

Design Guide: TIDA-010986

罗氏线圈信号调节参考设计



说明

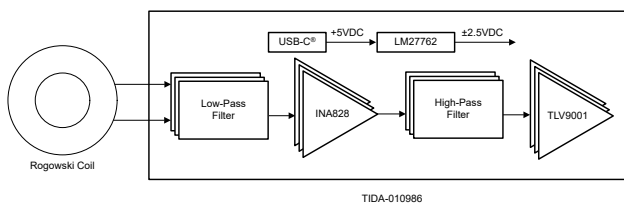
本参考设计是一款适用于罗氏线圈的信号调节参考设计，旨在提高电表、断路器、保护继电器和电动汽车充电器中电流测量的精度，使罗氏线圈测量满足 **ANSI C12.1** 和 **IEC** 合规性标准。这种基于运算放大器的有源积分器设计具有宽动态电流范围，以及带宽、稳定性和可调节增益 (**1V/V** 至 **525V/V**)。该设计针对三相系统进行了优化，并可与 TI 的 [ADS131M08 计量评估模块](#) 连接。该设计的目标是以类似基于分流器的设计的成本实现类似电流互感器的精度，并且与没有磁芯的电流互感器 (CT) 相比，还能达到 **0.2** 级和更高的精度水平。

资源

TIDA-010986	设计文件夹
INA818 、 INA828 、 INA188	产品文件夹
TLV9001 、 LM27762 、 ADS131M08	产品文件夹
TIDA-00601	设计文件夹



请咨询我司 **TI E2E™** 支持专家

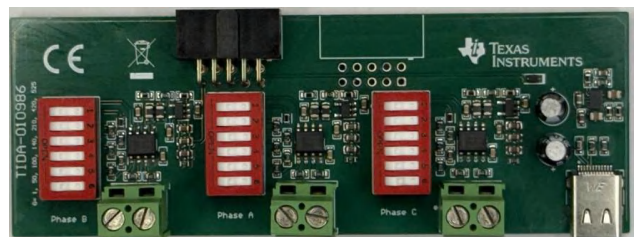


特性

- 使用基于罗氏 (di/dt) 线圈的电流传感器进行电流测量
 - 使用硬件元件 (运算放大器) 实现放大和积分
 - 符合 **ANSI C12.1**、具有 **0.2** 级或更高精度的类似 CT 性能
- 宽电流范围
 - 0.1A** 至 **> 1000A** (测试电流高达 **100A**)，可通过增益设置进行调节
- 高性能
 - 理论趋稳时间：**30ms**
 - 低 **BOM** 成本和小 **PCB** 尺寸
 - 旨在通过插件式外形直接与 **ADS131M08** 连接

应用

- 电表
- 交流充电 (桩) 站
- 直流快速充电站
- AFCI** 断路器
- 工业断路器 (**MCCB**、**ACB**、**VCB**)



1 系统说明

电表、断路器、保护继电器和电动汽车充电桩是现代电网基础设施的重要组成部分，支撑着各发电、输电和配电系统的保护、控制与监控功能。这些应用需要通过传感器元件进行精确的电压和电流检测，以实现可靠的性能、安全性和效率。

1.1 主要系统规格

参数	规格
电流传感器类型	PCB 和现成 (OTS) 罗氏线圈
罗氏线圈输出规格	PCB 罗氏线圈：16 μ V/A 至 100 μ V/A
输入电流数量 (相位)	三相
测量频率	50Hz、60Hz
积分器类型	有效
积分器输出	双极
交流电流测量范围	0.1A $\rightarrow$ 1000A (在 100A 下测试)
精度等级	< 0.2%
相位角误差	< 1°
积分器时间常数	大约 30ms
外部直流电源输入	USBC、5VDC

1.2 电表

电子电能表 (电表) 用于准确测量和监控住宅、商业和工业环境中的电能消耗。这些电表可采集电压、电流和频率。电表通常包括计量引擎，这些引擎使用测量值来实时计算 RMS 电压、RMS 电流、有功功率、无功功率、功率因数 (PF)、总谐波失真 (TDH)、相移、频率和电能使用情况。

现代电子仪表通常将罗氏线圈、分流电阻器和电流互感器 (CT) 集成为电流传感器。罗氏线圈因其线性输出、宽动态范围、紧凑的外形尺寸、抗饱和能力、高带宽和抗温漂等优势而备受青睐。这些传感器与高分辨率 ADC 和精密模拟前端相结合，使电表可提供 0.2 级或更高的测量精度。

为了支持使用时间计费、负载预测和电网诊断，电表必须在宽动态范围 (从低待机电流到峰值负载) 内保持高精度。准确的电流检测对于计费精度以及符合 ANSI C12.1 和 IEC 62053 等监管标准都至关重要。快速响应时间以及在温度和老化过程中的稳定性也至关重要，尤其是在智能电网系统中，电表需要将使用数据传送给公用事业提供商，以进行实时监控和负载管理。

1.3 断路器

断路器通过检测过载和短路，然后断开电源来防止损坏或火灾，从而保护电气系统。快速而准确的电流检测对于在正确的时间使断路器跳闸至关重要。

罗氏线圈专为断路器而设计，因为这类线圈可以在故障期间检测到非常高的电流而不会饱和。快速响应和宽测量范围使其成为快速可靠触发跳闸装置的理想选择。使用罗氏线圈有助于提升断路器性能，尤其是在需要精确、实时电流数据的现代电子跳闸系统中。

1.4 电动汽车充电器

电动汽车充电器需要准确测量电流以确保安全、计费和控制。充电期间的电流电平可能波动很大：从慢速充电期间的低电平到快速充电期间的极高电流。

罗氏线圈是电动汽车充电器的理想选择，因为这些线圈可以高精度测量宽范围电流，并且不会像传统的电流互感器那样饱和。这些线圈还可以很好地处理快速变化的信号，使其成为电力电子领域高频开关的绝佳选择。使用罗氏线圈有助于电动汽车充电器满足安全标准，同时提供可靠、高效的充电。

1.5 保护和继电器

保护继电器可在故障情况下通过监控多个电压和电流为电网设备提供保护。如果继电器检测到应力状况，则会向断路器发送跳闸信号，以将故障部分与电源系统隔离。保护继电器通过电流互感器 (CT)、罗氏线圈或分流器精确测量电流输入，通过电压互感器 (PT) 或分压器精确测量电压输入。此外，保护继电器还可以进行精确测量。这些继电器具有辅助电源（交流或直流）。

1.6 基于罗氏线圈的电流传感器

1.6.1 原理

罗氏线圈是一种环绕在导体周围的空芯（非磁性）环形绕组。由初级导体 (IP) 中的电流产生的交变磁场在线圈中产生电压 (V_s)。由于它是非磁芯，因此线圈的输出不会因大初级电流而饱和。

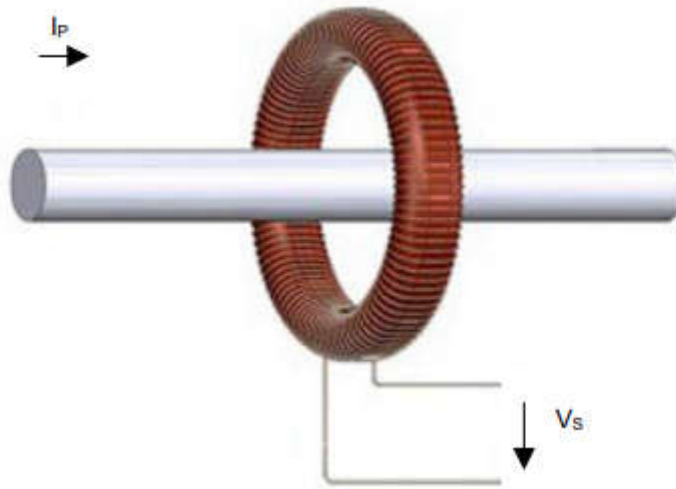


图 1-1. 基于罗氏线圈的电流传感器

罗氏线圈的输出电压与初级导体中的电流变化率成正比，并且电压不受直流电流的影响。具有宽电流量程的罗氏线圈可同时用于测量和保护应用。线圈提供与初级电路的电隔离。由于罗氏线圈将输入电流转换为输出电压，因此无需负载电阻器。这进而降低了功耗。与电流互感器不同，罗氏线圈在开路状态下具有电气安全性。

1.6.2 罗氏线圈类型

以下列表介绍了三种罗氏线圈类型：

- 刚性罗氏线圈绕制在由环氧树脂、塑料或其他非磁性材料制成的环形芯体上。
- 柔性罗氏线圈绕制在硅胶或橡胶管等柔性材料上。
- PCB 罗氏线圈在双层可堆叠 PCB 上采用紧密缠绕的均匀走线结构。

1.6.3 积分方法

罗氏线圈输出端感应的电压 (V_s) 与流过初级导体 (IP) 的电流的时间变化率成正比。对于正弦输入电流，输出电压存在 90° 的相移，且滞后于输入。由于罗氏线圈的输出与瞬时初级电流的导数成正比，因此需要积分器来检索原始电流信号。输出电压是线性的，在仅需要电流测量的应用中无需集成即可使用。对于需要测量功率的应用，电流和电压之间的相位差很重要，这需要罗氏电流传感器输出进行相移。这是使用积分器完成的。罗氏积分器可以通过两种方式实现：

- 数字（软件）集成：频域中的积分可产生 $-20\text{dB}/十倍频程$ 的衰减和恒定的 -90° 度相移。由于具有精确的相位和幅度响应控制，当以数字方式完成时，相位角校正精度显著提高。精确的数字集成需要采用数字滤波器实现高性能微控制器 (MCU) 和模数转换器 (ADC)。由于数字滤波器实现的复杂性，在启动期间会发生延迟处理。数字滤波器由系统中的 MCU 和 ADC 执行。

- 硬件集成：硬件积分器也可用于校正罗氏电流传感器相移。这可以使用无源积分器（电阻器、电容器）或有源积分器（有源（运算放大器）和无源元件的组合）来实现。此 TI 设计实现了一个基于运算放大器的稳定有源积分器，可在有用的温度范围内使用。

设计完善的硬件集成器会引入 90° 相移；然而，实际限制可能会导致相位误差和不准确。谨慎选择元件可更大限度地减小相位误差变化。

1.6.4 罗氏线圈选择

由于具有抗电磁干扰 (EMI)、消除寄生电容、抗饱和、低温漂、外形小巧和价格低廉等优点，罗氏线圈是替代电流互感器和分流电阻的上佳之选。刚性线圈具有更高的精度，而柔性线圈便于测量大型或非圆形截面导体（如母线排）中的电流。PCB 线圈是首选，因为它们可定制且外形轻薄。但是，对于某些应用，需要信号调节电路。

2 系统概述

来自线圈的输出信号非常小，偏移 90 度，并在过零附近失真。事实证明，新的差分 PCB 线圈设计不受 EMI 的影响，消除了寄生电容的影响，并且 CMMR 更高。为了适应 PCB 线圈设计的变化，必须重新设计新的信号调节电路。

2.1 方框图

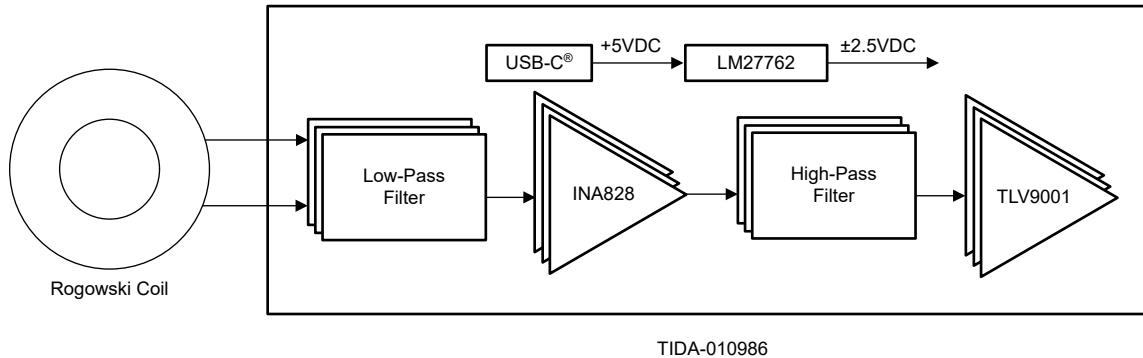


图 2-1. TIDA-010986 方框图

TIDA-010986 包含 6 个主要部分：

- 差分增益放大器
- 高通滤波器
- 低通滤波器
- 有源积分器
- USB-C® 电源输入
- 双极电源
- 两种不同的输出选项

2.1.1 差分增益放大器

由于来自线圈的信号非常微弱，因此需要一个增益放大级来增强 ADC 的输入信号。由于 INA828 器件在高增益设置下具有低输出噪声、高 CMMR 和高带宽，可以灵活地用于多种应用，而不仅仅是用于计量应用，因此选择其作为增益级。此放大器使用一个电阻器即可设置增益，相较于传统增益运算放大器电路中使用两个电阻器进行增益设置，这样可以降低最终使用成本。

2.1.2 高通滤波器

来自线圈的信号失真，存在潜在的直流失调电压。积分器对直流失调电压很敏感，因此任何直流失调电压都会导致过度积分，从而导致巨大的输出偏移。添加高通滤波器可将输入交流耦合到积分器、消除任何直流失调电压，并更大幅度地提高精度。

2.1.3 低通滤波器

罗氏线圈是 di/dt 传感器，用于测量电流的变化率，而不是测量电流。因此，罗氏线圈对快速瞬态和开关噪声非常敏感，尤其是在电流波形过零点附近。过零时，电流 (i) 瞬间处于零，导致急剧的电压峰值和线圈输出端的高频振铃。过零峰值和振铃会使信号失真，并在信号链中引入非线性。

为了解决过零问题和非线性，在差分放大器的输入端实现了一个低通滤波器。低通滤波器的作用是衰减高频分量（包括不必要的峰值和振铃），从而提高信号完整性并使系统行为具有更高的线性。

2.1.4 有源积分器

罗氏线圈输出，尤其是 PCB Rogowski 非常低（约为 $50 \mu V/A$ ），这在较低电流（例如 100mA）时会成为问题，此时信号需要根据线圈的灵敏度进行放大（ $100V/V - 500V/V$ ）。有源积分器电路可充当衰减器，同时将电流波形偏移 90 度。衰减低输入信号会降低精度，因为信号会变得非常低，而 ADC 会将该应用中的信号视为噪声。积分器的增益必须设置为单位增益，以消除相关频率（50Hz-60Hz）下的积分衰减。

为了实现 90 度的相移和增益为一，必须正确计算无源器件，并且元件类型必须是适合离散方法数学运算的类型。

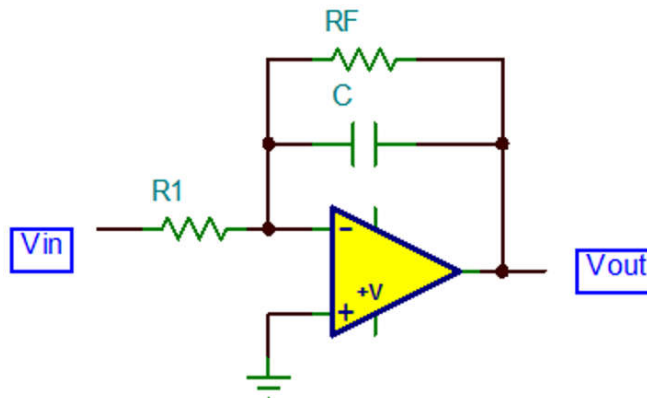


图 2-2. 积分器电路原理图

2.2 设计注意事项

2.2.1 元件选择

可以在两个级（增益级和积分器级）上控制系统的增益。增益选择受应用的影响很大。一些应用需要将高振幅电流降至可测量值，以在电流大于 1kA 时实现保护目的。对于精密测量至关重要的保护应用，电流会下降到 mV 范围，在该范围内增益放大器会放大信号，然后积分器（设置为衰减）会衰减系统中的所有噪声以实现精密测量。该设计具有多种增益设置，范围从 1V/V 到 525V/V，具体取决于罗氏线圈的类型和灵敏度，其中积分器的增益已设置为单位增益。这些增益设置在最大电流为 100A 时根据 100 级的 ANSI C12.1 2024 标准进行选择，以适应不同的灵敏度。

2.2.1.1 RC 元件选择

该设计旨在实现低相位误差、低噪声、快速趋稳和精密测量。为了实现小于 3 度的低相位误差，选择了 < 30ms 的 RC 时间常数。选择 100kΩ 电阻器和 0.3 μF 电容器来为积分器获得 30ms 的趋稳时间。选择具有低 (< ±5%) 容差和较低温度漂移的积分电容器。C0G/NP0 电容器具有良好的频率响应和温度稳定性。本设计中使用的电阻器具有 ±0.1% 的容差，并且采用薄膜材料，可提高精度和可重复性，并且不会给系统带来额外的噪声。

2.2.1.2 用于增益设置的 RG 选择

增益放大器的增益选择仅通过单个电阻器 (RG) 来控制。电阻器 RG 连接到 INA828 器件的引脚 1 和引脚 8。该电阻必须尽可能靠近放大器的引脚，以减小引脚 1 和引脚 8 之间的线路电容。放大器的增益必须根据以下公式正确设置：

$$S \times I_{\max} \times G_s = L \quad (1)$$

其中

S = 线圈灵敏度 (以 μV 为单位)

$I_{\max}$ = 流经导体的最大电流

L = ADC 模拟输入引脚的限制

G_s = 系统增益

其中

$$G_s = \text{Gain}_{\text{amp}} \times \text{Gain}_{\text{int}} \quad (2)$$

$$\text{Gain}_{\text{amp}} = 1 + \frac{50k}{R_G} \quad (3)$$

$$\text{Gain}_{\text{int}} = \left(\frac{R_F}{R_I} \right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi \times F \times R_F \times C)^2}} \right) \quad (4)$$

备注

要设置正确的增益值，必须已知罗氏线圈的灵敏度和最大电流。

2.3 重点产品

2.3.1 INA828

在罗氏线圈设计中，使用 3A 仪表放大器对每个相位进行电压监控。选择合适的仪表放大器对于该前端至关重要。

选择仪表放大器的主要规格包括：

- 高共模抑制比有助于减少在仪表放大器两个输入端观察到的共模噪声量。
- 低电压噪声密度可提高灵敏度更高的罗氏线圈在低输入电流下的精度。
- 低增益误差偏移和增益误差漂移有助于尽可能减少校准操作，并降低温度变化对性能的影响。
- 宽电压增益范围可实现与各种不同罗氏线圈输出的兼容性。

本设计中为积分器和增益级使用了 INA818 仪表放大器。另外，当寻求较低的本底噪声时，请考虑使用 INA828 或 INA188，这两款器件虽会使电压噪声略有增加，但能改善随温度变化的漂移特性。

2.3.2 TLV9001

运算放大器在为电流检测应用提供精确集成和信号调节方面起着至关重要的作用。选择恰当的运算放大器对于在宽工作范围内实现高精度、高稳定性和可重复的结果至关重要。

为积分器级选择运算放大器时，其关键规格参数包括：

- 低失调电压和低温漂，可减少频繁校准的需求，并有助于在温度变化时保持长期测量精度。
- 低输入偏置电流，可最大限度减轻罗氏线圈的负载效应，有助于保持信号保真度。
- 低电压噪声密度，可提升测量精度和可重复性，尤其在低输入电流电平下效果显著。

TLV9001 具有轨至轨输入/输出特性与低功耗特性，这也使其非常适合要求具备集成性能的紧凑型低功耗设计。

2.3.3 LM27762

LM27762 提供超低噪声的正负输出，可在 $\pm 1.5V$ 和 $\pm 5V$ 之间调节。输入电压范围为 $2.7V$ 至 $5.5V$ ，输出电流高达 $\pm 250mA$ 。LM27762 的工作电流仅为 $390\mu A$ 和 $0.5\mu A$ 典型关断电流，可为功率放大器和 DAC 偏置以及其他高电流、低噪声负电压需求提供出色的性能。该器件采用很少的外部元件，因此设计尺寸较小。

3 系统设计原理

3.1 原理图到布局

3.1.1 罗氏输入连接器

图 3-1 和图 3-2 显示了差分罗氏线圈与信号调节电路连接的连接器。2 引脚端子 (J1) 通过输入 INPUT_1_P 和 INPUT_1_N 接收线圈的差分输出，以提供信号完整性并避免在线圈断开连接时出现未定义的行为。按照 [INA828 50 \$\mu V\$ 失调电压、7nV/ \$\sqrt{Hz}\$ 噪声、低功耗、精密仪表放大器](#) 数据表中的建议，在每个输入端与接地端之间放置 $47.5k\Omega$ 处的下拉电阻器 (R9 和 R10)。这些电阻器可防止输入端悬空，否则可能导致积分器级出现噪声拾取或不稳定行为。

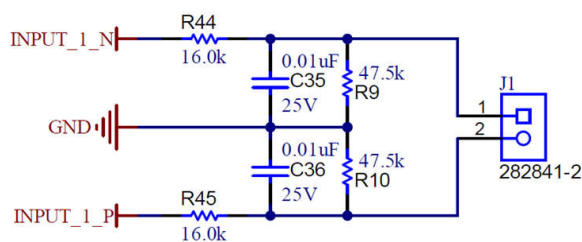


图 3-1. 端子块输入连接原理图

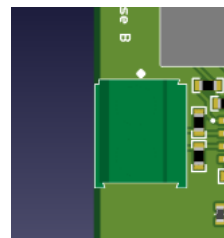


图 3-2. 端子块输入连接

3.1.2 增益设置电阻器链

图 3-3 和图 3-4 展示了用于设置增益放大器级增益的电阻器链。该链的灵活设计可根据应用要求和线圈灵敏度提供各种增益值。DIP 开关 (SW1) 从一组精密电阻器 (R15-R20) 中一次选择一个电阻器，其中每个电阻器都对应各种灵敏度的特定增益值。

开关上的每个位置都将增益放大器的引脚 1 和引脚 8 路由到不同电阻值的电阻器，从而提供一组在 PCB 丝印上标记的离散增益选项： $G = 1$ 、50、100、140、210、420 和 525。精心选择这些值以涵盖各种罗氏线圈输出，并确保与低电流和高电流测量兼容。

电阻器链方法简化了测试和校准，使工程师能够快速评估不同的增益设置，而无需修改 PCB 布局或对元件进行返工。

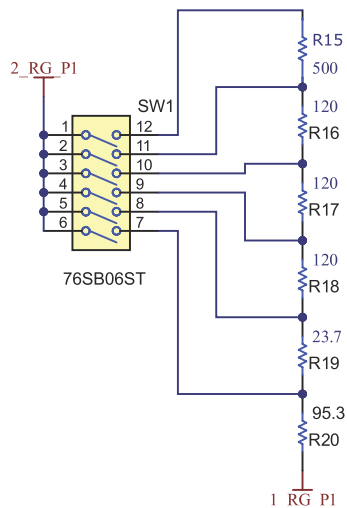


图 3-3. 离散电位器电阻器链原理图

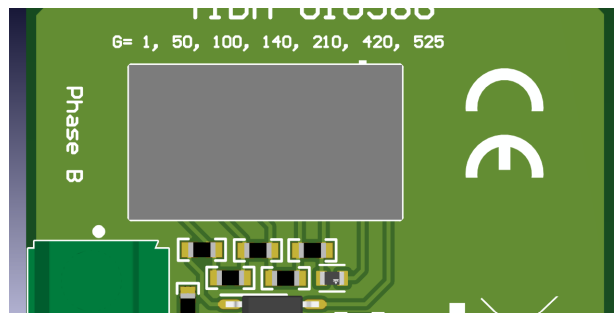


图 3-4. 离散电位器电阻器链

3.1.3 增益放大器和高通滤波器级

该级利用精密仪表放大器 INA828 放大来自罗氏线圈的差分信号。放大器配置为双极输出，增益由外部电阻器（连接到 RG 引脚）设置，如节 3.1.2 中所述，并在节 2.2.1.2 中计算。此配置允许根据线圈的灵敏度和所需的输出范围进行灵活调整。该放大器提供出色的共模抑制和高输入阻抗，因此非常适合处理由罗氏线圈生成的低电平差分信号。

在放大器之后，使用电容器 C13 和 C21（共 44μF）以及电阻器 R33（50.5kΩ）实现高通滤波器。此滤波器可阻断直流分量和低频漂移，仅允许交流信号（代表成比例的波形）通过。这对于抑制由于随时间的积分、线圈断开或长时间运行而累积的基线偏移尤为重要。

该级确保在馈送到积分器之前正确放大和清理信号，从而实现精确的电流波形重建和测量。

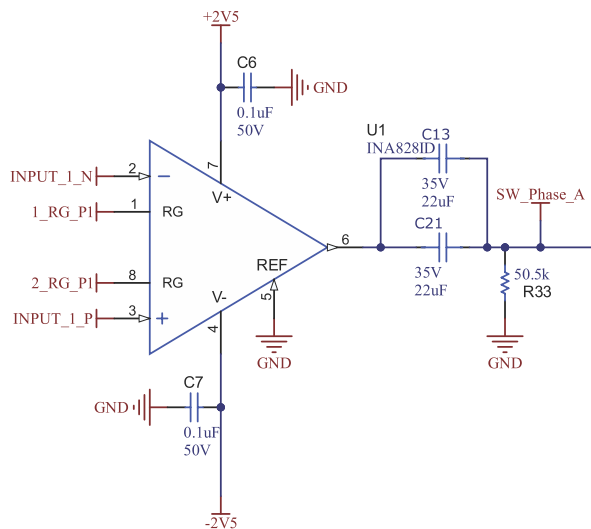


图 3-5. 增益放大器和高通滤波器原理图

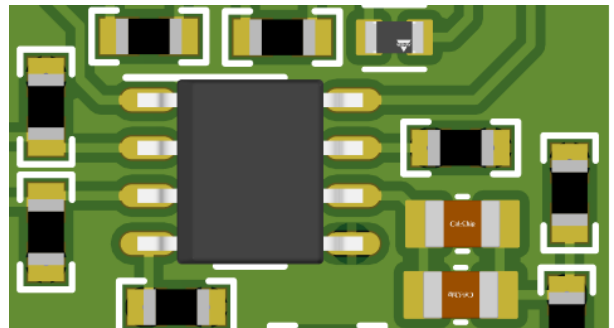


图 3-6. 增益放大器和高通滤波器

3.1.4 有源积分器级

图 3-7 和图 3-8 中所示的电路是使用 TLV9001IDBVR 运算放大器的有源积分器，针对罗氏线圈输出的精密信号调节进行了优化。该级对差分增益放大器的双极比例输出电压进行积分，以重建相应的电流波形。

图 3-8 中的相邻布局视图展示了该积分器级的紧凑型 PCB 实现。正确放置无源器件和 TLV9001 可确保信号完整性并更大限度地降低噪声。反馈元件采用短走线布线以减少寄生效应。

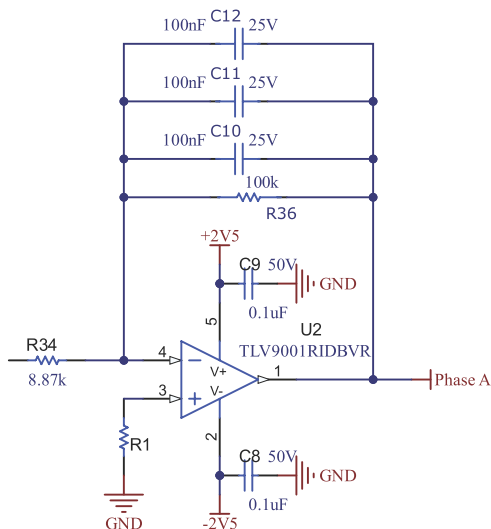


图 3-7. 有源积分器电路原理图

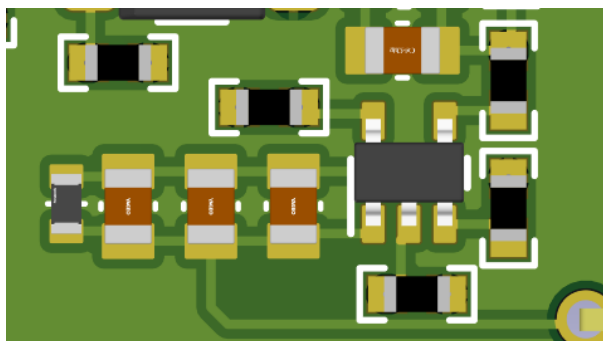


图 3-8. 有源积分器电路

3.1.5 输出级

输出级提供两种类型的信号，用于评估和灵活测试：

- **硬件集成信号输出：**该路径在使用 TLV9001 运算放大器进行模拟集成后提供输出。此方法表示来自罗氏线圈的完全调节电流信号（类似 CT 的信号），已准备好进行直接测量和数字化。
- **没有硬件集成的放大信号：**该路径绕过积分器级，允许用户测试基于软件的集成方法。该方法提供原始放大的罗氏线圈信号，这在评估 [ADS131M08 计量评估模块](#) 中的数字集成性能时特别有用。

输出连接器设计用于直接连接 [ADS131M08 计量评估模块](#)，无需手动跳线或返工。这种简化方法可提高测试效率、减少误接线导致的误差，并确保信号调节板和计量平台之间具有可靠连接。

相应的 PCB 布局显示了两个不同的输出连接器。顶部是硬件集成信号，底部是放大信号预集成。

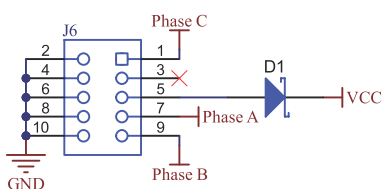


图 3-9. 输出连接器原理图

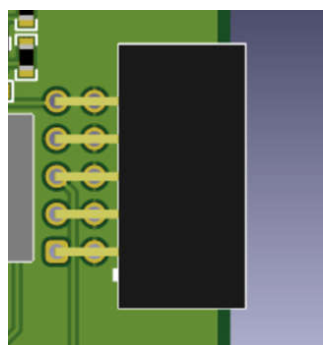


图 3-10. 输出连接器

3.1.6 电源

电源级负责为模拟信号链提供所需的双极性电源轨。此级采用 USB-C 输入接口接收标准 5V 电源，随后通过 LM27762 电荷泵逆变器进行降压并转换为 $\pm 2.5V$ 电源。

此设计方案具有以下特点：

- 提供 INA828 和 TLV9001 运算放大器所需的 +2.5V 和 -2.5V 电源轨

- 实现紧凑高效、低噪声的电源设计，无需外接双极性电源

PCB 布局展示了 USB-C 连接器和电源电路的简洁实施方案，包含恰当的旁路电容和输出滤波设计，确保稳定运行。LM27762 周围的对称布局可大幅抑制纹波并提供低输出阻抗，这对模拟精密应用至关重要。

这种自包含的电源设计仅需一根 USB-C 电缆即可实现整个系统的轻松集成和便携，使其成为开发和现场测试的理想选择。

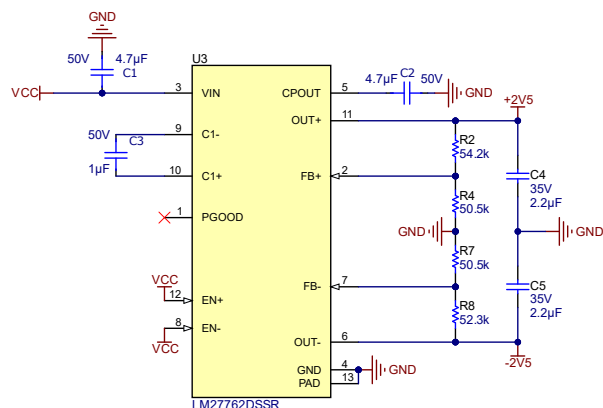


图 3-11. 电源原理图

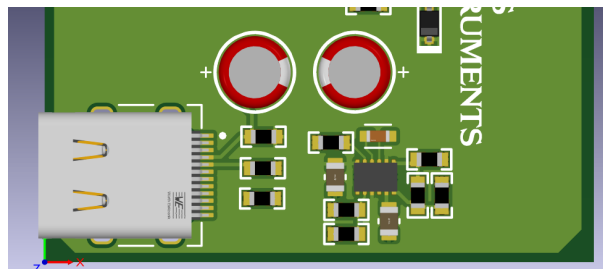


图 3-12. 电源 USB-C® 连接器

4 硬件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

为准确评估罗氏线圈和相关信号调节电路的性能，需要以下硬件：

1. **示波器：**
用于观测信号调节电路的输出波形。高带宽示波器可精确捕捉罗氏线圈过零处的快速瞬变和尖峰行为。
2. **USB-C 电源 (5VDC)：**
为信号调节板提供稳定电源。确保电源纯净且隔离，以免开关噪声注入系统。
3. **电流源或具有电流注入功能的函数发生器：**
需要一个可编程的交流或脉冲电流源，用于向罗氏线圈注入已知电流波形。
4. **精密电流测量工具（如钳形电流表、校准电流探头）：**
对流过导体的实际电流进行精确参考测量时需要用到。借此可实现与罗氏线圈输出信号的对比，从而准确验证振幅、相位精度、线性度及测量准确度。
5. **负载（电阻或实际负载）：**
用于创建真实工作条件，使电流源能够通过已知阻抗驱动电流。

4.2 测试设置

4.2.1 完整系统方框图

图 4-1 展示模拟符合 ANSI C12.1 标准、达到 0.1 级精度的计费电表所需的完整系统设置。测试设置包含五个主要部分：

- 可编程电流和电压源 (PTS3.3C 测试系统)
- 罗氏线圈 (PCB 罗氏)
- 信号调节电路板 (TIDA-010986)
- ADS131M08 计量评估模块
- 用于电表性能监控和校准的 GUI

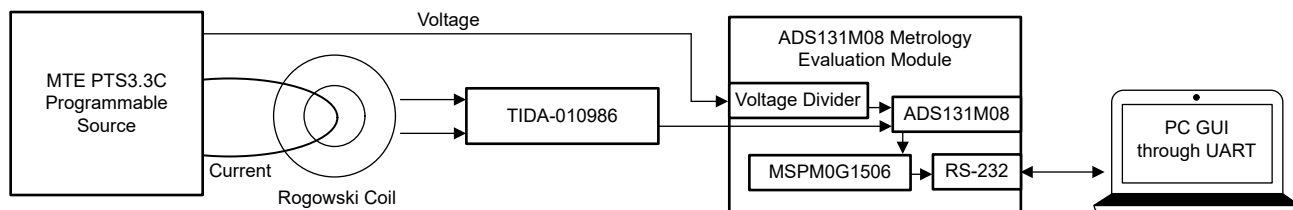


图 4-1. 完整系统方框图

4.2.2 测试系统

图 4-2 展示了 MTE 测试设备。用于测量的 *PTS3.3C* 精度等级为 0.05%，可在测量过程中尽可能减少不确定性。



图 4-2. 自动测试设备 (MTE)

4.2.3 罗氏线圈

图 4-3 展示了用于此测试的 PCB 罗氏线圈作为主电流传感器。

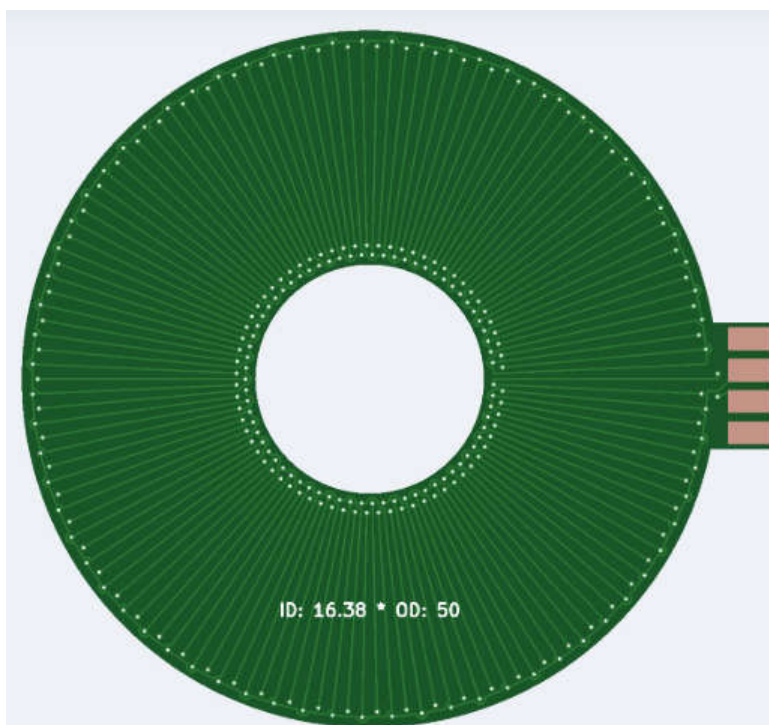


图 4-3. PCB 罗氏线圈

4.2.4 TIDA-010986

图 4-4 展示了使用罗氏线圈时用于调节信号的模拟信号调节电路板。

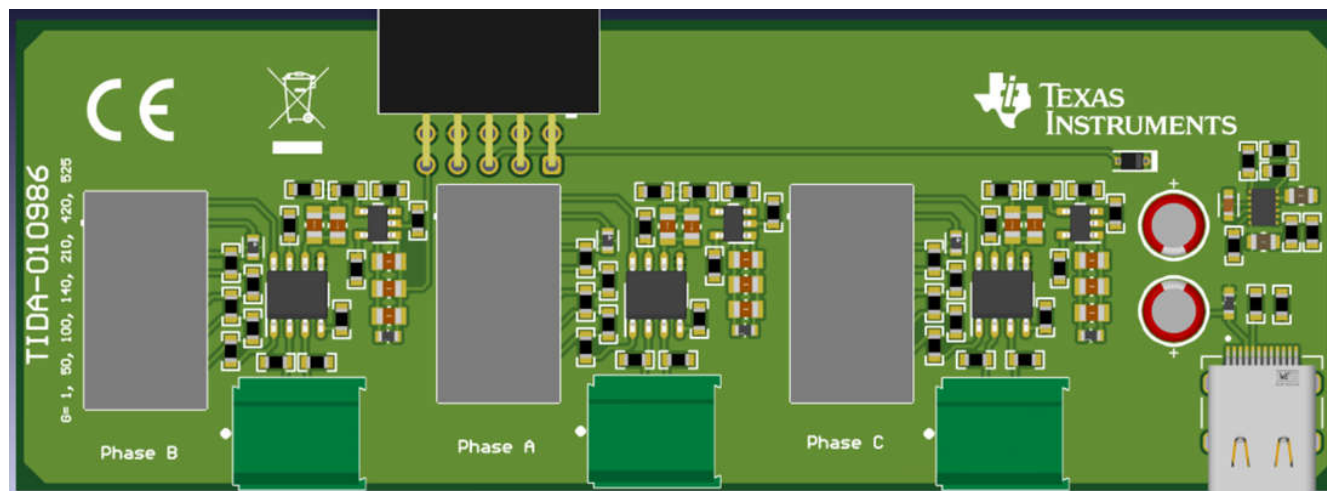


图 4-4. TIDA-010986 模拟信号调节 PCB

4.2.5 ADS131M08 计量评估模块

图 4-5 展示能量计算和消耗测量所需的、配备 ADC 和 MCU 的 EVM。

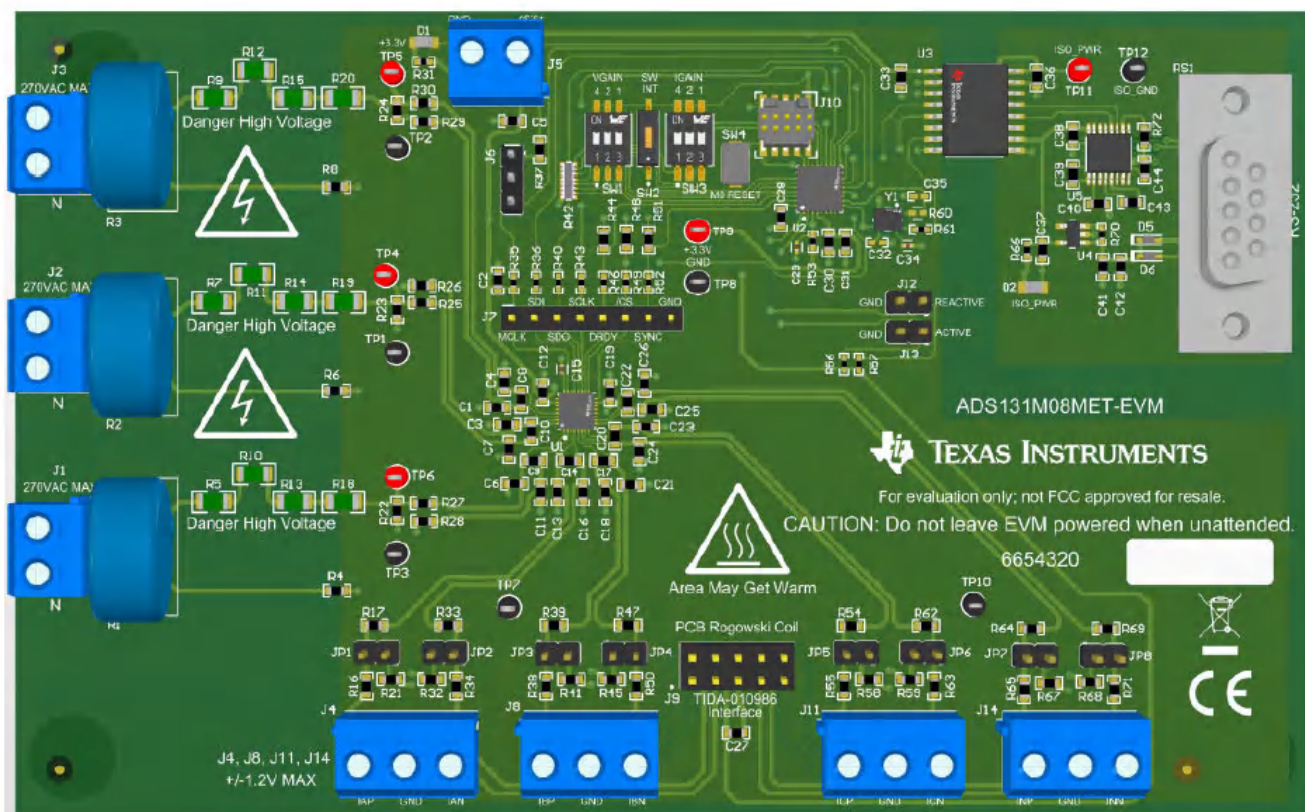


图 4-5. ADS131M08 计量评估模块

4.2.6 GUI

图 4-6 展示用于跟踪电表消耗和电表校准的 PC GUI。

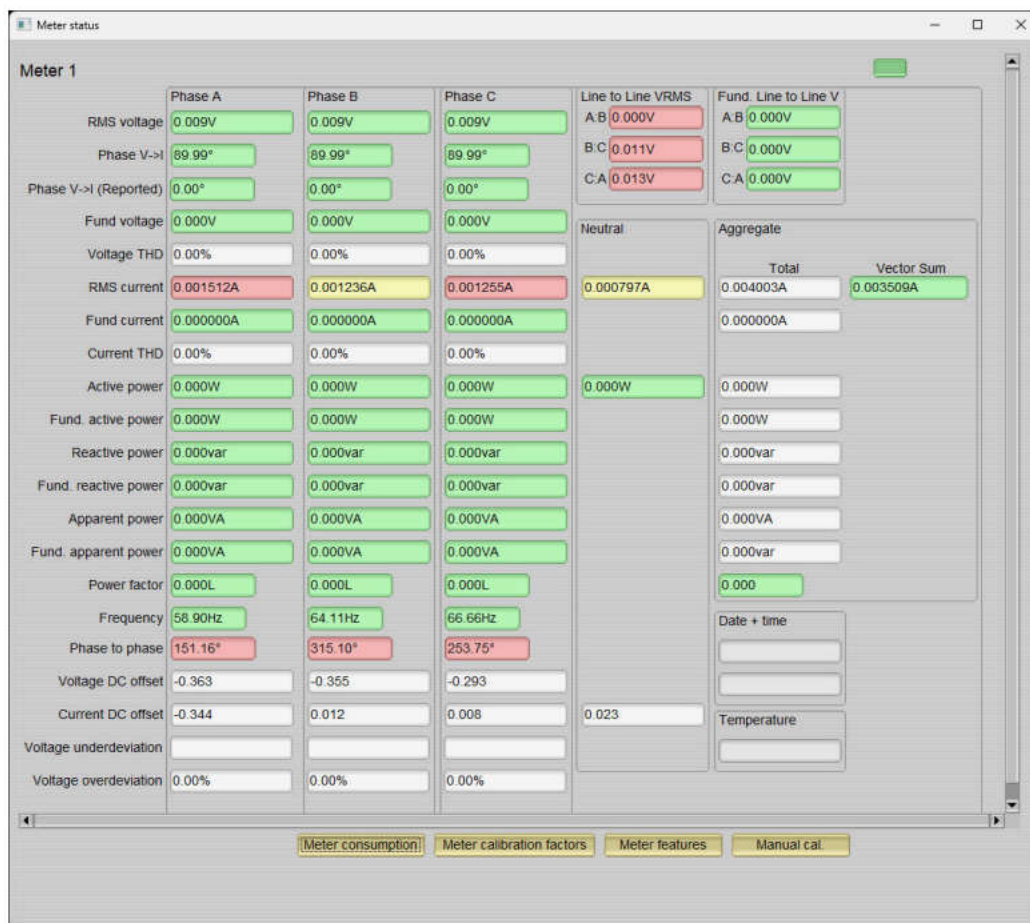


图 4-6. PC GUI

4.2.6.1 入门

本节介绍 PCB 罗氏线圈、TIDA-010986 工具和 [ADS131M08 计量评估模块](#) 上提供的不同类型连接，以及如何将这些电路板连接在一起以实现完整的电表设计。

4.2.6.1.1 PCB 罗氏线圈设置

D1 和 D2 引脚为罗氏线圈输出端，必须将跳线焊接至 D1 和 D2 引脚以实现罗氏线圈与 TIDA-010986 的连接。为获取线圈输出，必须在电路板背面（无丝印层侧）的 D1 和 D2 引脚之间连接跳线（ 0Ω 电阻器）。此设计还支持堆叠配置，当线圈堆叠时灵敏度将倍增，也可视需要降低增益配置，从而有效抑制噪声、提升系统稳定性及测量精度。

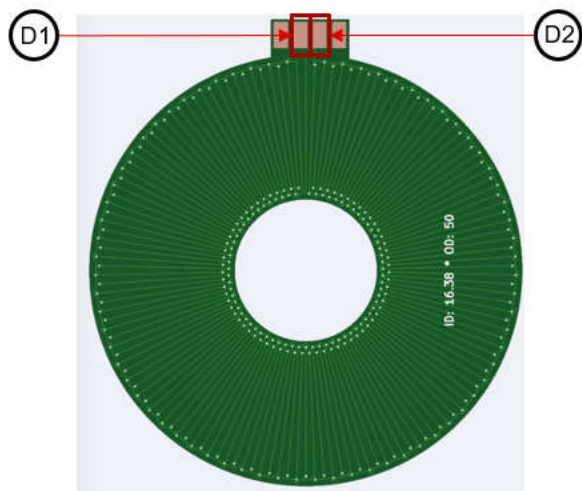


图 4-7. PCB 罗氏线圈 - A

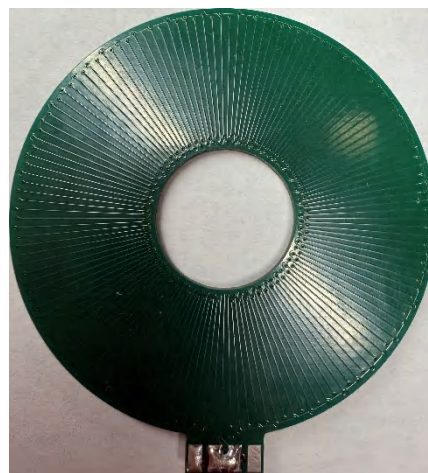


图 4-8. PCB 罗氏线圈 - B

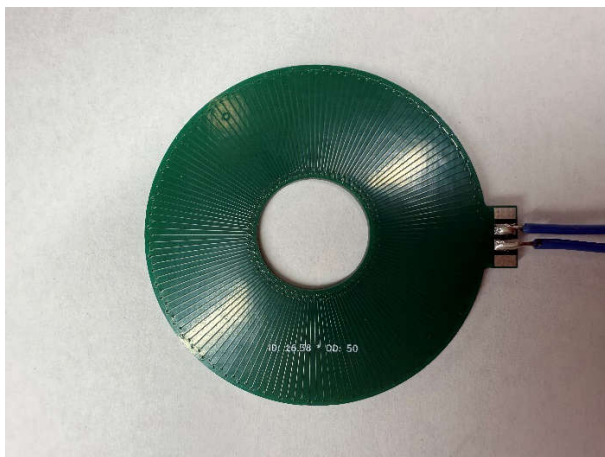


图 4-9. PCB 罗氏线圈 - C

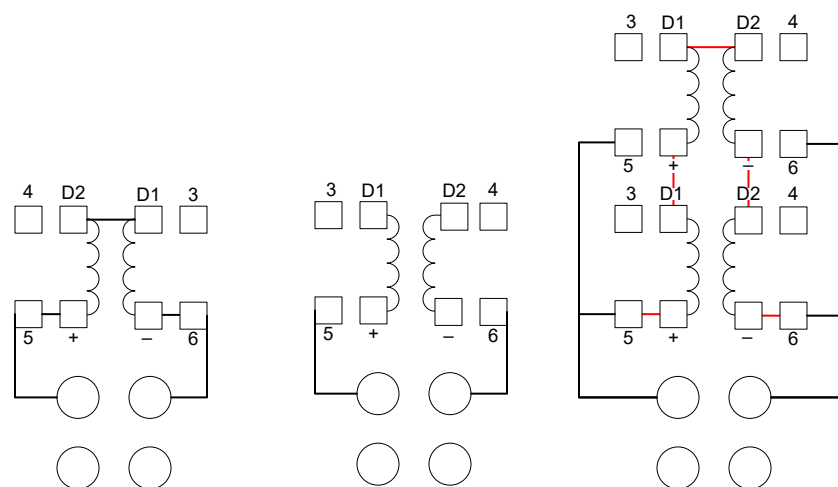


图 4-10. 双线圈堆叠配置示例

4.2.6.1.2 TIDA-010986 连接器

4.2.6.1.2.1 输入端子块

图 4-11 展示了 TIDA-01086 上某一相的接线端子排列，该端子用于连接至罗氏线圈的跳线接口。

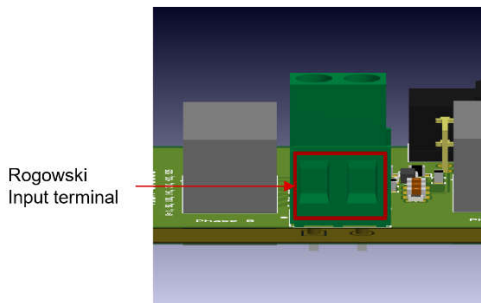


图 4-11. 输入端子块

4.2.6.1.2.2 电源连接

图 4-12 展示了位于电路板左下角的 USB-C 连接器。USB-C 连接器仅用于供电。

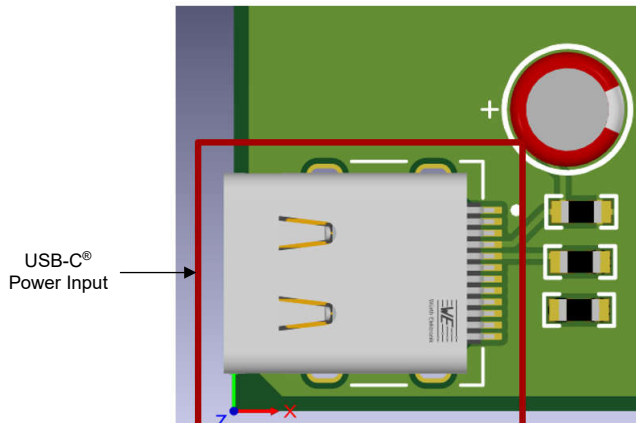


图 4-12. USB-C® 连接器

4.2.6.1.2.3 输出接头

图 4-13 展示了与 [ADS131M08 计量评估模块](#) 连接的输出连接器。图 4-13 对应硬件集成输出接口，其中引脚 1 - 6 分别对应 C 相输出、NC、5VDC 输入、A 相输出、B 相输出和 GND。

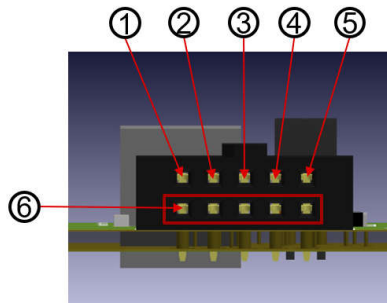


图 4-13. 输出连接器引脚排列 1 - 6

4.2.6.1.3 ADS131M08 计量评估模块连接器

图 4-14 展示允许 TIDA-010986 无跳线与 [ADS131M08 计量评估模块](#) 连接的接头连接器，使该过程更易于使用。

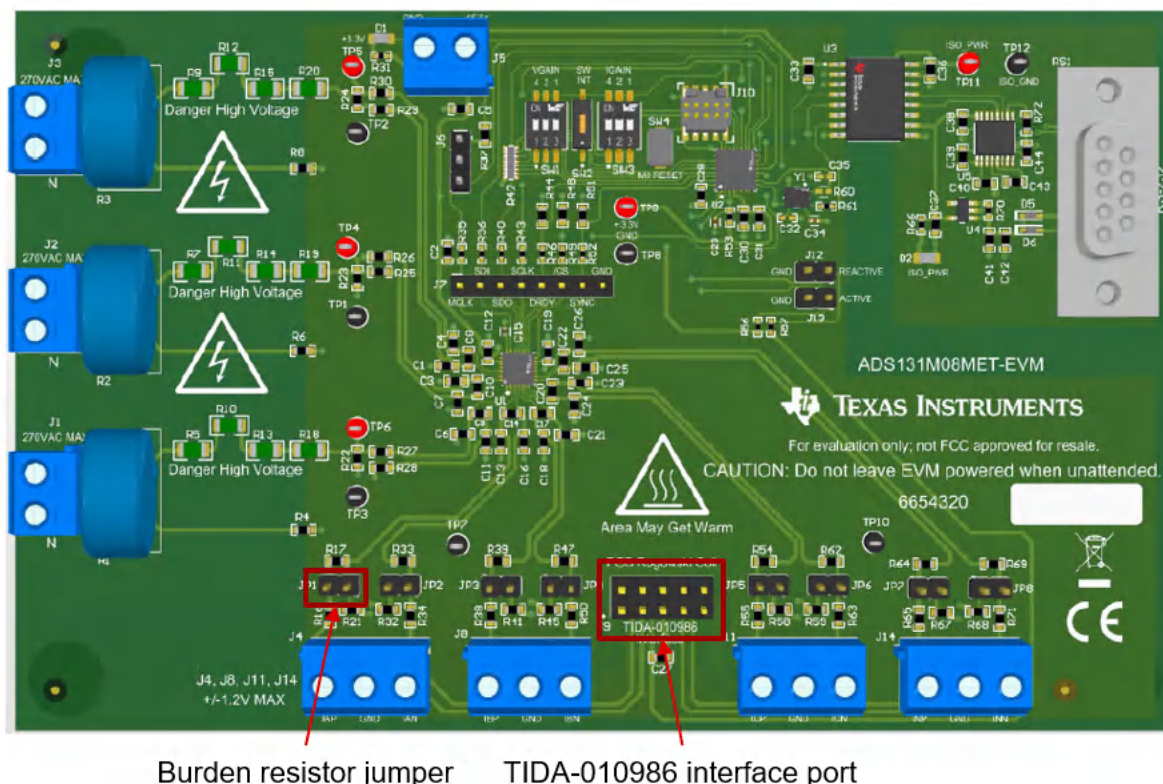


图 4-14. TIDA-010986 的连接点

备注

要将所有电路板正确连接在一起，需要移除负载电阻跳线。

备注

如果连接了 TIDA-010986 和 [ADS131M08 计量评估模块](#)，则无需将 USB-C 连接到 TIDA-010986，因为 TIDA-010986 会通过 [ADS131M08 计量评估模块](#) 供电。

4.3 测试结果

4.3.1 功能测试

表 4-1 展示功能检查。

表 4-1. 功能检查

参数	预期值	观察值
电源输入	5VDC	+5.08 VDC
正极电源轨	+2.5 VDC	+2.478 VDC
负极电源轨	-2.5 VDC	-2.48 VDC
增益设置	1、50、100、140、210、420、525	1、52.07、105.38、140.27、210.2、421.16、525.65
积分增益	1V/V	0.99V/V
相移	90°	90.72°

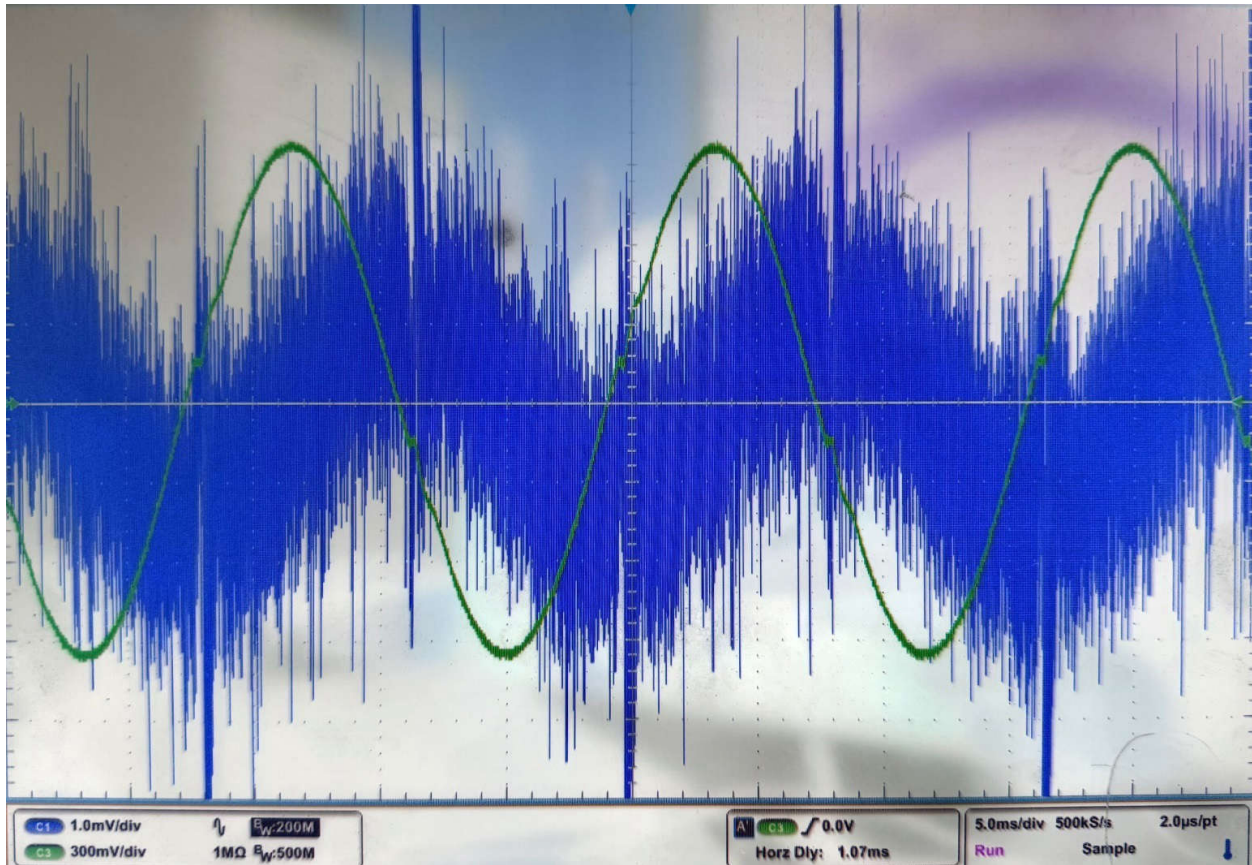


图 4-15. 在 100A 下运行系统的示波器捕获

4.3.2 精度测量

本节讨论在 PCB 罗氏线圈和信号调节电路板 (TIDA-010986) 上执行的各种测试。这些测试按照 *ANSI C12.1* 和适用的 IEC 标准进行。以下各节还展示了测试结果，重点介绍了系统在不同用例中的精度、线性度和防噪性能。目标是验证设计是否符合计量标准以及在实际应用中的有效性。

备注

测试使用一个堆叠式 PCB 罗氏线圈执行，如图 4-3 所示。

4.3.2.1 无负载条件

4.3.2.1.1 目标

本测试的目标是验证系统在电路中没有电流时不会记录脉冲（电流读数）。

4.3.2.1.2 设置

电路中必须存在电压，且电流必须与电路断开。

4.3.2.1.3 要求

在空载条件下，请遵循以下要求。

- 在前 10 分钟内：
 - 不得发出超过一 (1) 个测试脉冲
 - 累积的能量不得超过 1 个测试脉冲的等效值
- 在接下来的 20 分钟内：
 - 不得再发出任何测试脉冲
 - 不得再累积任何能量

4.3.2.1.4 结果

电路中存在电压，所有电流电路均已断开。系统在测试持续期间（20 分钟）记录一个脉冲。

4.3.2.2 初始负载运行测试

4.3.2.2.1 目标

本测试的目标是验证电表能在启动负载条件下在预期的最小额定电压范围内持续可靠地运行，并确保电表能够正确地测量两个方向的能量。

4.3.2.2.2 设置

对相关电流等级施加指定的起始负载电流

- 对于本测试，计量应用的目标是电流等级 100 和 0.1 级至 0.2 级精度。

施加最低额定电压。

4.3.2.2.3 要求

在初始负载运行测试中，请遵循以下要求。

- 在整个测试过程中，电表必须保持连续运行。
- 本测试必须在两个能量方向上均通过。

4.3.2.2.4 结果

在核心电流等级 100 下，电表能够在最低额定电压和起始负载电流下记录准确的电流读数

	Phase B
Voltage	9.000V
Phase V->I	1.17°
Phase V->I (Reported)	0.58°
Voltage (Reported)	8.997V
Voltage THD	0.00%
Current RMS	0.055898A
Current RMS (Reported)	0.055224A
Current THD	0.00%
Active Power	0.495W
Active Power (Reported)	0.493W

图 4-16. 起始负载条件下的 GUI 截图

4.3.2.3 不同负载条件下的精度测试

4.3.2.3.1 目标

本测试的目标是确保电表能在不同的负载条件下符合 0.1 级至 0.2 级精度要求，并且不超过允许的误差。

4.3.2.3.2 设置

在不同负载条件下进行精度测试时，请遵循以下设置。

- 必须在标称电流、电压、功率因数和频率值下进行校准。
 - 本测试的校准条件分别为 15A、120V、1Hz 和 60Hz。
- 对相关电流等级施加指定的负载电流。

4.3.2.3.3 要求

精度必须保持在相对于参考值的允许偏差范围内。

4.3.2.3.4 结果

表 4-2 展示了在不同负载条件下且精度为功率因数 (PF) = 1 时的精度测试结果。

表 4-2. PF = 1 时的精度

条件	脉冲数	电流	cos ϕ = 1i (0 度)							ANSI C12.1 (PF 1)		
			ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	平均误差 %	基准差值	限值 (%) [0.5 级]	限值 (%) [0.2 级]	限值 (%) [0.1 级]
1	3	1	0.023	0.190	0.008	-0.184	-0.189	-0.030	-0.027	1.0	0.4	0.2
2	6	1.5	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.100	-0.097	0.5	0.2	0.1
3	6	3	-0.102	-0.066	-0.039	0.008	0.028	-0.034	-0.030	0.5	0.2	0.1
4	22	10	0.035	0.028	0.028	0.013	0.008	0.022	0.026	0.5	0.2	0.1
5	29	15	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.008	REF	0.2	0.1	0.05
6	58	30	-0.004	-0.008	-0.003	-0.001	-0.003	-0.004	0.000	0.5	0.2	0.1
7	115	50	-0.01	-0.018	-0.01	-0.016	0	-0.011	-0.007	0.5	0.2	0.1
8	230	75	0	-0.002	-0.006	-0.003	0	-0.002	0.002	0.5	0.2	0.1
9	298	90	0.000	-0.003	0.001	0.004	0.008	0.002	0.006	0.5	0.2	0.1
10	384	100	0.006	0.013	0.015	0.013	0.010	0.011	0.015	0.5	0.2	0.1

4.3.2.4 功率因数变化测试

4.3.2.4.1 目标

本测试的目标是验证电表是否能在不同的功率因数 (而不仅仅是单位功率因数) 下持续、可靠且准确地工作。

4.3.2.4.2 设置

应用不同的功率因数，包括超前 (电容) 和滞后 (电感)。

4.3.2.4.3 要求

功率因数变化导致的误差不得超过相关电流等级和精度等级的规定限值。

4.3.2.4.4 结果

表 4-3 展示了功率因数测试变化的结果。此测试的基准数据位于节 4.3.2.3.4 中。

表 4-3. PF = 0.5 和 0.8 时的精度

电流	cos ϕ = 0.5i (60 度)							ANSI C12.1 (PF 0.5 0.8)			cos ϕ = 0.8c (-36.87 度) (323.13)						
	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	平均 误差 (%)	基准 差 值	限值 (%) [0.5 级]	限值 (%) [0.2 级]	限值 (%) [0.1 级]	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	平均 误差 %	基准 差 值
1.5	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.100	(基 准)	不适用	不适用	不适用	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.100	(基 准)
3	0.047	0.184	-0.064	-0.192	-0.168	-0.039	0.062	1.00	0.50	0.25	-0.128	-0.166	-0.175	-0.122	-0.124	-0.143	-0.043
15	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.008	(基 准)	不适用	不适用	不适用	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.008	(基 准)
15	-0.034	-0.070	-0.071	-0.037	-0.017	-0.046	-0.054	0.6	0.3	0.15	0.044	0.057	0.051	0.045	0.051	0.050	0.041
50	-0.010	-0.018	-0.010	-0.016	0.000	-0.011	(基 准)	不适用	不适用	不适用	-0.010	-0.018	-0.010	-0.016	0.000	-0.011	(基 准)
50	-0.100	-0.104	-0.098	-0.095	-0.095	-0.098	-0.088	0.6	0.3	0.15	0.068	0.071	0.07	0.081	0.083	0.075	0.085
100	0.006	0.013	0.015	0.013	0.010	0.011	(基 准)	不适用	不适用	不适用	0.006	0.013	0.015	0.013	0.010	0.011	(基 准)
100	-0.11	-0.116	-0.114	-0.111	-0.114	-0.113	-0.124	0.6	0.3	0.15	0.095	0.093	0.094	0.098	0.097	0.095	0.084

4.3.2.5 电压变化测试

4.3.2.5.1 目标

本测试的目标是验证电表是否能在一定电压范围内（而不仅仅是在标称电压下）持续、可靠且准确地工作。

4.3.2.5.2 设置

根据电表的指定电压范围施加不同的电压。

测试点：

- 最低额定电压的 90%
- 标称电压
- 随机中点
- 最高额定电压
- 最高额定电压的 110%

4.3.2.5.3 要求

电压变化导致的误差不得超过相关电流等级和精度等级的规定限值。

4.3.2.5.4 结果

表 4-4 详细说明了电压结果的变化。

表 4-4. 电压结果变化

电压	cos ϕ = 1i (0 度)							ANSI C12.1 2022		脉冲
	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	平均误差 (%)	与基准 的 差值	限值 (%) [0.1 级]	限值 (%) [0.2 级]	
	测试电流 (TA)									
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5					
120 (REF)	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.100	(基准)	REF	REF	12
108	-0.157	0.083	0.159	-0.195	-0.038	-0.0296	0.071	±0.1	±0.2	12
235	0.023	-0.04	-0.172	-0.23	-0.117	-0.1072	0.007	±0.1	±0.2	12
270	-0.141	0.162	0.138	-0.129	-0.186	-0.0312	0.069	±0.1	±0.2	29
297	-0.192	0.127	-0.059	-0.135	0.077	-0.0364	0.064	±0.1	±0.2	58
	测试电流 (TA)									
	15	15	15	15	15					
120(REF)	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.0082	(基准)	REF	REF	58
108	-0.005	-0.006	-0.014	-0.003	0.012	-0.0032	0.011	±0.1	±0.2	58
235	-0.012	-0.001	-0.002	-0.003	-0.002	-0.0040	0.012	±0.1	±0.2	115
270	-0.01	0.002	0.02	0.023	0.017	0.0104	0.002	±0.1	±0.2	230
297	0.028	0.028	0.018	0.026	0.018	0.0236	0.015	±0.1	±0.2	288

4.3.2.6 频率变化测试

4.3.2.6.1 目标

本测试的目标是验证电表是否能在一定频率范围内（而不仅仅是在标称频率下）持续、可靠且准确地工作。

4.3.2.6.2 设置

根据电表的指定频率范围施加不同的频率。

测试点：

- 条件 1：基准频率的 98%
- 条件 2：基准频率的 102%
- 条件 3：基准频率的 98% 以获得更高的电流
- 条件 4：基准频率的 102% 以获得更高的电流

4.3.2.6.3 要求

频率变化导致的误差不得超过相关电流等级和精度等级的规定限值。

4.3.2.6.4 结果

表 4-5 详细说明了频率结果的变化。

表 4-5. 频率结果变化

频率	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	平均误差 %	与基准的差值	限值 (%) [0.1 级]	限值 (%) [0.2 级]	脉冲
	测试电流 (TA)									
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5					
50(REF)	-0.249	-0.277	-0.26	-0.217	-0.226	-0.2458	(基准)	REF	REF	6
49	-0.305	-0.234	-0.253	-0.252	-0.28	-0.2648	0.019	±0.05	±0.1	6
51	-0.209	-0.223	-0.217	-0.193	-0.173	-0.2030	0.043	±0.05	±0.1	6
60(REF)	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.1004	(基准)	REF	REF	6
58.8	-0.045	-0.043	-0.056	-0.043	-0.06	-0.0494	0.051	±0.05	±0.1	6
61.2	-0.032	-0.029	-0.019	-0.026	0	-0.0212	0.079	±0.05	±0.1	6
	测试电流 (TA)									
	15	15	15	15	15					
50(REF)	-0.205	-0.206	-0.203	-0.198	-0.204	-0.2032	(基准)	REF	REF	58
49	-0.233	-0.241	-0.239	-0.242	-0.235	-0.2380	0.035	±0.05	±0.1	58
51	-0.171	-0.168	-0.172	-0.17	-0.169	-0.1700	0.033	±0.05	±0.1	58
60(REF)	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.0082	(基准)	REF	REF	58
58.8	-0.013	-0.009	-0.015	-0.009	-0.012	-0.0116	0.020	±0.05	±0.1	58
61.2	0.012	0.009	0.008	0.01	0.011	0.0100	0.002	±0.05	±0.1	58

4.3.2.7 相序反转测试

4.3.2.7.1 目标

本测试的目标是验证电表是否能在相位序列反转时持续、可靠且准确地工作。

4.3.2.7.2 设置

当所有电路均采用 **ABC** 配置连接时，将记录参考点。然后，当相位序列反转 (**CBA** 配置) 时，将记录精度测量值。

4.3.2.7.3 要求

电流电路中的相位序列反转导致的误差不得超过相关电流等级和精度等级的规定限值。

4.3.2.7.4 结果

表 4-6 详细说明了相位序列反转的结果。

表 4-6. 相位序列反转结果

电路	ERROR 1	ERROR 2	ERROR 3	ERROR 4	ERROR 5	平均误差 %	与基准的差值	限值 (%) [0.1级]	限值 (%) [0.2级]	脉冲
	测试电流 (TA)									
	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5					
ABC	-0.153	-0.180	-0.109	-0.088	0.028	-0.1004	(基准)	REF	REF	6
CBA	-0.102	-0.087	-0.029	-0.008	0.023	-0.0406	0.060	±0.1	±0.3	6
	测试电流 (TA)									
	15	15	15	15	15					
ABC	0.005	0.014	0.016	0.008	-0.002	0.0082	(基准)	REF	REF	58
CBA	-0.031	-0.038	-0.035	-0.039	-0.037	-0.0360	0.044	±0.1	±0.3	58

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-010986](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010986](#) 中的设计文件。

5.1.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010986](#) 中的设计文件。

5.2 工具

PSpice-FOR-TI

适用于 TI 设计和仿真工具的 PSpice®

TINA-TI™ 软件

基于 SPICE 的模拟仿真程序

5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [INA818 35 \$\mu\$ V 偏移、8nV/ \$\sqrt{\text{Hz}}\$ 噪声、低功耗、精密仪表放大器数据表](#)
2. 德州仪器 (TI), [INA828 50 \$\mu\$ V 偏移、7nV/ \$\sqrt{\text{Hz}}\$ 噪声、低功耗、精密仪表放大器数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [INA188 高精度、零漂移、轨到轨输出、高电压仪表放大器数据表](#)
4. 德州仪器 (TI), [TLV900x 适用于成本敏感型系统的低功耗、RRIO、1MHz 运算放大器数据表](#)
5. 德州仪器 (TI), [LM27762 低噪声正负输出集成式电荷泵与 LDO 数据表](#)
6. 德州仪器 (TI), [ADS131M08 内存评估模块用户指南](#)

5.4 支持资源

商标

TI E2E™ and TINA-TI™ are trademarks of Texas Instruments.

USB-C® is a registered trademark of USB Implementer's Forum.

PSpice® is a registered trademark of Cadence Design Systems, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

DANIEL MAAYA 是德州仪器 (TI) 达拉斯总部的系统工程师，专注于开发适用于电力计量和电网基础设施应用的精密模拟前端设计。Daniel 就职时已拥有电气和电力电子领域的多学科背景，在信号调节、计量合规性 (ANSI/IEC)、电源转换器和基于罗氏线圈的传感系统方面具备深厚的专业知识。他拥有模拟硬件设计和系统级集成方面的实践经验，包括针对高精度测量的 EMC 测试和校准。

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司