

## Design Guide: TIDA-010982

## 现场变送器平台：4mA 至 20mA 环路供电接口参考设计



## 说明

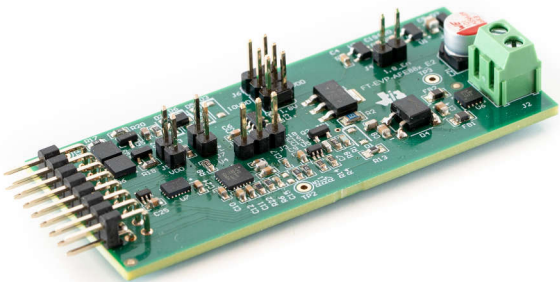
此参考设计提供了用于 2 线环路供电式传感器的 4 - 20mA 接口实现示例。此设计支持在采用 1.8V 信号链的较低功耗应用类环境中评估 AFE881H1 和 AFE882H1。AFE881H1 和 AFE882H1 集成了高精度 16 位 DAC 和 HART® 调制解调器。此参考设计在一个引脚接头上提供串行外设接口 (SPI) 和通用异步接收器-发送器 (UART) 接口，以连接微控制器。该引脚接头提供 3.3V 和 1.8V 电压来为连接的微控制器供电，并提供 1.25V 参考电压用于 ADC。

## 资源

<a href="#">TIDA-010982</a>	设计文件夹
<a href="#">AFE881H1、AFE882H1</a>	产品文件夹
<a href="#">OPA391、TPS7A03</a>	产品文件夹
<a href="#">REF35、TVS3301、ADS122S14</a>	产品文件夹
<a href="#">TMUX1219、SN74LV8T165</a>	产品文件夹
<a href="#">MSPM0-SDK , SNSR-DUAL-ADC-EVM</a>	工具文件夹



请咨询 TI E2E™ 支持专家

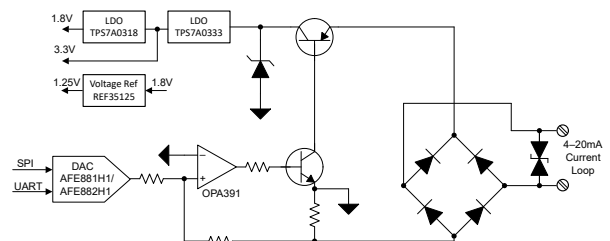


## 特性

- 适用于 2 线环路供电传感器的 4 - 20mA 环路接口实现
- 完整的 1.8V 信号链可实现低功耗并保持高精度
- AFE88xH1 16 位 DAC，集成参考电压和 HART 调制解调器
- MCU 接口提供电源输出 ( 1.8V、3.3V、1.25V 参考电压 )、SPI 和 UART 接口

## 应用

- [流量变送器](#)
- [液位变送器](#)
- [压力变送器](#)
- [温度变送器](#)
- [模拟输出模块](#)



## 1 系统说明

此参考设计为环路供电式传感器实现了 4 - 20mA 电流环路接口。设计中包含一个 16 位 DAC，即 AFE881H1 或 AFE882H1。DAC 输出电压驱动一个 OPA391 运算放大器将电压转换为电流。

此设计集成了具有 1.8V 或 3.3V 输出选项的电源。配置设置决定使用 1.8V 还是 3.3V 来为电路板上的模拟电路和连接的 MCU 供电。使用具有低  $I_Q$  的低压降 (LDO) 稳压器 (TPS7A0333 和 TPS7A0318) 来保持稳定、高效的电源输出，将系统的可用电力保持在高电平。

此设计包含用于 MCU 的分立式 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) CSD25404 电源开关。此电源开关控制连接到 MCU 的连接器上的 1.8V 和 3.3V 导轨。额外的大容量电容支持超过环路限制的启动电流。在进入低功耗模式之前，电容器为 MCU 初始化供电。

### 1.1 主要系统规格

参数	规格
环路电源电压	8V 至 30V
环路电流范围	3mA 至 24mA
分辨率	16 位
RMS 噪声	< 0.5 $\mu$ A
峰值间噪声	< 3 $\mu$ A
稳定时间	< 1ms
电源输出	3.3V、1.8V
电源输出电流	2mA
基准电压输出	1.25V
用于连接 MCU 的接口	SPI、UART

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

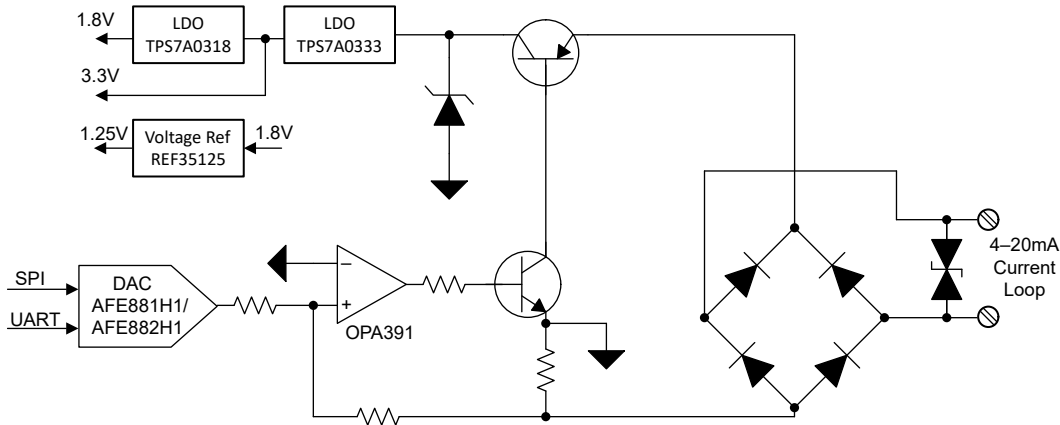


图 2-1. TIDA-010982 方框图

### 2.2 设计注意事项

此设计实现用于现场变送器和传感器的 4mA 至 20mA 输出级。AFE881H1 和 AFE882H1 集成了具有高达 16 位高分辨率的数模转换功能。低功耗使系统能够直接由环路电源供电运行。此外，AFE 还集成了调制解调器，支持 HART 通信功能。借助 AFE881H1，整个设计可由单个 1.8V 电源供电运行。

通过在输入端使用格拉茨桥实现极性反转保护，支持在任一极性下运行。TVS3301 TVS 二极管提供了过压保护，可防止电压电平过高。使用铁氧体磁珠降低高频噪声。

电流调节通过一个导通晶体管搭配齐纳二极管和第一个 LDO 来实现。系统灌入部分电流，其余部分主要灌入齐纳二极管，从而实现在多个器件之间分摊功率耗散并尽可能降低热应力。专用运算放大器将 DAC 的输出电压转换为环路电流。

LDO 提供两个 1.8V 和 3.3V 电源为系统元件供电。板载电路直接提供稳定的 1.25V 参考电压。也可以通过引脚接头访问参考电压输出。

### 2.3 重点产品

#### 2.3.1 TPS7A03

TPS7A03 是一款超小型超低静态电流、低压差线性稳压器 (LDO)，可输出 200mA 电流，具备优异的瞬态性能。

TPS7A03 具有 200nA 超低  $I_Q$ ，专为将超低静态电流作为关键参数的应用而设计。此器件即使在压降模式下也能保持低  $I_Q$  消耗，从而进一步延长电池寿命。在关断或禁用模式下，该器件消耗 3nA 的超低  $I_Q$ ，有助于延长电池保质期。

TPS7A03 的输出范围为 0.8V 至 5.0V，步长为 50mV，可支持更低的现代微控制器 (MCU) 内核电压。

TPS7A03 具有包含内部控制下拉电阻器的智能使能电路，该电阻器即使在 EN 引脚悬空时也能让 LDO 保持禁用状态，有助于更大程度地减少用于下拉 EN 引脚的外部元件。此电路还有助于在器件处于使能状态时，大幅减少通过外部下拉电路消耗的电流。

#### 2.3.2 REF35

REF35 是毫微功耗、低漂移、高精度串联基准系列器件之一。REF35 系列具有  $\pm 0.05\%$  的初始精度，典型功耗为 650nA。该器件的温度系数 (12ppm/°C) 和长期稳定性 (1000 小时内为 40ppm) 有助于提高系统稳定性和可靠性。凭借低功耗以及高精度规格，此器件适用于多种便携式应用和低电流应用。

REF35 可提供高达 10mA 电流，噪声为 3.3ppm<sub>p-p</sub>，负载调整率为 20ppm/mA。借助这一功能集，REF35 可为精密传感器和 12 至 16 位数据转换器提供强大的低噪声高精度电源。

### 2.3.3 TVS3301

TVS3301 器件可将高达 27A 的 IEC 61000-4-5 故障电流进行分流，以保护系统免受高功率瞬态冲击或雷击。该器件满足 1kV IEC 61000-4-5 开路电压（通过 42Ω 阻抗耦合）的通用工业信号线 EMC 要求。TVS3301 采用反馈机制在故障期间提供精准的平缓钳位，使系统暴露电压低于传统 TVS 二极管。严格的电压调节使设计人员能自信地选用更低耐压的系统元件，降低系统成本与复杂度，而不会牺牲稳健性。TVS3301 具备 ±33V 工作电压范围，支持在需要防反接布线的系统中运行。

此外，TVS3301 采用小型 SON 封装，专为空间受限的应用而设计，与标准 SMA 和 SMB 封装相比，其尺寸显著减小。低器件泄露电流和电容更大限度地降低了对受保护线路的影响。为了在产品的整个寿命期间提供可靠保护，TI 在 125°C 下对 TVS3301 进行了 5000 次重复浪涌冲击测试，但器件性能未发生任何变化。

### 2.3.4 OPA391

OPA391、OPA2391 和 OPA4391 (OPAx391) 精密放大器器件具有高带宽 (1MHz) 和超低静态电流 (24 μA) 的独特组合。这些特性加上轨到轨输入和输出，使这些器件成为高增益、低功耗应用的理想选择。10fA 的超低输入偏置电流、仅 45 μV 的偏移电压（最大值）和 1.2 μV/°C 的温漂有助于在具有严苛低功耗要求的比例式传感器和电流分析传感器前端中保持高精度。

OPAx391 使用德州仪器 (TI) 专有的 e-trim™ 运算放大器技术，实现了超低偏移电压和低输入温漂的独特组合，无需任何输入切换或自动置零技术。基于 CMOS 的技术平台还采用现代、稳健的输出级设计，可耐受高输出电容，从而缓解典型低功耗放大器中常见的稳定性问题。

### 2.3.5 AFE881H1

16 位 AFE881H1 和 14 位 AFE781H1 (AFEx81H1) 是具有电压输出的高度集成、高精度、极低功耗的数模转换器 (DAC)，专为支持 HART 的传感器变送器应用而设计。

AFEx81H1 器件包含设计 4mA 至 20mA、2 线（环路供电）传感器变送器所需的大多数元件。除了高精度 DAC 之外，这些器件还包括一个经 HART 认证的频移键控 (FSK) 调制解调器、10ppm/°C 电压基准和一个诊断模数转换器 (ADC)。为满足内在和功能安全方面的要求，需要进行外部电压至电流转换和功率调节。

内部诊断 ADC 多路复用为多个内部节点，可实现自动自我运行状况检查。如果从诊断 ADC、CRC 帧错误校验或窗口化看门狗计时器检测到任何故障，这些器件可以选择发出中断，进入与标准 NAMUR 输出值和/或用户指定的自定义值相对应的失效防护状态。

这些器件采用低至 1.71V 的电源供电，最大静态电流为 220 μA。这些器件的额定工作温度范围为 -40°C 至 +125°C，但工作温度范围为 -55°C 至 +125°C。

### 2.3.6 AFE882H1

16 位 AFE882H1 和 14 位 AFE782H1 (AFEx82H1) 是具有电压输出的高度集成、高精度、极低功耗的 DAC，专为支持 HART 的过程控制和工业自动化应用而设计。

AFEx82H1 器件包含设计 4mA 至 20mA 3 线或 4 线制传感器变送器或模拟输出模块所需的大多数元件。除了高精度 DAC 之外，这些器件还包括一个符合 HART® 标准的 FSK 调制解调器、10ppm/°C 电压基准和一个诊断模数转换器 (ADC)。为满足本质安全和功能安全方面的要求，需要进行外部电压至电流转换和功率调节。

内部诊断 ADC 被多路复用到多个内部节点，以实现运行状况自动自检。此检查能够检测内部偏置源、电源稳压器、电压基准、DAC 输出、芯片温度和可选外部电压源的错误或故障。如果从诊断 ADC、CRC 帧错误校验或窗口化看门狗计时器检测到任何故障，这些器件可以选择发出中断和/或进入用户指定的失效防护状态。

### 2.3.7 SN74LV8T165

SN74LV8T165 器件是一个并联或串联输入、串联输出 8 位移位寄存器。该器件具有两种运行模式：加载数据和移位数据，这两种模式由  $\overline{\text{SH/LD}}$  输入控制。输出电平以电源电压 (VCC) 为基准，并支持 1.8V、2.5V、3.3V 和 5V CMOS 电平。

该输入经设计，具有较低阈值电路，支持较低电压 CMOS 输入的升压转换（例如 1.2V 输入转换为 1.8V 输出或 1.8V 输入转换为 3.3V 输出）。此外，5V 容限输入引脚可实现降压转换（例如 3.3V 转 2.5V 输出）。

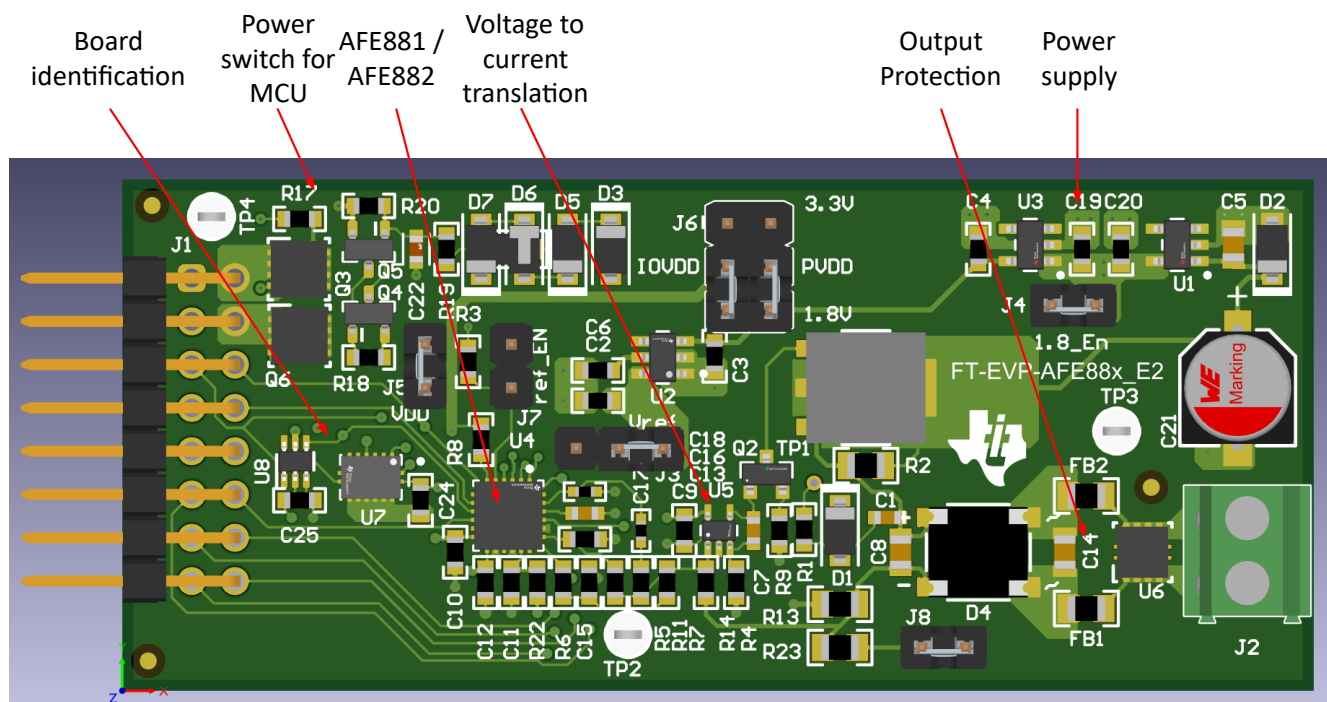
### 2.3.8 TMUX1219

TMUX1219 是一款通用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 单极双投 (SPDT) 开关。TMUX1219 可根据 SEL 引脚的状态在两个电源输入之间切换。1.08V 至 5.5V 的宽工作电源电压范围使其适用于从个人电子设备到建筑自动化的广泛应用。该器件可支持源极 (Sx) 和漏极 (D) 引脚上从 GND 到 VDD 范围的双向模拟和数字信号。4nA 的低电源电流使其可用于便携式应用。

所有逻辑输入均具有 1.8V 的逻辑兼容阈值，当器件在有效电源电压范围内运行时，能够确保 TTL 与 CMOS 的逻辑兼容性。失效防护逻辑电路允许先在控制引脚上施加电压，然后在电源引脚上施加电压，从而保护器件免受潜在的伤害。

### 3 系统设计原理

本节介绍此设计中不同功能块的相关信息。图 3-1 展示了这些功能块的位置。





## 4 硬件、软件、测试要求和测试结果

### 4.1 硬件要求

为了使电路板正常工作，必须进行正确连接并相应地设置跳线。图 4-1 展示了 TIDA-010982 跳线，表 4-1 简要介绍了这些跳线和连接器。

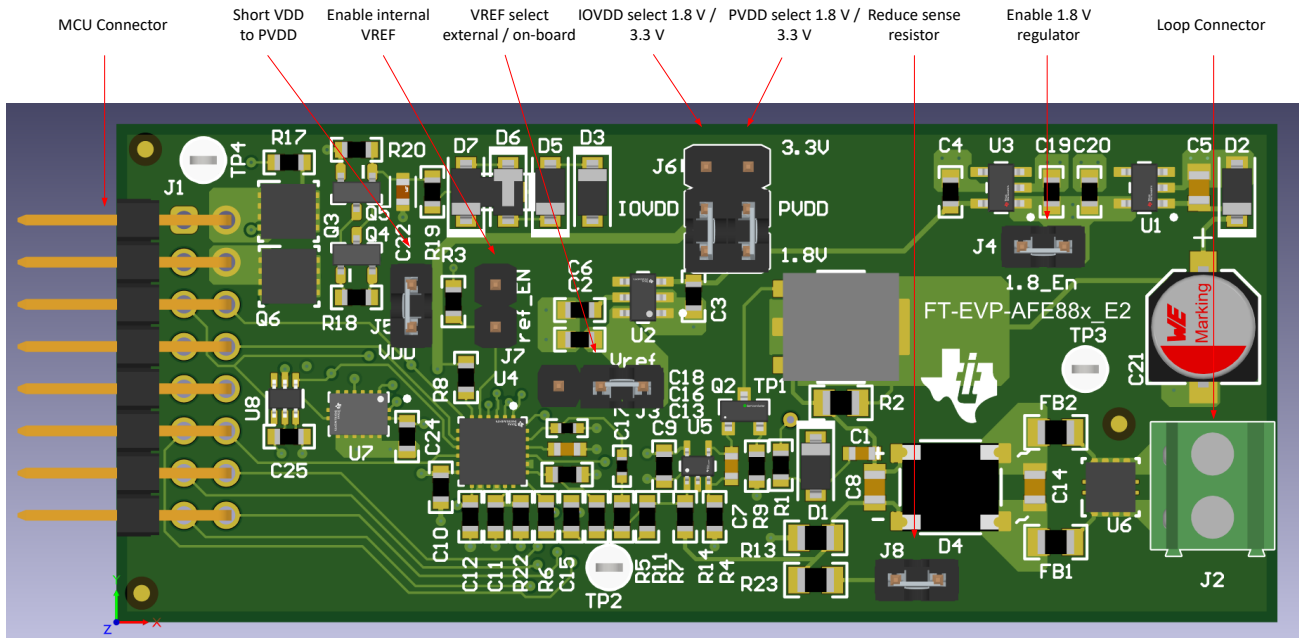


图 4-1. TIDA-010982 跳线

表 4-1. 跳线和连接器说明

指示符	跳线、连接器	说明
J1	MCU 连接器	连接到微控制器电路板
J5	将 VDD 短接至 PVDD	如果使用具有 1.8V 电压的 AFE881H1，则需要短接此连接器，从而禁用内部 LDO
J7	启用内部 VREF	设置该连接器将启用 AFE881H1 或 AFE882H1 的内部基准电压
J3	VREF 选择	设置为 1-2 以使用板载 REF35125。设置为 2-3，以使用通过 MCU 连接器 J1 提供的外部基准电压。
J6	IOVDD 选择	对于在 3.3V 下的运行，设置为 1-3；对于 1.8V，设置为 3-5
J6	PVDD 选择	对于在 3.3V 下的运行，设置为 2-4；对于 1.8V，设置为 4-6
J8	减小检测电阻器	减少用于电压电流转换的反馈电阻器。对于在 1.8V 下的运行，需要设置此跳线。
J4	启用 1.8V 稳压器	设置此跳线以启用 1.8V LDO
J2	环路连接器	连接到电流环路

对于不同的工作电压，需要以不同方式设置跳线，以免损坏器件。图 4-2 展示了如何为在 1.8V 下运行设置跳线。图 4-3 展示了在 3.3V 下运行的跳线配置。红色框展示了需要如何为在 3.3V 下运行设置跳线。

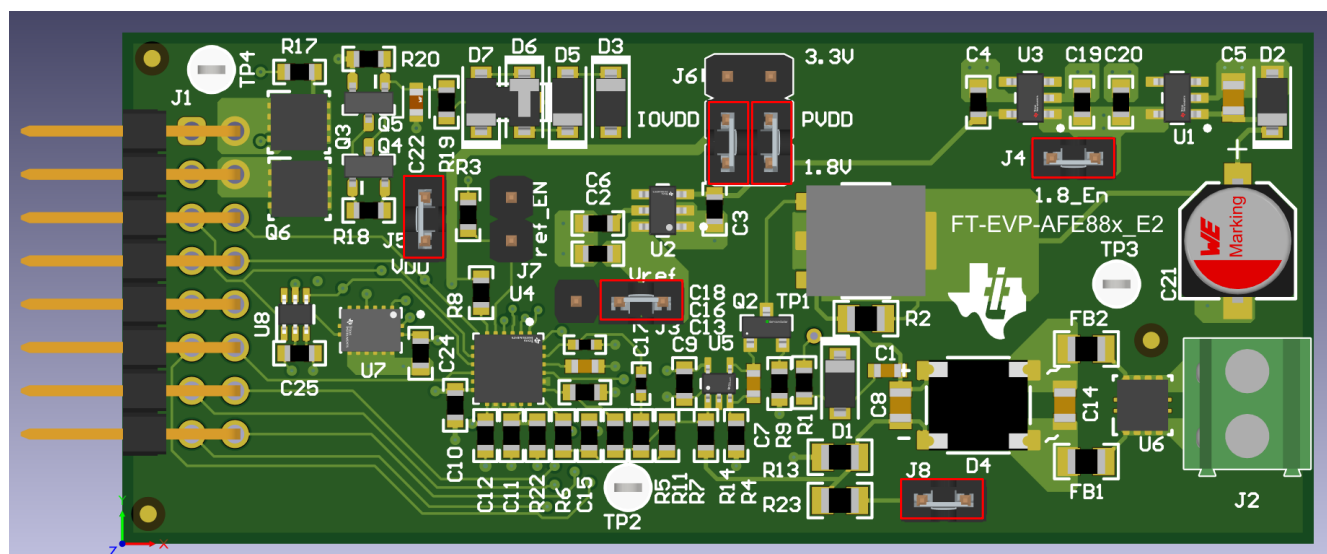


图 4-2. 用于在 1.8V 下运行的 TIDA-010982 跳线配置

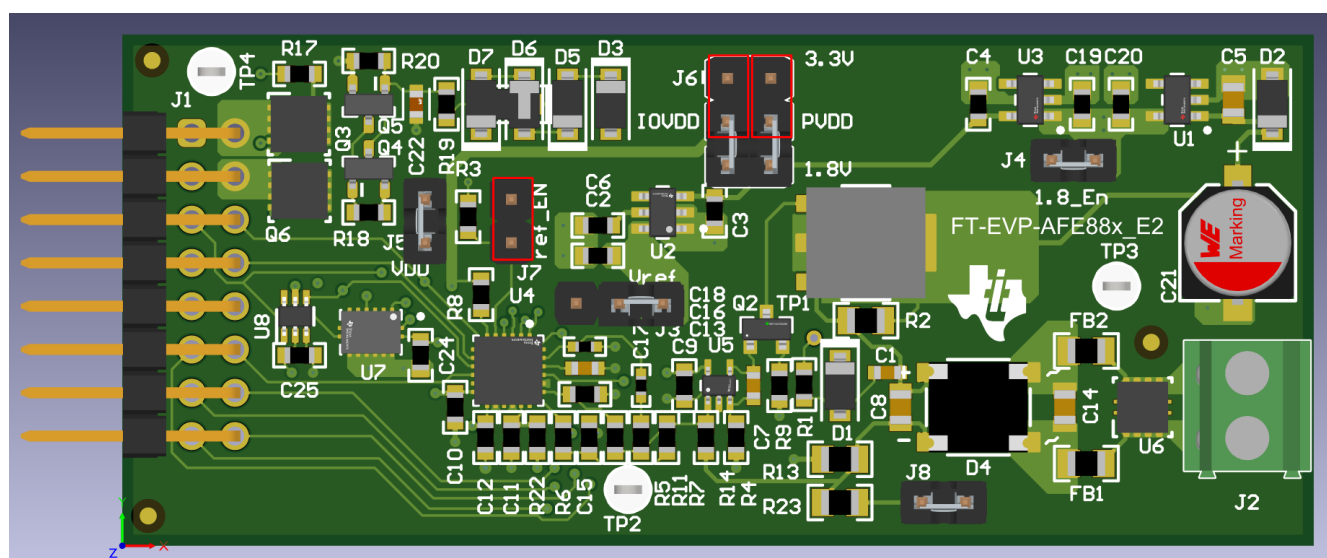


图 4-3. 用于在 3.3V 下运行的 TIDA-010982 跳线配置



连接器 J1 连接到 MCU 板，表 4-2 展示了引脚排列。引脚 1 已在 PCB 上标出。

**表 4-2. J1 连接器引脚排列**

引脚	信号
1	GND
2	VDD-3V3
3	VREF_EXT
4	VDD-1V8
5	ID0
6	SCLK
7	未使用
8	SDI
9	未使用
10	SDO
11	ALARM
12	CS
13	CD
14	DAC_HART_RX
15	RTS
16	DAC_HART_TX

## 4.2 测试设置

对于所有测试，该参考设计应与包含 MSPM0G1507 和两个 ADS122S14 ADC 的 SNSR-DUAL-ADC-EVM 结合使用。MSPM0G1507 可控制 AFE 及 ADC。

用于评估的软件包含在 MSPM0-SDK 中，示例可从以下位置导入：

SDK\_INSTALL\_PATH\examples\nortos\LP\_MSPM0G3507\demos\field\_transmitter into Code Composer Studio

该软件实现了适用于简单传感器的典型信号链。系统会从 ADC 读取数据并调节这些值，例如进行线性化处理。该软件会将这些值缩放到 4mA 至 20mA 电流环路等接口。该过程包括特定于接口的校准值，并且会控制输出级。为了使环路供电传感器的功耗保持在合理水平，MCU 会处于低功耗模式，仅以定义的时钟速率唤醒并运行信号链。

图 4-4 显示了软件流程及所有辅助函数。

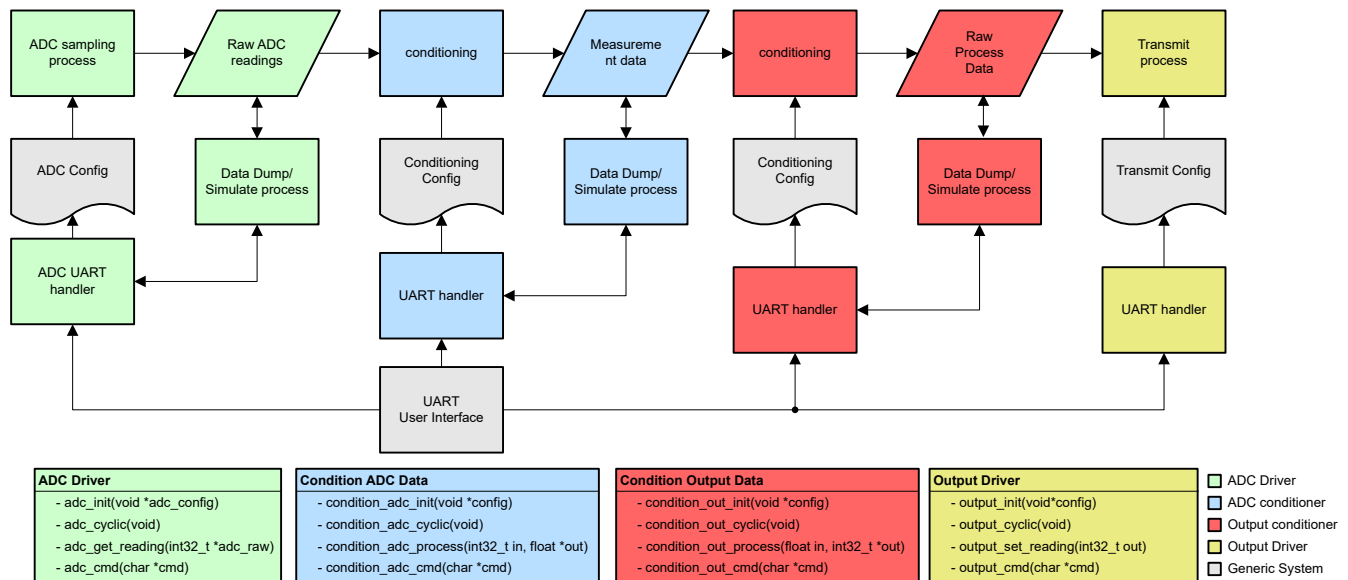


图 4-4. 软件流程

该软件使用函数指针来表示主要模块，以便在不同的 ADC、接口和缩放函数之间保持灵活性。启动时，软件会根据从连接卡读取的 ID，为这些指针填充正确的驱动程序。存在两个相关的结构。第一个结构定义了具有 ADC 函数和输入缩放函数的模拟输入侧。第二个结构涵盖输出侧，需要指定一个用于设置 CPU 时钟的函数。

```
struct id_func_input_map_struct {
    /** adc initialisation function */
    adc_init_func adc_init;
    /** This function gets called regularly by the main function, do not block here */
    adc_cyclic_func adc_cyclic;
    /** read adc reading and return it */
    adc_get_reading_func adc_get_reading;
    /** handle uart commands and execute them */
    adc_cmd_func adc_cmd;

    /** adc conditioning init function */
    condition_adc_init_func condition_adc_init;
    /** adc conditioning cyclic function */
    condition_adc_cyclic_func condition_adc_cyclic;
    /** adc conditioning processing function */
    condition_adc_process_func condition_adc_process;
    /** adc conditioning uart cmd handler */
    condition_adc_cmd_func condition_adc_cmd;
};

struct id_func_output_map_struct {
    /** output conditioning init */
    condition_out_init_func condition_out_init;
    /** output conditioning cyclic function */
    condition_out_cyclic_func condition_out_cyclic;
    /** output conditioning set the output value */
    condition_out_process_func condition_out_process;
    /** output conditioning uart cmd handler */
    condition_out_cmd_func condition_out_cmd;
};
```

```
condition_out_cmd_func condition_out_cmd;

/** output stage init */
output_init_func output_init;
/** output cyclic function */
output_cyclic_func output_cyclic;
/** output setter */
output_set_reading_func output_set_reading;
/** output uart handler */
output_cmd_func output_cmd;

/** init cpu clock */
cpu_clock_init_func cpu_clock_init;
};
```

表 4-3 中显示的每个驱动程序都需要包含四个常用函数。

**表 4-3. 驱动程序函数**

驱动程序名称	功能
init	初始化所有必要组件：配置内存、外设和变量
cyclic	主循环会在每个周期以固定频率调用此函数。该函数会生成时序或执行循环轮询。
get_reading, process, set_reading	这些函数会实际处理数据。这些函数用于从 ADC 读取数据，执行缩放并设置 DAC 的输出值。
cmd	该函数会处理命令行界面。当用户为此驱动程序输入命令时，系统会调用该函数。

各驱动程序均可包含仅供自身使用的静态函数，其他驱动程序不得调用。

该软件通过 USB UART 提供命令行界面来控制 ADC 和数据流。所有命令都有两个级别。第一级指定哪个驱动程序接收命令。第二级包含与特定驱动程序相关的实际命令。驱动程序的特定函数会处理所有其他部分。所有级别均提供帮助命令 ( *help* , *adc help* )

表 4-4 介绍了一级命令。

**表 4-4. 一级命令**

名称	说明	文件 ( 具体文件取决于电路板 ID 和配置 )
sys	系统相关命令，例如 reset、flash	system/system.c
adc	特定于 ADC 驱动程序的命令	adc/
out	特定于输出的命令	output/
cin	特定于 ADC 输入调节的命令	condition/
cout	特定于输出调节的命令	condition/

以 *adc get* 为例的命令可用于获取一次 ADC 采样，将最后一个 ADC 读数打印到 UART。要连续获得 ADC 读数，请使用 *adc stream* 进行进一步测试。

## 4.3 测试结果

### 4.3.1 线性度测试

对于此测试，此参考设计连接到用于 AFE SPI 的微控制器，模拟输出则连接到电源和电流表。整个系统由环路上的电流供电，并通过隔离式 UART 连接到 PC。所有测试均使用 10V 和 24V 环路电压完成，AFE881H1 采用 3.3V 和 1.8V 配置，AFE882H1 采用 3.3V 配置。对 DAC 代码执行阶跃，并记录电流表的电流读数。

图 4-5 展示了完整的设置。

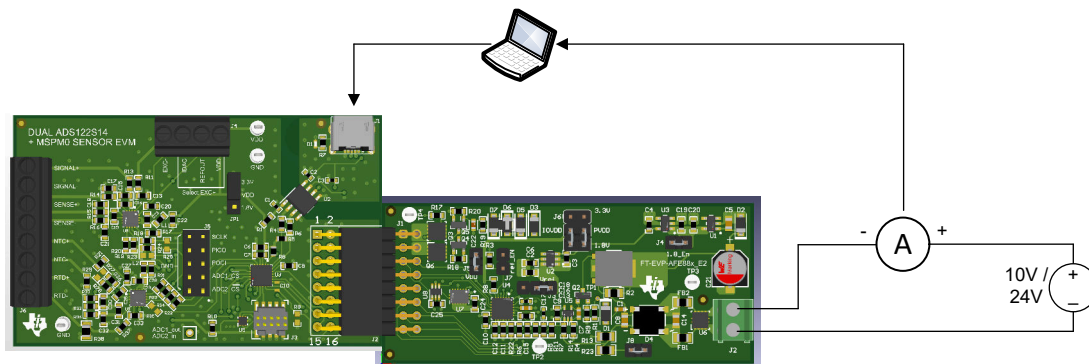


图 4-5. 线性度测试的测试设置

图 4-6 至图 4-17 显示了线性度，包括也用于计算误差的线性趋势线。因此，该公式用于计算理想电流，显示了与测量值的差值。对于每种 10V 至 24V 配置，使用相同的公式计算误差，在一个偏置点仿真校准，然后在另一个偏置点运行。提供了不同的公式供参考。

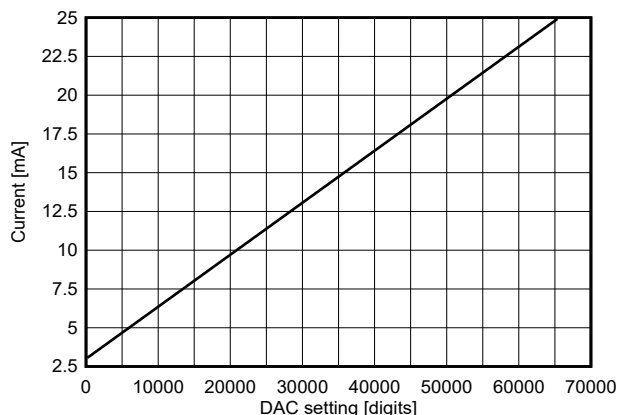


图 4-6. AFE881 : 1.8V 电源、10V 环路线性度  
 $y = 3.35466E - 04x + 2.99760$

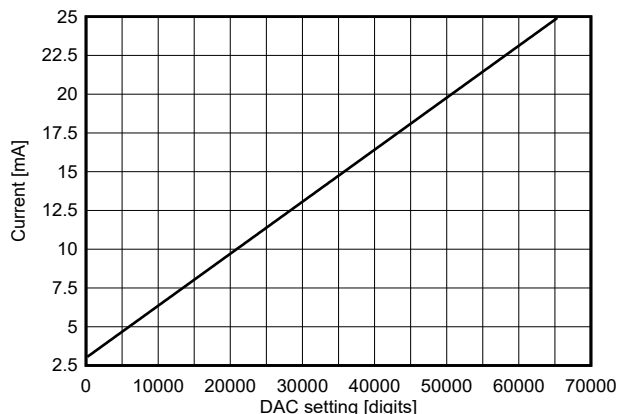


图 4-8. AFE881 : 1.8V 电源、24V 环路线性度  
 $y = 3.35485E - 04x + 2.99755$

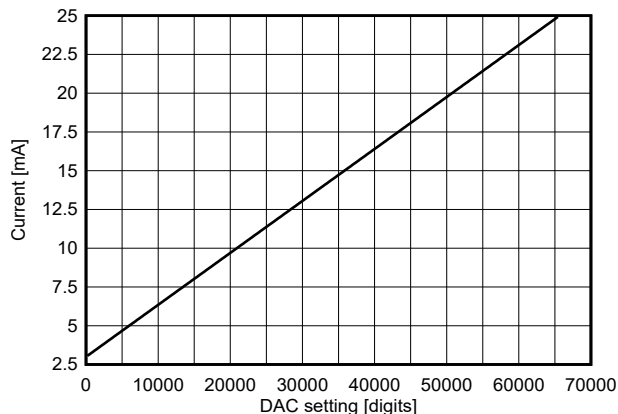


图 4-10. AFE881 : 3.3V 电源、10V 环路线性度  
 $y = 3.35189E - 04x + 2.99416$

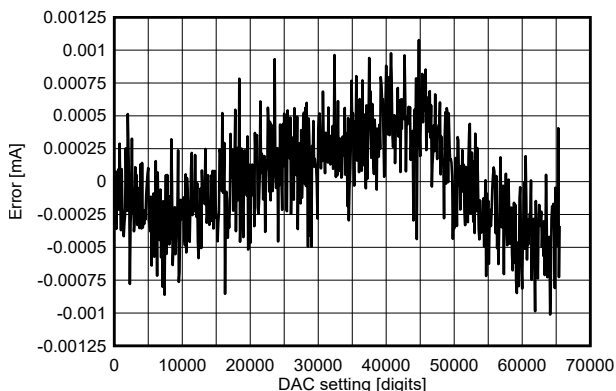


图 4-7. AFE881 : 1.8V 电源、10V 环路误差

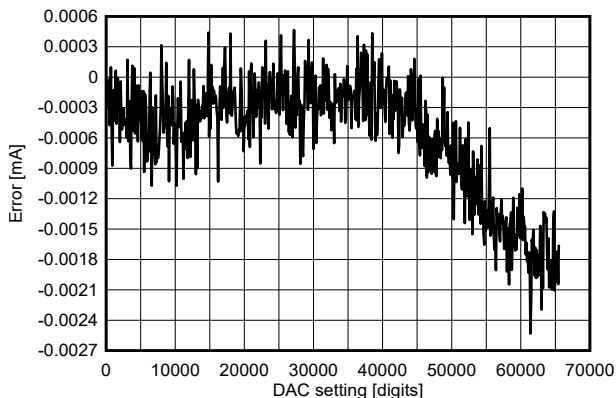


图 4-9. AFE881 : 1.8V 电源、24V 环路误差

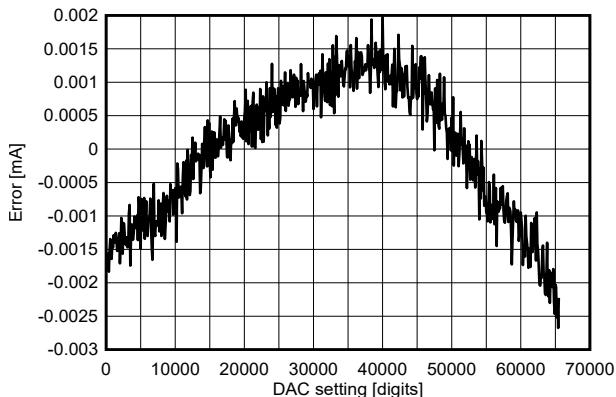


图 4-11. AFE881 : 3.3V 电源、10V 环路误差

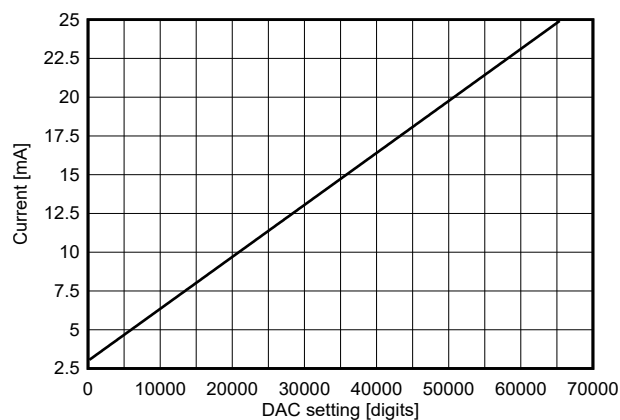


图 4-12. AFE881 : 3.3V 电源、24V 环路线性度  
 $y = 3.35312E - 04x + 2.99208$

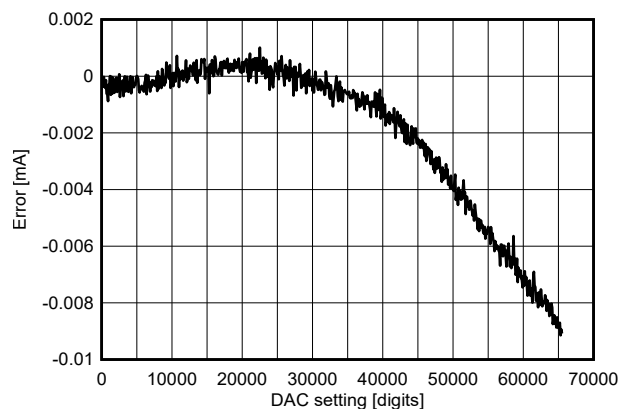


图 4-13. AFE881 : 3.3V 电源、24V 环路误差

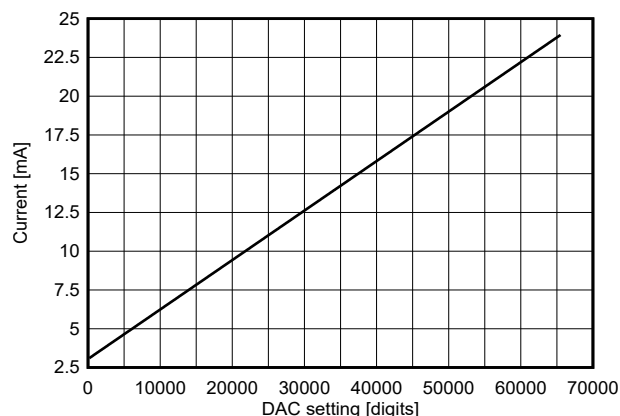


图 4-14. AFE882 : 3.3V 电源、10V 环路线性度  
 $y = 3.19149E - 04x + 3.04646$

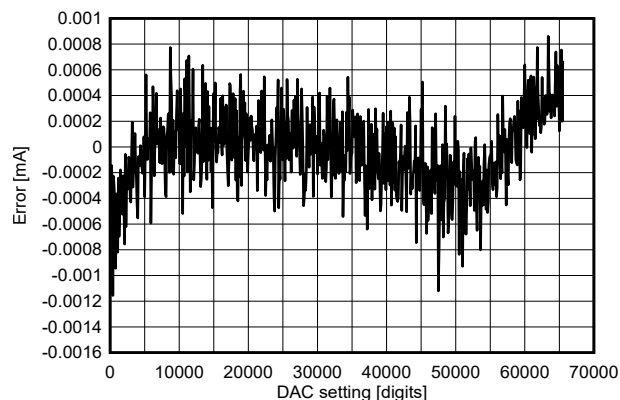


图 4-15. AFE882 : 3.3V 电源、10V 环路误差

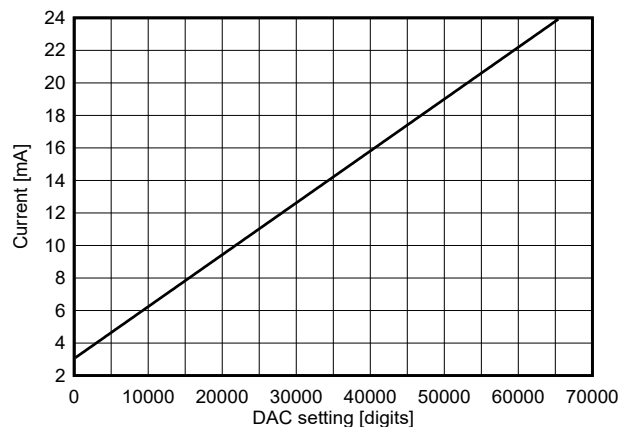


图 4-16. AFE882 : 3.3V 电源、24V 环路线性度  
 $y = 3.19127E - 04x + 3.04673$

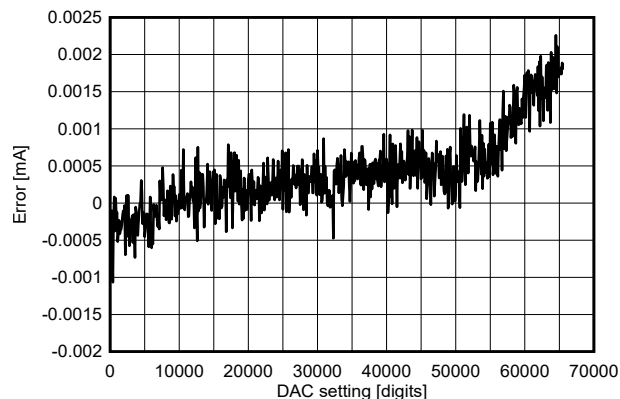


图 4-17. AFE882 : 3.3V 电源、24V 环路误差

#### 4.3.1.1 线性度测试总结

对于所有配置，所有结果都完全在规格范围内，没有配置显示出不稳定迹象或其他非线性效应。通过 AFE881 器件，使用 1.8V 电源和 3.3V 电源可以实现类似性能。



### 4.3.2 噪声测试和电流柱状图

对于此测试，测试设置与 节 4.3.1 类似。为了测量性能，DAC 设置为三种不同的输出电流（零 [最小值]、中点、最大值），测得的电流为 8192 倍。根据这些值，绘制柱状图，并根据这些读数计算几项性能参数。

图 4-18 展示了完整的设置。

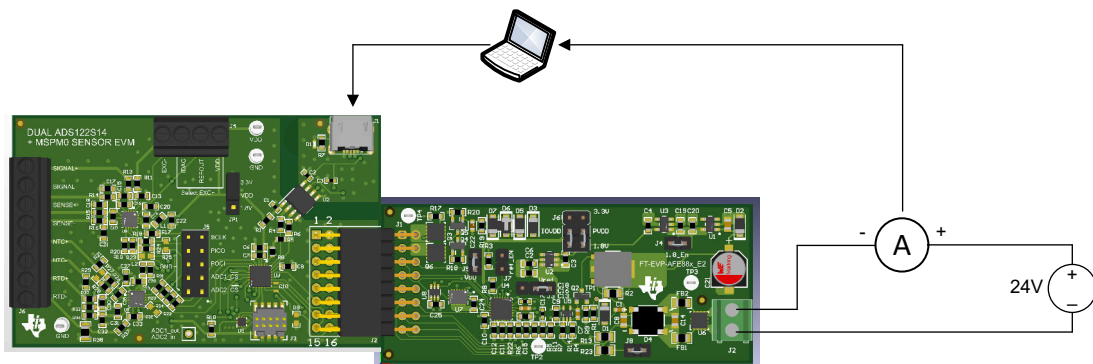


图 4-18. 电流噪声测试设置

图 4-19 至 图 4-27 展示了测得电流的柱状图。

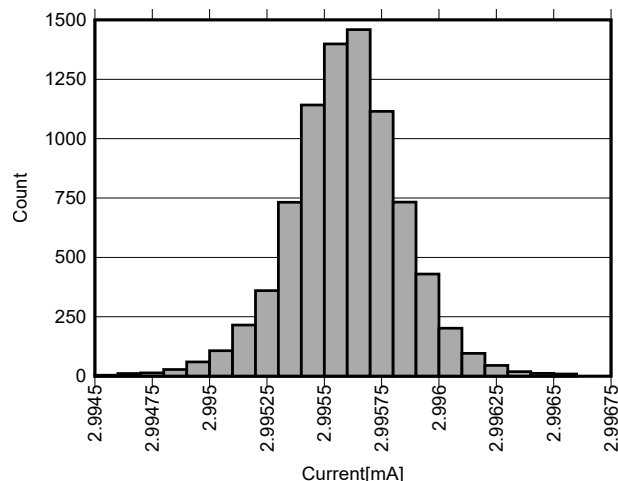


图 4-19. AFE881 由 1.8V 供电，采用最小 DAC 设置的柱状图

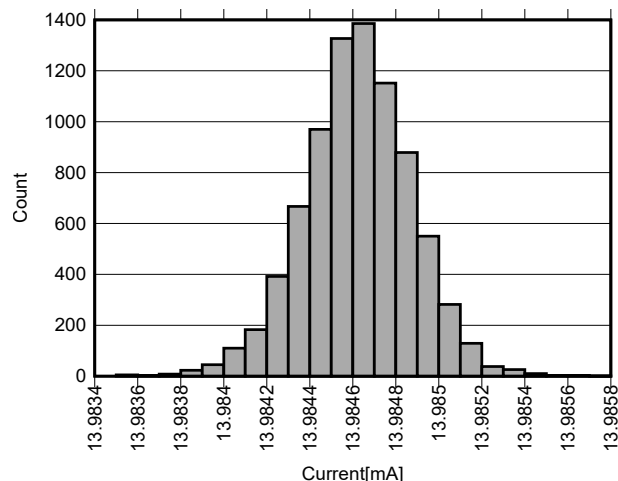


图 4-20. AFE881 由 1.8V 供电，采用中点 DAC 设置的柱状图

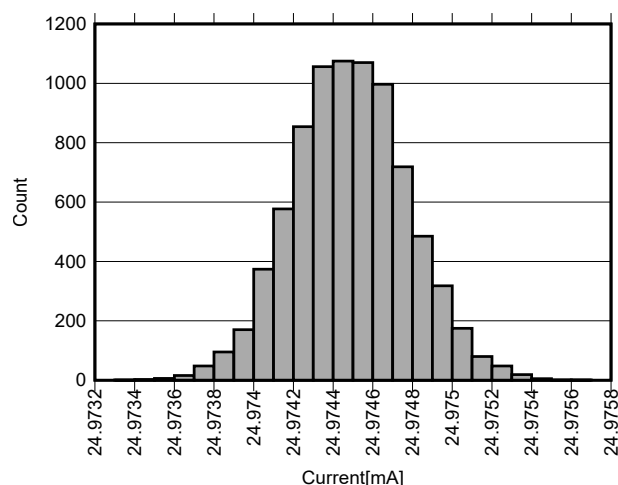


图 4-21. AFE881 由 1.8V 供电，采用最大 DAC 设置的柱状图

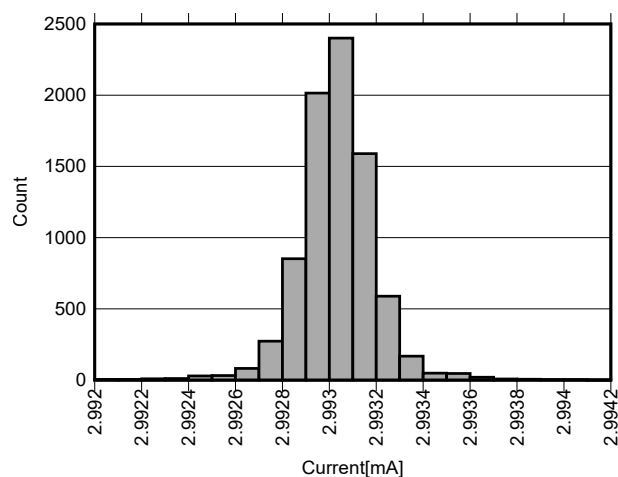


图 4-22. AFE881 由 3.3V 供电，采用最小 DAC 设置的柱状图

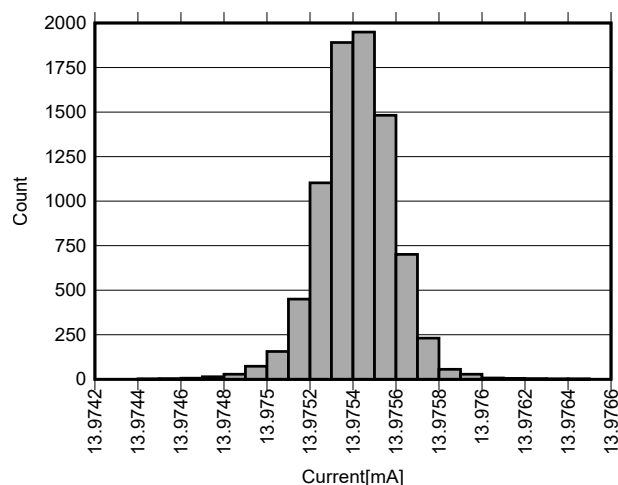


图 4-23. AFE881 由 3.3V 供电，采用中点 DAC 设置的柱状图

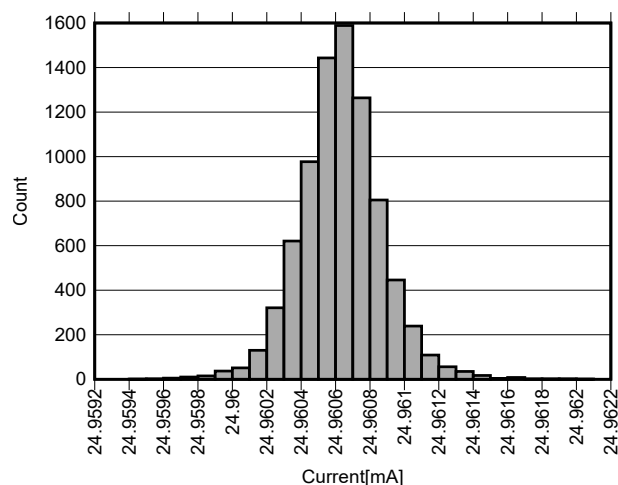


图 4-24. AFE881 由 3.3V 供电，采用最大 DAC 设置的柱状图

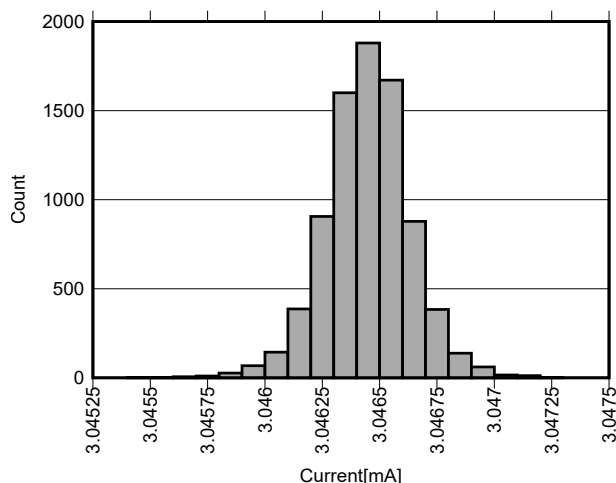


图 4-25. AFE882 由 3.3V 供电，采用最小 DAC 设置的柱状图

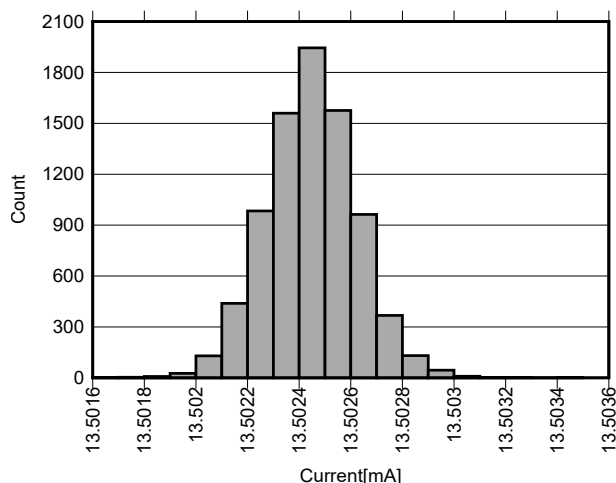


图 4-26. AFE882 由 3.3V 供电，采用中点 DAC 设置的柱状图

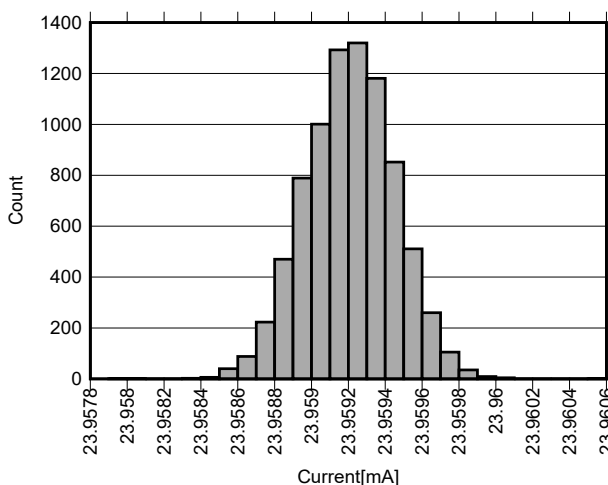


图 4-27. AFE882 由 3.3V 供电，采用最大 DAC 设置的柱状图

#### 4.3.2.1 噪声测试和电流柱状图总结

表 4-5 展示了根据图 4-19 到图 4-27 中的原始数据计算出的结果。

表 4-5. 噪声总结

AFE	电源电压 (V)	DAC 设置	最小电流 (mA)	平均电流 (mA)	最大电流 (mA)	峰值间噪声 (μA)	RMS 噪声 (nA)	无噪声位 (NFB)	有效位数 (ENOB)
AFE881	1.8	0	2.9945	2.9956	2.9966	2.05	247	15.6	18.6
AFE881	1.8	32768	13.9836	13.9846	13.9858	2.19	250	15.5	18.6
AFE881	1.8	65535	24.9734	24.9745	24.9757	2.25	289	15.4	18.4
AFE881	3.3	0	2.9920	2.9930	2.9942	2.15	160	15.5	19.3
AFE881	3.3	32768	13.9744	13.9754	13.9764	2.04	173	15.6	19.1
AFE881	3.3	65535	24.9595	24.9606	24.9621	2.62	239	15.2	18.7
AFE882	3.3	0	3.0455	3.0464	3.0473	1.76	184	15.8	19.1
AFE882	3.3	32768	13.5016	13.5024	13.5035	1.81	173	15.8	19.1
AFE882	3.3	65535	23.9580	23.9592	23.9606	2.6	241	15.2	18.7

总体而言，柱状图显示了这类信号的预期高斯分布，没有任何振荡或其他干扰信号。这也证明了 MCU 唤醒时消耗的峰值电流未在环路上显现，得到了正确调节。1.8V 和 3.3V 信号链之间没有性能差异。

### 4.3.3 阶跃响应

为了测试电路的阶跃响应，将电路再次连接到 24V 电源。电流测量采用多匝线圈缠绕的电流钳进行，以提升灵敏度。

通过从 PC 向 AFE88x 发送相应 DAC 值来生成步长。在此测试中，测量从零到最大值和返回的步长以及中点电流。此测试显示了模拟电路的转换率，并且还测试了稳定性。

图 4-28 展示了完整的设置。

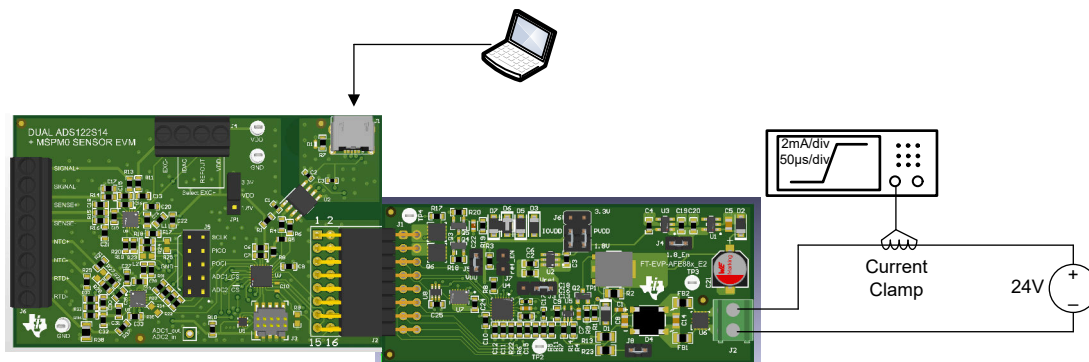


图 4-28. 阶跃响应测量的测试设置

下图展示了该电路的阶跃响应。

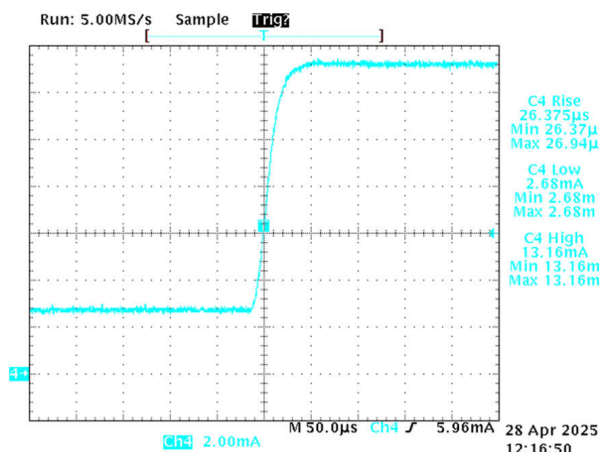


图 4-29. AFE881 : 3.3V, 从 0 至 65535 的上升时间

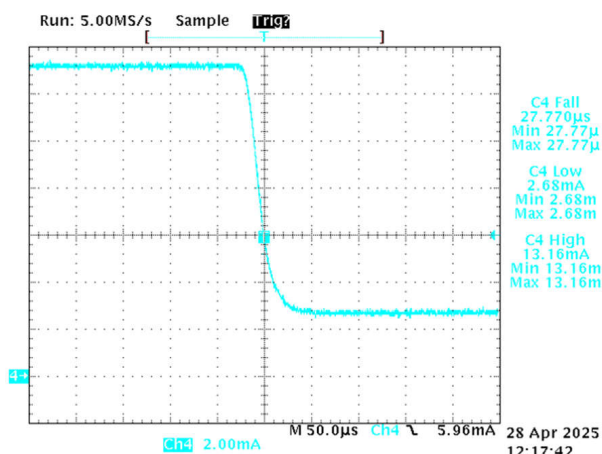


图 4-30. AFE881 : 3.3V, 从 65535 到 0 的下降时间

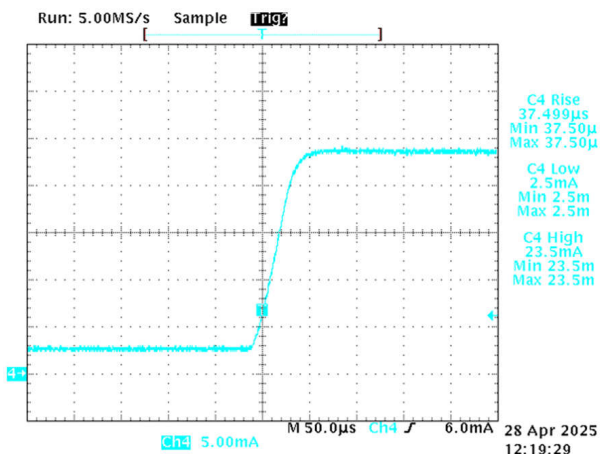


图 4-31. AFE881 : 3.3V, 从 0 至 32768 的上升时间

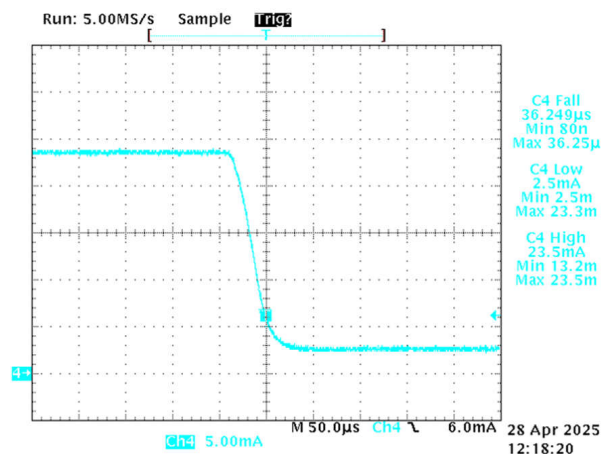


图 4-32. AFE881 : 3.3V, 从 32768 到 0 的下降时间

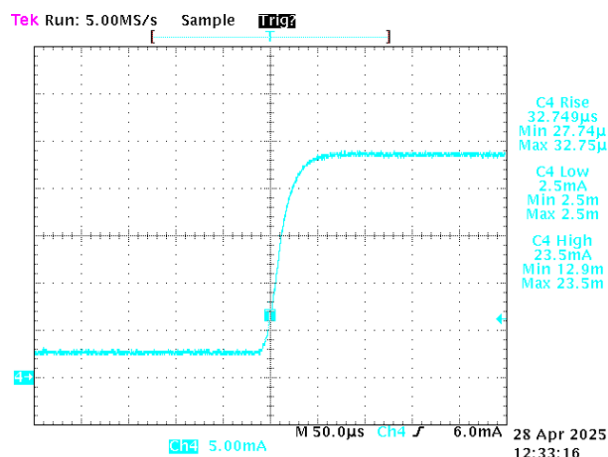


图 4-33. AFE881 : 1.8V, 从 0 至 65535 的上升时间

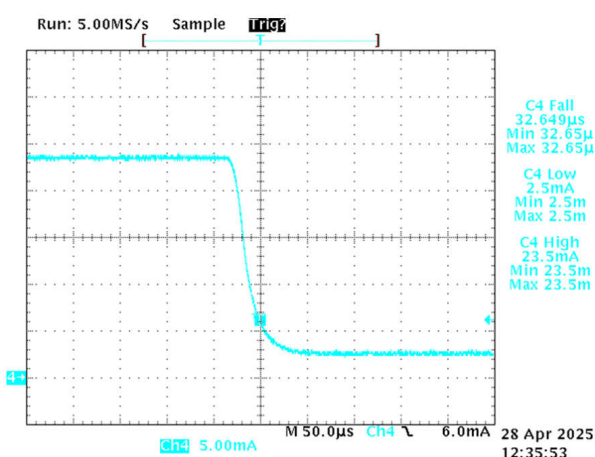


图 4-34. AFE881 : 1.8V, 从 65535 到 0 的下降时间

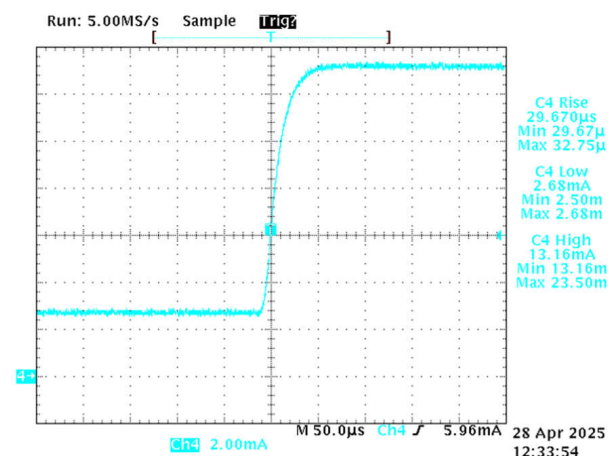


图 4-35. AFE881 : 1.8V, 从 0 至 32768 的上升时间

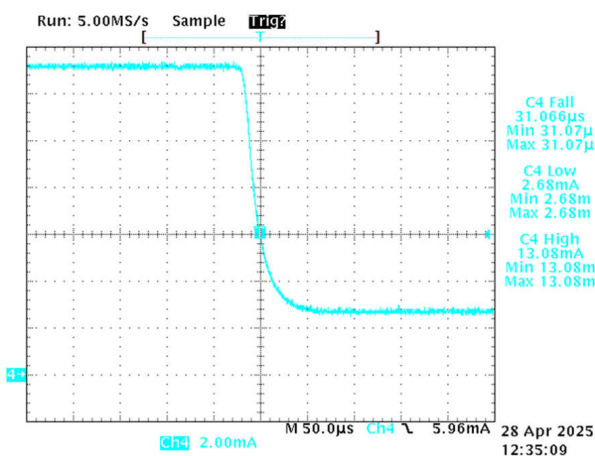


图 4-36. AFE881 : 1.8V, 从 32768 到 0 的下降时间

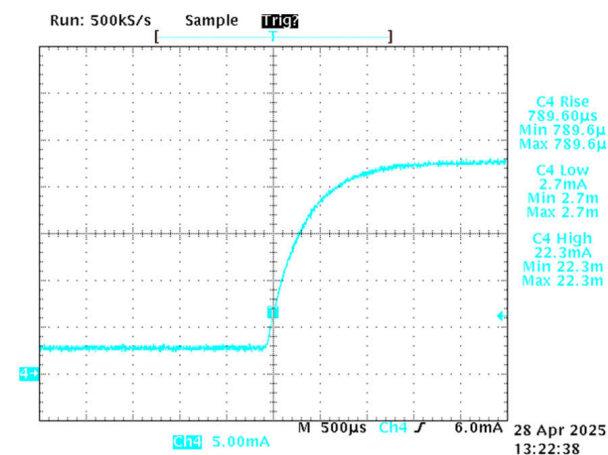


图 4-37. AFE882 : 3.3V, 从 0 至 65535 的上升时间

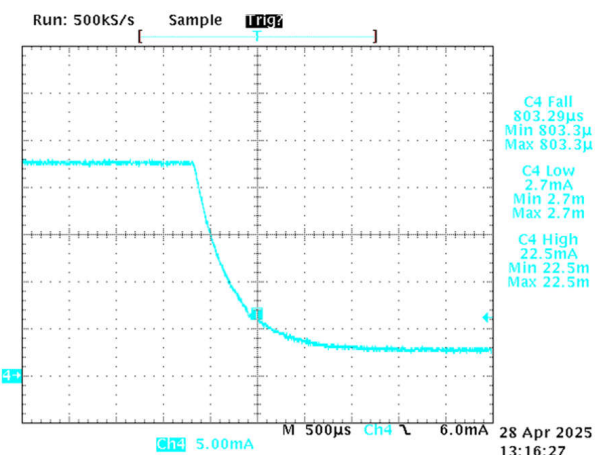


图 4-38. AFE882 : 3.3V, 从 65535 到 0 的下降时间



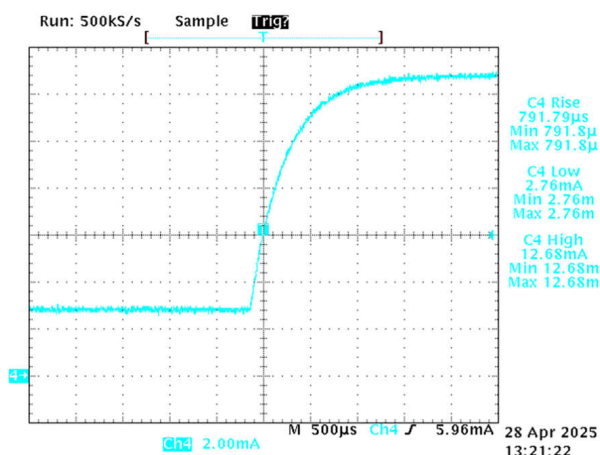


图 4-39. AFE882 : 3.3V, 从 0 至 32768 的上升时间

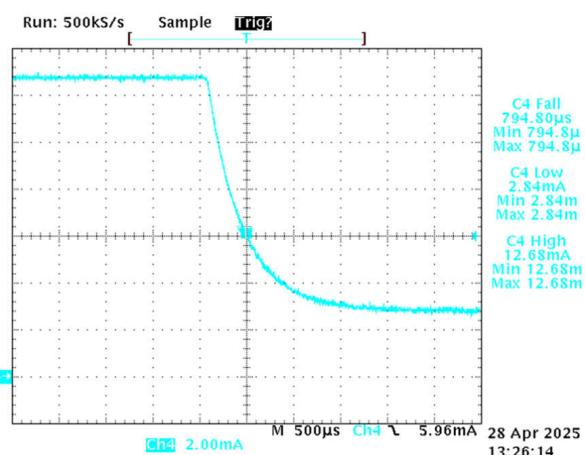


图 4-40. AFE882 : 3.3V, 从 32768 到 0 的下降时间

#### 4.3.3.1 阶跃响应总结

表 4-6 总结了上升和下降时间。AFE882H1 硬件旨在实现较慢的上升和下降时间。然而，这些图中没有发现过冲、下冲或振荡。

表 4-6. 上升时间和下降时间总结

AFE	电源电压 (V)	DAC 设置	上升时间 (µs)	下降时间 (µs)
AFE881	3.3	65535	26	28
AFE881	3.3	32768	38	36
AFE881	1.8	65535	33	33
AFE881	1.8	32768	30	31
AFE882	3.3	65535	790	803
AFE882	3.3	32768	792	795

#### 4.3.4 启动

研究系统的启动行为也很重要。特别是确定在整个启动阶段是否可以保持小于 4mA 的最小电流，以及启动阶段所花的时间。图 4-41 展示了监测启动的第一步。

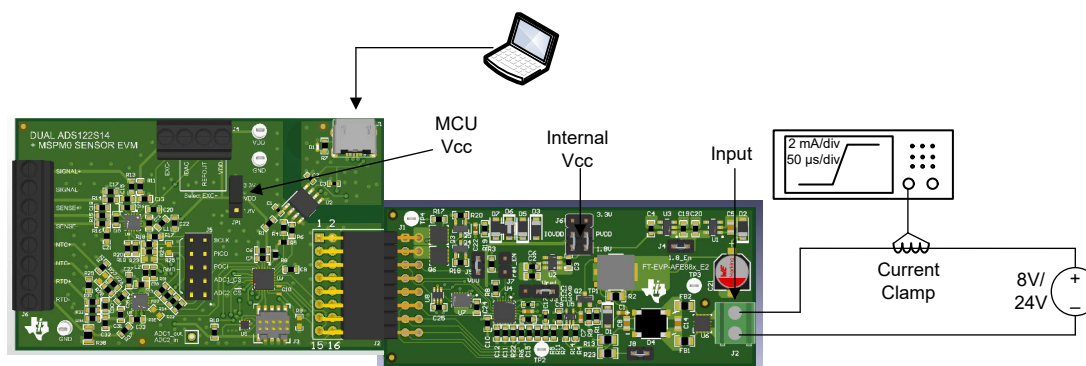


图 4-41. 启动测量的测试设置

使用图 4-41 中的配置进行测量会得到图 4-42 中所示的示波器图片。



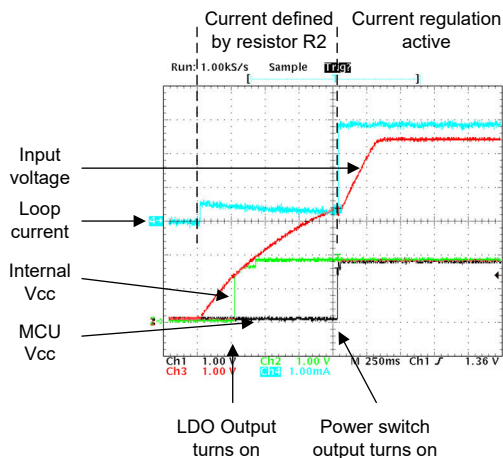


图 4-42. AFE881 1.8V 至 8V 环路电压启动

图 4-43 展示了电流显示如测量值所示的原因。初始电流仅由旁路电阻器 R2 决定，该电阻器是内部电压建立、放大器通电及电流调节前唯一允许电流通过的器件。

250ms 后，电压升至足够高，进而 LDO 导通并提供 1.8V 内部电压。再过 750ms，内部电源开关导通。该开关监测中间 3.3V 导轨，以保持稳定并增加一定的延迟。该开关导通将启用 MCU 及 AFE 的 IO 导轨。这使得 AFE 能够退出上电复位并开始调节电流，尽管测得的输入电流步长为 3mA。

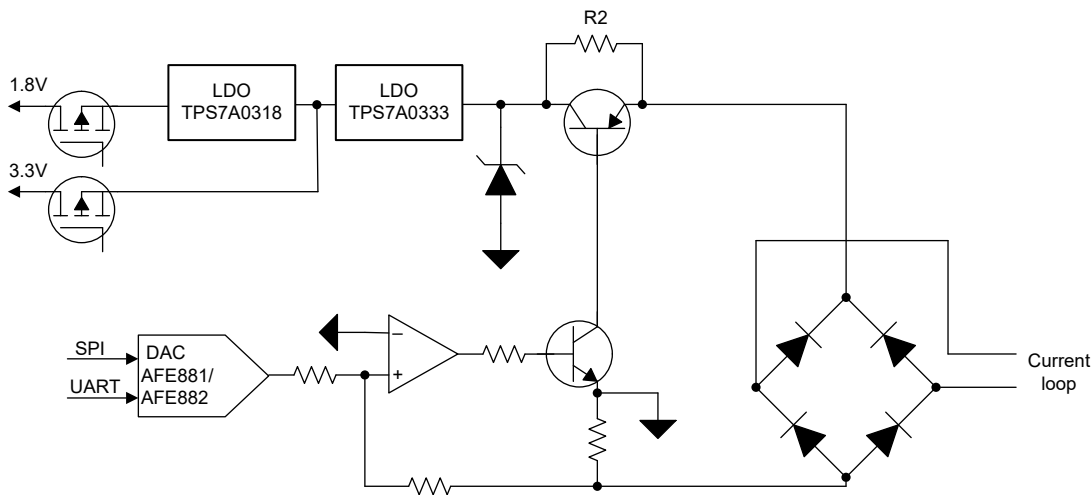


图 4-43. 简化版原理图

采用 24V 电源时，因初始电流更高，系统启动速度显著加快。图 4-44 展示了与之前相同的测量，但环路电压为 24V。上电序列开始时电流约为 2mA。MCU 在大约 150ms 内完成整个启动过程。

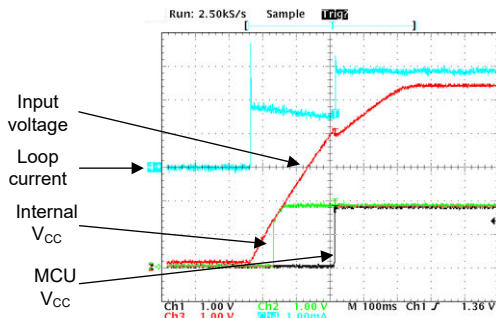


图 4-44. AFE881 1.8V 至 24V 环路电压启动

图 4-45 至图 4-48 展示了不同配置下的相同测试。

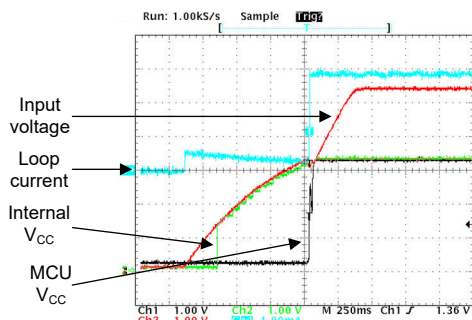


图 4-45. AFE881 : 3.3V 至 8V 环路电压启动

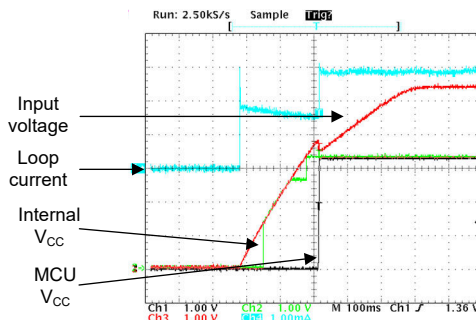


图 4-46. AFE881 : 3.3V 至 24V 环路电压启动

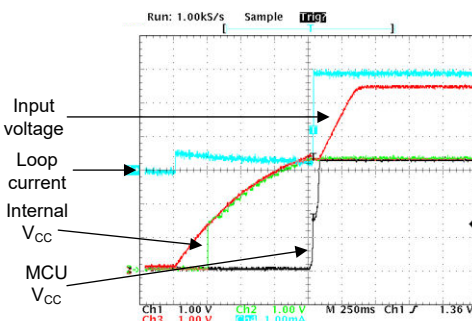


图 4-47. AFE882 : 3.3V 至 8V 环路电压启动

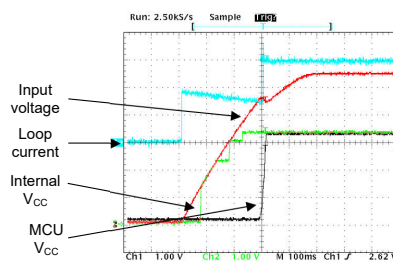


图 4-48. AFE882 : 3.3V 至 24V 环路电压启动

### 4.3.5 MCU 电流

除了启动行为和电流外，仔细检查微控制器的电流曲线也很重要。

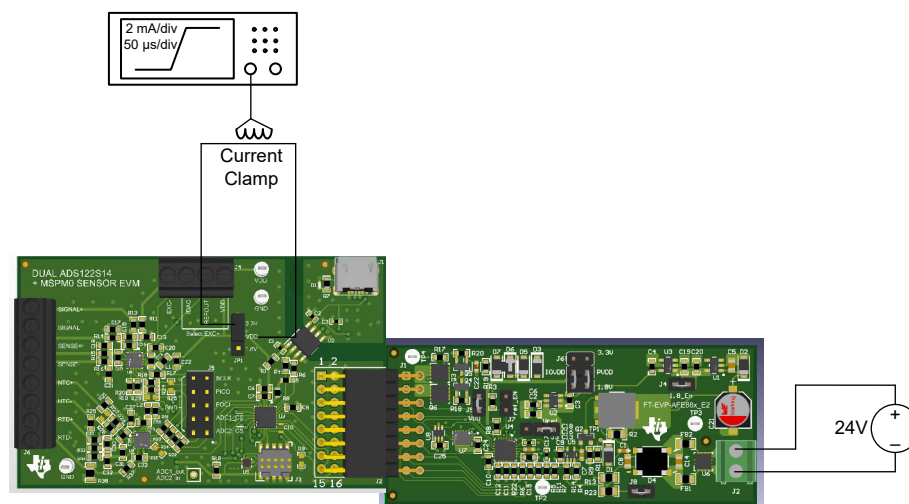


图 4-49. MSPM0 电流消耗的测试设置

图 4-49 展示了用于此测量的设置。系统照常通过 24V 电源供电，使用电流钳位直接在 MCU 板上测量流入 MCU 的电流。测量数据仅包含 MCU 和旁路电容器。

图 4-50 至图 4-53 展示了 MSPM0 在不同条件和缩放因子下的输入浪涌电流。

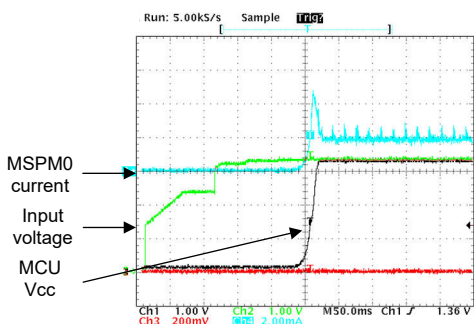


图 4-50. MSPM0 启动 3.3V 电源

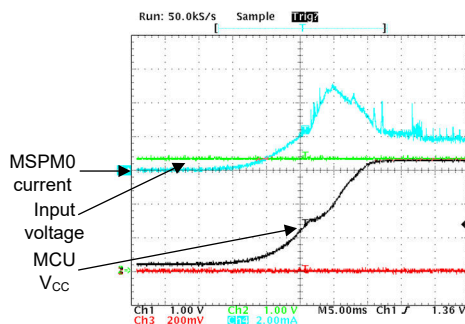


图 4-51. MSPM0 启动 3.3V 电源 - 详细信息

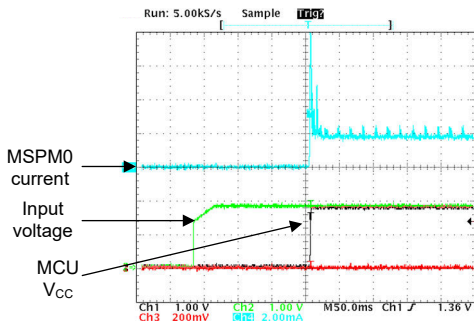


图 4-52. MSPM0 启动 1.8V 电源

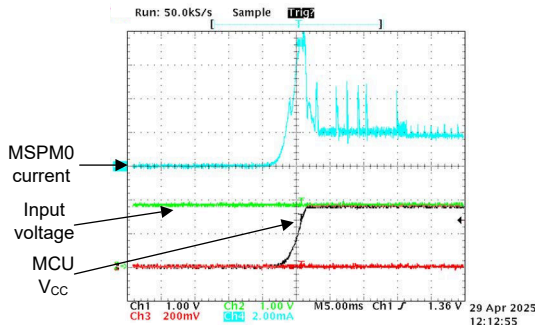


图 4-53. MSPM0 启动 1.8V 电源 - 详细信息

#### 4.3.5.1 MCU 电流总结

在图 4-50 至图 4-53 中，测量结果表明 MSPM0 电路的输入浪涌电流很容易超过 4mA。该电流峰值在整个系统的输入端不可见，不会干扰电流调节电路。

#### 4.3.6 系统电流

为了查看系统的哪些部分对功耗产生了影响，测量了不同导轨中的电流。在 3.3V 配置中，AFE881 使用内部电压基准和内部 LDO 从 PVDD 生成 VDD；而在 1.8V 配置中，使用外部基准电压，VDD 电源由系统的 1.8V 导轨提供。

图 4-54 展示了在电路板上测量电流的位置。图 4-55 表明在 1.8V 配置中，还测量了另一个导轨。

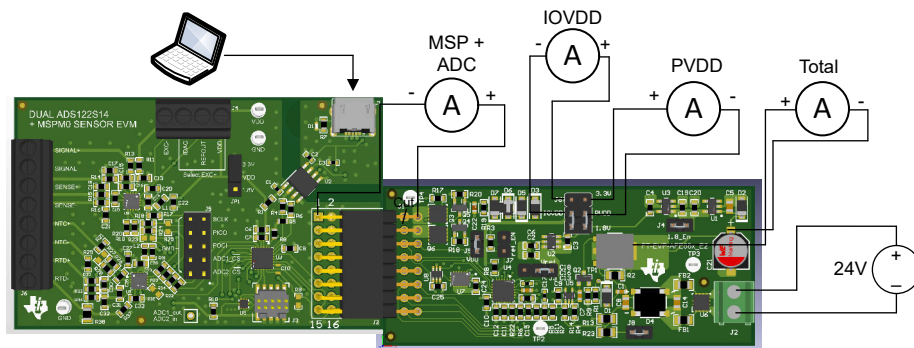


图 4-54. 电流测量的测试设置：3.3V

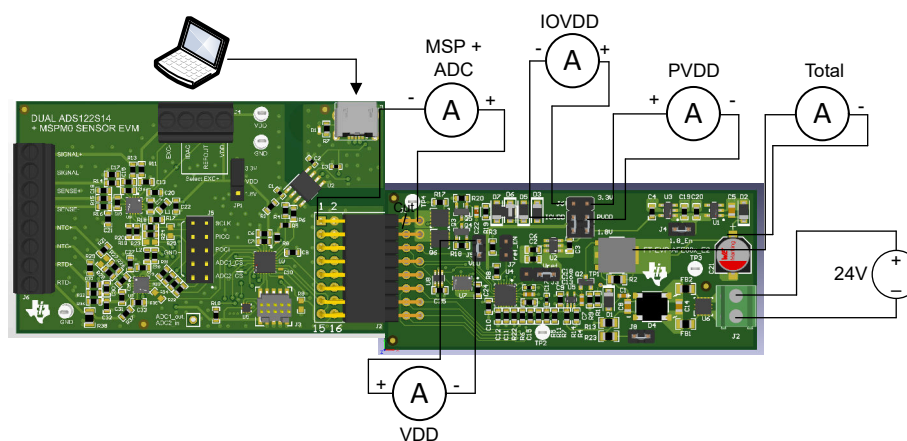


图 4-55. 电流测量的测试设置：1.8V

图 4-56 展示了主要元件和电源导轨的连接。

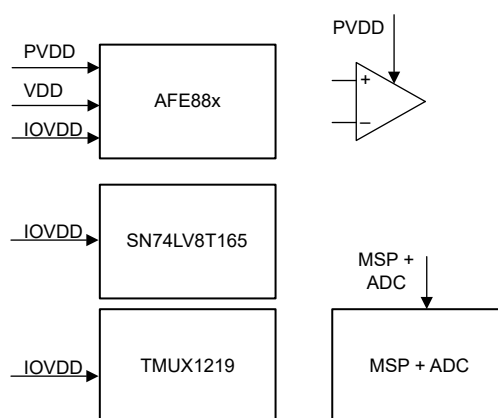


图 4-56. 简化的电源树

#### 4.3.6.1 系统电流总结

表 4-7 显示了在不同系统配置下测得的电流。总电流表示流入系统的总和电流，其测量点位于环路驱动晶体管与 LDO 输入端之间。此总测量值涵盖了所有未单独测量的电流，包括 LDO 和基准电压电路的静态电流。

表 4-7. 不同配置下测得的电流

AFE	电源电压 (V)	DAC 设置	P <sub>VDD</sub> (μA)	IOVDD (μA)	MSP + ADC (mA)	VDD (μA)	总计 (mA)
AFE882	3.3	0	200	1.2	1.958	不适用	2.214
	3.3	32768	217	1.2	1.958	不适用	2.231
	3.3	65535	230	1.2	1.958	不适用	2.244
AFE881	3.3	0	192	1.1	1.99	不适用	2.266
	3.3	32768	203	1.1	1.99	不适用	2.276
	3.3	65535	216	1.1	1.99	不适用	2.289
	1.8	0	50	0.6	1.92	89	2.135
	1.8	32768	55.5	0.6	1.92	89	2.140
	1.8	65535	61.3	0.6	1.92	89	2.146

#### 4.3.7 ADC 输入

要快速查看 ADC 线性度和失调电压，请将 *ads122s14\_ptx\_daisychain.c* 中的 ADC 配置结构从 128 增益和外部基准更改为 1 增益和内部基准。请参阅以下代码块中的更改。

```
volatile struct ads122s14_config_struct gADSDefault[2][9] = {  
    ...  
    // set external reference and enable reference buffers  
    {REFERENCE_CFG_ADDRESS, REFERENCE_CFG_REFP_BUF_EN_ENABLED |  
                                     REFERENCE_CFG_REFN_BUF_EN_ENABLED |  
                                     REFERENCE_CFG_REF_SEL_EXTERNAL},  
    // set gain to 128  
    {GAIN_CFG_ADDRESS,      GAIN_CFG_GAIN_128},  
    ...  
};
```

```
volatile struct ads122s14_config_struct gADSDefault[2][9] = {
...
// set internal reference
{REFERENCE_CFG_ADDRESS, REFERENCE_CFG_REF_SEL_INTERNAL},

// set gain to 1
{GAIN_CFG_ADDRESS,      GAIN_CFG_GAIN_1},
...
};
```

按照“ADC 电压输入测试”所示设置硬件，将模拟输入端连接至可调电压源，此处使用源测量单元 (SMU) 作为该电压源。控制硬件和 SMU，将电压从 0V 以 50mV 步进逐步提升至 1.25V。在每个步骤中进行 64 次测量。随后利用所测得的数据计算线性度、偏移量和噪声。

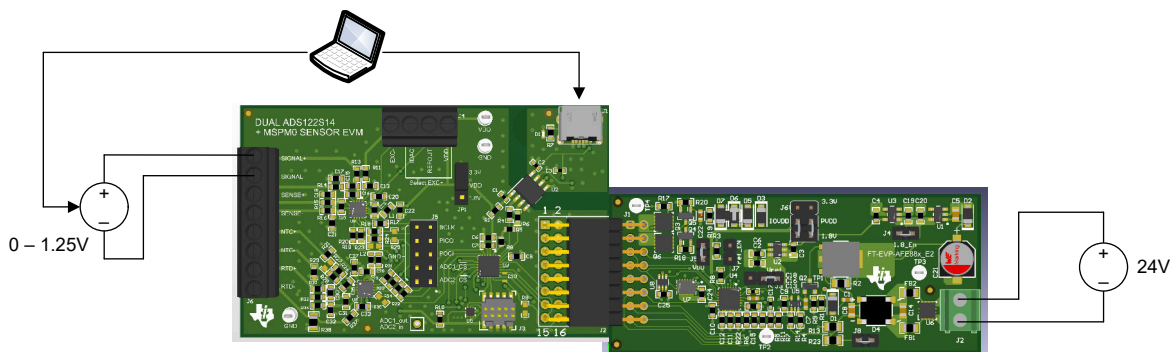


图 4-57. ADC 电压输入测试设置

所施加电压与计算所得电压之间的偏移量，反映了未经校准的初始误差。图 4-58 描绘了测量值。1250mV 时存在大约 1mV 的误差。该误差包含 AD 的增益误差与偏移误差、内部参考源误差以及测试设置引入的误差。

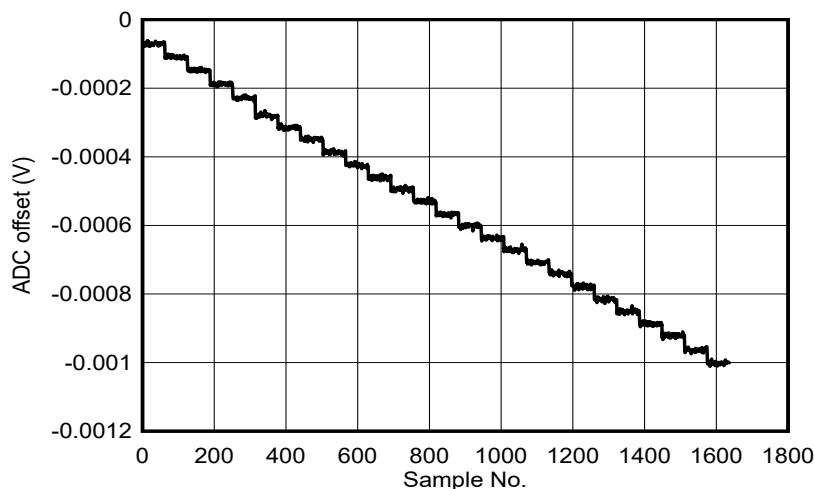


图 4-58. 未校准的 ADC 电压输入



图 4-59 显示了应用了增益和失调电压校准后的 ADC 精度。

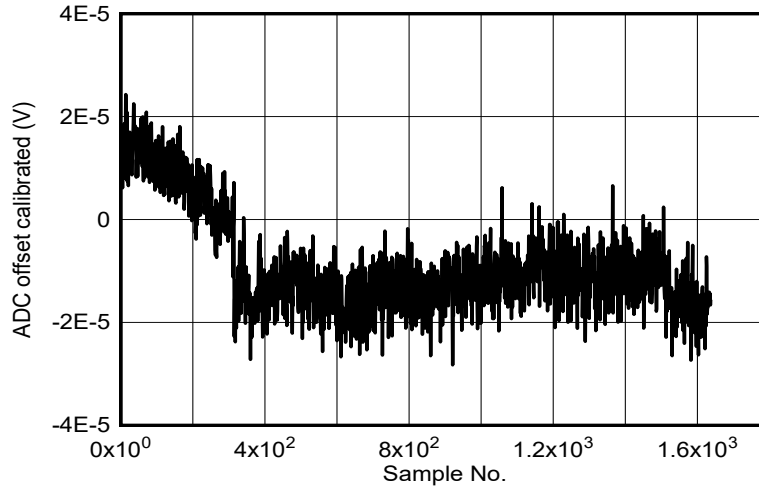


图 4-59. 已校准的 ADC 电压输入

增益和失调电压误差源自未校准数据，其斜率为 1.2509（而非 1.25），失调电压为 85 $\mu$ V。

#### 4.3.8 温度输入

为了测试 RTD 输入，请将 PT100 模拟器连接至 RTD 连接器，如图 4-60 中所示。在软件中，选择在基准电阻上产生大于 ADC 所需最小值 (0.5V) 但不会违反 IDAC 顺从电压的激励电流。有关这些规范的更多信息，请参阅 ADS122S14 数据表。

默认组装选项对 PT100 传感器使用 4.02k $\Omega$  基准电阻。200 $\mu$ A 的激励电流为基准输入产生 800mV。该电流还允许从 4mA 到 20mA 电流环路运行。

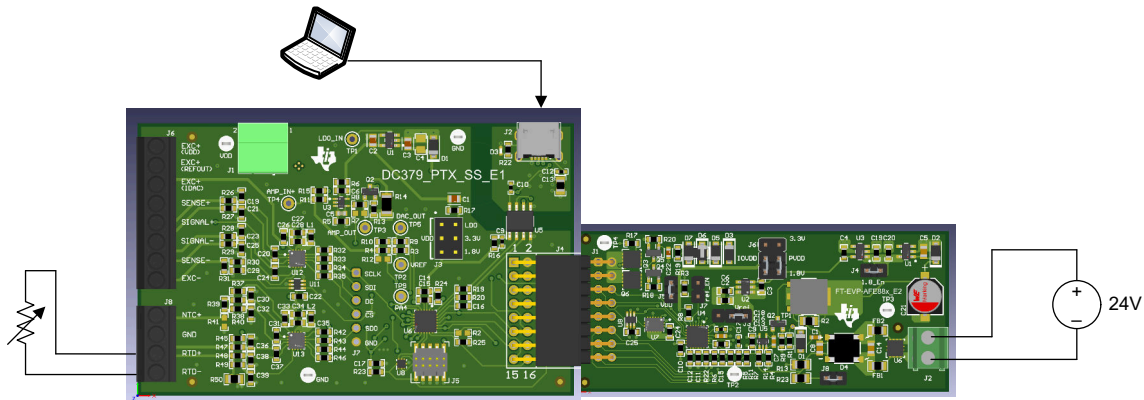


图 4-60. RTD 输入测试设置

表 4-8 展示了使用 RTD 模拟器进行测试的结果。约 100mΩ 的噪声相当于 0.25°C 的温度噪声。

**表 4-8. RTD 模拟器测试结果**

RTD 模拟器设置	ADC 读数最小值	ADC 读数平均值	ADC 读数最大值	ADC 峰值间噪声	ADC RMS 噪声	ENOB	NFB	标准差	产生的 RTD 电阻最小值	产生的 RTD 电阻平均值	产生的 RTD 电阻最大值	产生的 RTD 电阻峰值间偏差
-200	38366	38537.26	38620	254	32.23	18.99	16.01	32.26	18.39	18.47	18.51	0.12
-100	124793	124889.4	125009	216	31.29	19.03	16.25	31.32	59.80	59.85	59.91	0.10
-50	166270	166374.3	166487	217	29.36	19.12	16.24	29.39	79.68	79.73	79.78	0.10
-20	190696	190814	190919	223	30.42	19.07	16.20	30.45	91.39	91.44	91.49	0.11
-10	198874	198964.8	199069	195	29.47	19.12	16.39	29.50	95.30	95.35	95.40	0.09
0	207010	207127.6	207214	204	30.59	19.06	16.33	30.62	99.20	99.26	99.30	0.10
10	215092	215198.7	215288	196	30.68	19.06	16.39	30.71	103.08	103.13	103.17	0.09
20	223157	223257.5	223353	196	28.74	19.15	16.39	28.77	106.94	106.99	107.04	0.09
30	231204	231306.1	231415	211	30.65	19.06	16.28	30.68	110.80	110.85	110.90	0.10
40	239193	239299.8	239390	197	30.25	19.08	16.38	30.28	114.63	114.68	114.72	0.09
50	247147	247254.6	247355	208	31.92	19.00	16.30	31.95	118.44	118.49	118.54	0.10
60	255198	255304.3	255409	211	30.64	19.06	16.28	30.67	122.30	122.35	122.40	0.10
80	270994	271075.5	271177	183	29.74	19.11	16.48	29.77	129.87	129.91	129.95	0.09
100	286846	286979.6	287082	236	29.59	19.11	16.12	29.62	137.46	137.53	137.58	0.11
150	325776	325893.5	325977	201	29.15	19.13	16.35	29.17	156.12	156.18	156.22	0.10
200	363995	364094	364196	201	29.03	19.14	16.35	29.05	174.43	174.48	174.53	0.10
250	401674	401782.6	401893	219	29.54	19.12	16.23	29.56	192.49	192.54	192.60	0.10
300	438912	439000.3	439079	167	30.17	19.09	16.62	30.20	210.34	210.38	210.42	0.08
400	511381	511481.4	511593	212	30.40	19.07	16.27	30.43	245.06	245.11	245.17	0.10
500	581504	581627.7	581725	221	30.39	19.07	16.21	30.42	278.67	278.73	278.78	0.11
600	649426	649522.9	649642	216	29.82	19.10	16.25	29.86	311.22	311.27	311.32	0.10
700	714809	714911.4	715007	198	30.05	19.09	16.37	30.08	342.55	342.60	342.65	0.09
800	777632	777735.9	777881	249	29.62	19.11	16.04	29.65	372.66	372.71	372.78	0.12

#### 4.3.9 完整信号链

为了测试整个信号链（包括 ADC、信号处理和 AFE882H2），使用一个简单的压力电池模拟器可以生成三个电压阶跃。模拟器使用图 4-61 中所示的原理图模拟传感器电桥。模拟器会创建模拟低、中和最大读数的电压阶跃。

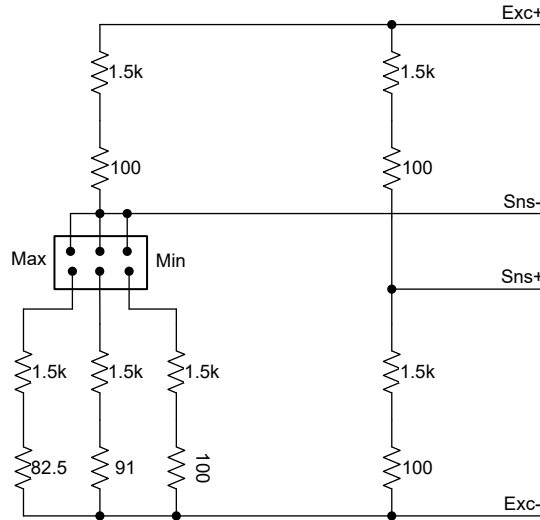


图 4-61. 压力传感器模拟器原理图

最小电压目标为 0mV，但电阻容差产生了稍高的值。中间设置产生 1.86mV，最大设置产生 3.83mV。

在测试中，工程师根据三个模拟器步骤的 ADC 读数来确定校准值。工程师还确定了与所需电流读数相对应的 DAC 设置，并使用温度读数来应用线性化函数。表 4-9 显示了测得的 ADC 读数、ADC 电压和测得的噪声。DAC 设置与先前的测试相关。所有测试均使用 100Ω 电阻器对 RTD 进行模拟。

图 4-62 显示了测试设置。

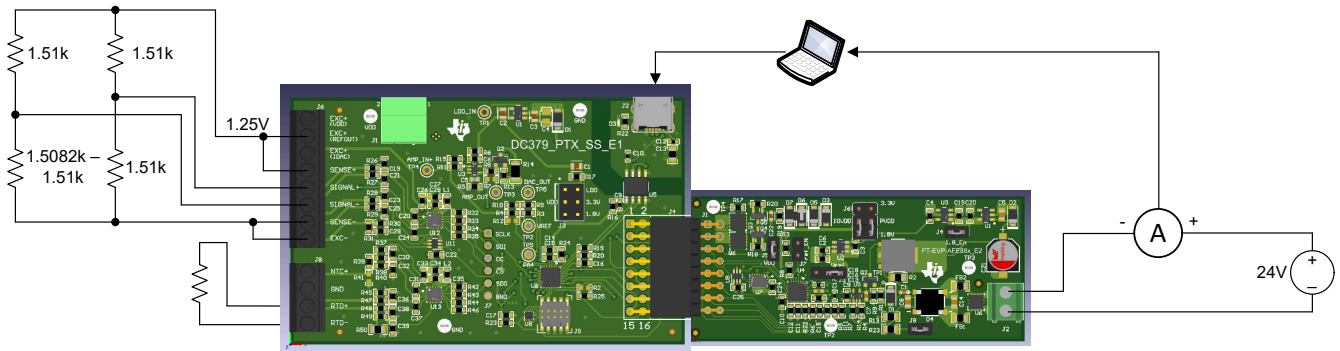


图 4-62. 系统测试设置

表 4-9. 测得的 ADC 读数、ADC 电压和测得的噪声

模拟器设置	ADC 读数 (十六进制)	ADC 电压	ADC 峰值间噪声	所需的输出电流	DAC 设置
最小值	0x4474e	0.32mV	5810 位 (6.7μV)	4mA	0xbb8
中	0x1bbaf8	2.11mV	8093 位 (9.4μV)	12mA	0x6df6
最大值	0x31b87e	3.79mV	6763 位 (7.8μV)	20mA	0xd034

pressure\_temp\_adc\_condition.c 文件包含生成的校准值和偏移值。

```
static int32_t h0 = 27340;
...
static int32_t g0 = 18135484;
```

```
...
static int32_t n0 = 421023099;
...
static int32_t P_offset = -1769446;
static int32_t T_offset = 0;
```

此配置允许使用三种不同的模拟器设置来测量整个系统的环路电流。

在模拟器设置为最小值的情况下，系统会产生预期的 4mA 电流。图 4-63 至图 4-66 中的测量结果展示了原始 ADC 读数，包括噪声和柱状图，以及测得的环路电流和柱状图。平均环路电流测得为 4.00mA，峰峰值噪声为 33μA。

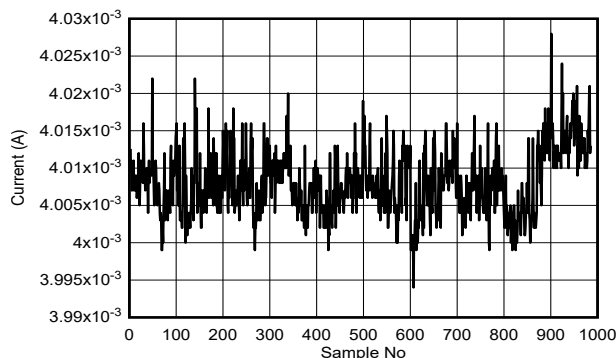


图 4-63. 最小设置环路电流

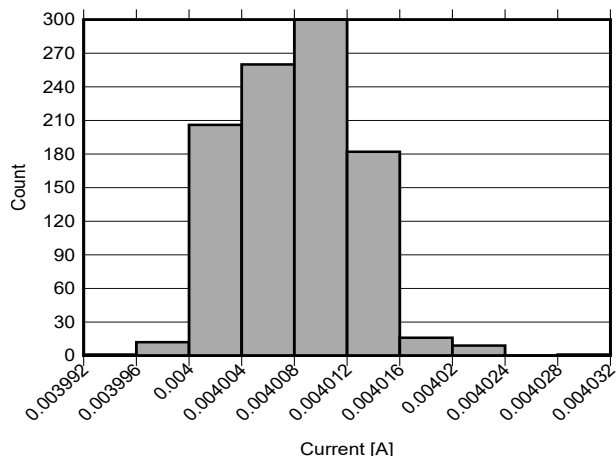


图 4-64. 最小设置环路电流柱状图

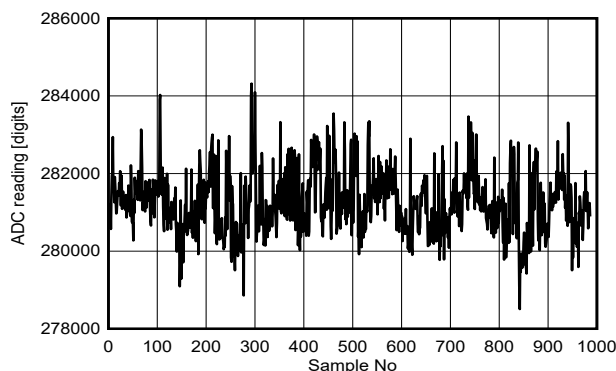


图 4-65. 最小设置 ADC 读数

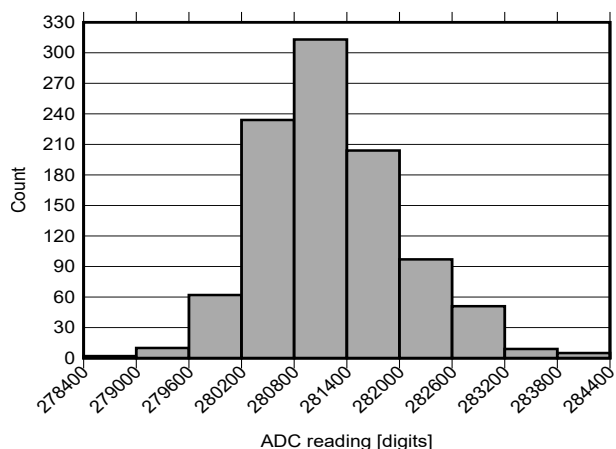


图 4-66. 最小设置 ADC 读数柱状图

在同一测试中，中间设置使用的预期电流为 12mA。图 4-67 至图 4-70 中的测量结果展示了原始 ADC 读数，包括噪声和柱状图，以及测得的环路电流和柱状图。平均环路电流测得为 12.02mA，峰峰值噪声为 40μA。

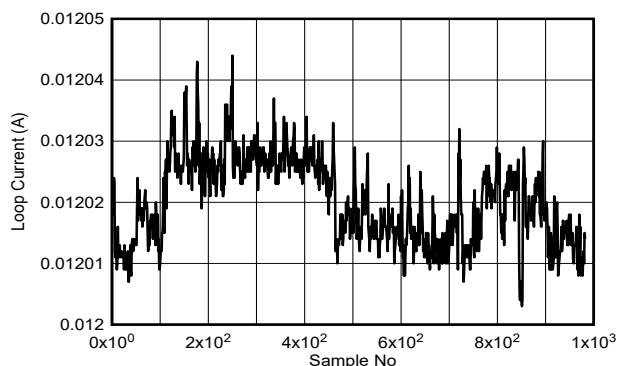


图 4-67. 中间设置环路电流

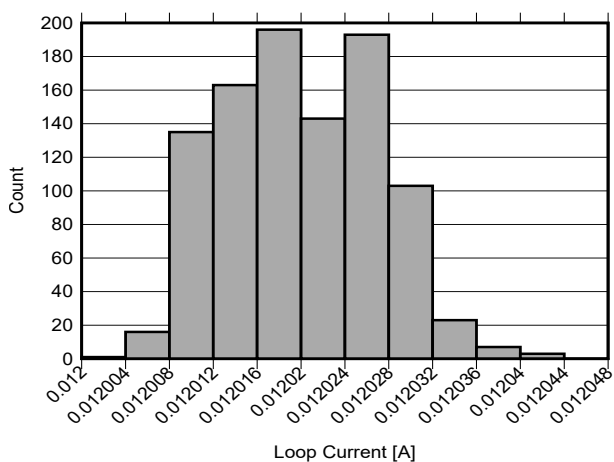


图 4-68. 中间设置环路电流柱状图

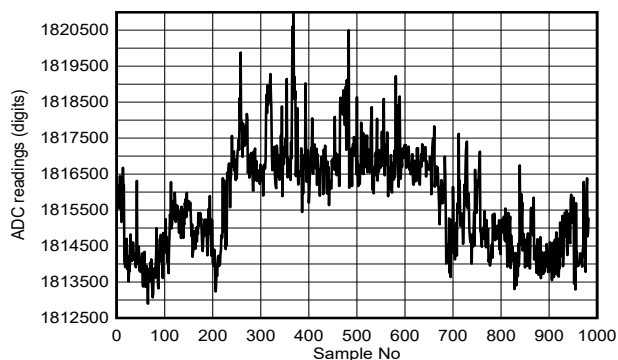


图 4-69. 中间设置 ADC 读数

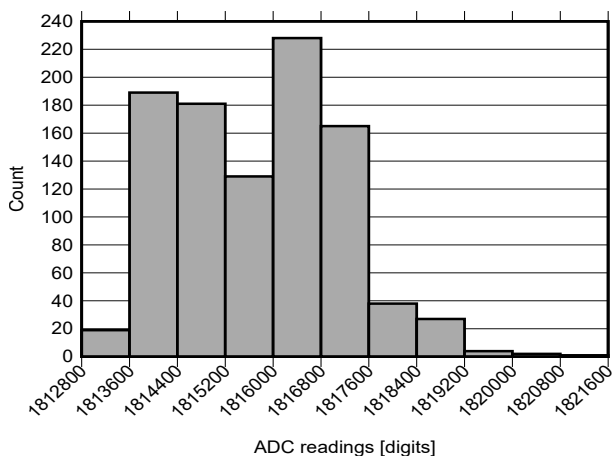


图 4-70. 中间设置 ADC 读数柱状图

在该测试中，最大设置使用的预期电流为 20mA。图 4-71 至 图 4-74 中的测量结果展示了原始 ADC 读数，包括噪声和柱状图，以及测得的环路电流和柱状图。平均环路电流测得为 20.06mA，峰峰值噪声为 37 $\mu$ A。

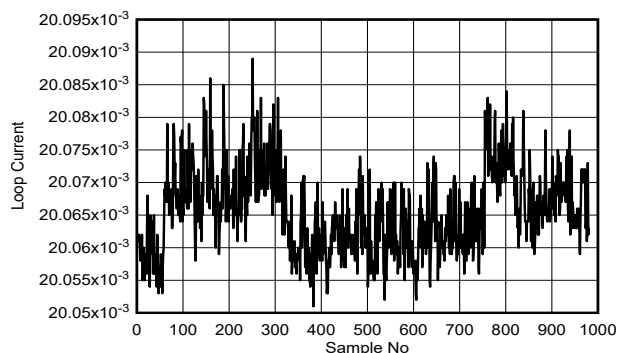


图 4-71. 最大设置环路电流

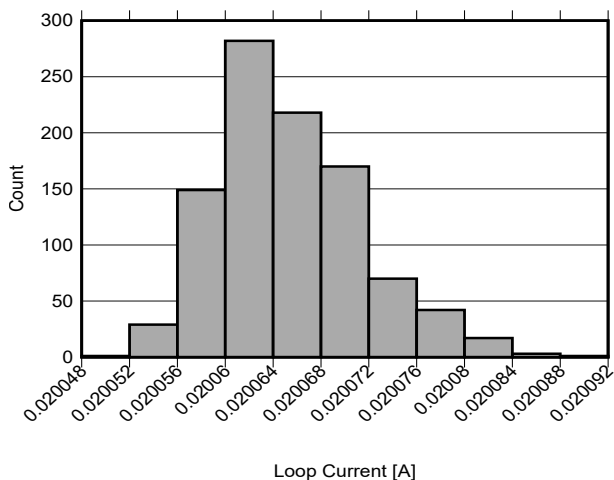


图 4-72. 最大设置环路电流柱状图

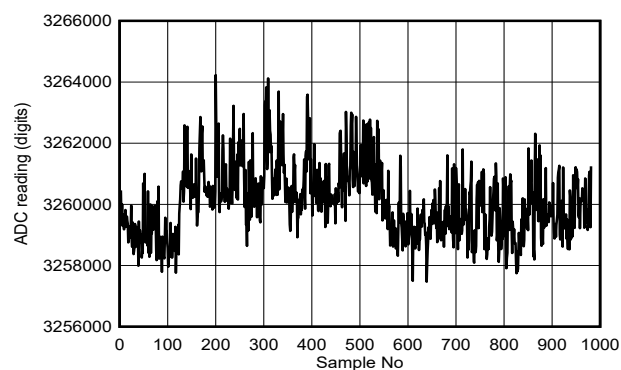


图 4-73. 最大设置 ADC 读数

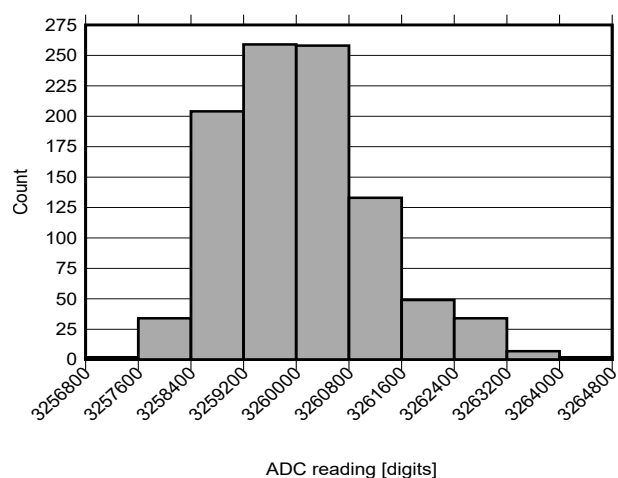


图 4-74. 最大设置 ADC 读数柱状图



## 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-010982](#) 中的设计文件。

#### 5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010982](#) 中的设计文件。

#### 5.1.3 PCB 布局建议

##### 5.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010982](#) 中的设计文件。

### 5.2 工具与软件

#### 工具

<a href="#">AFE881H1EVM</a>	AFE881H1 16 位电压输出精密 DAC 和 16 位 ADC 评估模块
<a href="#">AFE882H1EVM</a>	AFE882H1 16 位电压输出精密 DAC 和 16 位 ADC 评估模块
<a href="#">LP-MSPM0G3507</a>	适用于 80MHz Arm® Cortex®-M0+ MCU 的 MSPM0G3507 LaunchPad™ 开发套件

#### 软件

<a href="#">MSPM0-SDK</a>	MSPM0 软件开发套件
---------------------------	--------------

### 5.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[AFEx81H1](#) 具有内部 HART® 调制解调器、电压基准和诊断 ADC 且适用于 4mA 至 20mA 环路供电应用的 16 位和 14 位低功耗 DAC 数据表
- 德州仪器 (TI)，[AFEx82H1](#) 具有内部 HART® 调制解调器、电压基准和诊断 ADC 且适用于过程控制的 16 位和 14 位低功耗数模转换器 (DAC) 数据表
- 德州仪器 (TI)，[OPAx391](#) 精密、超低 I<sub>Q</sub>、低偏移电压、e-trim™ 运算放大器数据表
- 德州仪器 (TI)，[TPS7A03](#) 具有快速瞬态响应的毫微功耗 I<sub>Q</sub>、200nA、200mA 低压降稳压器数据表
- 德州仪器 (TI)，[REF35](#) 超低功耗高精度电压基准数据表
- 德州仪器 (TI)，[TVS3301 33V](#) 双向平缓钳位浪涌保护器件数据表
- 德州仪器 (TI)，[TMUX1219 5V](#) 双向 2:1 通用型开关数据表
- 德州仪器 (TI)，[SN74LV8T165](#) 并联负载 8 位移位寄存器数据表

### 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

E2E™, e-trim™, LaunchPad™, and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

HART® is a registered trademark of FieldComm Group.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 6 关于作者

**STEFFEN GRAF** 是德州仪器 (TI) 的一名系统工程师，负责开发工业领域中的参考设计。**Steffen** 在单线对以太网、数据线供电以及 IO-Link 领域拥有丰富的经验，他获得了德国达姆施塔特应用科学大学的电气工程理学硕士学位。

## 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 * (July 2025) to Revision A (January 2026)	Page
• 添加了 <a href="#">ADC 测试和测量</a> 。 .....	<a href="#">24</a>

## 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