

Design Guide: TIDA-010988

具有单电源的八通道电压与电流组合模拟输入模块参考设计



说明

TIDA-010988 是一款适用于工业自动化应用的八通道、2 端子输入模拟输入模块。每个通道支持可通过软件选择的电压范围 (0V 至 10V, $\pm 10V$) 以及电流范围 (4mA 至 20mA, $\pm 20mA$)。该设计实现了一个高密度隔离模拟输入模块, 可由单个 24V 现场电源或 5V USB 供电。通过使用 ADS125H18 的片选转发特性, 该设计实现了共享 SPI 架构, 从而减少了所需的数字隔离通道数量。该系统经过设计, 可在整个温度范围内实现优于 0.1% (电压输入) 和 0.2% (电流输入) 的系统绝对精度误差。

资源

TIDA-010988	设计文件夹
ADS125H18	产品文件夹
MSPM0G5117	产品文件夹
TXE8116	产品文件夹
ISO6441	产品文件夹
LM5180	产品文件夹
UCC33420	产品文件夹
TPS7A2050	产品文件夹
TLV709A33	产品文件夹

特性

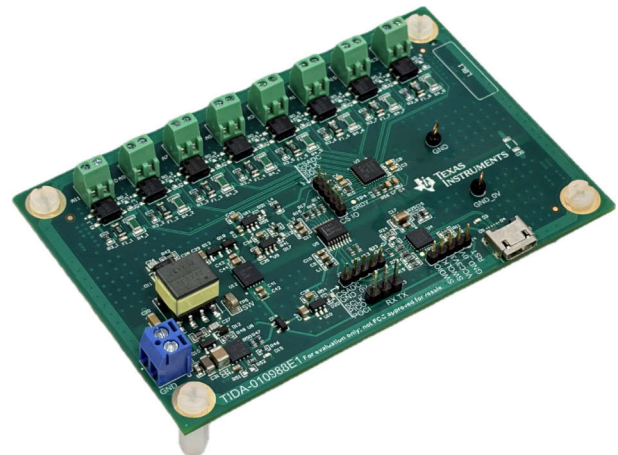
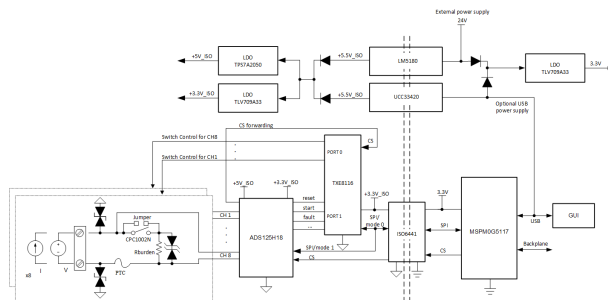
- 八个相同的 2 端子模拟输入通道
- 每个通道支持电压 (0V 至 10V, $\pm 10V$) 和电流 (4mA 至 20mA, $\pm 20mA$) 输入
- 基于 Photo-MOS 的电压和电流切换, 每个通道均具有断线检测功能
- 集成 PTC、TVS 和齐纳二极管输入保护, 实现稳健的工业接口
- 用于评估的单个 24V 电源或 5V USB 电源
- 系统绝对精度误差:
 - 整个温度范围内 (-40°C 至 125°C), 电压: $<0.1\%$, 电流: $<0.2\%$
 - 室温 (25°C), 电压: $<0.05\%$, 电流: $<0.15\%$

应用

- 模拟输入模块
- 混合模块 (AI、AO、DI、DO)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

该参考设计实现了一个 8 通道隔离模拟输入模块，其具有 2 端子输入，且能按通道配置电压和电流。由单个 24V 现场电源或 5V USB 为模块供电。系统围绕 ADS125H18 精密 Δ - Σ ADC、MSPM0G5117 MCU、LM5180 隔离电源、ISO6441 数字隔离器和 TXE8116 I/O 扩展器而构建。该设计专门用于紧凑型工业模拟输入模块，这类模块需要在通道密度、隔离、功耗和 PCB 面积之间取得平衡。

每个通道前端结合了 PTC、TVS 二极管和钳位器件，以提高对浪涌和持续过压的稳健性，同时 TXE8116 在电压和电流之间提供了每通道模式选择。支持的输入类型包括 0V 至 10V 和 $\pm 10V$ 电压输入，以及 4mA 至 20mA 和 $\pm 20mA$ 电流输入。一旦选择了通道输入模式，即可直接测量这些支持范围内的信号，无需额外的量程切换。

参考设计的目的是在 -40°C 至 125°C 温度范围内，实现优于 0.1% 的电压输入系统绝对精度误差和优于 0.2% 的电流输入系统绝对精度误差（计入保护网络的影响）。在室温条件下，该设计实现了优于 0.05% 的电压输入精度误差和优于 0.15% 的电流输入精度误差。

该设计使用单个数字隔离器，配合 ADS125H18 的片选转发功能，可以减少对隔离数字接口的需求。ADC 将片选信号转发至用于输入模式控制的隔离侧 I/O 扩展器。这种安排允许 MCU 通过单个隔离 SPI 加上少量额外的控制线路来管理 ADC 转换、每通道模式控制以及诊断。这种方法减少了隔离通道、外部元件和 MCU SPI 资源数量，有助于提高通道密度并进一步减小整体模块尺寸，同时保持完整的隔离和功能。

USB 接口提供了辅助电源选项，并提供了与主机 PC GUI 的直接连接，以便在评估期间进行工作模式配置和实时数据可视化。此外，背板接口支持将该模块集成到 PLC 和 DCS 系统中，或作为独立的模拟输入卡进行评估。

1.1 主要系统规格

参数	规格	详细信息
模拟输入通道数量	8	
电源选项	24V 现场电源或 5V USB	节 3.1
通道配置	可通过软件选择的每通道电压或电流输入模式	节 3.2.2
支持的电压输入范围	0V 至 10V, $\pm 10V$	
支持的电流输入范围	4mA 至 20mA, $\pm 20mA$	
断线检测	每个通道可用	
ADC 分辨率	24 位	
系统绝对精度误差 (25°C)	电压： $<0.05\%$	节 4.2.3.3
	电流： $<0.15\%$	
系统绝对精度误差 (-40°C 至 125°C)	电压： $<0.1\%$	
	电流： $<0.2\%$	
输入阻抗	电压模式：大约 $2.2M\Omega$	
	电流模式：约 249Ω	
目标应用	PLC/DCS 模拟输入模块和工业模拟数据采集系统	

2 系统概述

2.1 方框图

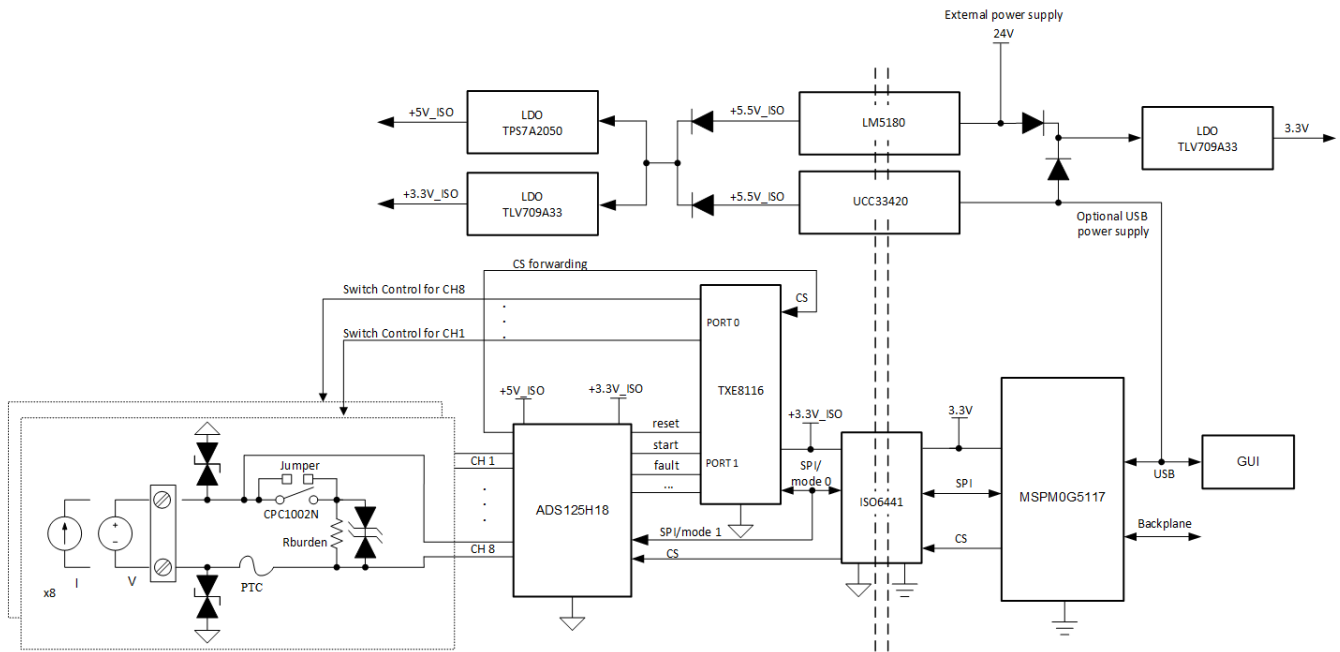


图 2-1. TIDA-010988 的系统方框图

2.2 设计注意事项

工业模拟输入模块通常需要一个通用的硬件平台，该平台不但需要支持电压和电流信号，同时还要保持通道密度、隔离和低成本。该设计通过八个相同的 2 端子输入通道满足了这一需求。每个通道使用同一对现场端子进行电压或电流测量，与需要单独端子或专用通道变型的输入结构相比，减少了连接器数量并简化了现场接线。

信号链围绕 ADS125H18 ADC 构建，该 ADC 在隔离侧复用八个现场输入。包含输入保护以提高应对工业环境中常见的浪涌、故障和接线错误情况的稳健性。瞬态钳位器件和 PTC 有助于保护输入级，而可切换的并路路径允许仅在需要时启用电流测量。当通道配置为电压输入时，这种切换方法可防止不必要的负载。

为减少隔离器通道数量，设计采用了 ADS125H18 的片选转发功能，以便与用于通道开关控制的隔离侧 I/O 扩展器共享 SPI 总线。共享的 SPI 架构简化了隔离数字接口，同时保持了每个通道的可配置性。

电源路径同时支持 24V 和 5V 电压。正常工作时，隔离现场侧使用外部电源，而评估和基于 GUI 的测试可使用可选的 USB 电源。为隔离的模拟和数字电路生成独立的电源轨，以支持 ADC 和开关控制功能。

2.3 重点产品

2.3.1 ADS125H18

ADS125H18 是一款高性能、24 位、多路复用 $\Delta\Sigma$ ADC，适用于工业系统中的精密多通道数据采集。该器件集成了输入多路复用器、精密电压基准、诊断功能以及支持高达 20V 共模信号的电阻分压器输入，从而减少了高密度模拟输入模块中的外部元件数量。

ADS125H18 支持 CS (片选) 转发特性，可使用一个 ADC GPIO 来控制辅助器件的 CS 引脚。CS 转发特性使 ADC 能够辅助管理与其他外部配套器件的 SPI 事务。因此，必须穿过隔离栅的信号数量得到减少，避免了为单独的片选信号增加额外的专用隔离器通道。

在该设计中，ADS125H18 用作 8 通道模拟输入前端的主数据转换器。集成的多路复用器、灵活的转换模式、通过电阻分压器输入实现的高共模输入功能以及诊断功能，使得 ADS125H18 成为 PLC 和 DCS 模拟输入模块的绝佳选择，这些模块要求在 -40°C 至 125°C 温度范围内实现精确测量、高效通道扫描和紧凑的实现方案。

2.3.2 MSPM0G5117

MSPM0G5117 是一款 32 位 Arm Cortex-M0+ 微控制器，专为嵌入式控制和混合信号工业应用而设计。MSPM0G5117 集成了片上存储器、模拟外设、计时器、通信接口和一个 USB 2.0 全速接口，为测量和系统管理功能提供了紧凑的控制器件。

在该设计中，MSPM0G5117 管理 ADC 通信、通道配置、诊断和主机接口功能。高集成度和低功耗运行使该器件非常适合需要实时控制和灵活系统连接的紧凑型模拟输入模块。

TI MSPM0 MCU 平台提供了一系列封装选项和片上存储器大小，以支持不同的系统要求。

2.3.3 TXE8116

TXE8116 是一款 16 位 SPI I/O 扩展器，可在 MCU 引脚数量有限的系统中提供额外的通用数字 I/O。该器件支持宽工作电压范围，并集成了可编程上拉电阻器、中断功能和可配置输出模式等特性。

在该设计中，TXE8116 用于控制每通道前端开关以选择电压和电流模式，还提供了其他离散控制功能。通过这些信号从 MCU 卸载，该器件有助于减少控制器引脚数量需求并简化隔离式模拟输入模块中的 PCB 布线。

2.3.4 ISO6441

ISO6441 是一款增强型四通道数字隔离器，为三个正向和一个反向单向通道提供电流隔离。该器件使用二氧化硅 (SiO₂) 绝缘栅来实现高隔离等级和高共模瞬态抗扰度，提高了嘈杂工业环境中的稳健性。

在该设计中，ISO6441 为控制器与隔离模拟输入域之间的数字通信路径提供电流隔离。结合共享 SPI 架构，ISO6441 有助于减少隔离通道和外部元件数量，同时保持稳健的隔离通信。

2.3.5 LM5180

LM5180 是一款初级侧调节反激式转换器，集成高压电源开关，设计用于从宽输入电压范围生成隔离或非隔离电源轨。初级侧调节消除了对光耦合器或次级侧反馈电路的需求，从而实现紧凑且可靠的隔离电源设计。

在该设计中，LM5180 用于为模拟前端和相关电路生成隔离电源轨。其宽输入电压功能支持由 24V 现场电源供电的工业模块。

2.3.6 UCC33420

UCC33420 是一款隔离 DC/DC 转换器模块，集成了变压器驱动器、电源开关和整流电路。该器件设计用于通过集成的高压隔离栅提供稳压输出功率，且外部元件极少，可在电路板通过 5V USB 供电时用作隔离电源选项。

2.3.7 TPS7A2050

TPS7A2050 是一款低压降 (LDO) 线性稳压器，可提供固定 5.0V 输出，在宽输入电压范围内具有高 PSRR 和低输出噪声。该器件具有低静态电流和良好的瞬态响应，能够对开关转换器或为精密模拟和混合信号电路供电的电源轨进行高效的后级稳压。

集成的电流限制和热关断保护功能增强了系统可靠性，使 TPS7A2050 成为为 ADC 生成干净 5V 电源轨的绝佳选择。

2.3.8 TLV709A33

TLV709A33 是一款低静态电流、固定 3.3V 输出的 LDO 稳压器，专为空间受限和成本敏感型应用而设计。TLV709A33 具有良好的线路调整率和负载调整率、低压降电压，并且能够在使用小型陶瓷输出电容器的情况下稳定工作。

3 系统设计原理

本节阐述系统设计架构，以及关键子系统如何实现并相互交互。

3.1 电源

电源树分为非隔离部分和隔离部分，两部分通过电流隔离栅隔开。在该设计中，隔离电源可由 24V 现场电源通过 LM5180 反激式转换器生成，或由 5V USB 输入通过 UCC33420 隔离 DC/DC 模块生成。数字隔离器提供跨越隔离栅的数字通信。

3.1.1 24V 输入电源路径

当通过 J5 上的 24V 输入供电时，输入级在隔离转换器之前提供保护并进行滤波。D14 提供反向电流保护，D16 钳制输入瞬态，C31、C32 和 C33 提供输入去耦和大容量能量存储。

经过调理的 24V 电源轨为 LM5180 反激式转换器 (U8) 供电。该级与 T1、D11 以及 C28/C29 一同生成隔离的 5V5_ISO_OUT 电源轨。转换器采用初级侧调节，省去了光耦合器，简化了隔离电源设计。UVLO 网络配置为大约 9.5V 导通和 6.5V 关断，软启动时间约为 9ms。

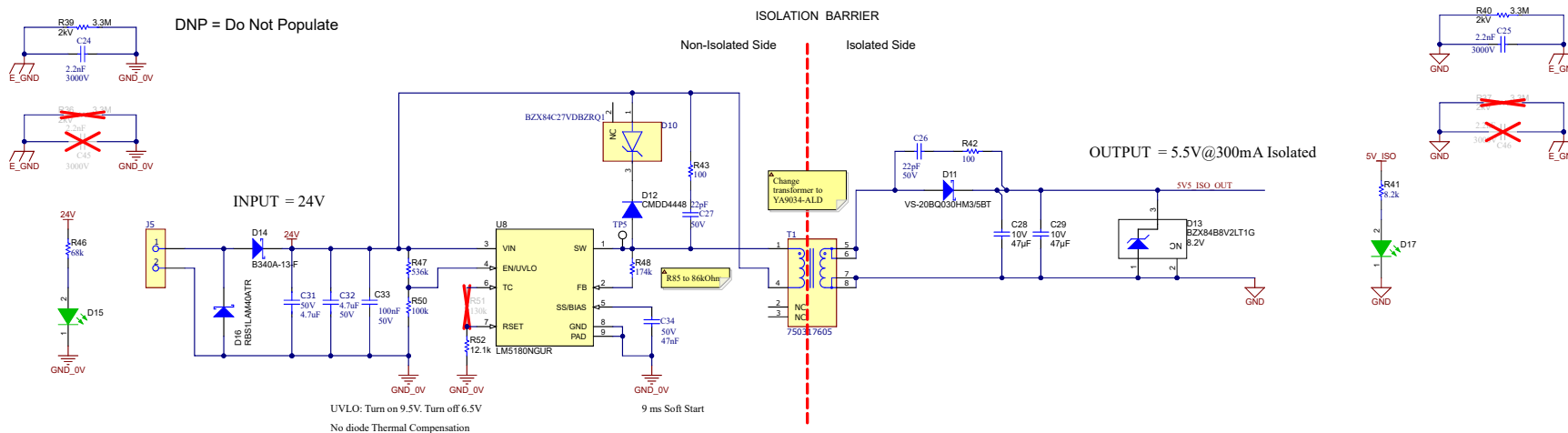


图 3-1. 24V 输入电源路径原理图

有关此电路的更多详细信息，请参阅 [LM5180 数据表](#) 中典型应用部分的设计 1。

3.1.2 USB 电源路径

对于评估和基准测试，该电路板也可以由 5V USB 输入供电。在此模式下，VUSB 为 UCC33420 隔离 DC/DC 模块 (U12) 供电，后者生成隔离的 5V5_ISO_USB 电源轨。

C41 和 C42 提供输入去耦，而 C43 和 C44 对隔离输出进行滤波并支持负载瞬态。在当前配置下，该路径可提供大约 1.5W 的隔离输出功率。

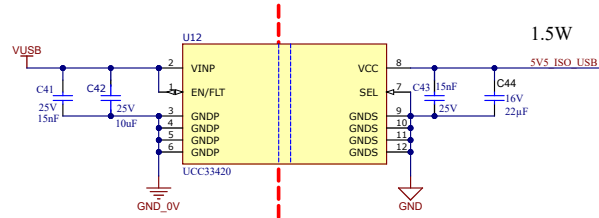


图 3-2. USB 电源路径原理图

3.1.3 非隔离 MCU 电源

在非隔离侧，MCU 和本地数字电路由 U10 (TLV709A33) 生成的 VCC_3V3 供电。D19 处的二极管逻辑“或”网络用于选择为 U10 供电的电源，并防止 24V 衍生电源路径与 VUSB 之间发生反向馈电。C37 和 C38 提供本地输入和输出去耦。该电源轨为 MSPM0G5117 及其他非隔离数字电路供电。

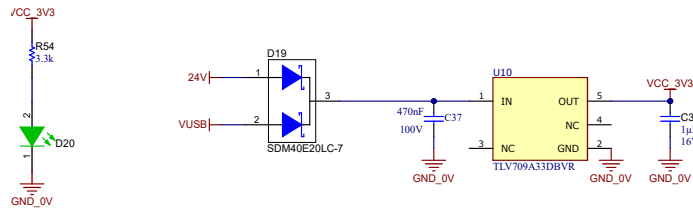


图 3-3. 非隔离 MCU 电源原理图

3.1.4 隔离 ADC 及外设电源

隔离测量域由一条公共的隔离 5.5V 总线供电，该总线通过 D18 将 5V5_ISO_OUT 和 5V5_ISO_USB 进行二极管逻辑“或”连接而形成。这种二极管逻辑“或”排列方式允许任一隔离电源为现场侧电路供电，同时防止两个电源之间出现反向电流。

该总线为两条后置稳压电源轨供电：

1. U9 (TPS7A2050) 生成的 5V_ISO 为精密模拟电路 (包括 ADS125H18) 提供低噪声电源。C35 和 C36 提供本地去耦。
2. U11 (TLV709A33) 生成的 3V3_ISO 为隔离侧数字和控制电路供电。C18 和 C40 提供本地去耦。

这些电源轨共同为测量子系统提供干净的隔离电源，同时将 MCU 和主机侧电路保持在隔离栅的非隔离侧。

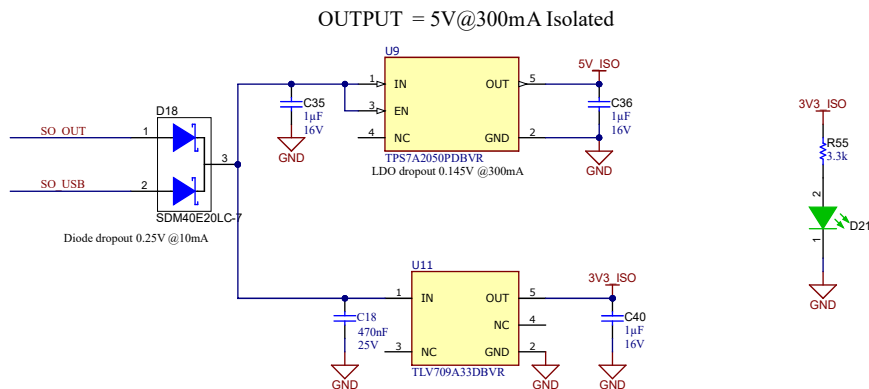


图 3-4. 隔离 ADC 及外设电源原理图

3.2 模拟输入端口

该设计包含八个相同的 2 端子模拟输入通道。每个通道使用一对现场端子，支持 $\pm 10V$ 差分电压输入或 $\pm 20mA$ 差分电流输入。通过一个 Photo-MOS 开关为每个通道实现模式选择，无需重新接线即可进行软件配置。这种 2 端子输入架构减少了连接器数量，并支持紧凑的高密度模拟输入模块。

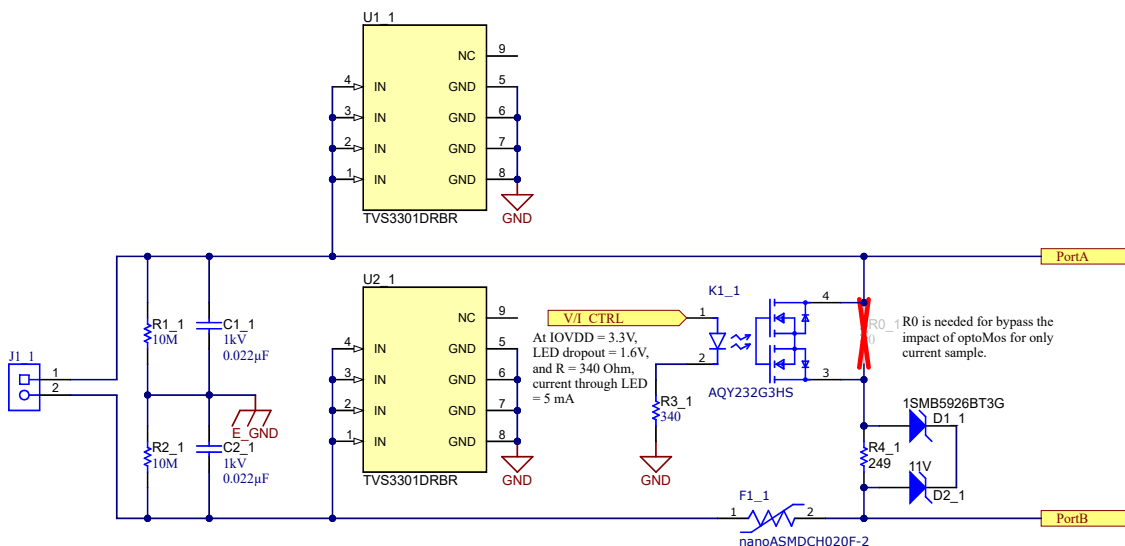


图 3-5. 模拟输入前端原理图

3.2.1 模拟输入端口与保护

每个通道通过一个 2 位输入端子连接。在前端，输入包括一个以 E_GND 为基准的 EMI 网络和一个以隔离模拟接地为基准的瞬态保护级。R1、R2、C1 和 C2 构成输入 EMI 网络。高阻值电阻器为线路对地电容器提供放电电路，并防止悬浮现场接线上的电荷积聚，同时增加的负载可忽略不计。

这些电容器提供了到 E_GND 的高频返回路径，从而改善长电缆上的 EMI 性能。

瞬态保护由 U1 和 U2 使用 TVS3301 器件实现。这些器件钳制输入端的浪涌和 ESD 事件，保护下游的切换和测量电路。

3.2.2 电压与电流模式选择

每个通道均支持通过 Photo-MOS 开关 K1 进行电压或电流测量。隔离侧数字控制电路通过 V/I_CTRL 信号驱动该开关。

当 K1 导通时，电流测量路径接通，通道工作在电流模式。

当 K1 关断时，电流路径断开，通道用作高阻抗差分电压输入。

R3 为 Photo-MOS 的输入端设定来自 3.3V 控制信号的 LED 驱动电流。R0 为可选的 $0\ \Omega$ 旁路位置，可在电流模式下降低 Photo-MOS 导通电阻的影响。在默认实现中，R0 保持未组装状态。

3.2.3 电流测量路径

在电流模式下，输入电流流经受保护的电流测量路径。R4 是分流电阻器，将输入电流转换为 ADC 的差分电压。对于 $\pm 20\text{mA}$ 输入范围， $249\ \Omega$ 的分流电阻器在测量电阻器两端产生约 $\pm 4.98\text{V}$ 的电压，该电压处于 ADC 输入范围内。

F1 为可复位保险丝，与电流路径串联，以提高在接线错误或持续过流条件下的故障稳健性。D1 和 D2 是跨接在分流路径两端的双向钳位二极管，用于限制过载事件期间的过高电压应力。

3.2.4 电压测量路径

在电压模式下，K1 将电流测量支路（包括 F1、D1、D2 和 R4）与输入路径断开。然后，将该通道用作 $\pm 10\text{V}$ 范围内的差分电压输入。

在此模式下，输入信号仅通过前端保护和 EMI 网络施加到 ADC。TVS 器件继续提供瞬态保护，而以 E_GND 为基准的 RC 网络则保持 EMI 性能。

3.2.5 通道配置

所有八个通道使用相同的输入拓扑并独立控制。每个通道都有一个 V/I_CTRL 信号，允许软件为每个通道选择电压或电流输入模式。这种方法提供了灵活的模拟输入接口，同时保持了前端电路的简洁性和稳健性。

3.3 数字控制和数据采集子系统

本节介绍用于控制 ADC、采集转换数据以及管理每通道电压和电流模式选择的数字子系统。该设计分为由隔离栅隔开的非隔离控制域 (GND_0V) 和隔离测量域 (GND)。

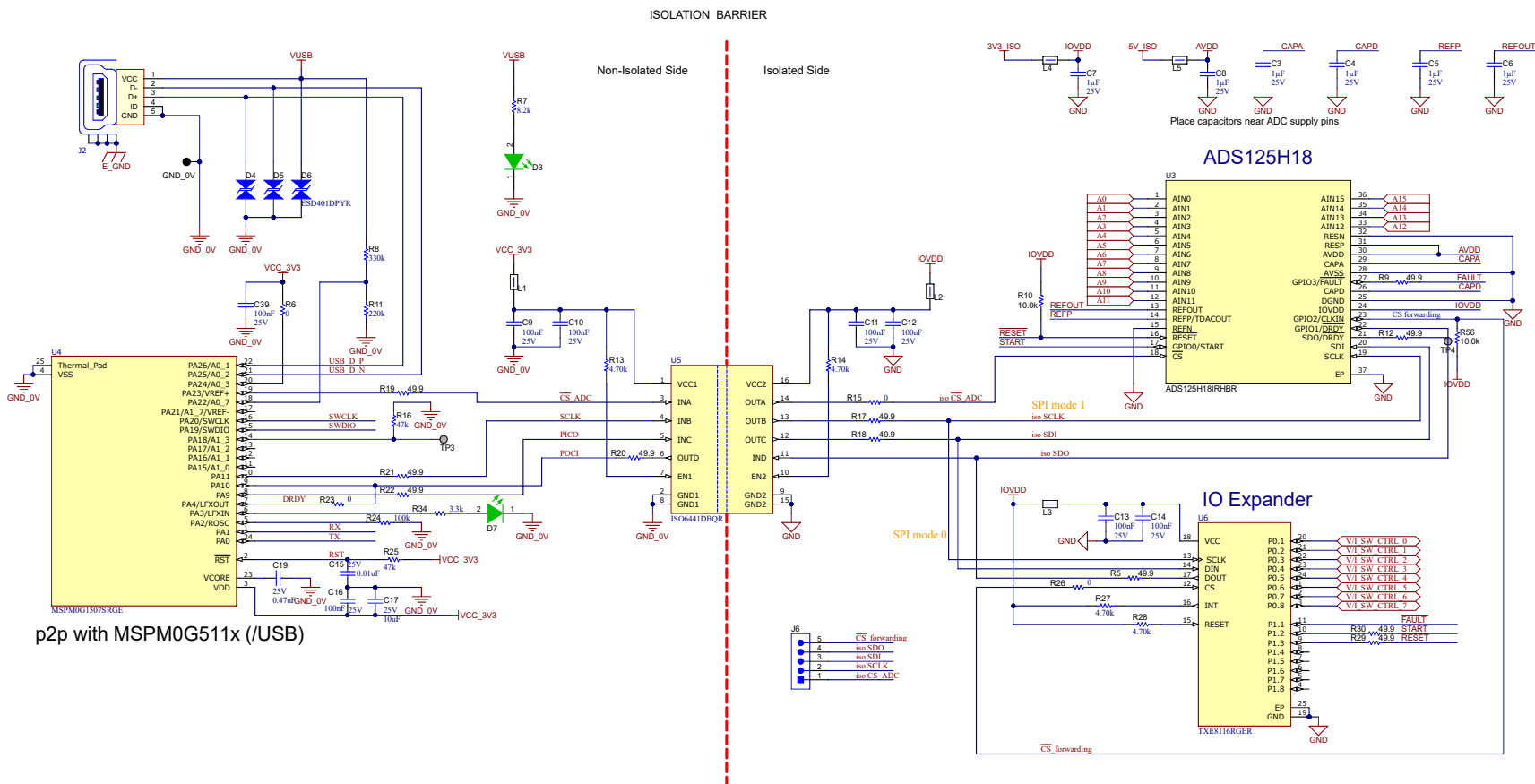


图 3-6. 数字控制和数据采集子系统原理图

3.3.1 微控制器平台

参考设计支持两种引脚对引脚兼容的 MCU 选项：MSPM0G5117 和 MSPM0G1507。MSPM0G5117 是主要选项，提供用于评估、配置和数据采集的 USB 连接。MSPM0G1507 为不需要 USB 连接的设计提供了成本更低的选项。

对于支持 USB 的实现，USB 连接器通过保护和支持电路连接至 MCU。D4 - D6 在 USB 线路上提供 ESD 保护，电阻分压器用于 VBUS 检测和相关的 USB 支持功能。0 Ω 选项 R6 支持针对具有 USB 功能的型号的装配选择。MCU 还提供了本地调试和服务接口。

3.3.2 精密 ADC

精密 ADC ADS125H18 (U3) 是隔离式测量域的核心，为八个输入通道提供模拟输入接口和转换引擎。该 ADC 由隔离式电源轨供电，并在 AVDD、IOVDD、CAPA、CAPD、REFP 和 REFOUT 引脚附近放置了本地去耦电容器，以降低电源阻抗并支持低噪声运行。

ADC 通过 SPI 通信，并提供控制和状态信号，包括 START、RESET、DRDY 和 FAULT。控制器和隔离侧支持逻辑使用这些信号来管理转换时序控制和监测器件状态。

GPIO2 用于片选转发功能。为该节点添加了一个上拉电阻器 (R56)，以便在加电和其他空闲条件下使用定义的逻辑电平。虽然上拉电阻器并非严格必要，但 R56 有助于防止在器件被有意选中之前，与下游器件发生意外通信。

3.3.3 共享 SPI 总线与片选转发

该设计采用 ADS125H18 片选转发功能，在 ADC 和 I/O 扩展器之间共享一条 SPI 总线。片选转发功能利用 ADC GPIO 来控制辅助串行外设的片选 (CS) 引脚。片选转发功能使 ADC 能够辅助管理与外部配套器件的 SPI 通信。因此，必须穿过隔离栅的信号数量得到减少，避免了为单独的片选信号增加额外的专用隔离器通道。

ADC 在 SPI 模式 1 下运行，而 I/O 扩展器在 SPI 模式 0 下运行。MCU 根据需要切换 SPI 模式，并利用 ADC 的转发路径通过同一条隔离 SPI 总线与两个器件通信，同时保持确定性的器件选择。

数字接口线上使用串联电阻器 (49.9 Ω) 来实现源端端接并改善信号完整性。串联电阻器有助于抑制快速边沿上的振铃和过冲，并降低 EMI，特别是对于穿过隔离栅或走线较长的信号。这些电阻器应靠近信号驱动器放置。

3.3.4 I/O 扩展器

基于 SPI 的 I/O 扩展器 TXE8116 (U6) 提供了系统所需的额外隔离侧数字控制信号。其主要功能是生成八个 V/I_SW_CTRL 输出，以用于模拟前端中的每通道电压和电流模式选择。TXE8116 还支持与 ADC 相关的控制和监测功能，如 START、RESET 和 FAULT 处理。

本地去耦电容器靠近扩展器的电源引脚放置，以降低隔离域中的数字电源噪声。

3.3.5 可选外部基准

该设计包含一个可选的外部精密电压基准 REF6025 (U7)，以提高精度和温度漂移性能。组装了外部基准选项后，基准驱动 ADC 参考输入，并在本地进行滤波，以保持低噪声基准节点。与仅依赖 ADC 内部基准路径相比，此选项可提高基准精度和温度漂移性能。

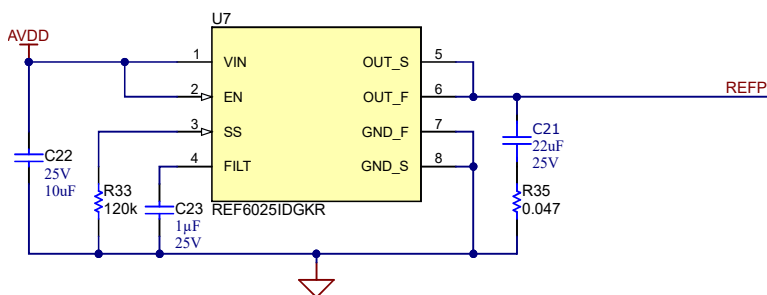


图 3-7. 可选外部基准原理图

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

4.1.1 PCB 概述

图 4-1 和图 4-2 分别展示了 TIDA-010988 PCB 的顶视图和底视图。

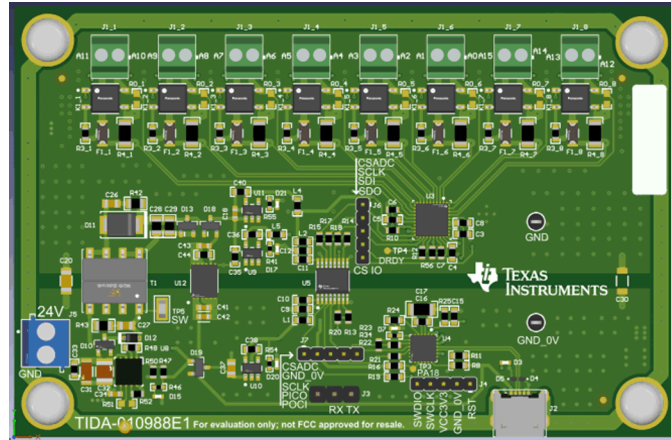


图 4-1. TIDA-010988 PCB 顶视图

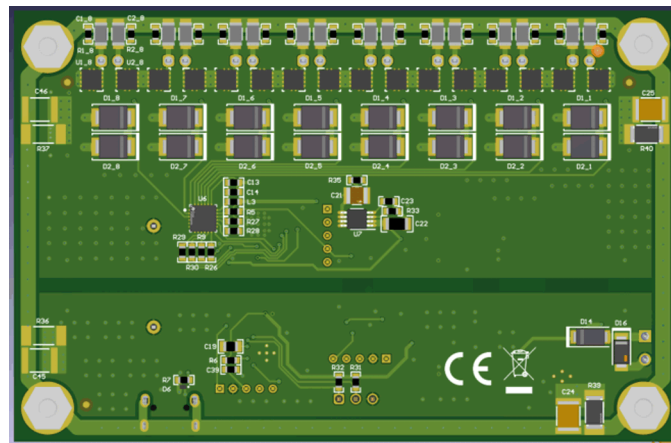


图 4-2. TIDA-010988 PCB 底视图

4.1.2 连接器说明

4.1.2.1 电源连接器

电路板可通过以下任一方式供电：

- 通过连接器 J5 施加的标称 24V 输入电压。
- 通过 J2 建立的标准 micro-USB 连接。

4.1.2.2 输入连接器

表 4-1 介绍了 TIDA-010988 电路板上的不同连接器。

表 4-1. 连接器说明

指示符	说明
J5	24V 现场电源输入
J2	USB 连接，也可为电路板供电
J1-1 至 J1-8	八个通道的模拟输入连接器。默认配置为电压输入模式
J3	UART 连接器，可用于与 CPU 模块进行背板通信

表 4-1. 连接器说明 (续)

指示符	说明
J4	用于固件编程的 MCU 调试连接器

4.2 测试设置和测试结果

4.2.1 ADS125H18 通用配置

表 4-2 汇总了表征期间使用的基准 ADS125H18 配置。除非另有说明，本节中的所有测量均使用此配置采集。

表 4-2. 表征过程使用的 ADS125H18 基准配置

条目	设置
时钟源	内部振荡器
速度模式	高速模式 ($f_{MOD} = 12.8\text{MHz}$)
电压基准	内部 2.5V 基准
数字滤波器	SINC4 (32) + SINC1 (32)
过采样率 (OSR)	1024
时序控制器模式	连续重复单步

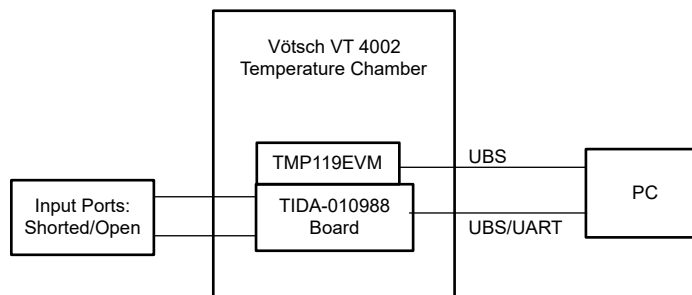
4.2.2 偏移测试

4.2.2.1 测试设置

执行了偏移测试，以评估在电压输入模式和电流输入模式下，零输入条件下模拟输入信号链的残输入参考余误差。

在六个温度点进行了测量： -40°C 、 -20°C 、 25°C 、 85°C 、 105°C 和 125°C 。测试期间，参考设计板放置在温箱 (Vötsch VT 4002) 内。TMP119EVM 放置在靠近电路板的位置，以监测被测硬件附近的局部温度。在每个温度点，允许温箱在开始数据采集前保持稳定约一小时。

对于电压输入偏移测试，所有八个通道均配置为电压模式，并在参考设计板的相应输入端子上短接。对于电流输入偏移测试，所有八个通道均配置为电流模式，并在参考设计板的相应输入端子上保持开路。每次测量期间，所有八个通道均配置为相同的输入模式。图 4-3 展示了偏移测试设置。


图 4-3. 全温度范围偏移测试设置

器件配置并加电后，使用 ADS125H18 的自动时序控制功能连续采集转换数据。图 4-4 展示了测量中使用的 ADC 数据采集时序。对于每个通道，连续采集 1,024 个样本，然后再切换到扫描序列中的下一个通道。采集从 CH1 开始，依次进行直至 CH8。因此，通道数据是顺序采集的，而非同时采集。未应用异常值剔除。测量数据通过串行接口传输到 PC 以进行后处理。

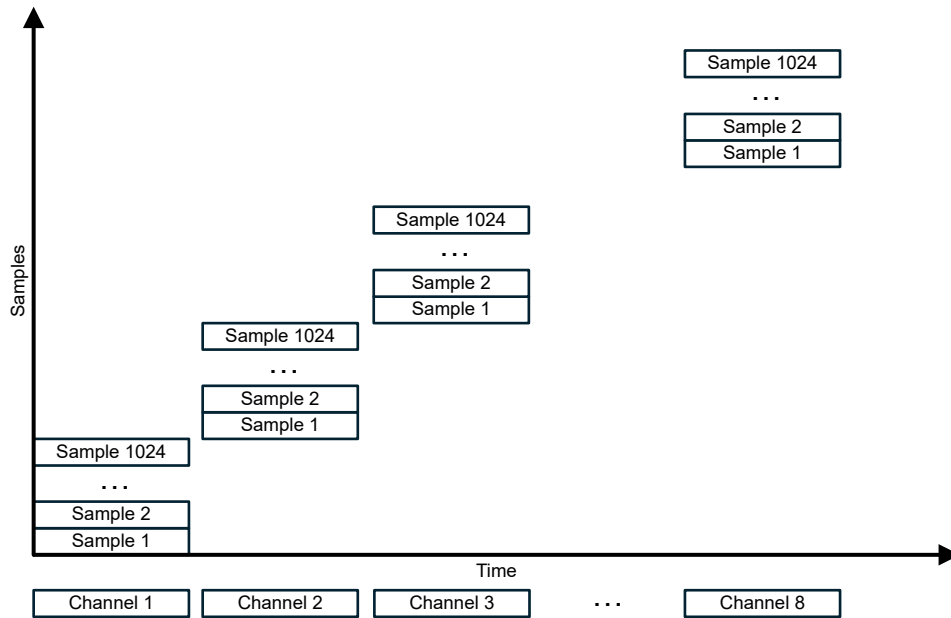


图 4-4. 每个通道 1,024 个样本的顺序 ADC 数据采集时序

4.2.2.2 测试结果

在整个表征温度范围内，采集了电压输入模式和电流输入模式的偏移结果。以下各节分别汇总了各项测量结果。

4.2.2.2.1 电压输入模式

电压输入偏移汇总为八个通道在每个温度点的平均绝对偏移。表 4-3 汇总了电压输入模式下，在 -40°C 、 -20°C 、 25°C 、 85°C 、 105°C 和 125°C 时的平均绝对偏移。结果表明，电压输入偏移在整个温度范围内保持稳定，在大多数温度点，平均绝对偏移接近 1mV ，在 25°C 时观察到的值较低。在整个表征范围内，未观察到异常的温度相关偏离。

表 4-3. 整个温度范围内电压输入模式平均绝对偏移

温度	-40°C	-20°C	25°C	85°C	105°C	125°C
平均绝对偏移 (mV)	1.035	1.031	0.422	1.064	1.047	0.946

图 4-5 至图 4-10 展示了在不同温度下测得的代表性通道 CH4 的偏移分布直方图。这些图提供了每个温度点下偏移特征的样本分布视图。总的来说，在整个表征温度范围内，分布保持单峰状态，未观察到异常分布形状。分布的中心随温度变化而变化，与前面展示的平均偏移趋势一致。与其他温度点相比， 25°C 时的分布更窄，这与在室温附近观察到的平均绝对偏移降低相对应。

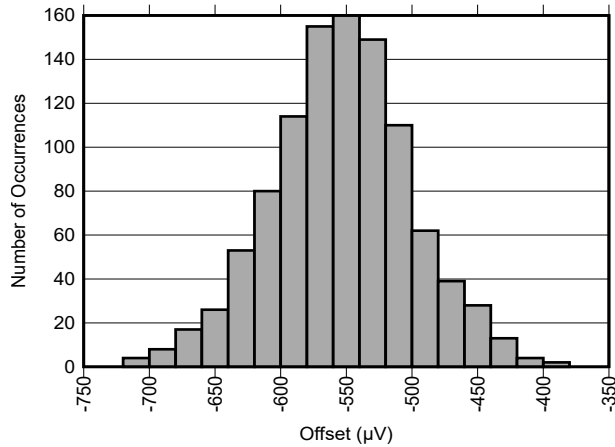


图 4-5. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 -40°C 时的偏移分布直方图

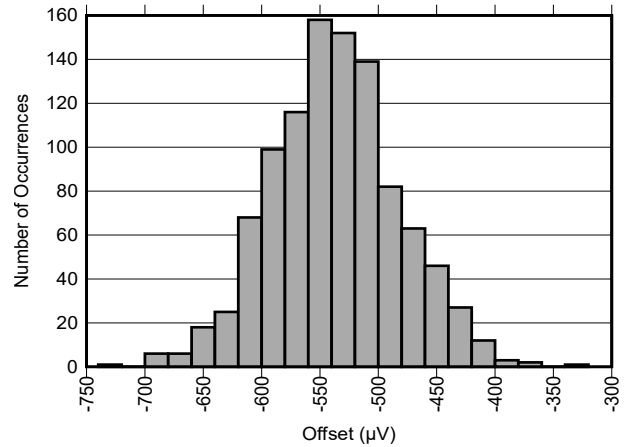


图 4-6. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 -20°C 时的偏移分布直方图

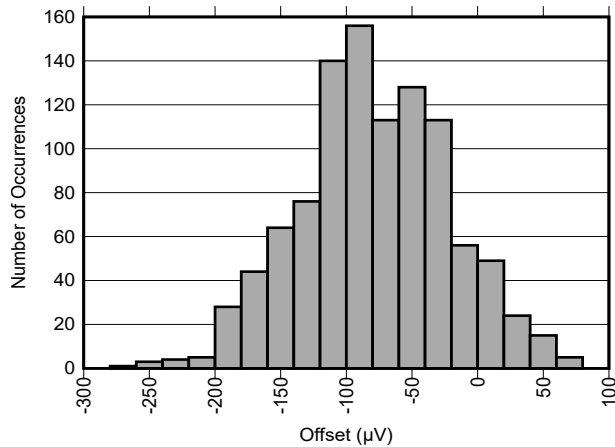


图 4-7. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 25°C 时的偏移分布直方图

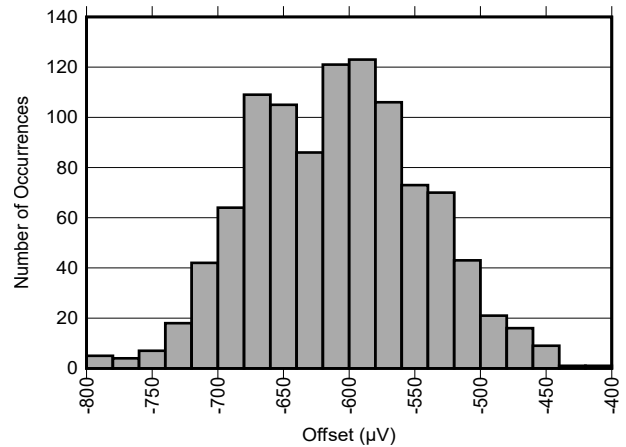


图 4-8. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 85°C 时的偏移分布直方图

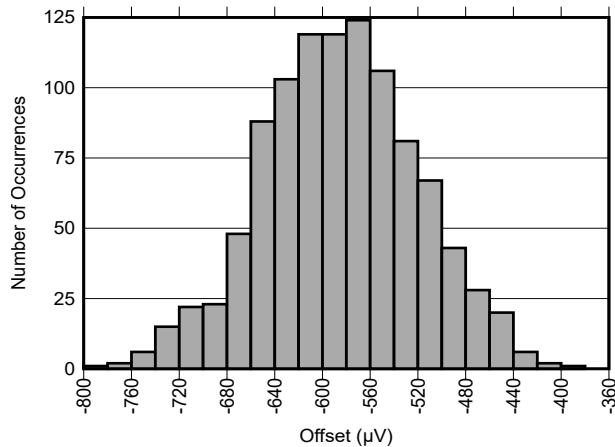


图 4-9. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 105°C 时的偏移分布直方图

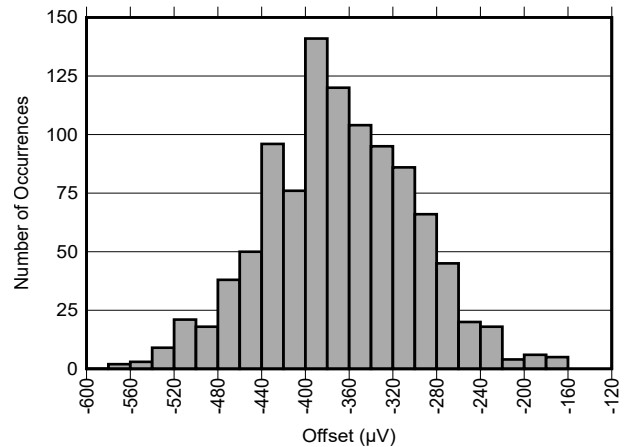


图 4-10. 电压输入模式下代表性通道 CH4 在 125°C 时的偏移分布直方图

4.2.2.2.2 电流输入模式

电流输入偏移以每个温度点八个通道的平均绝对偏移表示，与电压输入模式相同。表 4-4 列出了在 -40°C、-20°C、25°C、85°C、105°C 和 125°C 时，电流输入模式下的平均绝对偏移。测量结果表明，电流输入偏移在整

个温度范围内基本一致，在表征范围的大部分区间，数值约为 $4\ \mu\text{A}$ 。在 125°C 时观察到稍低的值，但没有明显的温度相关异常漂移。

表 4-4. 整个温度范围内电流输入模式平均绝对偏移

温度	-40°C	-20°C	25°C	85°C	105°C	125°C
平均绝对偏移 (μA)	4.151	4.143	4.126	4.263	4.196	3.800

图 4-11 至图 4-16 展示了电流输入模式下，在不同温度下测得的代表性通道 CH4 的偏移分布直方图。直方图显示，在所有表征温度点，样本分布保持良好，没有不规则扩散或不连续的迹象。总的来说，在整个表征范围内，分布保持单峰状态，未观察到异常分布形状。分布的中心随温度略有变化，与表 4-4 中汇总的偏移结果一致。

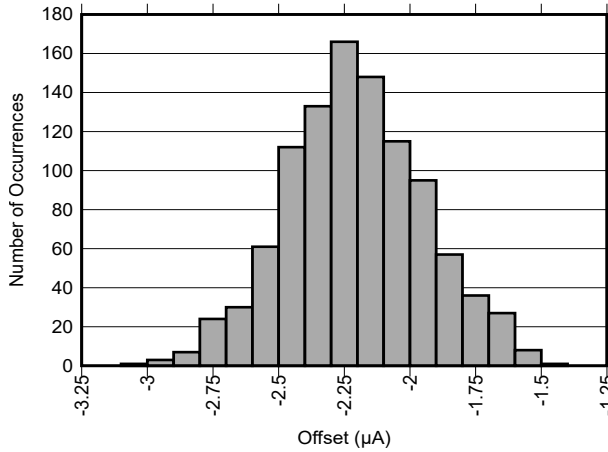


图 4-11. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 -40°C 时的偏移分布直方图

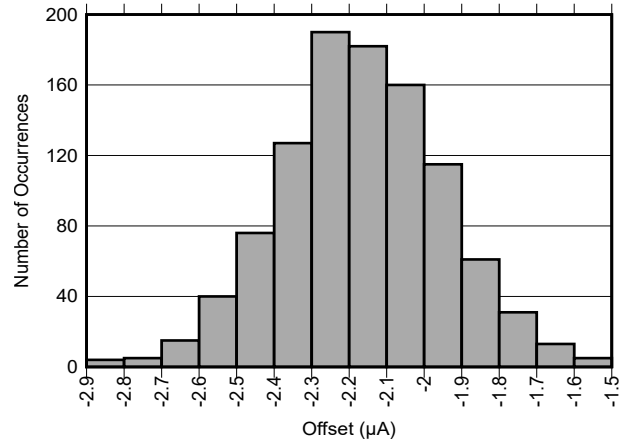


图 4-12. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 -20°C 时的偏移分布直方图

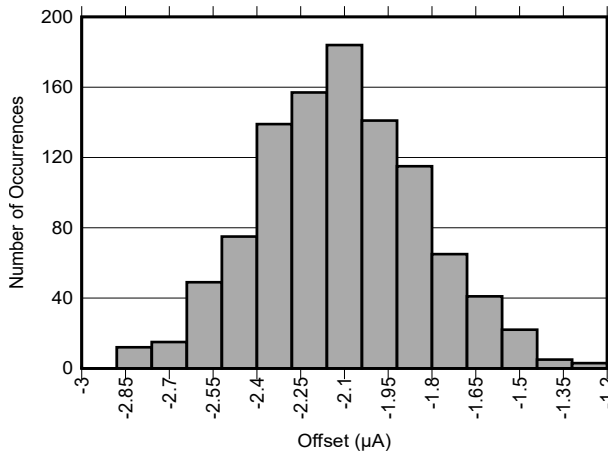


图 4-13. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 25°C 时的偏移分布直方图

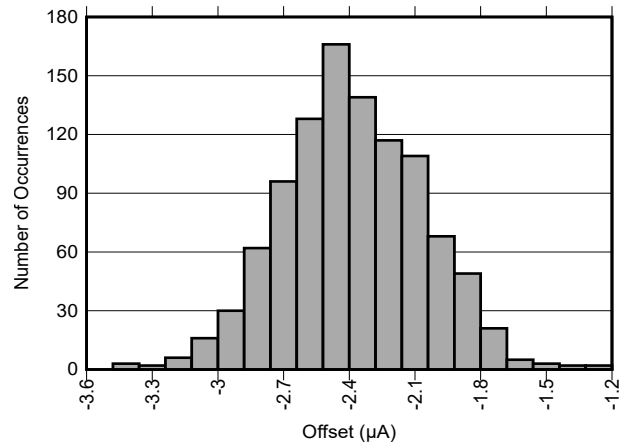


图 4-14. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 85°C 时的偏移分布直方图

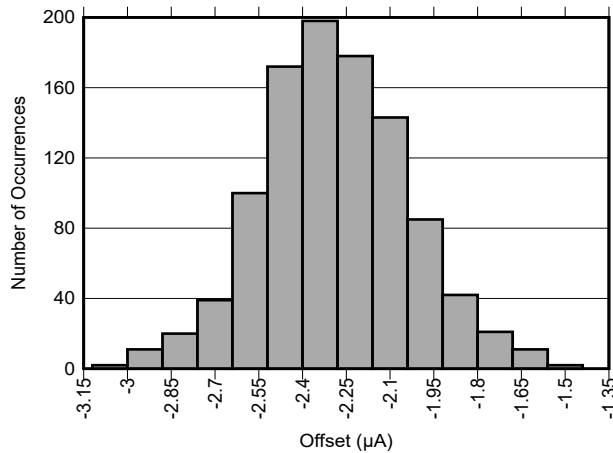


图 4-15. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 105°C 时的偏移分布直方图

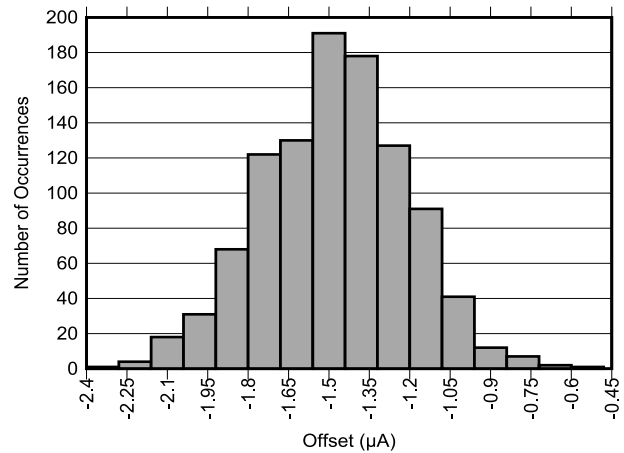


图 4-16. 电流输入模式下代表性通道 CH4 在 125°C 时的偏移分布直方图

4.2.3 系统精度误差和噪声性能测试

4.2.3.1 计算方法

每种测试条件下，每个通道采集 1,024 个样本。除非另有说明，平均测量值、RMS 噪声和 ENOB 均根据每种测试条件下采集的原始 ADC 转换代码计算得出。系统绝对精度误差则另行计算，使用从每个样本得出的转换后电压或电流值，然后以相应的数字万用表 (DMM) 读数为基准进行计算。

每个通道的平均测量值 x_{AVG} 使用 [方程式 1](#) 计算。

$$x_{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} (\text{codes}) \quad (1)$$

其中

- x_i 是样本 i 的测量值
- $N = 1,024$

每个通道的 RMS 噪声使用 [方程式 2](#) 从相同的 1,024 个样本数据集计算得出。以下测试结果中报告的 RMS 噪声值，是通过将计算出的原始 ADC 代码格式 RMS 噪声转换为相应的输入参考电压或电流值而获得的，而 ENOB 则根据原始 ADC 代码格式 RMS 噪声计算得出。

$$\text{RMS Noise} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x_i - x_{AVG}]^2}{N}} (\text{codes}) \quad (2)$$

其中

- x_{AVG} 是通道的平均测量值
- $N = 1,024$

每个样本的系统绝对精度误差以相应的 DMM 基准读数为参照，使用 [方程式 3](#) 计算得出。

$$\text{System Absolute Accuracy Error} = \left| \frac{x_i - x_{REF}}{x_{REF}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

其中

- x_{REF} 是 DMM 测量的相应基准值

ENOB 使用 [方程式 4](#) 根据测得的 RMS 噪声计算得出。

$$\text{ENOB} = \log_2 \left(\frac{2^{24}}{\text{RMS Noise}} \right) (\text{bits}) \quad (4)$$

其中

- 2^{24} 是测量路径的满量程代码范围

4.2.3.2 测试设置

系统精度误差和噪声性能均采用 ADS125H18 基准配置，在电压输入模式和电流输入模式下进行评估。除非另有说明，温度条件、温箱设置和数据采集程序均与偏移测试所采用的设置相同。在六个温度点进行了测量：-40°C、-20°C、25°C、85°C、105°C 和 125°C。

对于电压输入测试，使用电池组作为输入源。施加的输入电平为 +3.3V、-3.3V、+5V、-5V、+10V 和 -10V。所有八个通道并联连接到同一输入源。将一台 6.5 位 DMM (Keysight 34461A) 并联在参考设计板的输入端子上，以监测施加的电压。

对于电流输入测试，输入电流由电池组串联一个精密电阻器来产生。施加的电流电平为 +4mA、-4mA、+10mA、-10mA、+20mA 和 -20mA。首先将 CH1 至 CH4 串联并进行测试，然后使用相同方法测试 CH5 至 CH8。将 DMM 以串联方式插入电流回路中，以监测施加的电流。

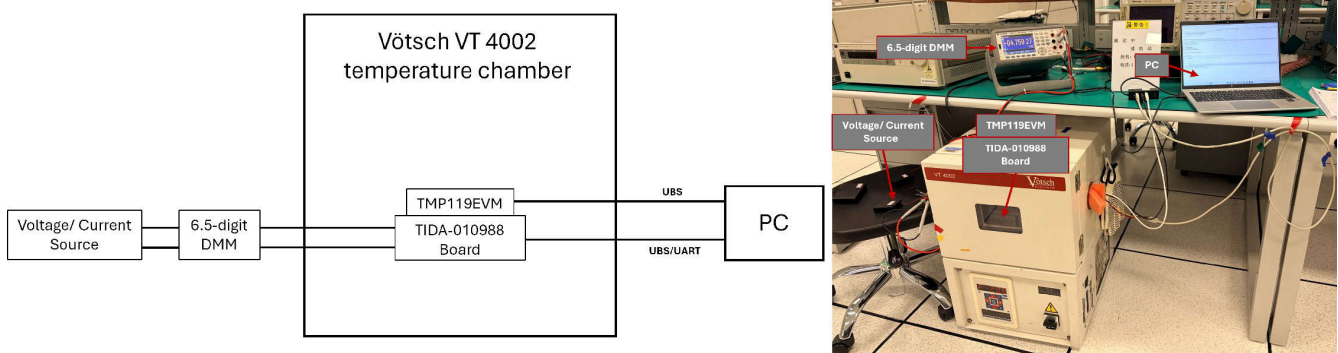


图 4-17. 全温度范围系统精度误差和噪声性能测试设置的方框图和照片

测试期间，将 TIDA-010988 电路板和 TMP119EVM 放置在 Vötsch™ VT 4002 温箱内部，而信号源仪器、DMM 和 PC 留在温箱外部。PC 通过 UART 接口与参考设计板通信，并用于数据记录和后处理。图 4-17 同时展示了用于全温度范围精度误差和噪声评估的系统级测试设置图和实验室设置照片。

4.2.3.3 测试结果

4.2.3.3.1 电压输入模式

表 4-5 汇总了在表征温度范围内，电压输入模式下的 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差。测试的输入电平为 +3.3V、-3.3V、+5V、-5V、+10V 和 -10V。每种测试条件下，每个通道采集 1,024 个样本。计算每个通道的 RMS 噪声，然后取八个通道的平均值。根据相应的 RMS 噪声结果计算得出 ENOB。针对每个测量样本，相对于相应的 DMM 基准值计算得出系统绝对精度误差。将计算出的 1,024 个精度误差值取平均，得到每个通道的精度误差结果。表中报告的值是八个通道结果的平均值。在该表中，RMS 噪声以转换后的电压值形式报告。

表 4-5. 电压输入模式下 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差汇总

输入电压	温度	RMS 噪声 (μV)	ENOB (位)	精度误差 (%)
+3.3V	-40°C	54.99	19.79	0.0486
	-20°C	57.07	19.74	0.0311
	25°C	60.20	19.66	0.0355
	85°C	66.37	19.52	0.0298
	105°C	67.89	19.49	0.0356
	125°C	71.07	19.42	0.0296

表 4-5. 电压输入模式下 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差汇总 (续)

输入电压	温度	RMS 噪声 (μV)	ENOB (位)	精度误差 (%)
-3.3V	-40°C	54.85	19.80	0.0545
	-20°C	56.37	19.76	0.0356
	25°C	61.92	19.62	0.0308
	85°C	65.38	19.54	0.0360
	105°C	68.35	19.48	0.0297
	125°C	69.19	19.46	0.0297
+5V	-40°C	57.84	19.72	0.0449
	-20°C	58.97	19.69	0.0246
	25°C	63.76	19.58	0.0257
	85°C	68.63	19.47	0.0212
	105°C	71.23	19.42	0.0260
	125°C	72.07	19.40	0.0210
-5V	-40°C	56.93	19.74	0.0482
	-20°C	59.34	19.74	0.0255
	25°C	64.04	19.73	0.0212
	85°C	68.74	19.72	0.0255
	105°C	71.06	19.71	0.0201
	125°C	72.66	19.71	0.0206
+10V	-40°C	68.31	19.48	0.0381
	-20°C	72.96	19.39	0.0158
	25°C	76.86	19.31	0.0165
	85°C	83.55	19.19	0.0127
	105°C	87.04	19.13	0.0163
	125°C	88.78	19.10	0.0120
-10V	-40°C	68.66	19.47	0.0412
	-20°C	71.55	19.41	0.0140
	25°C	76.38	19.32	0.0111
	85°C	83.21	19.20	0.0126
	105°C	86.45	19.14	0.0087
	125°C	87.73	19.12	0.0096

如表 4-5 所示，RMS 噪声随温度点和输入幅值的增加而增大。相应地，ENOB 在较高温度和较大输入电平下会下降。这一特征与测得的噪声趋势一致。在整个表征范围内，ENOB 保持相对稳定，在所有测试的电压输入条件下均保持在 19 位以上。

系统绝对精度误差在全温度范围和所有输入极性下保持稳定。一般而言，百分比误差在输入电平较高时较小，在输入电平较低时稍大，这符合归一化精度误差指标的预期。正负输入条件在整个表征范围内表现出的性能相当，在温度极值点未观察到异常偏离。

图 4-18 展示了在电压输入模式下，不同输入电平的最差通道系统绝对精度误差与温度的关系。在每个温度点，每个通道的精度误差由 1,024 个计算样本误差取平均获得，图中绘制的值代表八个通道中最差通道的误差。相比之下，表 4-5 报告的是八个通道结果的平均值。

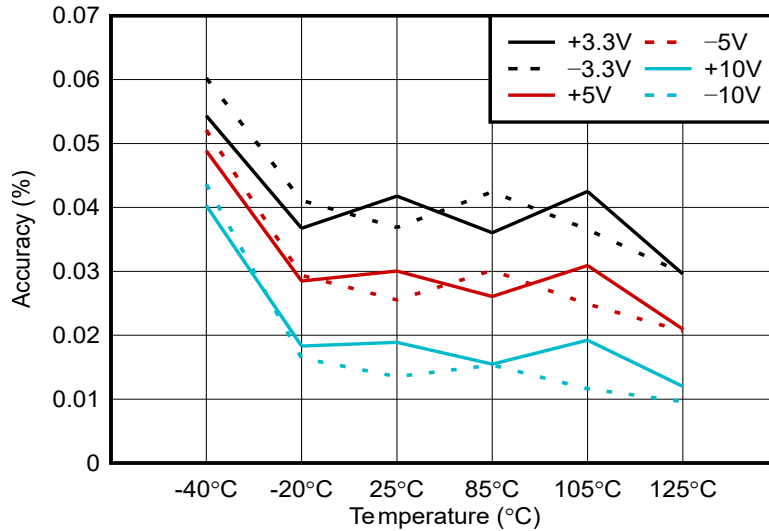


图 4-18. 电压输入模式下最差通道系统绝对精度误差与温度的关系

结果表明，最差通道系统绝对精度误差在测试温度最低时最高，在 -20°C 至 125°C 范围内保持相对一致。误差在输入幅值较低时通常较大，在输入幅值较高时较小， $\pm 10\text{V}$ 条件下误差最低， $\pm 3.3\text{V}$ 条件下误差最高，符合基于百分比的精度误差指标的预期。正负输入电平在整个温度范围内表现出类似的趋势，表明在所有输入极性下的性能均衡。

图 4-19 展示了电压输入模式下， $+3.3\text{V}$ 、 -3.3V 、 $+5\text{V}$ 、 -5V 、 $+10\text{V}$ 和 -10V 输入电平的 RMS 噪声与温度的关系。在每个温度点，绘制的值代表八个通道的平均 RMS 噪声，其中每个通道的 RMS 噪声根据 1,024 个测量样本计算得出。

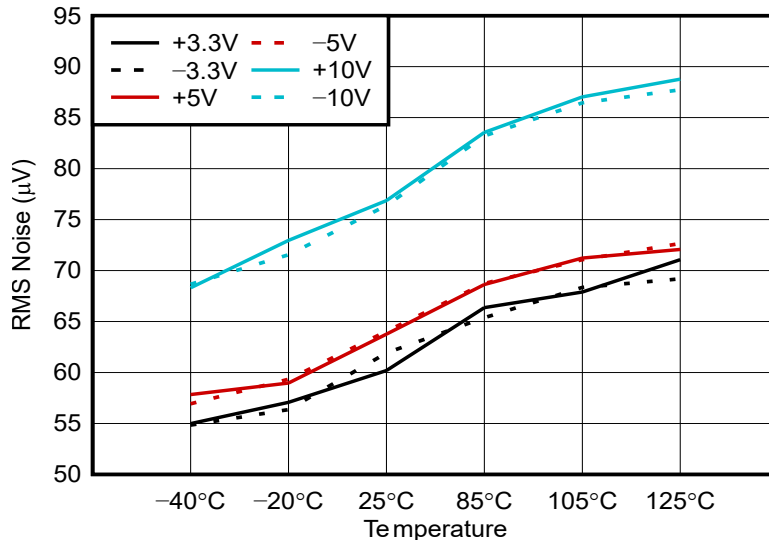


图 4-19. 电压输入模式 RMS 噪声与温度的关系

结果表明，在所有测试的输入电平下，RMS 噪声随温度升高而明显增大。较高的输入幅值也往往会产生较大的 RMS 噪声，在整个表征范围内的大部分区间， $\pm 10\text{V}$ 输入条件下表现出最大的噪声值。正负输入条件呈现出相似的趋势，表明在所有输入极性下的电压输入噪声性能一致。

图 4-20 至图 4-22 展示了在电压输入模式下，通道 4 在 $+10\text{V}$ 输入时，于 -40°C 、 25°C 和 125°C 下的输出分布直方图。选择了通道 4 作为代表性通道，以说明在整个温度范围内的分布特征。

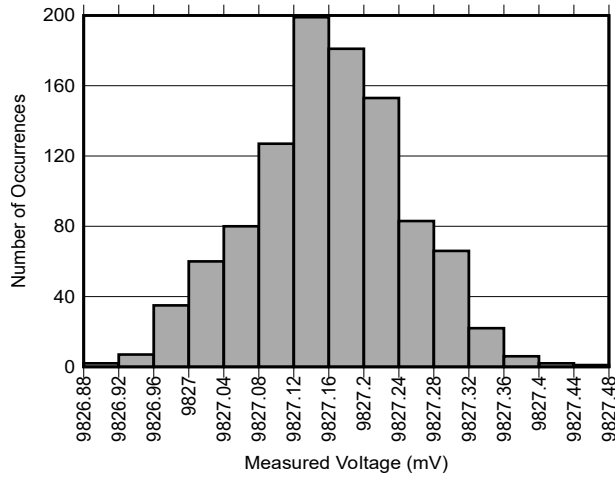


图 4-20. CH4 在 +10V、-40°C 下测得的电压分布直方图

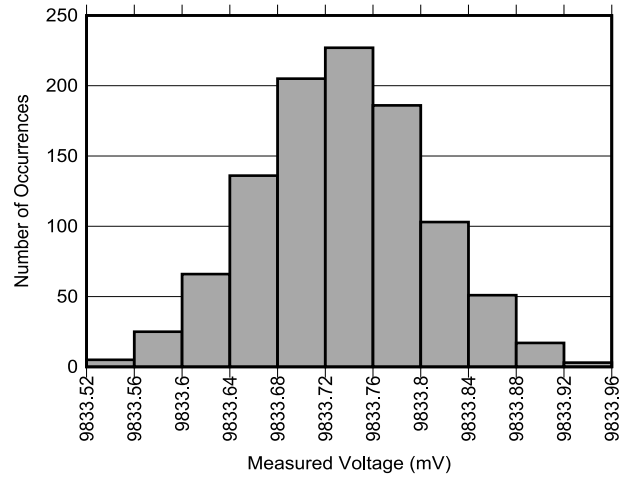


图 4-21. CH4 在 +10V、25°C 下测得的电压分布直方图

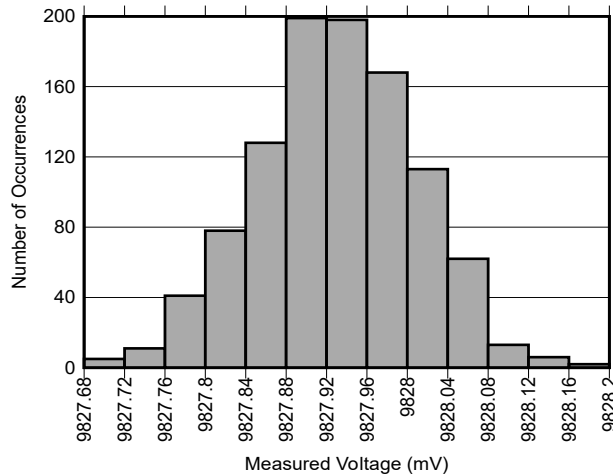


图 4-22. CH4 在 +10V、125°C 下测得的电压分布直方图

直方图表明，在整个表征温度范围内，输出分布保持单峰且近似于高斯分布，未观察到异常失真或不连续性。分布宽度随温度升高而增加，这与图 4-19 中所示的 RMS 噪声趋势一致。这些结果表明了通道特征稳定，电压输入噪声性能整个温度范围内保持一致。

4.2.3.3.2 电流输入模式

表 4-6 汇总了在 -40°C 至 125°C 的表征温度范围内，电流输入模式下，+4mA、-4mA、+10mA、-10mA、+20mA 和 -20mA 输入电平的 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差。RMS 噪声以转换后的电流值形式报告。

表 4-6. 电流输入模式下 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差汇总

输入电流	温度	RMS 噪声 (nA)	ENOB (位)	精度误差 (%)
+4mA	-40°C	215.81	19.83	0.1189
	-20°C	223.30	19.78	0.1386
	25°C	242.01	19.66	0.1294
	85°C	260.19	19.56	0.1308
	105°C	265.82	19.53	0.1348
	125°C	272.99	19.49	0.1212

表 4-6. 电流输入模式下 RMS 噪声、ENOB 和系统绝对精度误差汇总 (续)

输入电流	温度	RMS 噪声 (nA)	ENOB (位)	精度误差 (%)
-4mA	-40°C	215.75	19.83	0.1095
	-20°C	223.51	19.78	0.1133
	25°C	240.66	19.67	0.1129
	85°C	258.38	19.57	0.0990
	105°C	265.94	19.53	0.1018
	125°C	267.63	19.52	0.1136
+10mA	-40°C	221.44	19.79	0.0717
	-20°C	229.05	19.74	0.1020
	25°C	247.42	19.63	0.0871
	85°C	263.46	19.54	0.0807
	105°C	269.85	19.51	0.0859
	125°C	280.35	19.45	0.0788
-10mA	-40°C	221.79	19.79	0.0660
	-20°C	229.57	19.74	0.0893
	25°C	245.30	19.64	0.0812
	85°C	264.69	19.53	0.0730
	105°C	272.33	19.49	0.0718
	125°C	278.54	19.46	0.0778
+20mA	-40°C	233.00	19.72	0.0691
	-20°C	244.95	19.65	0.1053
	25°C	265.18	19.53	0.0899
	85°C	285.40	19.42	0.0847
	105°C	284.98	19.43	0.0896
	125°C	296.73	19.37	0.0855
-20mA	-40°C	233.89	19.71	0.0592
	-20°C	242.26	19.66	0.0993
	25°C	259.43	19.56	0.0819
	85°C	283.78	19.43	0.0694
	105°C	286.16	19.42	0.0769
	125°C	300.20	19.35	0.0824

总体而言，对于所有测试的输入电平，RMS 噪声随温度升高而增大，而 ENOB 随温度升高而相应降低。系统绝对精度误差在整个温度范围内保持相对稳定，±10mA 和 ±20mA 输入条件通常表现出比 ±4mA 条件更低的精度误差。在所有测试的电流电平和温度下，测量结果表明电流输入测量性能随温度变化而保持稳定。

图 4-23 展示了在电流输入模式下，不同输入电平的最差通道系统绝对精度误差与温度的关系。在每个温度点，每个通道的精度误差由 1,024 个计算样本误差取平均获得，图中绘制的值代表八个通道中最差通道的误差。相比之下，表 4-6 报告的是八个通道结果的平均值。

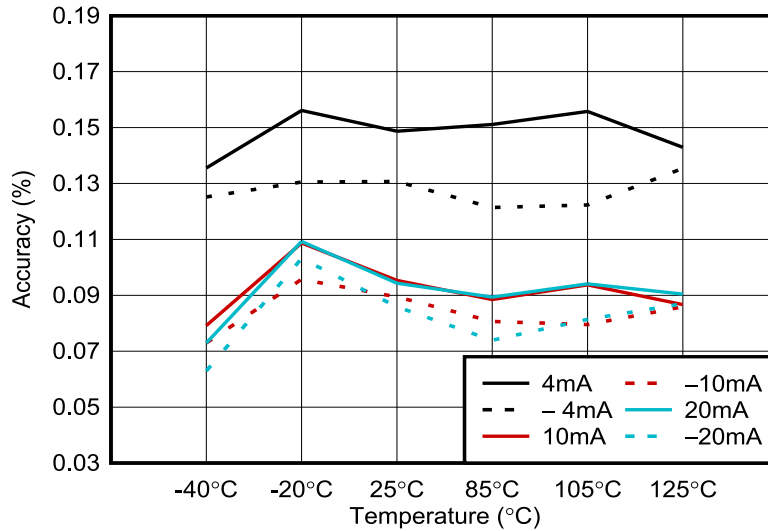


图 4-23. 电流输入模式下最差通道系统绝对精度误差与温度的关系

结果表明，对于所有测试的电流输入电平，在整个表征温度范围内，最差通道的精度误差得到了很好的控制。 $\pm 10\text{mA}$ 和 $\pm 20\text{mA}$ 输入条件通常表现出比 $\pm 4\text{mA}$ 条件更小的误差。负电流输入条件也表现出比相应的正电流输入条件稍小的误差。总体而言，曲线显示出电流输入精度性能在整个温度范围内保持一致。

图 4-24 展示了在电流输入模式下，不同输入电流的 RMS 噪声与温度的关系。在每个温度点，绘制的值代表八个通道的平均 RMS 噪声，其中每个通道的 RMS 噪声根据 1,024 个测量样本计算得出。

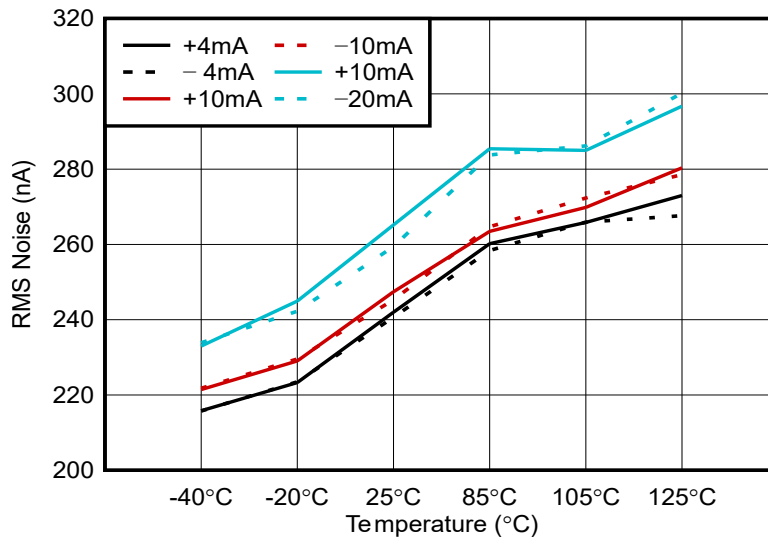


图 4-24. 电流输入模式 RMS 噪声与温度的关系

结果表明，在所有测试的电流输入电平下，RMS 噪声随温度升高而明显增大。总的来说，在整个表征温度范围内的大部分区间， $\pm 20\text{mA}$ 输入条件表现出最高的 RMS 噪声。正负电流输入条件呈现出相似的温度趋势，表明在所有输入极性下的噪声性能一致。

图 4-25 至图 4-27 展示了在电流输入模式下，通道 4 在 -40°C 、 25°C 和 125°C 以及 $+20\text{mA}$ 输入下的测量电流分布直方图。在所有三个温度点，测得的电流分布均保持单峰且形态良好，没有可见的次峰或异常形状。这些柱状图为电流输入噪声性能的温度依赖性提供了一个定性视图。

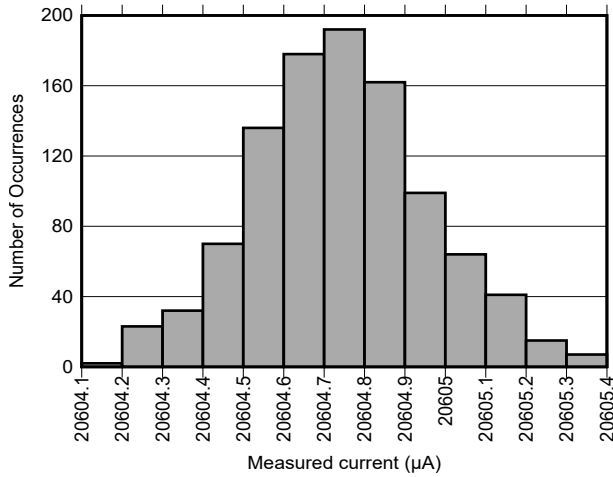


图 4-25. CH4 在 +20mA、-40°C 下测得的电流分布直方图

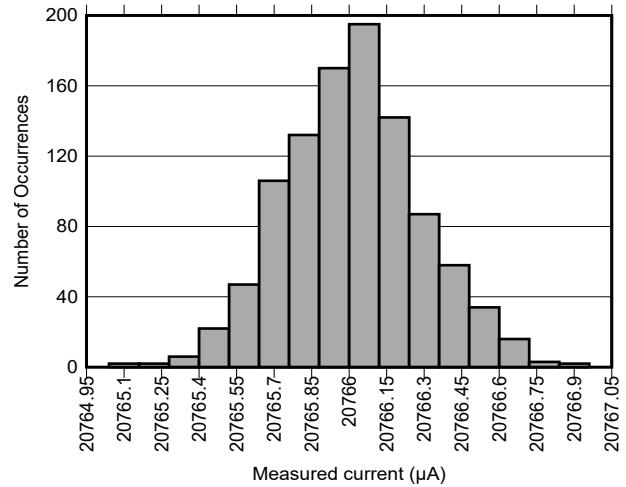


图 4-26. CH4 在 +20mA、25°C 下测得的电流分布直方图

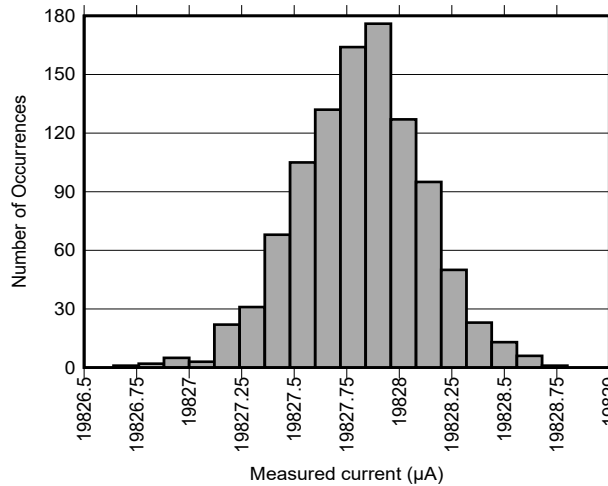


图 4-27. CH4 在 +20mA、125°C 下测得的电流分布直方图

4.2.4 输入保护测试

本节评估用于电流输入模式分流路径的过压保护网络。被测保护网络由背对背齐纳二极管和用在电流输入信号路径中的 PTC 保险丝组成。此测试的目的是，验证在电流传感路径上发生输入过压事件时，保护电路能否钳制受保护节点的电压，限制持续的故障电流，并在过压消除后恢复。测试重点是电流输入模式分流保护网络的稳态过压特征。与 TVS 器件相关的瞬态浪涌和 EMC 事件保护性能另行评估。

4.2.4.1 测试设置

图 4-28 展示了用于电流输入模式分流路径的测试设置和保护电路。评估针对的是基于分流器的电流输入保护电路。测试期间，器件配置为电流输入模式，并在电流输入端子上施加直流过压以模拟故障条件。

在电流输入模式下，分流路径通常将输入电流转换为可测量的电压。过压故障期间，过大的电流可能会对此路径造成应力。保护电路旨在钳制受保护节点的电压并限制持续故障电流。背对背齐纳二极管网络将节点钳制至大约 11V 标称钳位电平，同时 PTC 保险丝升温并切换到更高电阻状态，从而降低故障电流。输入端的 TVS 器件也会提供额外的瞬态保护。

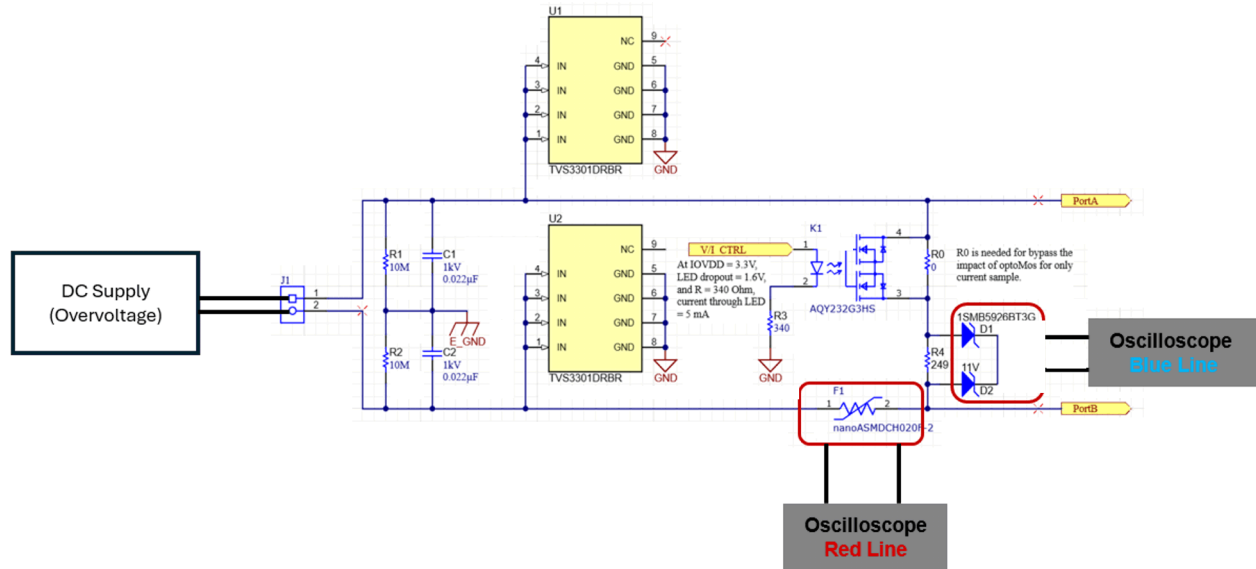


图 4-28. 电流输入模式保护电路的过压测试设置

使用示波器监测保护响应。蓝色示波器迹线代表背对背齐纳二极管网络两端的电压，红色迹线代表 PTC 保险丝两端的电压。可利用这些波形来观察施加过压后的保护响应以及故障解除后的恢复特征。本节测得的时序值仅作为代表性结果提供，因为具体值取决于施加的故障电平、热条件和波形阈值定义。

4.2.4.2 测试结果

图 4-29 和图 4-30 分别展示了电流输入模式下，24V 和 30V 输入过压时测得的保护波形。在两项测试中，蓝色波形显示背对背齐纳二极管网络在故障期间将受保护节点电压钳制至齐纳钳位电平附近。红色波形显示施加过压后 PTC 保险丝两端的电压升高，表明 PTC 对故障条件作出响应并过渡到更高电阻状态。

这些结果符合电流输入模式分流保护路径的预期运行情况。齐纳网络提供电压钳制，而 PTC 保险丝限制持续的故障电流并降低分流路径上的应力。移除过压源后，PTC 保险丝两端的电压恢复到初始水平，表明保护路径恢复。测得的波形与电流输入模式下分流网络的预期保护特征一致。

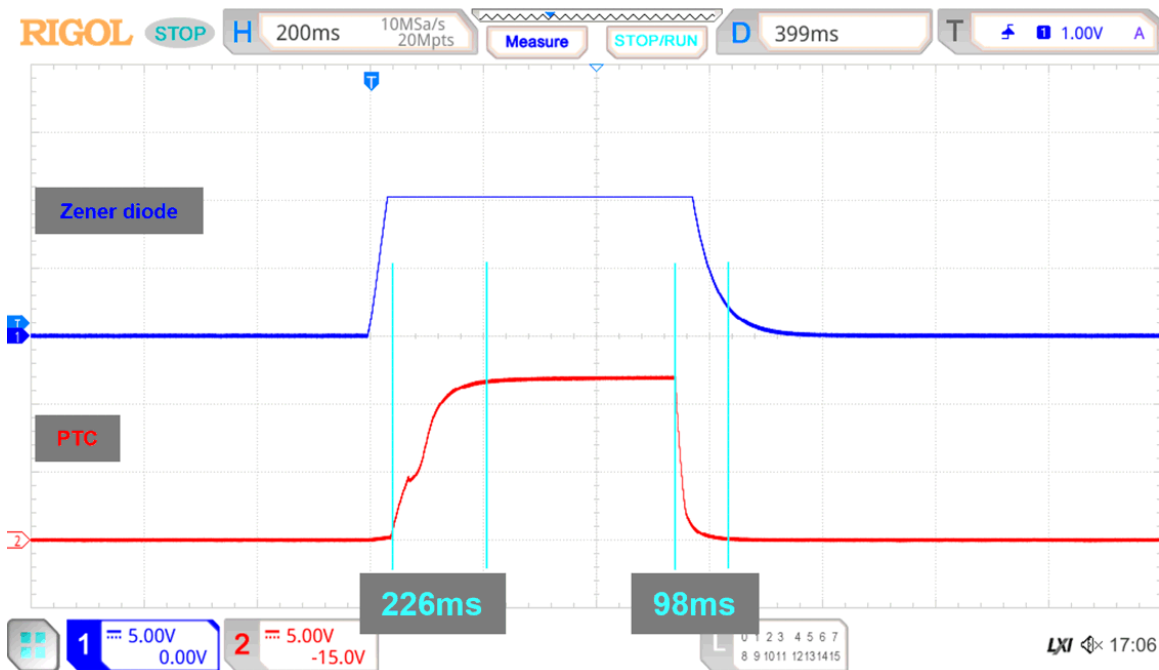


图 4-29. 电流输入模式下 24V 过压时测得的保护响应



图 4-30. 电流输入模式下 30V 过压时测得的保护响应

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-010237](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010237](#) 中的设计文件。

5.1.3 PCB 布局建议

要下载 PCB 布局，请查看 [TIDA-010237](#) 中的设计文件。

5.1.3.1 布局图

5.2 工具与软件

5.2.1 工具

5.2.2 软件

5.3 文档支持

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](#)。

商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Vötsch™ is a trademark of Weiss Technik GmbH.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 修订历史记录

日期	修订版本	注释
May 2026	*	初始发行版

7 作者简介

DONNA XU 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向工业应用的参考设计。她在工业自动化应用领域拥有丰富经验，以 PLC I/O 模块作为研究重点。她拥有复旦大学电子信息专业硕士学位。

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