (1)$$

确保不超出 PGA 的输入范围。针对不同的增益设置重复数据采集，确保温度室稳定至正确温度，然后再采集数据。采集满标量程 $\pm 95\%$ 的数据以执行增益误差计算。

若要采集温度漂移数据，请在多个温度下重复相同的试验。要考虑基准精度误差，请测量基准值并将结果输入左侧 GUI 中的“Interface Configuration”下方。

4.4.2 增益和偏移温度漂移

温漂是整个温度范围内失调电压的变化。信号链温漂可以通过使用箱形法收集的偏移数据来计算。箱形法使用该范围内的最大和最小偏移量，然后将偏移量除以温度范围，如方程式 2 所示：

$$\text{Offset Drift} \left(\frac{\mu\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \right) = 10^6 \times \frac{V_{\text{OFSMAX}} - V_{\text{OFSMIN}}}{T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}} \quad (2)$$

增益误差是信号链的实际斜率和理想斜率之间的差值。通过在满量程的 -95% 和 95% 上施加直流测试电压来测量增益误差。误差通过以下方式计算得出：从输出电压的差值（实际斜率）中减去按增益 (G) 缩放的直流测试电压（理想斜率）的差值，如方程式 3 所示：

$$\text{Gain Error} \left(\text{ppm of FSR} \right) = 10^6 \times \frac{\Delta V_{\text{OUT}} - G \Delta V_{\text{IN}}}{G \Delta V_{\text{IN}}} \quad (3)$$

同样，使用箱形法并使用增益级上的最小和最大增益误差可求出增益漂移：

$$\text{Gain Drift} \left(\frac{\text{ppm}}{^{\circ}\text{C}} \right) = 10^6 \times \frac{GE_{\text{MAX}} - GE_{\text{MIN}}}{T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}} \quad (4)$$

通过添加 PGA855 和 ADS127L21 数据表中列出的典型值，可以估算典型增益和温漂误差。也可以使用此方法估算最大误差：

表 4-3. 估算的偏移和增益漂移

	PGA855 (典型值)	ADS127L21 (典型值)	PGA855 + ADS127L21 的估 算值 (典型值)	PGA855 (最大 值)	ADS127L21 (最大 值)	PGA855 + ADS127L21 的估 算值 (最大值)
温漂 ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)	0.3	0.05	0.35	1	0.2	1.2
增益漂移 (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	1	0.5	1.5	2	1	3

对于 20°C - 30°C 范围，漂移的预期误差约为 $\pm 3.5 \mu\text{V}$ 偏移误差和 $\pm 15\text{ppm}$ 增益误差。下面显示了从一个单元测得的整个温度范围内的偏移和增益误差：

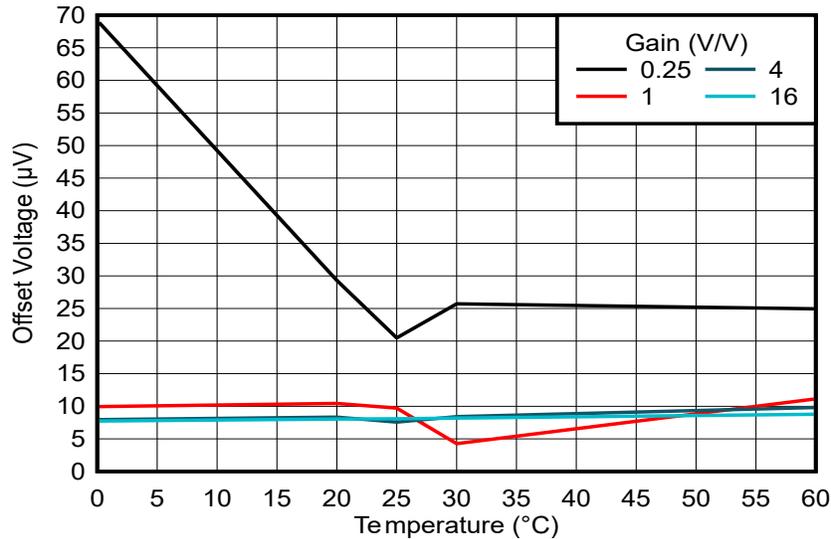


图 4-5. 失调电压 (RTI) 与温度间的关系

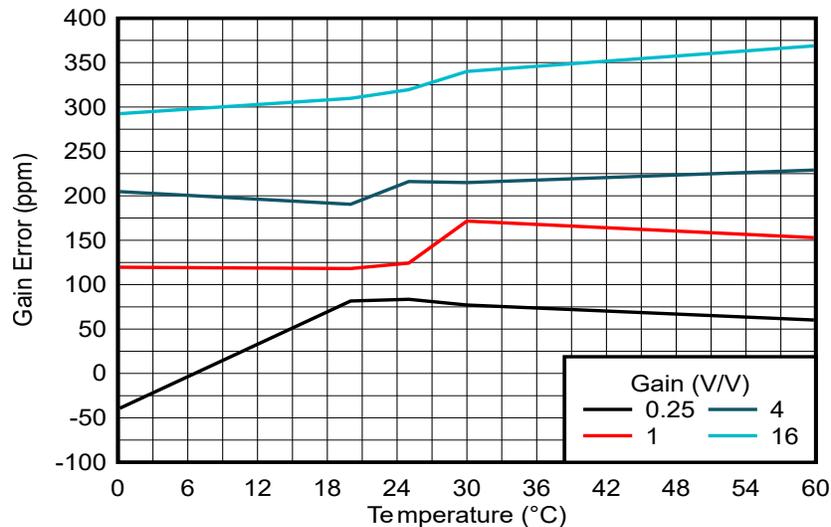


图 4-6. 增益误差与温度间的关系曲线

根据图 4-5 和图 4-6，我们可以使用方程式 2 和方程式 4 计算器件的温度漂移：

增益 (V/V)	0.25	1	4	16
温漂 ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	0.81	0.11	0.04	0.02
增益漂移 (ppm/ $^\circ\text{C}$)	2.06	0.89	0.64	1.28

4.4.3 非线性度

通过两点或三点校准，可以显著降低或完全消除偏移误差和增益误差等初始误差。然而，非线性无法轻松校准。积分非线性 (INL) 用于衡量系统实际输出在给定特定输入时相对于最佳输出的偏差。通过沿根据系统的斜率和偏移传递函数计算的直线施加一系列直流测试电压，可以测得 INL。INL 是满标量程输入范围内实际输出相对于最佳输出的差异的最大值。INL 计算使用最小平方误差最佳拟合方法来确定新的直线，从而更大程度地减小原始终点线之上和之下 INL 误差的和方根。

图 4-7 展示了在整个温度范围 (固定增益为 1V/V) 和跨增益范围 (25°C 时) 测量的一个单元的 INL。

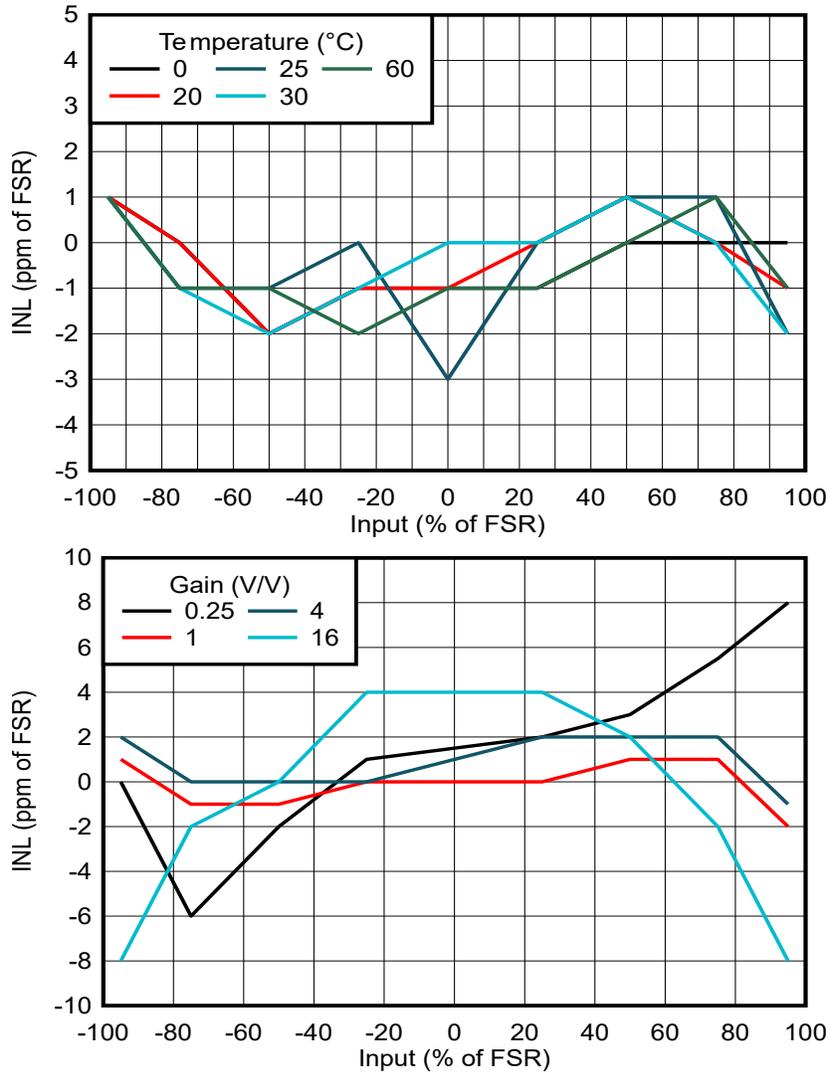


图 4-7. INL 误差与输入电压间的关系

ADS127L21 数据表中列出的典型 INL 为 0.4ppm，在 0°C 至 70°C 范围内的最大值为 1.8ppm。对于 PGA855，列出的典型 INL 值为 2ppm，最大值为 10ppm，与为一个单元收集的数据一致，如图 4-7 所示。

4.4.4 SNR 和噪声性能

有关设计的噪声性能和 SNR 的更多信息，请参阅以下应用手册：[通过 PGA855 全差分可编程增益放大器实现高 SNR](#)

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010945](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010945](#) 的设计文件。

5.2 软件

[ADS127L21 EVM 软件用户界面](#) 此参考设计旨在与适用于 ADS127L21 EVM 的专用 GUI 一起使用

5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[ADS127L21 具有可编程滤波器的 512kSPS、24 位宽带 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[PGA855 低噪声、宽带宽、全差分输出可编程增益仪表放大器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI)，[ADS127L21EVM-PDK 评估模块](#) 用户指南

5.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

5.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

MAGGIE LEE 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向测试和测量应用的参考设计。Maggie 拥有加利福尼亚州理工学院电气工程学士学位 (学士)。

作者感谢 KEITH NICHOLAS 和 LUIS CHIOYE 对本参考设计的支持。

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 * (May 2024) to Revision A (February 2026)	Page
• 更改了文档标题，使之更加清晰。	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、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