

说明

此参考设计解释了同步四通道宽带高分辨率接口的理论、设计和测试。主要目标应用是振动传感应用，但该设计也可以应用于任何需要宽带的的应用，例如功率因数测量中的三相电压和电流监测。

资源

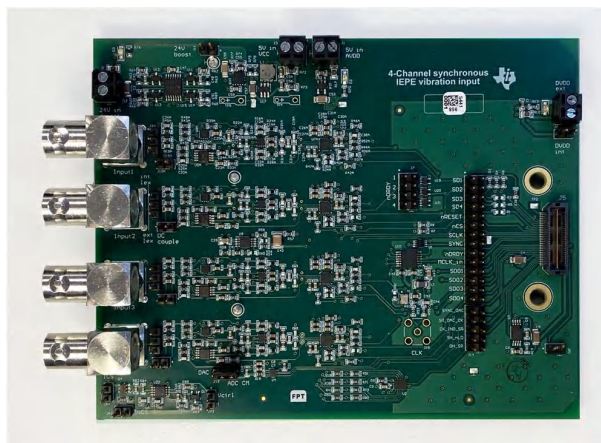
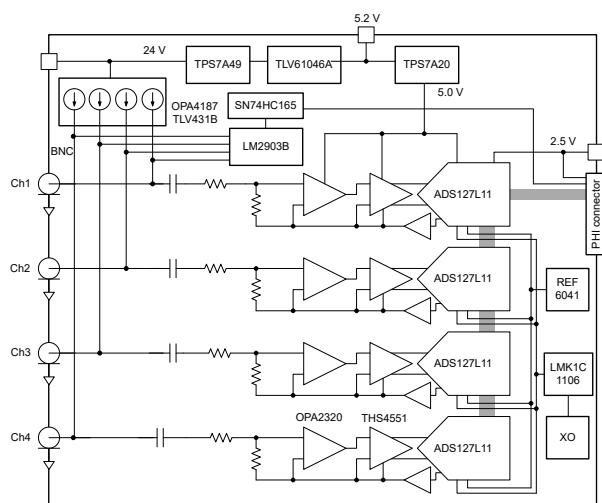
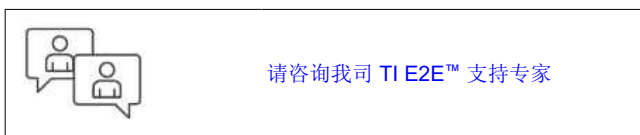
TIDA-010249	设计文件夹
ADS127L11	产品文件夹
THS4551	产品文件夹
OPA2320	产品文件夹
REF6041	产品文件夹
OPA4187	产品文件夹
TLV431B-Q1	产品文件夹

特性

- 同步四通道宽带集成电子压电式 (IEPE) 传感器接口
- 24 位、20kHz 带宽转换
- 数据速率：124kSPS (菊花链)、400kSPS (并行 SPI)
- $\pm 10V$ 交流输入，320k Ω 输入阻抗
- 板载四路励磁电流 (3.5mA)
- 板载非隔离式 5V 至 24V 升压
- 断线和短路检测

应用

- 状态监控模块
- 特殊功能模块
- 数据采集 (DAQ)



1 系统说明

此设计采用四通道高采样率 (高达 400kSPS)、宽带、24 位分辨率、高动态范围设计。同时对四个通道采样，这在多轴振动传感器进行采样时或在电源监测等其他应用中是必需的。组装选项可支持菊花链和并行 SPI 连接。

1.1 主要系统规格

此参考设计适用于高端多通道宽带高分辨率、高采样率接口。四个通道演示了可扩展到 6 个或更多通道的概念。对于大多数应用，标准 IEPE 传感器要求激励电流 > 2mA、激励电压 > 22V 且带宽 > 15kHz。该设计支持两种 SPI 通信模式：

- 菊花链模式，使所有 ADC 器件能够连接到单个 SPI 通道，尽可能地减少控制线路和隔离信号 (如果应用)
- 并行模式，使 ADC 能够以其最大数据速率运行，但每个 ADC 需要单独的数据输出线路

低功耗特性使该设计可用于电池供电的监控系统。断线和短路检测旨在确保传感器接口安全、可靠地运行。

表 1-1. 关键系统规格

参数	规格
通道数量	4
输入信号	±10V，单端
耦合	交流耦合
激励电压	23V (最小值)
激励电流	3.5mA
分辨率	24 位
带宽	0.6 Hz 至 20 kHz
数据速率	每通道 124kSPS 宽带滤波器，菊花链 SPI 每通道 400kSPS 宽带滤波器，并行 SPI 每通道 1000kSPS 正弦滤波器，并行 SPI
目标 SNR	> 100dB
增益	0.4 V/V
采样时钟频率	16MHz
SPI 时钟频率	16MHz
输入阻抗	> 250k Ω
功耗	< 1W
工作温度	- 40°C 至 125°C
诊断特性	断线和短路

2 系统概述

2.1 方框图

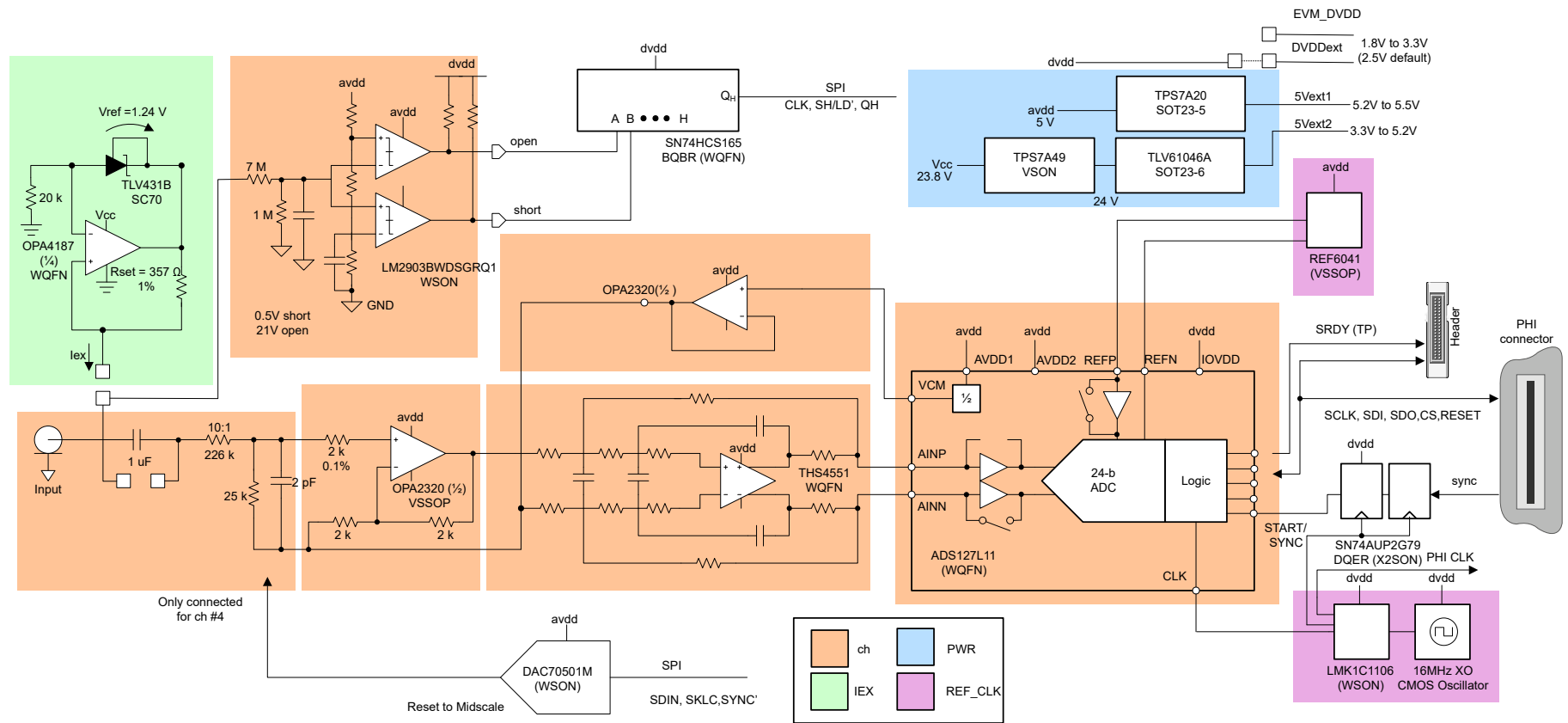


图 2-1. TIDA-010249 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 信号链电压电平

根据目标规格，输入信号可高达 23V。使用交流耦合时，最大信号电平为 $\pm 10V$ ，要实现 5V 信号链，耦合电容器后跟一个电阻分压器，比例因子为 10:1。这会将信号降至 $\pm 1.0V$ 。电阻分压器以 ADC 生成的 $1/2V_s$ (即 2.5V) 为基准执行电平转换，转换后输出信号变为 $2.5V \pm 1.0V$ 。同相缓冲器级的增益为 2，因此缓冲器的输出为 $\pm 2.0V$ 。缓冲器反相引脚也以 $1/2V_s$ (即 2.5V) 为基准，因此缓冲器的输出为 $2.5V \pm 2.0V$ 。

全差分放大器将单端信号转换为差分信号，并增加增益 2。差分放大器的输出共模也设置为 2.5V。因此，放大器的最大差分输出为 $\pm 4.0V$ ，而单端输出为 $2.5V \pm 2.0V$ 。

4.096V 的基准电压用于尽可能地提高 DR。根据之前给定的信号电平，可以选择具有所需输入和输出范围且噪声影响极小的适当放大器器件。

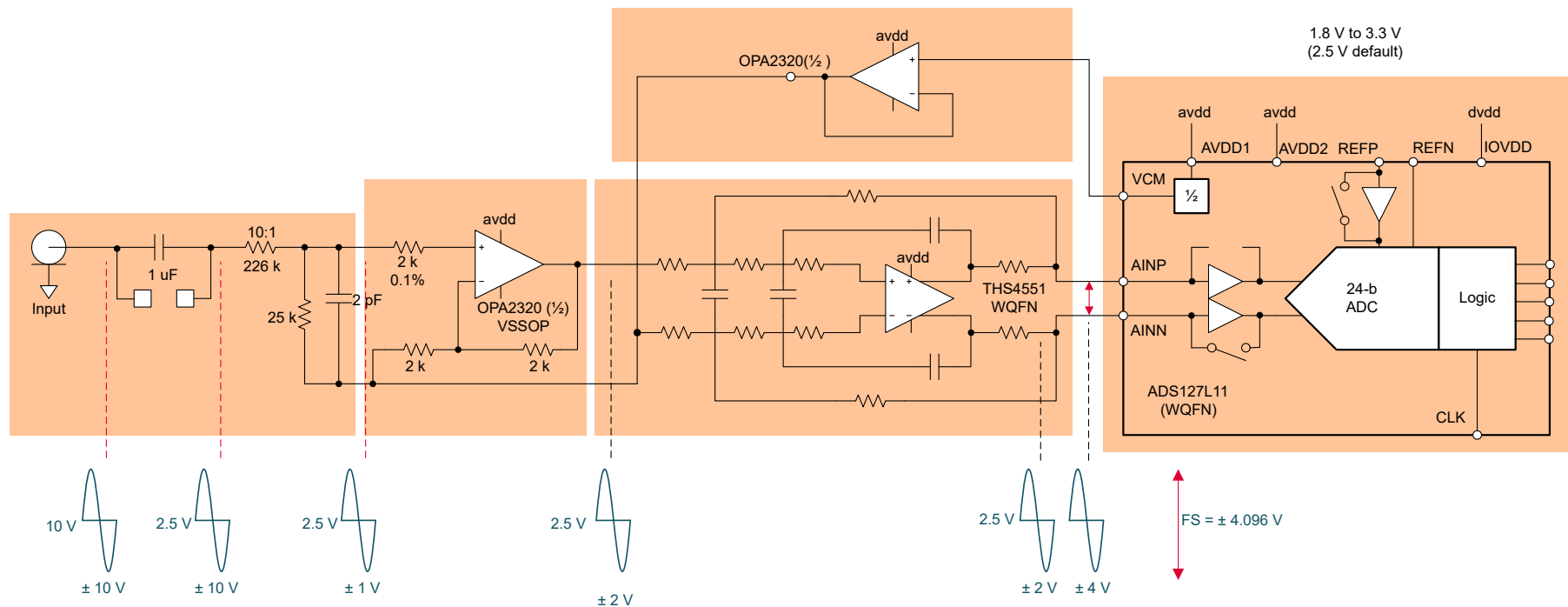


图 2-2. 信号链电压电平

2.2.2 ADC 配置

如上一节所述，ADS127L11 将使用 4V 基准电压，以更大限度地扩大动态范围。还选择 16MHz 振荡器时钟作为 ADC 的时钟基准以及 SPI 时钟。ADC 可以通过高达 25MHz 的时钟运行。

为了使信号链发挥理想性能，必须正确配置 ADS127L11 ADC。以下列表显示了所需的设置：

- 数据宽度 (分辨率) = 24 位
- 速度模式 = 高速
- 滤波器类型 = 宽带宽
- INP_RNG= VREF
- REF_RNG= 高基准范围
- VCM=启用
- AINP_BUF、AINN_BUF=启用
- CLK_SEL=外部

ADC 可用于菊花链或并行 SDO 模式。方程式 1 显示了菊花链模式的最大数据速率。

$$\text{最大数据速率} = \text{SPI CLK} / (\text{链中的器件数} \times \text{每帧位数}) \quad (1)$$

对于 16MHz SPI 时钟、4 个器件和每帧 32b，最大数据速率为 125kSPS。要将输出数据速率设置为 125kSPS，请设置 OSR=64。

对于并行 SDO 模式和使用宽带滤波器，数据速率可以设置为最大 400kSPS。对于 16MHz 时钟，只能选择 OSR = 64，这样输出数据速率为 250kSPS。要达到 400kSPS，请将板载 16MHz 振荡器替换为 25MHz 振荡器。

有关菊花链和并行连接的更多详细信息，请参阅 [ADS127L11 400kSPS、宽带宽、24 位 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC 数据表](#)和 [同步采样系统中的 ADS127L11 应用简报](#)。

2.2.3 ADC 时钟和同步

多个 ADS127L11 器件的同步对于该设计至关重要。保持完全同步需要两个因素。用于所有 ADC 的基准时钟需相同，而且所有 ADC 的 START 信号必须相同并与 ADC 基准时钟同步。

对于基准时钟，为验证不同时钟输入之间的最小偏差，需通过 LMK1C1106 超低抖动 6 通道缓冲器对振荡器进行缓冲。四个通路由到四个 ADC，一个输出发送回控制器，而第六个输出用于同步 START 信号，如本节所述。在低抖动缓冲的顶部，应特别小心地将四个时钟信号路由到 PCB 上具有相同布线长度和延迟的四个 ADC。

对于 START 信号，使用小型逻辑同步器电路将 START 信号与 ADC 基准时钟对齐，以确保所有 ADC 同时接收到基准时钟的 START 信号，并避免一个时钟周期的不确定性。

有关同步的更多详细信息，请参阅 [同步采样系统中的 ADS127L11 应用简报](#)。

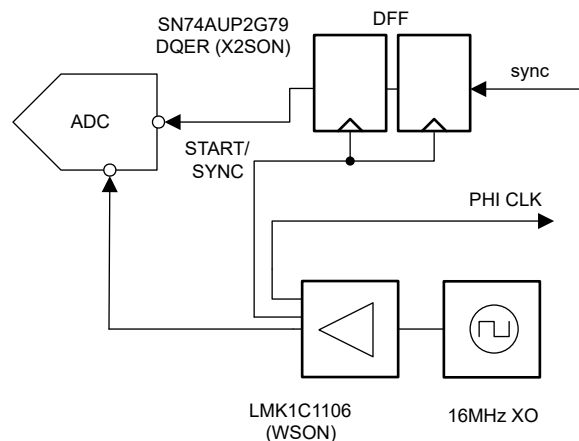


图 2-3. ADC 同步电路

2.2.4 差分低通滤波器

THS4551 级用作单端至差分转换器 (增益为 2) 以驱动 ADC, 除此之外, 该器件还用作低通滤波器以将输入带宽限制为 20kHz。这有助于通过抑制不需要的频带上的噪声信号来提高 SNR。

有关差分级的详细信息, 请参阅 [适用于 PLC 模拟输入的 IEPE 振动传感器接口参考设计](#) 设计指南。

2.2.5 电流源

IEPE 传感器需要 2mA 至 20mA 的激励电流才能运行, 具体取决于连接电缆长度和负载电容。在大多数 IEPE 应用中, 静态 2 - 4mA 足以运行传感器。电流源的精度并不重要, 但顺从范围、电流噪声和负载调节对于接口性能至关重要。

对于此设计, 使用低电压并联基准和运算放大器生成了 3.5mA 静态电流源。低电压基准可提供低余量和更高的顺从范围。使用四路运算放大器 OPA4187 封装实现了具有成本效益的设计。

有关电流源设计的更多详细信息, 请参阅 [适用于工业应用的高侧电流源](#) 模拟设计期刊文章。

由于此应用由 5V 电源供电运行, 因此需要使用升压级来为电流源生成高电压。使用 TLV61046A 紧凑型增压级, 并在它后面使用 TPS7A49 LDO, 可为电流源生成干净的 23.8V 电压。电流源具有大约 1.5V 的余量, 可使顺从范围高达 22V。

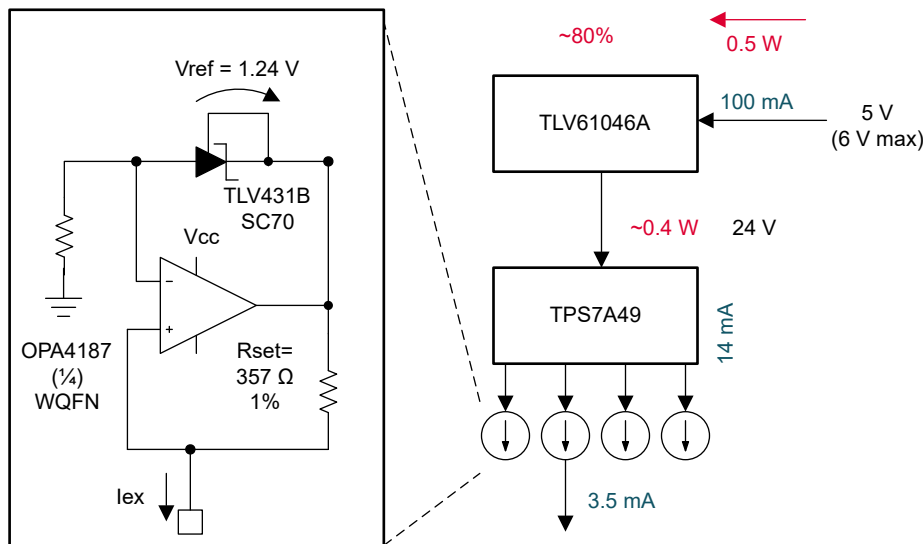


图 2-4. 电流源和升压级

2.2.6 增益级和高通滤波器

传感器通过一个电容器连接到信号链, 此电容器后面连接一个串联电阻器, 形成一个截止频率低于 1Hz 的高通滤波器。

该电阻器形成一个增益为 10 比 1 的分压器, 将 $\pm 10V$ 的输入信号降低至 $\pm 1V$ 。

该电阻器以中标准度 (2.5V) 而非接地为基准来转换信号。

同相增益级在全差分放大器级的输入端缓冲信号并将其放大至 $\pm 2V + 2.5V$ 。

双运算放大器 OPA2320 器件用于增益级和共模缓冲器。该级需要一个电源输出摆幅达到 0.5V 的运算放大器。不受交叉失真影响的线性放大器对于实现良好的 THD 性能至关重要。

2.3 重点产品

2.3.1 ADS127L11

ADS127L11 是一款 24 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC), 使用宽带滤波器时数据速率高达 400kSPS, 使用低延迟滤波器时数据速率高达 1067kSPS。该器件具有出色的交流性能、直流精度和低功耗 (高速模式下为 18.6mW)。

该器件集成了输入和基准缓冲器，用于降低信号负载效应。低漂移调制器可实现出色的直流精度和低带内噪声，从而提供出色的交流性能。电源可扩展架构提供两种速度模式来优化数据速率、分辨率和功耗。

数字滤波器可配置为宽带或低延迟运行，做到了在一个器件中优化直流信号的宽带交流性能或数据吞吐量。

串行接口具有菊花链功能，可通过隔离栅减少 SPI I/O。输入和输出数据以及寄存器设置通过循环冗余校验 (CRC) 功能进行验证，以增强运行可靠性。

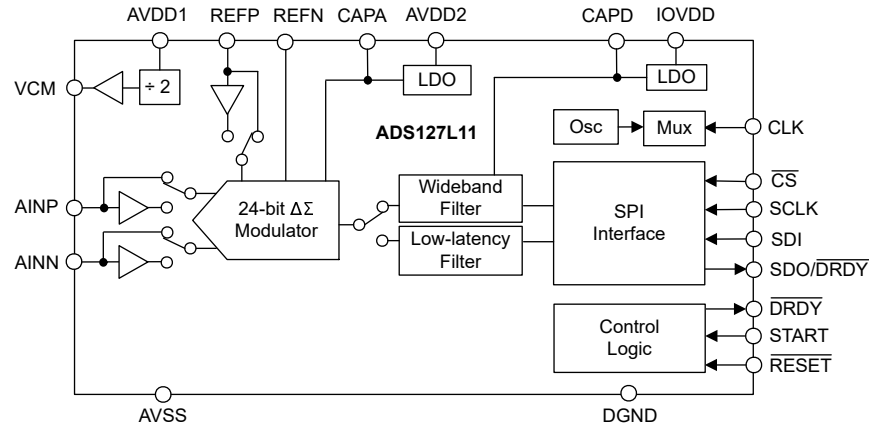


图 2-5. ADS127L11 方框图

2.3.2 THS4551

THS4551 全差分放大器可在单端源与差分输出之间提供一个简易的接口，从而满足各类高精度模数转换器 (ADC) 的需求。此器件兼具优异的直流精度、低噪声以及稳健的容性负载驱动能力，非常适合具有高精度要求的数据采集系统；同时组合使用放大器与 ADC 时，可获得出色的信噪比 (SNR) 与无杂散动态范围 (SFDR)。

THS4551 具有所需的负电源轨输入，可用于将直流耦合、中心接地的源信号连接到单电源差分输入 ADC。该器件具有超低直流误差和漂移，能够满足新兴的 16 至 20 位逐次逼近寄存器 (SAR) 输入要求。在 0.7V 至 3.0V 以上的 ADC 共模输入要求下，宽范围输出共模控制支持 ADC 在 1.8V 至 5V 电源下运行。

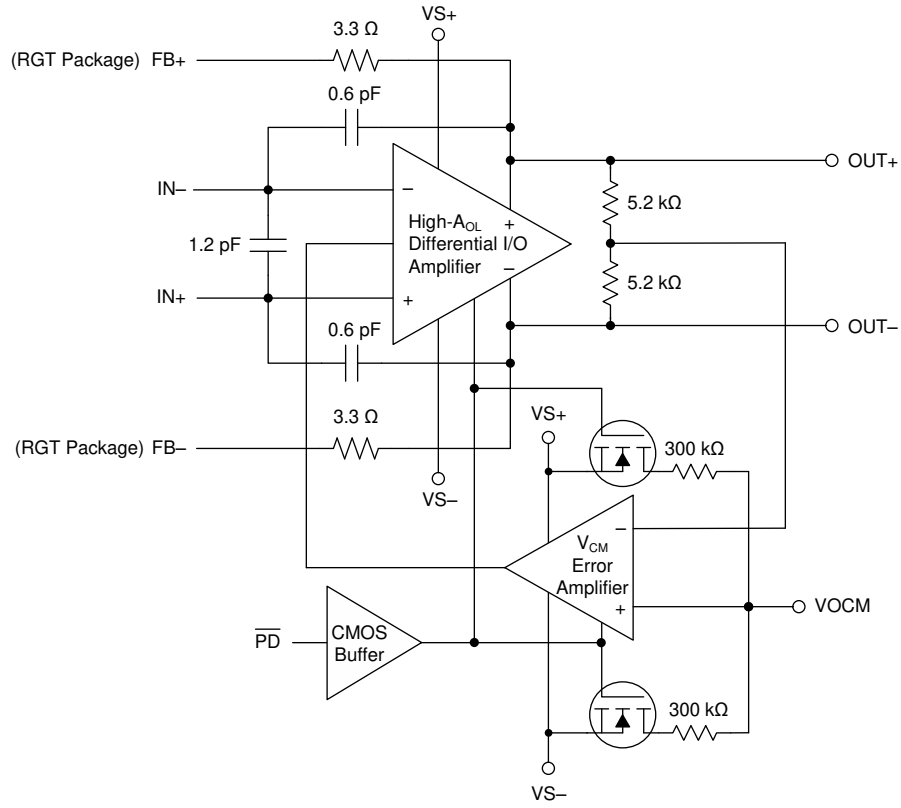


图 2-6. THS4551 方框图

3 系统设计原理

3.1 IEPE 传感器

集成电子压电式 (IEPE) 传感器是一款具有集成式电荷放大器和阻抗转换器的压电式振动传感器 (请参阅图 3-1)。将放大器集成在靠近传感器的位置可显著降低传感器噪声。IEPE 传感器的一个主要优势是传感器可互换。

IEPE 传感器在商业上也称为集成电路压电式 (ICP®)、恒定电流线路驱动器 (CCLD)、Isotron®, DeltaTron® 和 Piezotron®。

市场上通常提供单轴、双轴和三轴 IEPE 加速计, 每个轴具有一个双线连接器。输出与加速度成比例的传感器更为常见 (加速计), 但也提供与速度成比例的输出。

向双线连接施加恒定电流, IEPE 传感器从中汲取功率并建立约 10V 的恒定直流偏移。振动感测值叠加在传感器输出端的这一直流信号上, 此传感器输出端通常与传感器接口电路交流耦合。

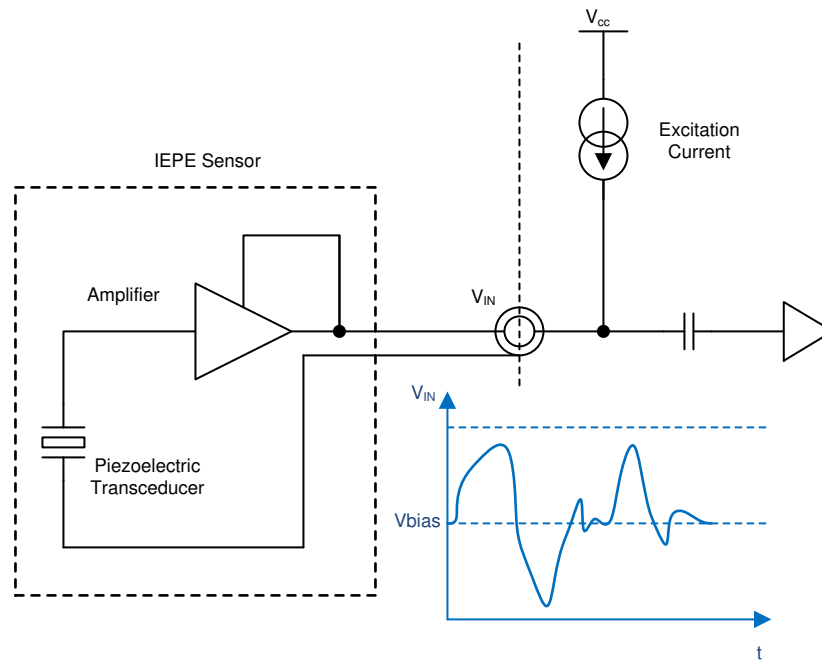


图 3-1. IEPE 传感器概念电路

3.1.1 IEPE 传感器参数

IEPE 加速计传感器具有适用于不同应用的各种性能参数。了解这些参数及其与传感器接口电路性能的关系非常重要。以下各小节将介绍这些参数并说明它们的相关性。

3.1.1.1 灵敏度和测量范围

灵敏度是指与特定机械加速度输入对应的输出电压变化。此参数通常以 mV/g 为单位衡量, 其中 g 是地球重力。加速计数据表通常报告单个标称灵敏度值。但请注意, 灵敏度会随温度、输入频率和输入加速度水平而变化, 因此传感器数据表中也会说明灵敏度容差。

IEPE 加速计灵敏度在数十 mV/g 到数千 mV/g 的范围内, 容差为 5% 或 10%。

测量范围是传感器可以转换为电压输出而不发生饱和或削波的最小和最大加速度输入, 这决定了最大输出电压 (请参阅方程式 2)。

$$\text{Output Voltage Range} = \text{Measurement Range} \times \text{Sensitivity} \quad (2)$$

对于 10g 的测量范围和 100mV/g 的灵敏度, 输出范围为 $\pm 5V$ 。传感器输出电压范围通常为最大 5V 或 10V。

3.1.1.2 激励、输出偏置电压和输出阻抗

如前所述，IEPE 传感器的输出电压可高达 $\pm 10\text{V}$ 。为避免使用双电源，IEPE 传感器的交流输出会以特定的恒定电压（称为输出偏置电压）偏移，该电压通常在 9V 至 12V 范围内。将交流信号叠加在直流输出偏置电压上，可指示来自为传感器供电的电流源的最小顺从电压不具有信号削波。此顺从电压也称为激励电压。激励电压仅仅是加到最大交流电压输出上的最大可能输出偏置电压。

$$\text{Excitation Voltage}_{\text{MIN}} = \text{Bias Voltage}_{\text{MAX}} + \text{Sensitivity}_{\text{MAX}} \times \text{Input}_{\text{MAX}} \quad (3)$$

激励电压的典型值为 18V 至 22V。激励电压也存在上限，不得超过该上限，以免损坏传感器电子元件。

输出阻抗是接口电路检测到的有效交流输出阻抗。典型值为 $300\ \Omega$ 到 $100\ \Omega$ 以下。考虑到接口电路的有限输入阻抗时，阻抗较低意味着测量误差较小。

3.1.1.3 线性度和温度变化

如前所述，灵敏度随输入电平和温度而变化。

输入电平的变化通过传感器的线性度（或非线性度）来衡量。温度变化也通过使用在工作温度范围内与标称灵敏度的灵敏度偏差来衡量。工作温度范围从 120°C 至 280°C 。

线性度和温度变化均表示为满量程输入范围的百分比。

标称灵敏度为 100mV/g 和线性度为 1% 的 10g 范围传感器的电压读数最大误差为 0.1g 。

3.1.1.4 频率响应

传感器的灵敏度随加速度激励的频率而变化。灵敏度通常被视为在由最小和最大 3dB 频率定义的特定频率范围内保持恒定。超出最大频率后，传感器会出现机械共振频率，在应用中必须避免这种频率。通常的频率范围为亚赫兹到 10kHz 、 20kHz 或 30kHz 。传感器接口电路必须具有与目标传感器相同的带宽，并且 ADC 转换器采样频率必须超过该带宽的两倍。

请注意，设计人员可以通过增大激励电流来扩展某些传感器的频率范围。因此，多功能 IEPE 传感器接口电路需要可变电流源。

3.1.1.5 噪声和动态范围

IEPE 传感器具有固有的机械和电气噪声，在检测低电平信号时必须考虑这些噪声。输出噪声表示为均方根 (RMS) 噪声电压。

最大输出范围与噪声水平的比率构成了传感器的有效动态范围。

4 硬件、软件、测试和测试结果

4.1 硬件说明

图 4-1 显示了参考设计 PCB 的顶视图，其中指示了 TIDA-010249 方框图中的不同电路块。

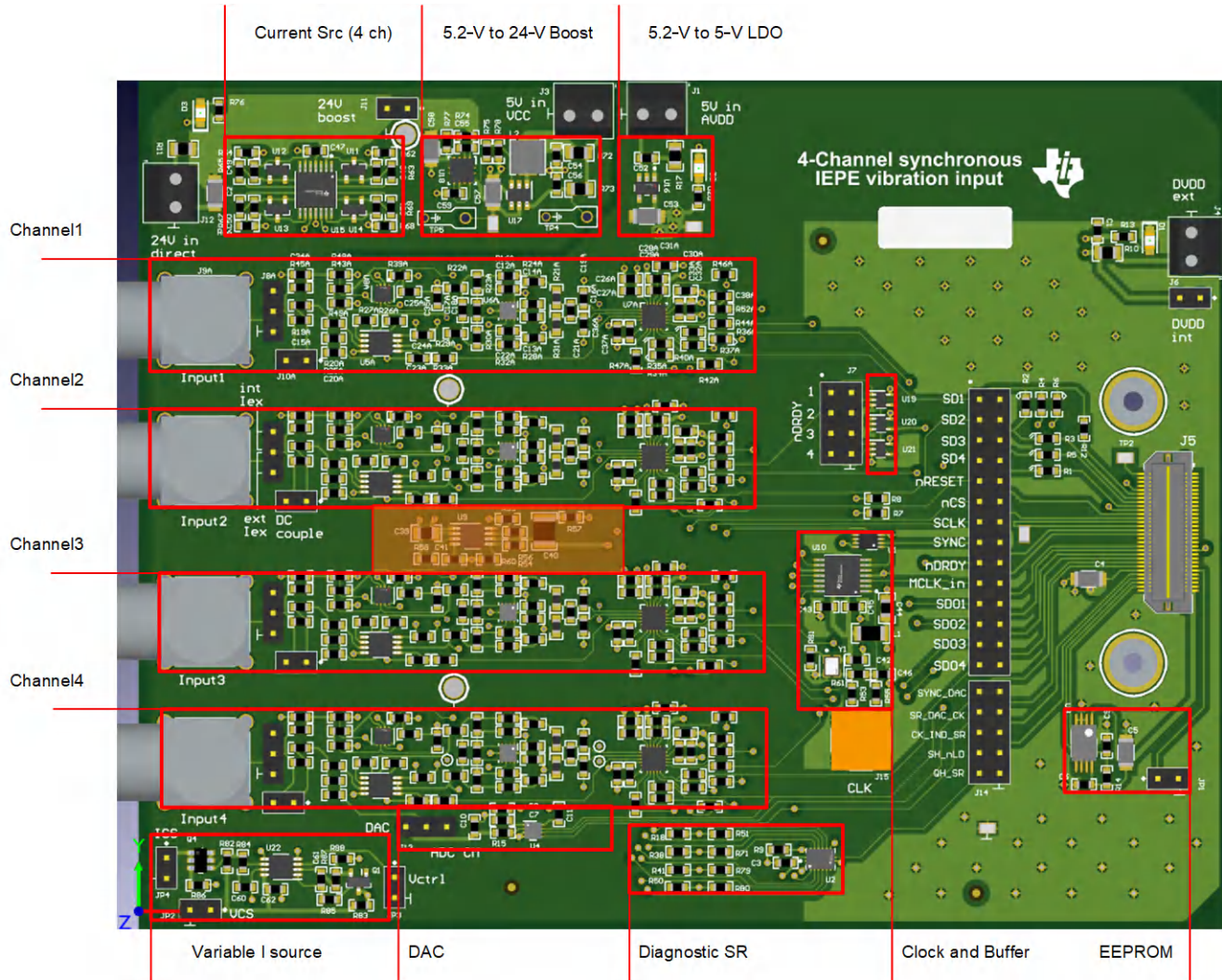


图 4-1. PCB 布局

表 4-1. 电路板连接器和接头 (continued)

连接器	说明
J4	外部数字电源，建议使用 2.5V。使用时，请确保 J6 处于开路状态，并且连接的 MCU 或控制器与 2.5V 电压兼容。
J6	短接以使用 PHI 数字电源（确保 2.5V，并且 J4 处于开路状态），如果要使用外部电源，则为开路状态
J13	DAC 连接短接（1、2，右侧）以使用 ADC CM (2.5V) 作为输入衰减器，共模短接（2、3，左侧）以将 DAC 用作衰减器的共模源，使用引脚 1 监控 ADC CM，引脚 3 用于监控，使用 DAC 输出引脚 2 连接外部源
JP3	可变电流源的控制连接，连接 J13 引脚 3 以使用 DAC
JP2	可变电流源的电源连接（注意接地标志）
JP4	可变电流源的输出连接，连接到 J8x（1、2）以用作通道 I _{SOURCE}

4.1.2 电源配置

电路板具有三种不同的主电源：数字电源、模拟电源和激励电流源。模拟电源需要外部电源。数字电源和激励电流源可直接连接到外部电源，或使用板载级。

以下各节介绍了在各种配置下运行的跳线设置。

4.1.2.1 电源序列

为避免损坏器件，请在为电路板供电时遵循以下顺序：

- 连接模拟电源（D2 导通）
- 在外部或通过导通 PHI 板来连接数字电源（D1 导通）
- 连接激励电流源（D3 导通）

遵守所有电源输入的绝对最大额定值。

4.1.2.2 模拟电源

该电路板依靠板载 LDO 为模拟电路提供所需的 5V 电压。输入源连接到 J1，并使用 5.2V 至 6V 的有效输入范围（也可以尝试 5.1V）

如果模拟电源运行，则 D2 导通。

模拟电源的估计电流低于 100mA。

4.1.2.3 数字电源

此电路板可由 2.5V 至 3.3V 的数字电源供电来运行（1.8V 电源也适用于诊断功能不可用的情况，在这种情况下，D1 未导通）。出于信号完整性、EMC 和功耗原因，应使用 2.5V。

该电路板设计为在连接时默认使用 PHI 数字电源。在该模式下：

- PHI 连接到 J5 并上电，最佳实践是在此之前为模拟电源供电
- J6 短接，J4 保持未连接

可以通过在 J6 上连接电流表而不是短接来测量不同 ADC 速度下的数字电源。

如果使用外部电源：

- 如果 PHI 连接到 J5，请确保 J6 处于开路状态
- 确保模拟电源已连接并处于运行状态（D2 导通）
- 将电压源连接到 J4，最大电平为 3.3V，建议电压为 2.5V
- 确保数字控制器与提供的电源电平兼容

如果电源处于运行状态，则 D1 导通。

来自数字电源的估计电流低于 30mA。

4.1.2.4 激励电流源

板载激励电流部分需要高电压才能满足高顺从范围。该电路板具有板载升压级，可从 1.8V 至 5.5V 的输入中产生 24V 电压，最佳实践是使用与模拟 LDO 相同的 5.2V 电源。

要使用板载升压：

- 确保已连接模拟电源 (D2 导通)
- 将外部电源 (5.2V) 连接到 J3
- 短接 J11，确认 J12 未连接，当电源处于运行状态时 D3 导通
- 可以使用电流表而非 J11 上的短接来测量电流。估计电流约为 16mA。由于 LDO 压降，在 J11 处测得的电压并非确切为 24V，而是大约 23.8V。

来自升压器的 5.2V 模拟电源的估计电流低于 100mA。

如果使用外部电源：

- 确保连接了模拟电源
- 确保 J11 处于开路状态
- 将外部高电压源 (8V 至 36V，典型值 24V) 连接到 J12，D3 导通

来自高压外部电源的估计电流为 16mA。

备注

要测量升压级的输入和输出纹波，请使用测试点 TP5、TP6。

4.1.2.5 SPI 连接模式及其组装变型

4.1.2.5.1 菊花链模式

在该模式下，四个 ADC 以菊花链方式连接，如图 4-3 所示。此模式下的最大 SPI 时钟速率为 16MHz。

要启用菊花链模式，需要使用以下电路板组件：

- R40x、R36x (所有通道)，移除 R3、R5 和 R1

备注

图 4-3 显示了所有这些电阻器均由相应电阻器左上角的小平行线指示。

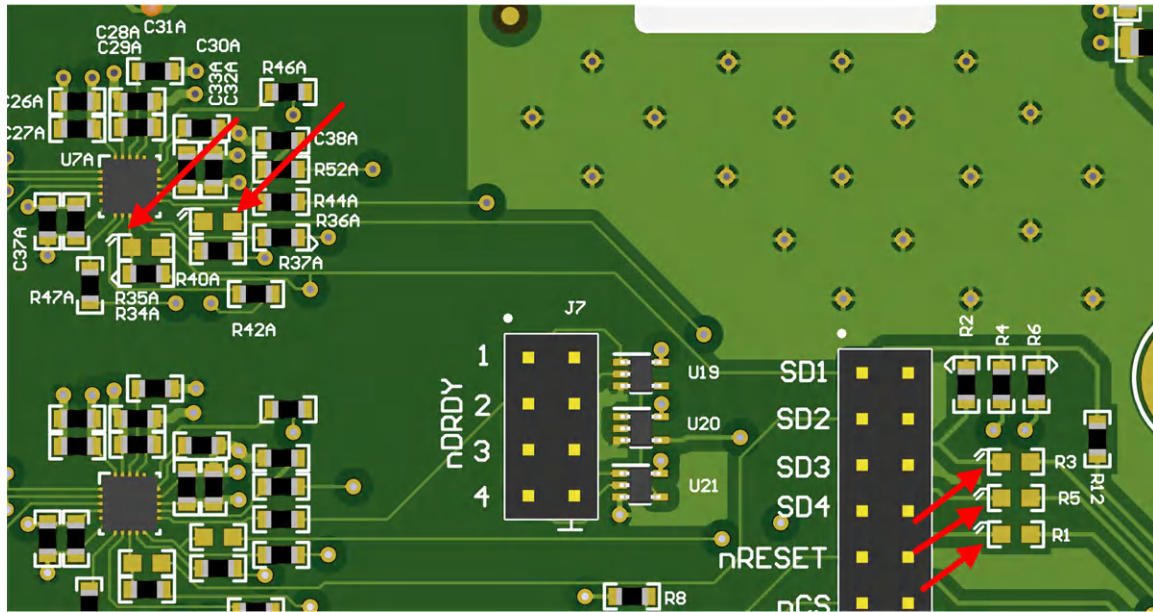


图 4-3. 菊花链变型

4.1.2.5.2 并行 SDO 模式

在并行 SDO 模式下，四个 ADC 通过单个共享 SDI 输入和四个并行 SDO 输出并联，如图 4-4 所示。

当需要高速度但 ADC 配置相似时，该模式可减少控制器所需的信号线路。SPI 时钟可达到 25MHz，从而实现每通道 1MSPS 的数据速率。

要启用并行 SDO 模式，需要使用以下电路板组件：

- R35x、R37x (所有通道)，移除 R3、R5 和 R1

备注

图 4-4 显示 R35x 和 R37x 由小三角形表示，以表示电阻器仅用于菊花链中。

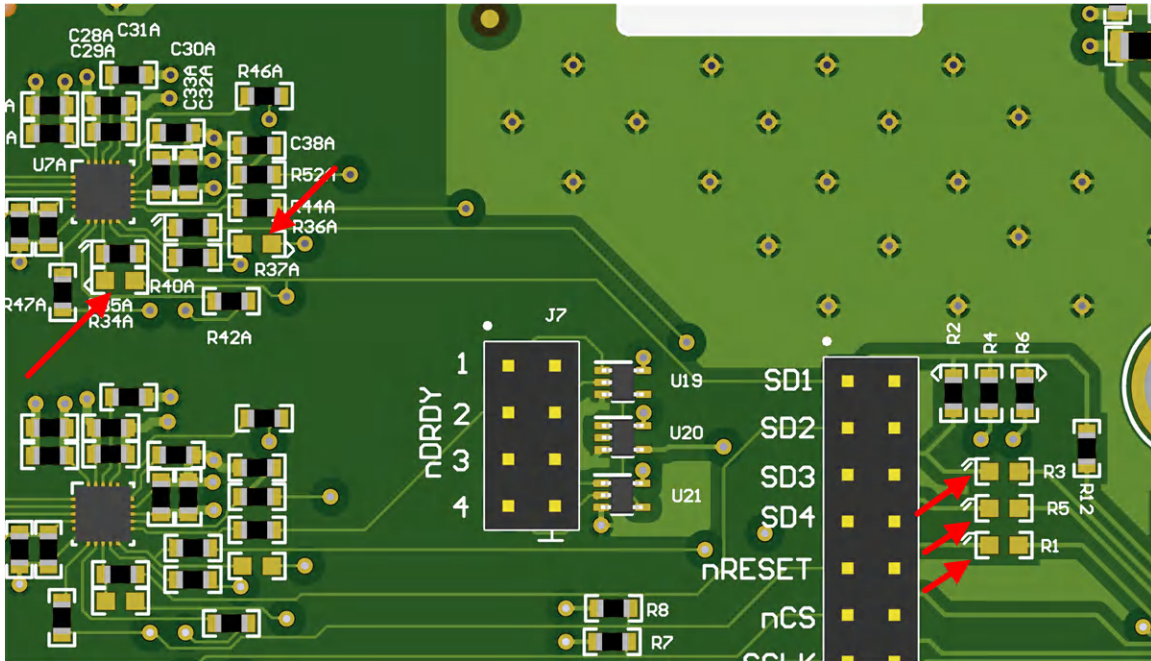


图 4-4. 并行 SDO 变体

4.1.2.5.3 并行 SDI 模式和并行 SDO 模式

在并行 SDI 模式和并行 SDO 模式下，CS 和 SCLK 在所有 ADC 间共享，并且使用单独的并行 SDI 和 SDO 线路。这样，就可以独立配置各个 ADC。

要启用并行 SDI 和并行 SDO 模式，需要使用以下电路板组件：

- R35x、R37x (所有通道)，移除 R2、R4、R6

备注

图 4-5 显示所有带有小三角形 (菊花) 的电阻器均已移除，而所有具有平行线的电阻器均已组装。

备注

默认组装具有一个 16MHz 晶体。使用此晶体，并行模式只能通过 ADC 实现 600kSPS 的数据速率。要解锁 ADC 的完全速度，请将 16MHz 替换为 25MHz 晶体。

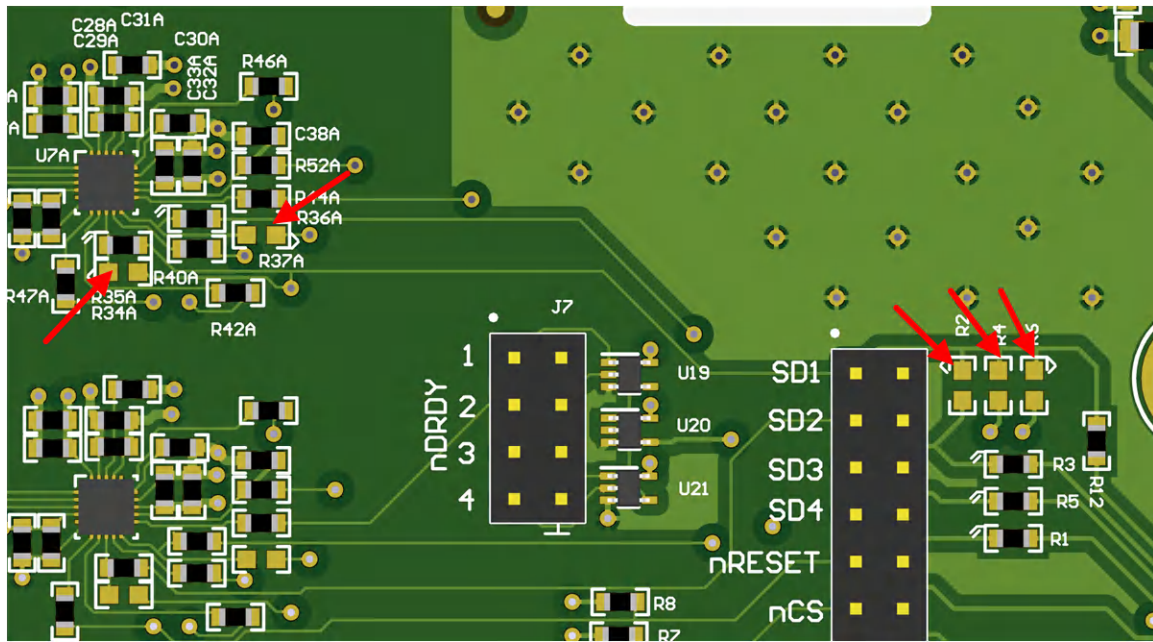


图 4-5. 并行 SDI 变体

4.1.2.5.4 时钟模式

此电路板支持 3 种时钟模式，如图 4-6 所示：

1. 独立模式：与其他电路板没有时钟线连接
2. 时钟输出模式：板载时钟连接到 SMA 连接器
3. 外部时钟输入模式：没有板载时钟，外部时钟连接到 SMA 连接器

表 4-2 详细说明了时钟部分中具有微小组装变化的电路板配置。

表 4-2. 电路板时钟配置

无外部时钟连接	时钟输出模式	外部时钟输入模式
移除了 J15	移除了 R53	移除了 Y1，移除了 R55

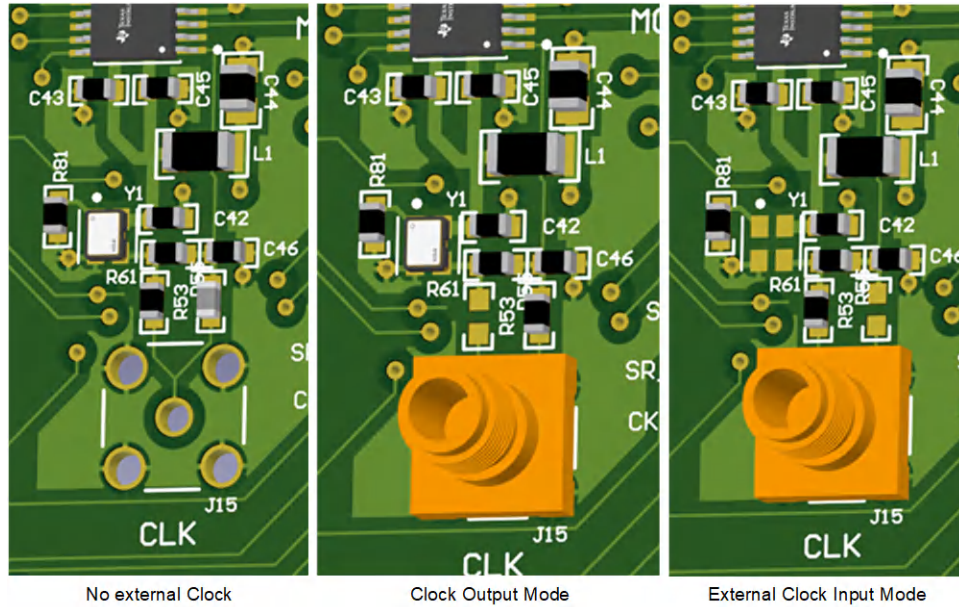


图 4-6. 时钟组装变化

如果要同步两块电路板，请将第一块电路板配置为时钟输出模式，并将第二块电路板配置为外部时钟输入模式。使用一根短的同轴电缆连接两块电路板的 J15，并且这两块电路板均连接到同一个控制器。使用控制器来处理 nRDY 信号的差异。

4.2 软件要求

此参考设计旨在与专用软件配合使用：适用于 Windows 的 TIDA-010249 EVM 软件，如图 4-7 所示。



图 4-7. TIDA-010249 EVM 软件用户界面

4.3 测试装置和过程

使用图 4-8 中的基本设置评估设计 PCB。该电路板通过 PHI 板连接到运行 TIDA-010249 软件的 PC。

运行所有测试需要以下组件：

- 参考设计 PCB (采用并行或菊花链组装配置)
- 5.2V 电源，设置为 300mA 限值
- PHI 电路板
- 运行参考设计软件的 PC
- 分流器和各种负载 (100 Ω 至 300 Ω, 0.25W)
- 波形发生器 (±10V 输出, 高达 100Hz 至 15kHz)，对于 THD 测量, 发生器必须具有非常低的失真 (< -100dB)，需要支持 16MHz 以实现时钟抑制
- PSI EVM 是生成干净的 2kHz 信号的良好且经济实惠的选择
- 4 通道模拟示波器 (用于同步测试)
- 对于电流源测量: 具有灌电流能力的电流源, 输出高达 23V
- 要使用传感器进行测试, 需要使用标准 IEPE 传感器, 并使用屏蔽电缆连接 PCB BNC 输入。四个传感器可用于 4 通道测试。
- 要使用传感器进行受控测试, 请使用传感器仿真器接收已知信号来生成确定性输出

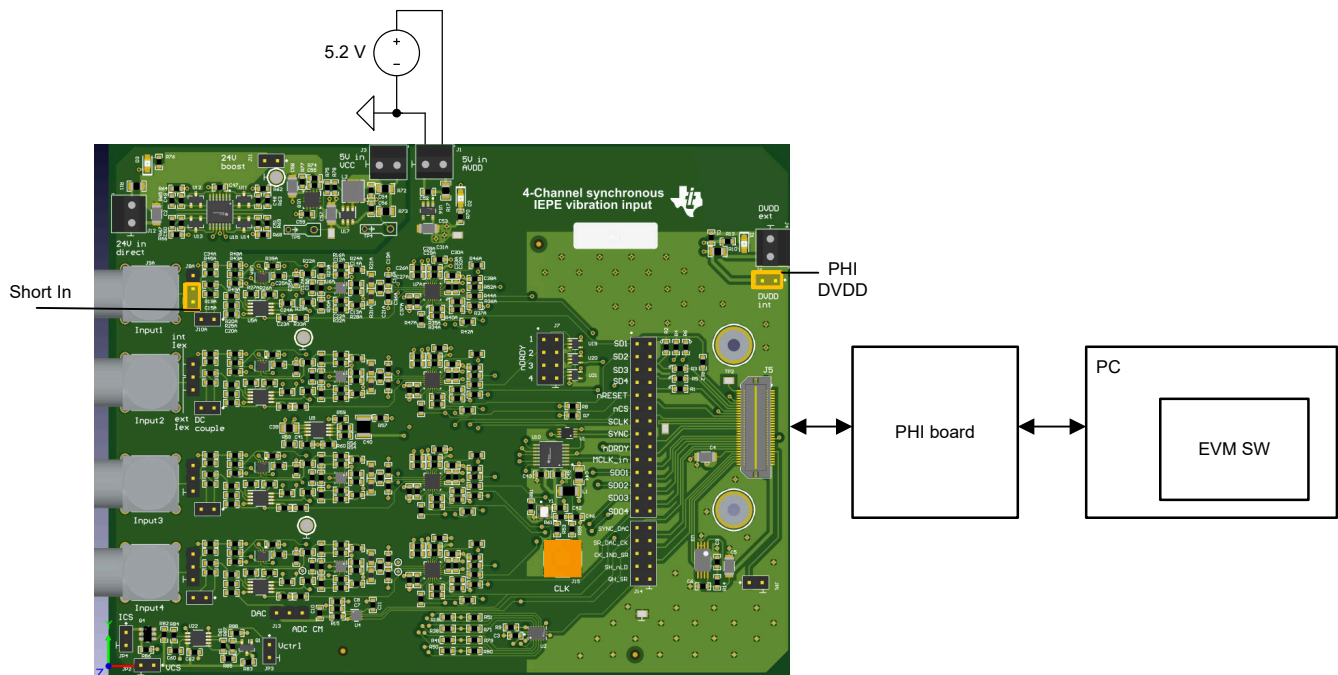


图 4-8. 基本测试设置

4.3.1 本底噪声和 SNR

要在没有激励电流或实际传感器的情况下评估信号链，请使用以下设置：

- 确保电路板处于与软件设置相匹配的特定 SPI 模式（例如，菊花链）
- 根据需要将通道输入设置为交流耦合（J10A = 开路），且输入对地短路（J8A，2-3 = 短接）
- 模拟电源连接器 J1 连接到 5.2V 电源（升压器关闭）
- J6 短接以使用 PHI DVDD（默认情况下，电路板设置为 2.5V 数字电源）
- 打开模拟电源，然后将 PHI 板连接到 USB
- 根据所需配置来配置软件设置（Vref = 4.096，OSR = 64，样本数为 16384 或 32768）
- 捕获帧（它捕获所有通道）
- 在直方图或时间视图中，记录峰峰值、标准偏差 (Σ) 和平均值以及有效分辨率
- 根据均值计算通道偏移，根据标准偏差计算通道噪声（以 μV 为单位）（还检查峰峰值），并计算每个通道的动态范围（FS = 4V/RMS Vnoise）。
- 可以针对不同的数据速率 (OSR) 和多个样本集重复上述步骤。
- 在频域视图中，检查频谱是否存在任何异常噪声尖峰或干扰音调。直方图视图显示了随机高斯分布。
- 在升压器件导通的情况下重复测量，激励电流在无源负载下加载但未连接到输入端

4.3.2 增益和输入范围

要在没有激励电流或实际传感器的情况下评估信号链增益和输入范围，请使用以下设置：

- 将输入源连接到 J8A 的引脚（2、3），建议使用能够提供 $\pm 10\text{V}$ 输出的低失真源，例如 THD < -100dB 的 R&S 音频分析仪 UPD
- 将源的输出设置为最大电平 Vp-p = 20V、低频率（如 100Hz）
- 捕获 ADC 时域并计算增益（来自峰峰值）
- 将源频率设置为 18kHz，并通过再次捕获 ADC 输出来计算增益
- 可以针对不同的频率重复前面的步骤，以绘制通道的频率响应
- 要测试通道 #4，请确保衰减器共模连接到 ADC 共模。短接 J13（1、2，右侧）。
- 如果需要，可以使用差分探头通过位于 ADC 输入之前的测试点测量 ADC 输入端的差分信号

确保信号中没有出现削波，以验证信号链得到正确偏置。

4.3.3 串扰

使用以下步骤评估信号链串扰：

- 将输入为 (Vpp = FS) 的干净信号源连接到通道（例如，通道 1），将频率设置为 2kHz
- 短接相邻通道（例如，ch2）并同时捕获 ch1 与 ch2
- 在频域视图中，ch2 频谱中的电平为 2kHz，计算串扰
- 在频率设置为 18kHz 的情况下重复测量
- 可以针对多个频率和不同的通道对重复上面的步骤

4.3.4 总谐波失真

按照以下步骤评估信号链总谐波失真：

- 将源设置为 -6dBFS (11.88Vpp)，并将 PSI 源的频率设置为 2kHz
- 捕获 ADC 输入
- 使用软件中的频域视图，计算 THD

4.3.5 时钟图像抑制

使用以下步骤评估信号链图像抑制：

- 使用高频正弦信号源（能够产生干净的 16MHz 信号）
- 使用 fin = 16.002MHz 和 -6dBFS 设置源
- 在频域视图中捕获 ADC 数据。在噪声频谱中监测最高杂散，并且图像抑制计算为以输入电平为基准的图像杂散。（理想的目标杂散为 2kHz，但复杂的互调会导致不同的音调。）

4.3.6 ADC 的同步

为确保在四个 ADC 之间保持正确的同步：

- 监控 J7 上的四个 nDRDY 信号
- 在良好的测试用例中，这些 nDRDYx 信号具有确切的从高电平到低电平转换时间。使用 4 通道示波器记录这些信号之间的延迟。
- 使用持续波形显示来捕获不同通道之间 nDRDY 延迟的变化（使用其中一个 nDRDY 信号作为触发器）
- 针对每个新的 SPI SCLK 频率以及菊花链模式和并行 SPI 模式重复前面的测试

4.3.7 故障检测电路

参考设计软件将故障检测电路的输出显示为开路和短路状态。然而，检测在时间上不是连续的，而是在每个预定义的周期进行采样。可以在软件中配置采样周期。

使用以下步骤检查故障检测的级别：

- 将输入连接到直流电源
- 使用任意步进数在 0V 和 24V 之间扫描直流电源
- 对于每个步进，确保获取故障移位寄存器输出
- 标记触发开路和短路故障的电平
- 可以应用反向扫描来检查迟滞

使用以下步骤检查故障检测电路的延迟。

- 故障检测比较器的输入经过低通滤波，这会导致实际输入变化与比较器输出变化之间出现一定程度的延迟
- 使用与在上一步中发现的检测电平之一交叉的输入方波波形。探测输入信号并用作触发器。
- 探测激励通道的比较器输出
- 测量输入的阈值交叉点与输出中间电平交叉点之间的延迟

4.4 测试结果

本节介绍示例测试结果。所有测试结果均在 27°C 室温、菊花链配置、125kSPS 数据速率、2.5V 数字电源 (PHI 已通电) 和 5.2V 模拟电源、32768 样本帧下得出。

4.4.1 本底噪声和动态范围

在进行本底噪声和动态范围测试时，并不为激励电流电路和升压级通电。

首先将 ADC 输入多路复用器设置为偏移测试模式。

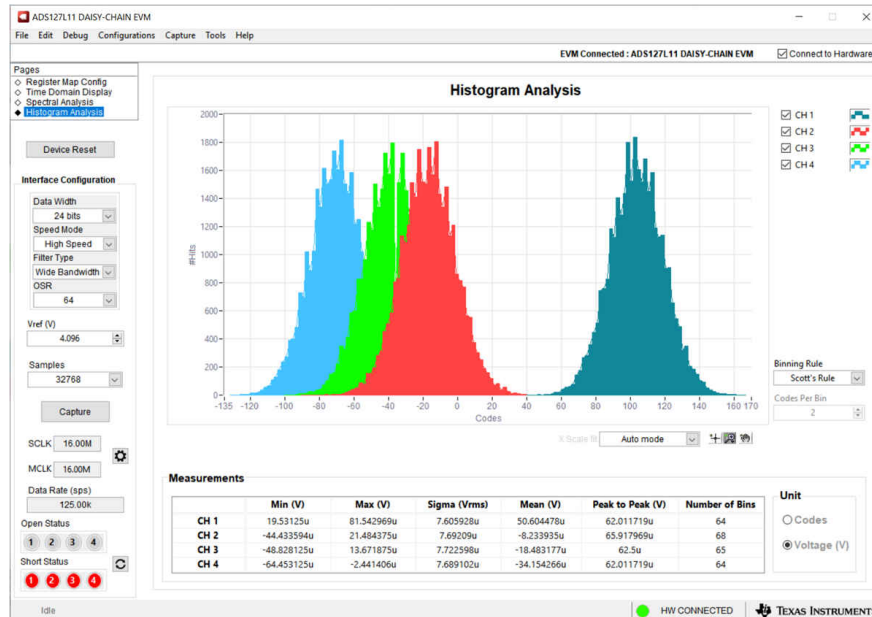


图 4-9. ADC 输入短路的直方图 (测试模式)

ADC 固有电压噪声 σ 为 $7.7 \mu\text{V}$ ，偏移量约为 $50 \mu\text{V}$ ，与 [ADS127L11 400kSPS](#)、[宽带宽](#)、[24 位 \$\Delta-\Sigma\$ ADC](#) 数据表中的值一致。

接下来，短接前端输入 (J8A, 2-3 = 短接)。



图 4-10. 前端输入短路的直方图

完整的前端电压噪声约为 $19.8 \mu\text{V}$ ，相当于 103dB 的动态范围。图 4-11 中的频率图显示了一个无噪声频谱，最高音调为 94dBFS。



图 4-11. 前端输入短路的频域图

时域图 (请参阅图 4-12) 验证了没有可见的音调。通道的平均值远低于 0.5mV ，即整个通道的估计偏移量，包括 OPA2320 (增益为 4) 和 THS4551 (增益为 2) 的偏移量以及 ADS127L11 的偏移量。



图 4-12. 前端输入短路的时域图

4.4.2 增益和输入范围

对增益和输入范围测试应用了以下条件：

- 20V_{PP}，2kHz 正弦输入连接到 ch1 的这一输入，所有通道的激励电流均导通，且已加载但未连接到输入

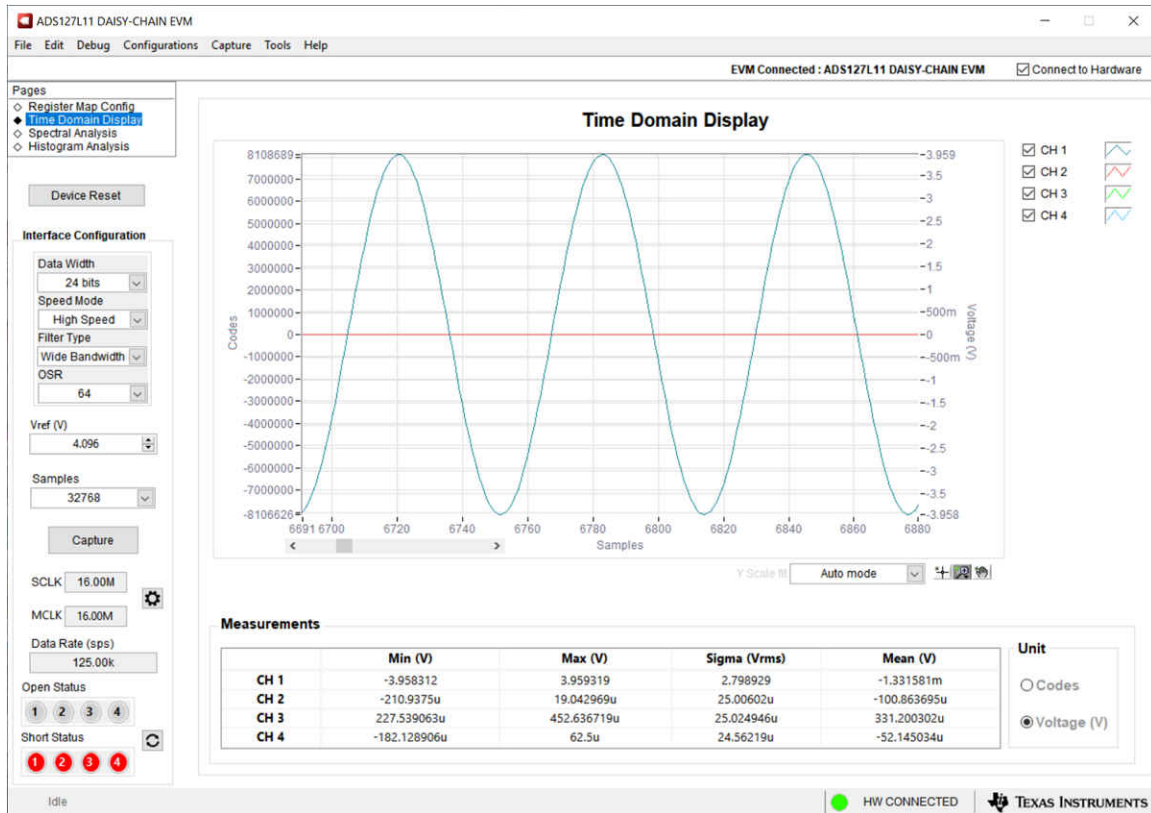


图 4-13. 通道 1 上 20V_{PP} 输入的时域图

图 4-13 所示的时域图中没有出现削波迹象。在总谐波失真测试中，削波结果显而易见。

4.4.3 串扰

如在输入范围测试中，向 ch1 施加 20V_{PP}、2kHz 的正弦输入，将 ch2 信号功率与 ch1 信号功率进行比较。20V_{PP}、2kHz 并非纯信号，而是包括多个高次谐波。



图 4-14. 通道 1 上 20V_{PP} 输入的频域图

ch1 信号电平为 -2.8dB，符合满量程输入的预期。而 ch2 和 ch3 信号电平为 -93dB。这些结果表明串扰电平低于 -90dB。

4.4.4 总谐波失真

对于图 4-15 所示的 TDH 图，来自非常干净的源 (PSI EVM) 的 10V_{pp}、2kHz 正弦信号直接施加到 ch1，这相当于 -6dBFS。总谐波失真小于 -97dB，表明前端具有高线性度。

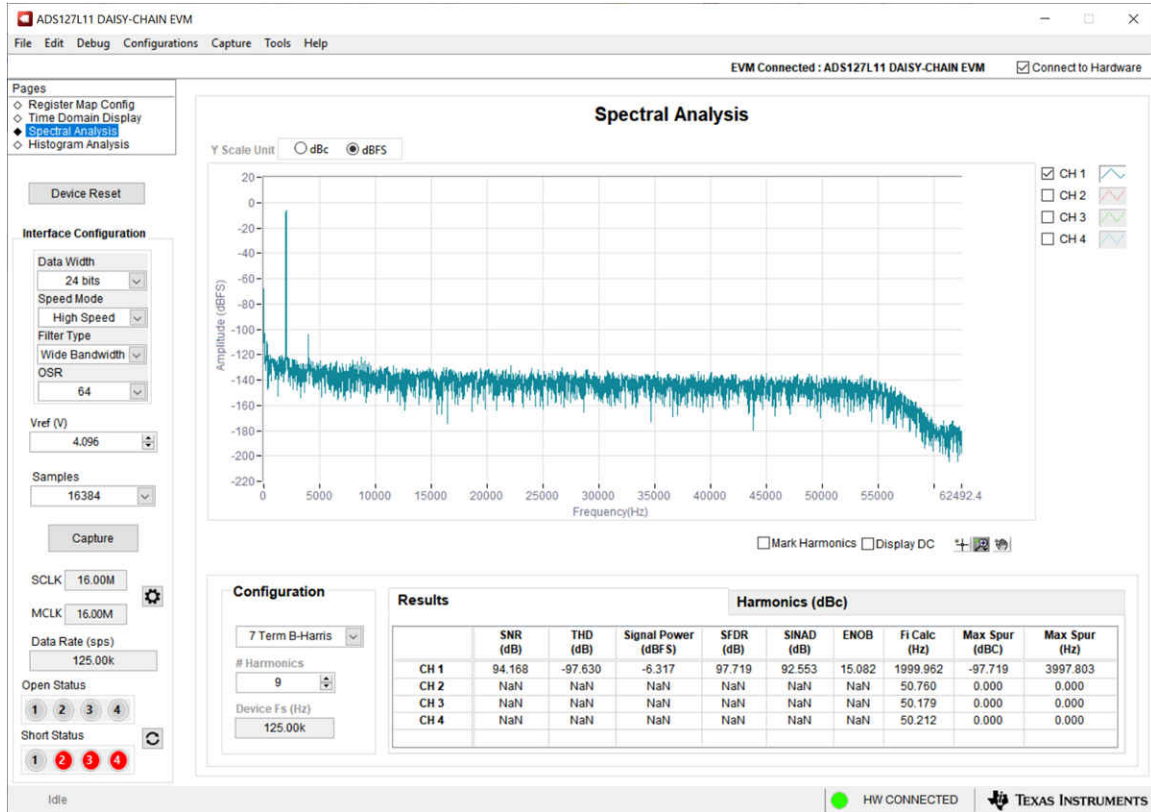


图 4-15. 通道 1 上 2kHz、10V_{pp} 输入的频域图

4.4.5 时钟图像抑制

图 4-16 所示的频域图是在 10V_{PP}、16.002MHz 正弦信号施加到 ch1 时绘制的。该设置模拟输入端的时钟图像频率。输出频谱显示没有时钟互调的迹象，并且时钟抑制低于噪声水平。



图 4-16. 通道 1 上 10V_{PP} 时钟图像输入的频域图

4.4.6 ADC 的同步

图 4-17 显示了表示四个对齐信号的 nDRDY 信号的时域波形。

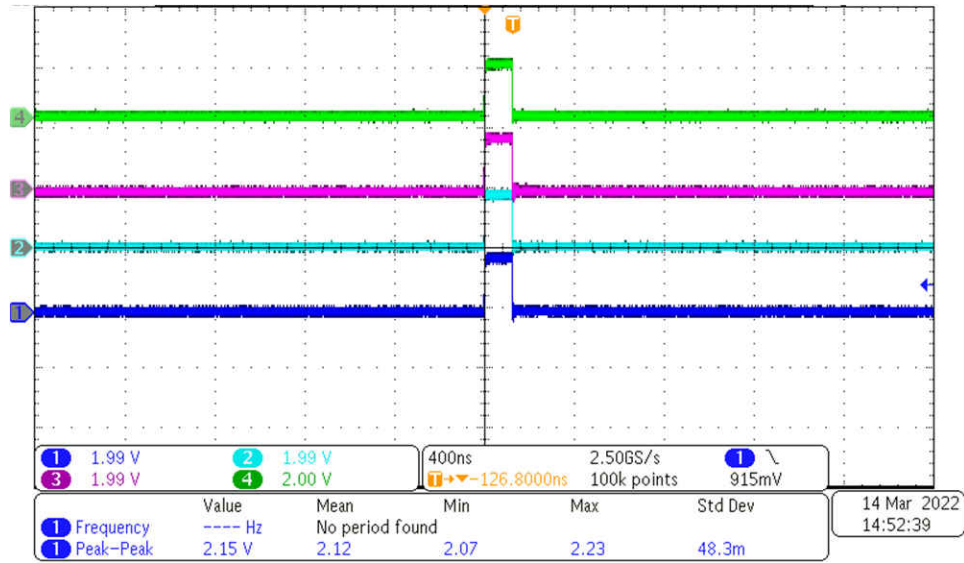


图 4-17. 数据就绪信号的时域图

图 4-18 中的放大图显示信号已向下同步到皮秒级。

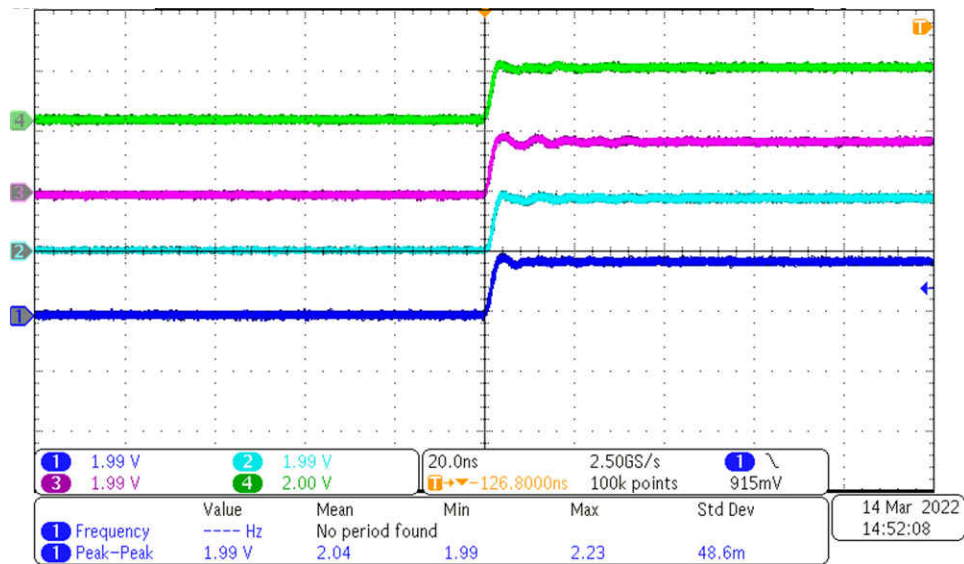


图 4-18. nDRDY 信号的放大时域图

4.4.7 故障检测电路

扫描输入电压会导致故障检测电路出现以下阈值：

- 0.5V 是短路检测阈值
- 20.1V 是开路检测阈值

输入信号逐步从 10V 降至 0V，并探测短路检测比较器的输出。图 4-19 中的图线显示了在比较器输出变为低电平之前有 1.5ms 的延迟。

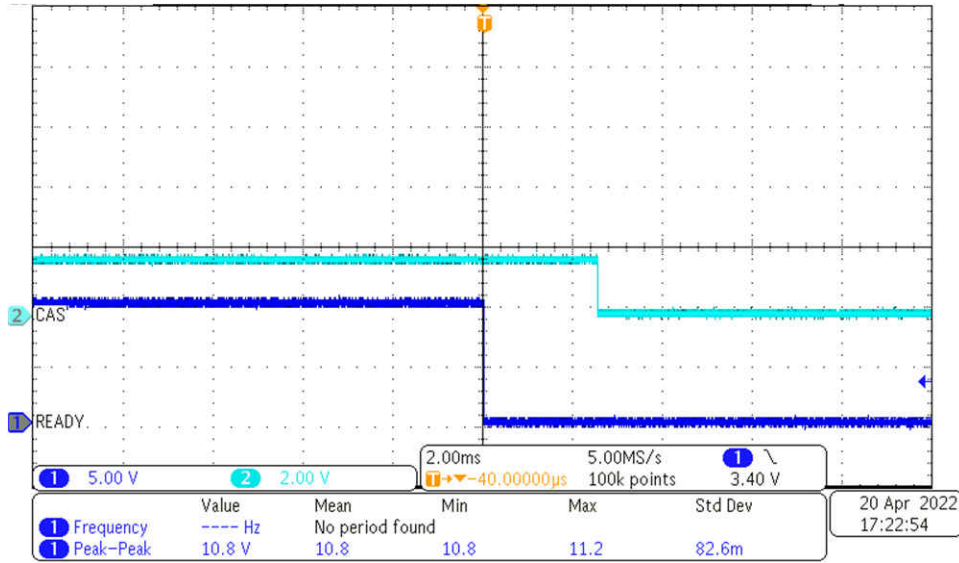


图 4-19. 故障检测电路延迟的时域图

4.4.8 使用实际 IEPE 传感器进行测试

IEPE 传感器 Innomic ICS80 1741 连接到 ch1，而 ch1 分别以 1kHz 和 5kHz 的频率接触相同振幅的音频振动源。捕获的频谱显示了接口对此类输入的灵敏度。低频具有装置和环境方面的机械振动。



图 4-20. 应用于 IEPE 传感器的 1kHz 的频域图



图 4-21. 应用于 IEPE 传感器的 5kHz 的频域图

4.4.9 测量结果总结

表 4-3 显示了主要系统规格。

表 4-3. 关键系统规格

参数	规格
通道数量	4
输入信号	±10V, 单端
耦合	交流耦合
分辨率	24 位
输入范围	1.7 V 至 22.2 V
激励电流	3.458 mA
激励电压	23.8 V
激励负载调节	9.25 μ A/V = 0.26%
系统输入噪声 RMS	19.8 μ V
系统动态范围	103dB
串扰	-90dB
总谐波失真	-97dB
时钟图像抑制	-100dB
短路检测阈值	0.5V
开路检测阈值	20.1 V
故障检测延迟	1.5ms

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-010249](#) 中的设计文件。

5.1.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010249](#) 中的设计文件。

5.2 软件

软件

[TIDA-010249 EVM 软件用户界面](#) 此参考设计旨在与适用于 Windows 的专用 TIDA-010249 EVM 软件一起使用。

5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[ADS127L11 400kSPS、宽带宽、24 位 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ADC](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[同步采样系统中的 ADS127L11](#) 应用简报
3. 德州仪器 (TI)，[适用于 PLC 模拟输入的 IEPE 振动传感器接口参考设计](#) 设计指南
4. 德州仪器 (TI)，[适用于工业应用的高侧电流源](#) 模拟设计期刊文章

5.4 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、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可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.

ICP® is a registered trademark of PCB Piezotronics, Inc.

Isotron® is a registered trademark of Meggitt (Orange Country), Inc.

DeltaTron® is a registered trademark of Brüel & Kjær.

Piezotron® is a registered trademark of Kistler Instrument Corporation.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

AHMED NOEMAN 是德州仪器 (TI) 德国公司的系统工程师，负责为工业应用开发系统设计。Ahmed 在模拟和射频设计、AMS 建模和验证以及广泛领域 (包括射频收发器、时钟和 PLL、存储器系统等) 的应用和系统工程方面拥有多年的经验。Ahmed 拥有埃及艾因夏姆斯大学的理学士学位和电气工程硕士学位。

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司