

Design Guide: TIDA-011013

基于 PCB 罗氏线圈的三相电表参考设计



说明

此参考设计旨在让用户能够在电量计量环境中使用不同类型和尺寸的罗氏线圈。该设计通过软件和硬件积分方法支持宽电流范围 (0.25A 至 115A)，并具有符合 IEC 和 ANSI 标准的 0.2% 精度。此设计采用独立的模数转换器 (ADC) 和可编程微控制器，具有高度灵活性和定制化。

资源

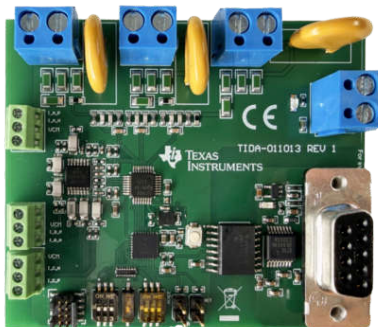
TIDA-011013	设计文件夹
ADS131M08	产品文件夹
MSPM0G1506	产品文件夹
TLV4387	产品文件夹
PCB 罗氏线圈设计工具	工具文件夹

特性

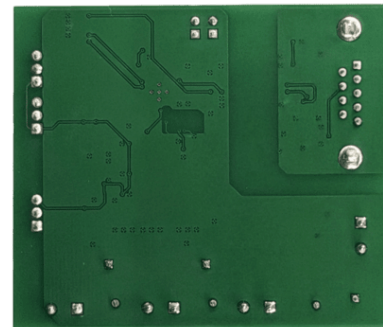
- 适用于三相电表的单芯片放大器积分器调理电路
- 硬件和软件积分方法
- 宽电流范围，适用于多种计量应用
 - 住宅、商业和工业

应用

- [电表](#)
- [交流充电 \(桩 \) 站](#)
- [AFCI 断路器](#)



电路板顶部



电路板底部

1 系统说明

电表系统由传感器、ADC、MCU、电源和通信模块等多个部分组成。电表的三个主要组成部分是电流检测、数据采集和计量引擎。本设计指南帮助用户更好地了解电表的主要组成部分、如何将这些部分组合在一起，以及如何评估和使用该参考设计。

1.1 术语

灵敏度：输入与输出比

EMF：电动势

ADC：模数转换器

MCU：微控制器单元

人工负载：非电阻负载

CMRR：共模抑制比

1.2 主要系统规格

表 1-1. 参考设计主要详细信息

项目	说明
线圈灵敏度	16 μ V/A 至 45 μ V/A
线圈带宽	10Hz 至 40MHz (集中在 50Hz 至 60Hz)
放大器增益	39V/V
积分器带宽	30Hz 至 6KHz
软件增益设置	1、2、4、8、16、32、64、128
相位数	三相
测量电流 (交流)	0.25A 至 115A
精度等级	< 0.2%
电源要求	3.3V 外部电源, j-tag

2 系统概述

罗氏线圈电流检测取决于两个基本概念 — 法拉第感应定律和比奥-萨瓦尔定律。载流导线在其周围空间中的任意点产生磁场。假设电流为交流电，闭环内不断变化的磁场（由导线中的电流产生）会产生电动势（EMF）。罗氏线圈的输出信号是与初级电流的时间导数（ di/dt ）成正比的电压，而非电流。由于没有磁芯，罗氏线圈非常适合存在磁饱和问题的应用（例如在电量计量中）。

由于罗氏线圈的输出是与电流变化率成正比的电压，因此输出电压与初级电流相位差为 90 度。因而需要进行积分。此参考设计使用单芯片四通道放大器，在一个级中对所有三个相位信号进行放大和积分。在同一个放大器芯片中，使用一个电路将所有输入进行直流电平转换为中间电压，无需负电源，从而降低了总体成本。

经调节的信号进入 24 位 $\Delta-\Sigma$ 同步采样 ADC。ADC 将模拟信号转换为数字信号；然后通过 SPI 将数据传输到 MCU，在此处进行电量计量计算。测量电压、电流和相位；然后计算有功功率和无功功率，并通过 RS-232 电缆将结果传输到 PC GUI。

2.1 方框图

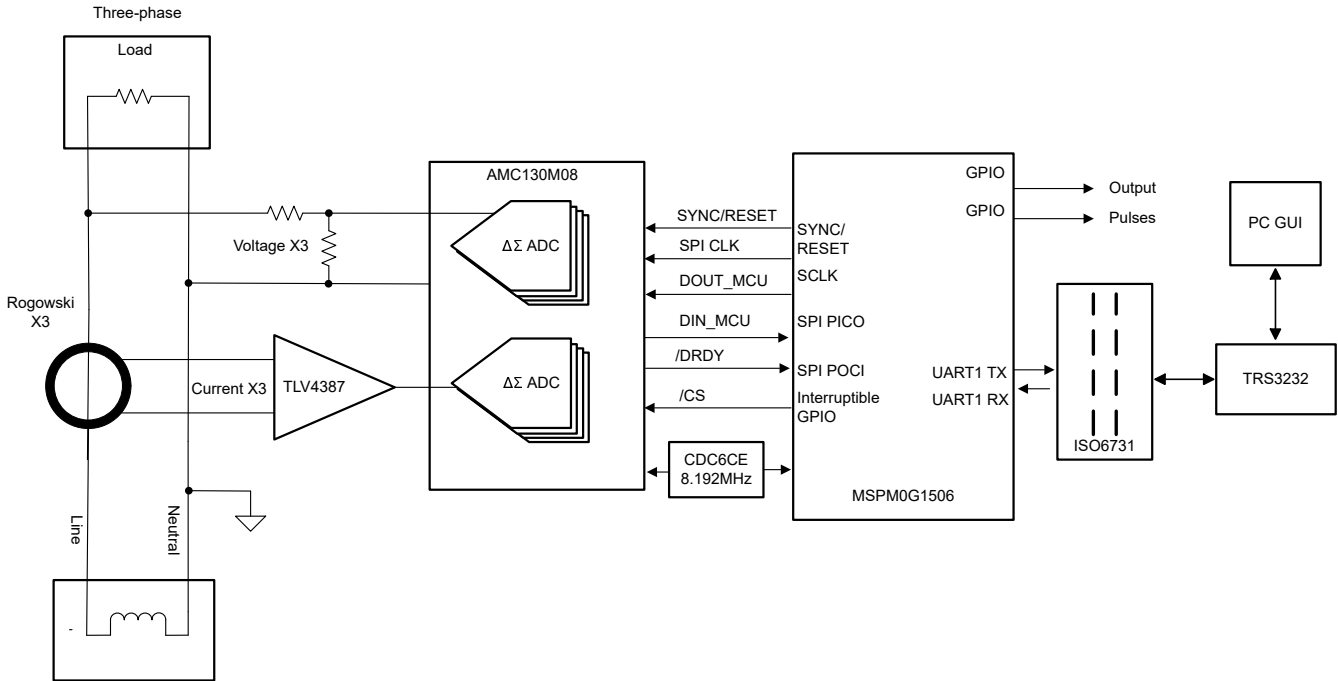


图 2-1. TIDA-011013 方框图

2.2 设计注意事项

在电表中使用罗氏线圈进行电流检测会带来一些设计难题，需要仔细解决。本设计指南介绍了相关难题、设计注意事项以及如何正确应对这些难题。

2.2.1 低信号幅值

问题：罗氏线圈的输出电压根据法拉第定律、磁通量、比奥-萨瓦尔定律以及对线圈面积的复杂分析得出

$$V_{out} = \frac{N\mu_0 h}{2\pi} \cdot w I_0 \cos(wt) \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

其中：

N = 匝数

μ_0 = 自由空间的磁导率

h = PCB 的高度

ω = 角频率

b = 外半径

a = 内半径

t = 时间

原因：初级电流与输出电压之比称为灵敏度，通常以 $\mu\text{V/A}$ 为单位测量。PCB 罗氏线圈由于物理限制固有灵敏度较低：PCB 厚度通常仅为 1.5mm，且匝数有限 — 这两个因素都是决定线圈灵敏度的关键因素。

解决方法：需要增加信号的增益。本参考设计中的放大器为信号增加了 38.9V/V 的增益，并在 ADC PGA 上选择 8V/V 的增益。通过这种组合，电表能够以 0.1% 的精度捕获低于 1A 的信号 — 以灵敏度为 $16\mu\text{V/A}$ 的小型罗氏线圈为例。

2.2.2 噪声敏感性

问题：当高频噪声耦合到导线中时，罗氏线圈会放大噪声，可能会将输出驱动到放大器和 ADC 的电源轨，从而导致测量结果不准确。在有噪声的环境中，输出幅值受频率的影响大于受初级电流实际幅值的影响。

原因：罗氏线圈的输出电压与电流随时间的变化率 (di/dt) 成正比。随着频率的增加， di/dt 会变大，从而提高灵敏度。罗氏线圈的灵敏度以每十倍频程 20dB 的速率提高。

权变措施：为了补偿这种特性，积分器设计的频率响应必须与罗氏线圈的频率响应相反（每十倍频程 -20dB）。由于罗氏线圈的输出随频率增加（与实际电流幅值无关），因此设计具有每十倍频程 -20dB 响应的积分器可抵消此影响。组合的频率响应在整个带宽范围内变得平坦，从而确保输出取决于实际电流幅值而非频率。

2.2.3 积分器限制

问题：在电量计量（50Hz 至 60Hz）中，低频积分需要在较大范围内累积信号，因此对不稳定性、信号变化和低频噪声非常敏感。此外，当频率趋近于零（直流）时，积分器增益趋于无穷大，耦合到信号链中的任何低频噪声都会被放大并导致不稳定性。

原因：

硬件积分复杂性：由于元件要求，在低频下实现硬件积分器非常具有挑战性。元件尺寸：低频需要较大的元件值 $\tan^{-1}(\omega RC) = 90^\circ$, $z = \frac{1}{j\omega C}$ 。要获得所需的 C 和 R ，必须采用非常大的电容和电阻值（M Ω 和 μF ）。

权变措施：为了获得理想的积分性能，必须使用 C0G/NP0 电容器、低容差匹配电阻器和低噪声零漂移放大器。

2.2.4 人工负载的影响

问题：在电器和家用器件积极消耗功率的实际计量场景中，电流波形很少是理想的正弦波。不同的负载会引入失真并将高频分量叠加到波形上。

原因：电磁炉、洗衣机、烘干机、风扇和照明装置等负载会表现出传导电磁干扰特性和瞬态突发

解决方法：需要一个积分器，在放大信号之前滤除高电压峰值和非电阻负载的影响。

2.2.5 杂散磁场干扰

问题：由于罗氏线圈是一种 di/dt 电流传感器，因此它可以检测磁通随时间的变化。如果电表附近存在杂散磁场，电表会接收到这些磁场，导致计费不准确。

原因：罗氏线圈对杂散磁场较为敏感，主要是因为它们是依赖于检测磁通导数的空芯传感器，没有用于抑制外部磁场的高磁导率屏蔽磁芯。

权变措施：为了解决此问题，需要采用带交错回流回路的差分线圈。当暴露在外部磁场中时，该配置会生成一个共模信号，然后由差分放大器将其抵消。此参考设计详细介绍了差分放大器实现。

2.2.6 串扰

问题：当检测线圈靠近载流导线放置，或在三相系统中使用罗氏线圈时，就会发生串扰。由于相邻相位所产生外部磁场的影响，这种干扰会导致电流测量不准确。

原因：比奥-萨瓦尔定律描述了载流直导线在远离导线中心的任何点产生的磁场

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1 \sin(wt)}{2\pi r_1} \quad (2)$$

其中 B_1 是导线 1 在距导线中心距离为 (r_1) 的任意点处产生的磁场。

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2 \sin(wt)}{2\pi r_2} \quad (3)$$

其中 B_2 是导线 2 在距导线中心距离为 (r_1) 的任意点处产生的磁场。

导线之间任意点的磁场总和如下所示：

$$\Sigma B = B_1(r_1) + B_2(r_2)\cos(\theta) \quad (4)$$

其中 (θ) 是 B_1 和 B_2 之间的方向夹角；如果两根导线彼此平行，则 (θ) 只能为 180° 或 0° 。

- 如果 (θ) = 180° ，则电流沿相同方向流动，磁场方向相互对立。磁场总和随着距离任一导线更近而增加，如果电流相同，则在两根导线之间的中点处抵消。
- 如果 (θ) = 0° ，则电流反向流动，磁场方向相同且相互增强，从而在导线之间产生均匀的净磁场。总磁场幅度随着导线之间间距的减小而增大，并随着间距的增大而减小。
- 以上是两种最坏情况，且并不现实。串扰影响可能出现在两种极端情况之间的任意点。

权变措施：

1. 为了解决此问题，需要采用带交错回流回路的差分线圈。当暴露在外部磁场中时，该配置会生成一个共模信号，然后由差分放大器将其抵消。此参考设计详细介绍了差分放大器实现。
2. 软件校准和串扰补偿。

2.2.7 机械限制

问题：

- 线圈几何结构：通常需要采用非圆形线圈几何结构，以高效地安装在母线周围，而不会浪费空间。
- 远程布置：某些应用要求将检测元件布置在远离计量或信号调节电路的位置。
- 改装不便：在已安装导线或线束的情况下，安装 PCB 罗氏线圈可能会造成干扰，而且实施起来不切实际。

原因：

- PCB 罗氏线圈在连接至计量板的过程中容易受到噪声干扰。这种噪声会降低测量精度。
- 刚性、固定的线圈几何结构难以安装，因为需要对现有安装结构进行物理改造或中断现有安装，才能将线圈绕在导体或母线周围。

解决方法：

1. 柔性或可开合的线圈设计可以简单地缠绕在导体或母线周围，提供了一种更实用、侵入性更低的替代方案。
2. 信号调节电路靠近检测线圈布置。

2.2.8 人为错误

问题：

- 输出电压优化：更大限度地提高输出电压需要通过增加线圈匝数来增大有效表面积。然而，在手动调整匝数的同时保持性能并非易事。
- 环路对称性：在检测环路中保持严格对称性是 PCB 罗氏线圈设计中最困难的一个方面。即使是很小的几何结构不匹配也会引入不平衡，从而导致波形失真并增加对外部磁场耦合的敏感性。
- 闭环完整性：确保所有线圈匝数保持对称并形成适当的闭环，对于保持预期的差分架构至关重要。手动实现这种精度水平非常具有挑战性并且容易出错，尤其是在复杂或非标准几何结构中。

原因：罗氏线圈的基本构造是将导线缠绕在非磁芯上，一端从中心穿回以形成回流路径。然后，整个组件构成一个闭环，从而在设计中产生两种不同的环路类型：

1. 检测环路
2. 回流环路

由于输出电压直接取决于匝数和线圈几何结构，因此手动构造过程中引入的任何不对称或不一致都会直接影响测量精度和抗噪性能。

权变措施：通过 [PCB 罗氏线圈设计工具](#) 实现线圈设计过程的自动化。

2.3 重点产品

2.3.1 TLV4387

TLV4387 是一款精密放大器，可提供出色的性能。通过零漂移技术，TLVx387 的失调电压和温漂可提供出色的长期稳定性。仅凭借 570 μ A 的静态电流，TLVx387 就能实现 5.7MHz 的带宽、8.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的宽带噪声和 177nVPP 的 1/f 噪声。这些规格对于在 16 位至 24 位模数转换器 (ADC) 中实现超高精度和不降低线性度至关重要。

TLV4387 在温度范围内具有平坦的偏置电流；因此，高输入阻抗应用在温度范围内几乎无需校准。

2.3.2 ADS131M08

ADS131M08 是一款八通道、同步采样、24 位、 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)，具有宽动态范围、低功耗和电能测量特定功能，因此非常适合电量计量、功率计量和断路器应用。ADC 输入可以直接连接到电阻分压器网络或电源变压器以测量电压，或连接到电流互感器或罗氏线圈以测量电流。可以根据传感器输入独立配置各个 ADC 通道。低噪声、可编程增益放大器 (PGA) 提供了从 1 到 128 的增益，用以放大低电平信号。此外，该器件集成了通道间相位校准、偏移和增益校准寄存器，有助于消除信号链误差。该器件集成了低漂移、1.2V 基准，减小了印刷电路板 (PCB) 面积。数据输入、数据输出和寄存器映射中可选的循环冗余校验 (CRC) 确保了通信完整性。

2.3.3 MSPM0G1506

TI MSPM0G1506 是一款低功耗 MCU，包含具有不同模拟和数字集成度的器件，可让客户找到满足其工程需求的 MCU。MSPM0G1506 包含 Arm Cortex-M0+ 平台，采用整体超低功耗的系统架构，使系统设计人员能够在降低能耗的同时提高性能。

2.3.4 ISO6731

ISO6761 器件是高性能六通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的高达 5000VRMS 隔离额定值，适合具有此类需求的成本敏感型应用。这些器件还通过了 VDE、TUV、CSA 和 CQC 认证。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时，ISO676x 器件可在低功耗下提供高电磁抗扰度和低辐射。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由 TI 的双电容二氧化硅 (SiO₂) 绝缘栅相隔离。

2.3.5 TPS70933

TPS709 系列线性稳压器是针对功耗敏感型应用而设计的超低静态电流器件。

2.3.6 TRS3232

TRS3232 器件由两个线路驱动器、两个线路接收器和一个双路电荷泵电路组成，具有端子间 (串行端口连接端子，包括 GND) $\pm 15\text{kV}$ ESD 保护。该器件符合 TIA/EIA-232-F 的要求并在异步通信控制器与串行端口连接器之间提供电气接口。电荷泵和四个小型外部电容器支持由一个 3V 至 5.5V 电源供电。这些器件以高达 250kbps 的数据信号传输速率和最高 30V/ μs 的驱动器输出压摆率运行。

2.3.7 CDC6CE

CDC6Cx 器件是一个低抖动、低功耗的固定频率振荡器，采用 BAW 作为谐振器源。该器件在出厂时已根据特定的频率和功能引脚进行编程。借助频率控制逻辑和输出频率分频器，CDC6CE 可在指定范围内生成任意频率，提供可满足所有频率需求的单个器件系列。该器件的高性能时钟、机械稳定性、低功耗、灵活性和小型封装选项专为工业、电信、数据和企业网络及个人电子产品终端设备中的基准时钟和核心时钟而设计。

3 系统设计原理

此参考设计采用 TI 最新的 PCB 罗氏线圈设计工具。这款全新设计工具解决了 PCB 线圈几何结构方面的难题，例如引线布置不对称、环路失配以及手动设计线圈时产生的人为错误。TI 器件解决了罗氏线圈设计时面临的积分、线圈灵敏度低、串扰、外部磁场影响以及噪声敏感性等难题。

3.1 罗氏线圈

该线圈用作差分线圈，配备匹配的返回回路。与导体的距离通过控制磁场密度与回路面积，决定了罗氏线圈的灵敏度。当该高增益差分信号出现回路路径失配时，外部磁场会耦合至信号中。本线圈采用创新布局设计，在偏移内层过孔的同时实现环路路径匹配。这可以实现更高的环路密度。本设计由四个交错排布的罗氏线圈构成。两组线圈（外侧线圈与内侧线圈）采用反向绕制方式串联连接。这些线圈与另一组以相同方式绕制的线圈对进行差分连接。此拓扑结构可抑制电感和电容噪声，同时提高线圈密度。罗氏线圈设计工具提供带中心抽头的 PCB 线圈，以便信号可以偏置到共模电压，从而无需负电源，并降低了总体成本。

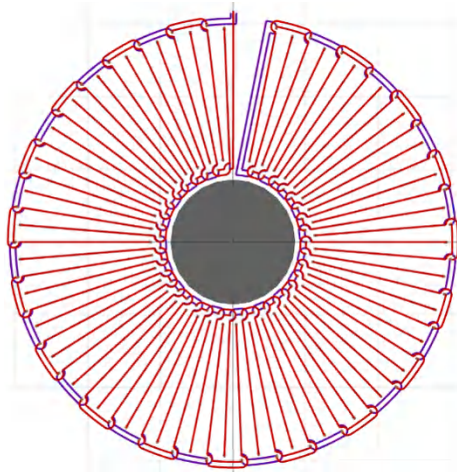


图 3-1. 罗氏线圈绕组布局

3.2 硬件积分器

积分器在整个 PCB 罗氏线圈带宽范围内提供平坦响应，同时放大低幅值低频信号，其不会随着时间的推移累积误差，因为积分器在直流下具有无限增益。

差分积分器电路旨在解决 PCB 罗氏线圈设计难题，并在宽电流范围内实现符合 ANSI 和 IEC 标准的 0.2 级精度。

此应用之所以选择使用 TLV4387，是因为该器件是一款出色的低噪声零漂移放大器，同时兼具高 CMRR，可抑制外部磁场产生的共模。

TLV4387 中的三个电路用于调理三相系统中的每个罗氏线圈输出信号，第四个电路用于产生共模电压。ADC 输入采用伪差分方式驱动，从而消除共模偏置的噪声。

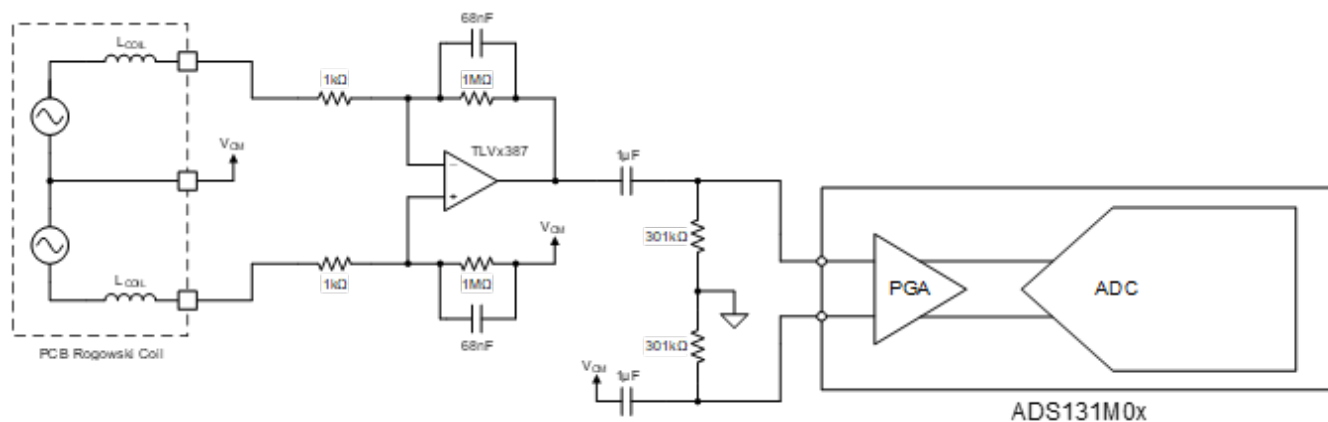


图 3-2. 差分积分器放大器电路

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

为保证参考设计的系统正常运行及性能达标，需配备以下硬件部件并满足相应规格要求：

1. 3.3VDC 外部电源
2. RS-232 电缆
3. 高压安全箱
4. 平头螺丝刀
5. 3 根 1AWG 线用于电流
6. 4 根 14AWG 至 10AWG 线用于电压
7. 高精度交流电源
8. 交流负载
9. 3 根三芯绞线 (线圈至电路板连接)

4.2 软件

为保证参考设计的系统正常运行及性能达标，需配备以下软件组件并满足相应规格要求：

1. RS-232 转 USB 驱动程序
2. 计量 GUI
3. MSPM0SDK

注意：计量代码已刷写到参考设计中。

4.3 测试设置

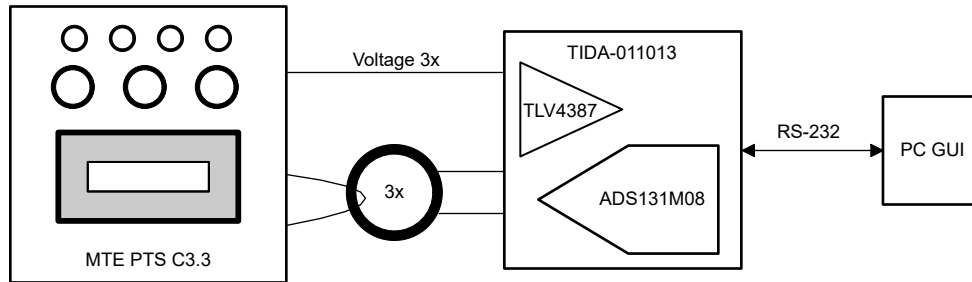


图 4-1. 测试设置方框图

4.3.1 接头信息

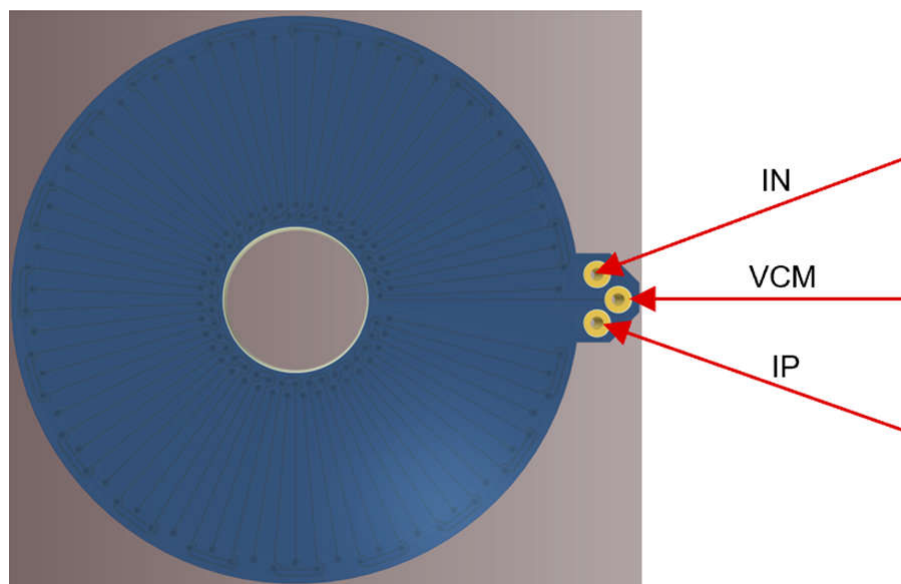


图 4-2. 罗氏线圈连接指南

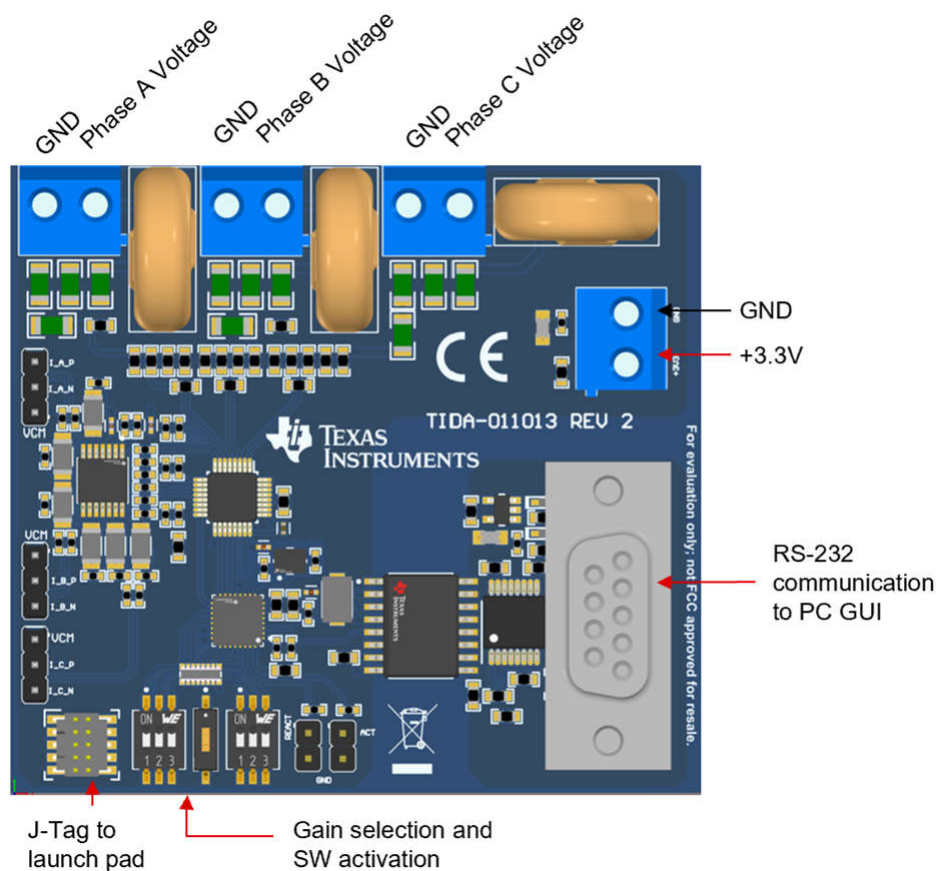


图 4-3. TIDA-011013 连接指南

4.4 入门

4.4.1 软件安装

用于评估参考设计的 PC 上必须安装两个软件。第一个软件是 RS-232 电缆的驱动程序，必须从制造商网站进行安装。所需的第二个软件是 [MSPM0-SDK](#)。该 SDK 包中包含 Energy Metrology GUI。

4.4.2 GUI 设置

运行该 GUI 之前，将 USB 转 RS-232 电缆插入 PC 并验证使用的 COM 端口。在 Microsoft Windows PC 上，打开设备管理器并向下滚动至“Ports (COM and LPT)”。找到 Prolific USB Serial COM Port 并记下使用的端口。

在 PC 上打开包含计量 GUI 的文件夹。默认情况下，GUI 位于 C:\ti\mspm0_sdk_(version)\tools\metrology_gui。在运行 calibrator.exe 文件之前，打开并编辑 calibration-config.xml 文件。使用文本编辑器打开 calibration-config.XML 文件并进行搜索。仪表位置后面的行中必须使用与 PL2303GS COM 端口关联的相同 COM 端口。确保在运行 calibrator.exe 文件之前保存所有更改。

GUI 设置完成后，打开 calibrator.exe。

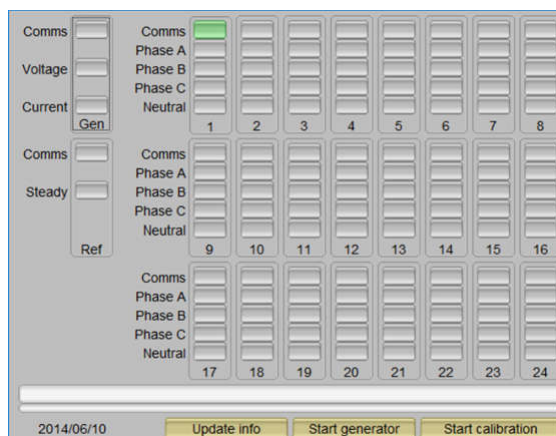


图 4-4. GUI 开始页面

点击 calibrator.exe 后，将显示 GUI 启动页面，然后点击绿色按钮即可访问电表读数和校准。如果该按钮为红色，则表示 TIDA-011013 与 PC GUI 之间尚未建立连接。要调试连接，请确保将 COM 端口 (设备管理器中显示的任何端口) 和波特率 (9600) 设置为正确的配置，然后尝试重新连接。

连接后，点击绿色按钮访问电表读数和校准。

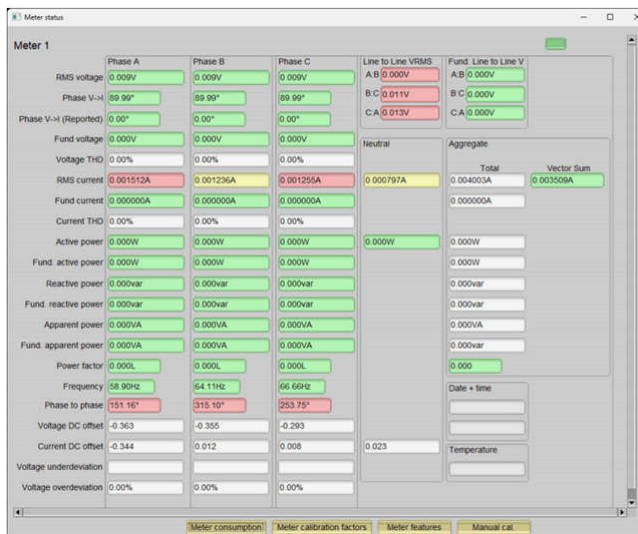


图 4-5. 电表读数和校准

4.4.2.1 校准

打开并更新 GUI 后，电表便可进行校准

备注

校准之前，使用板载 DIP 开关确保将 PGA 增益设置为 8 (最大电流为 120A，线圈灵敏度为 25μV/A 及更低)。根据最大电流调整增益。每次更改增益后，都必须点击复位按钮以复位设置。

	Phase A	Phase B	Phase C	Neutral
Voltage	0 %	0 %	0 %	
Voltage (imp)	0 %	0 %	0 %	
Voltage AC offset	0	0	0	
Fund. RMS Voltage offset (mV)	0	0	0	
Current	0 %	0 %	0 %	0 %
Current (imp)	0 %	0 %	0 %	0 %
Current AC offset	0	0	0	0
Fund. RMS Current offset (uA)	0	0	0	
Active power	0 %	0 %	0 %	0 %
Active power offset (mW)	0	0	0	0
Fund. active power offset (mW)	0	0	0	
Reactive power offset (mvar)	0	0	0	0
Fund. reactive power offset (mvar)	0	0	0	
Phase correction	0 us	0 us	0 us	0 us

Update meter

图 4-6. 手动校准页面

建议在标称值下进行校准：

- 120Vrms
- 15 Arms
- 50Hz - 60Hz
- 60° 相位偏移

将标称值输入电表。打开 GUI 中的手动校准选项卡，如图 4-6 所示。首先校准相位，即在每个相位的相位校正单元格中增加或减少微秒数。

$$\frac{60 - (\text{measuredphaseoffset})}{360} \quad (5)$$

校准相位后，将相位 V->I 更改为 0° 并校准电压、电流和有功功率。使用以下公式计算误差校正因数：

$$\left(\left(\frac{\text{measuredvalue}}{\text{sourcevalue}} \right) - 1 \right) \cdot 100 \quad (6)$$

将校正因数复制到每个相位的手动校准选项卡 (红色单元格) 中，然后点击 update meter。现在，电表已经过校准，可用于评估和测试。

4.5 测试结果

- 用于测试的 PCB 罗氏线圈由罗氏线圈设计工具制作，灵敏度为 20μV/A。
- TIDA-011013 针对 100 级电表的精度目标是 0.1 至 0.2 级 (最小电流为 1A，最大电流为 100A)。
- 在 0.25A 至 115A 的电流范围内进行精度测量

4.5.1 有功功率精度测量

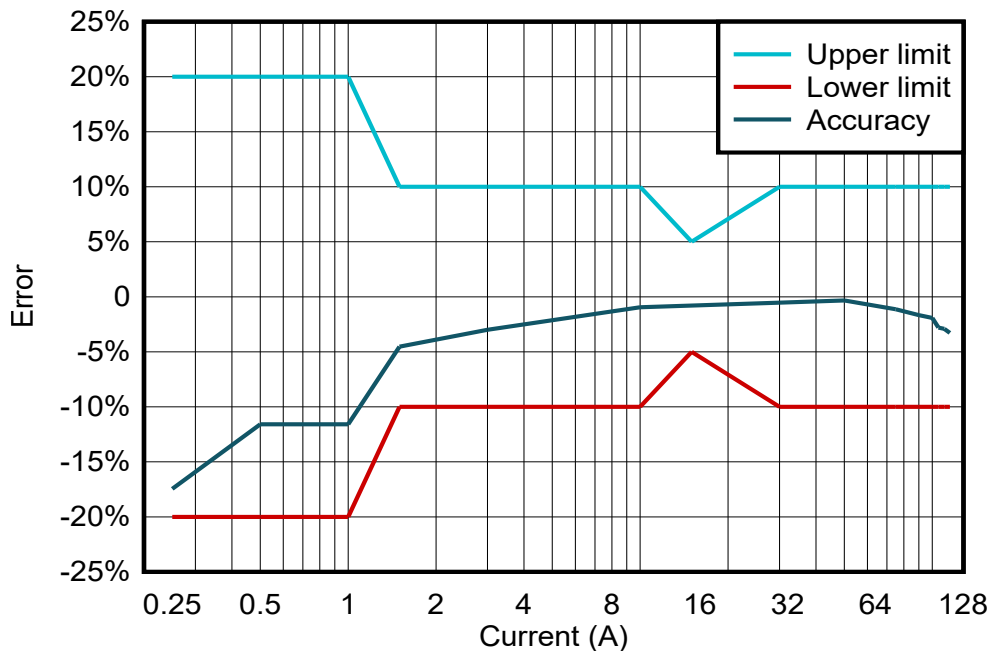


图 4-7. 全电流范围 PF = 1 时的有功功率精度测量

观察结果：TIDA-011013 在全电流范围内外均可实现 0.1 级精度。

4.5.2 有功功率精度测量 (PF ≠ 1)

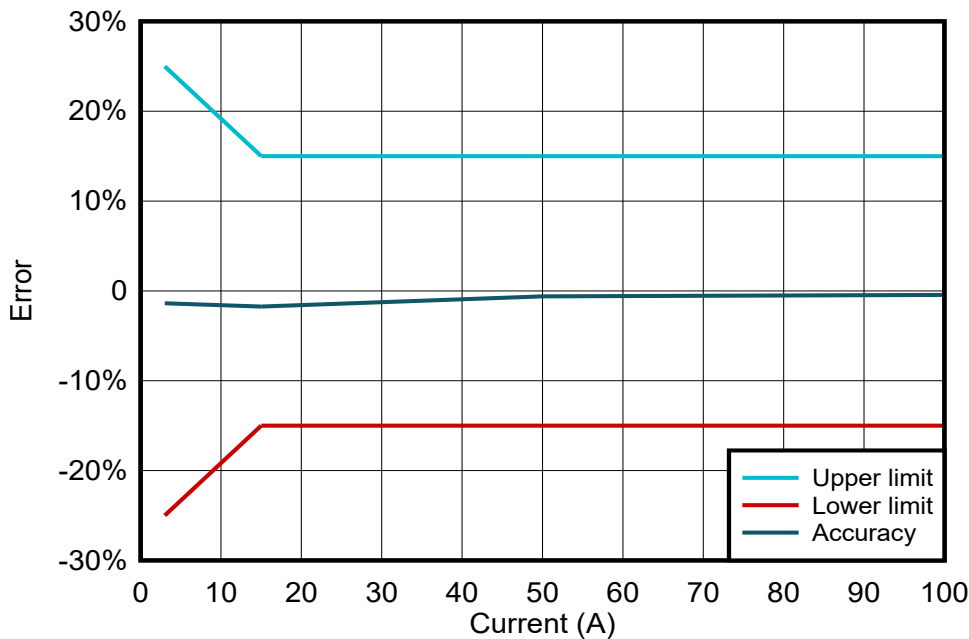


图 4-8. 全电流范围 PF = 0.5 (超前) 时的有功功率精度测量

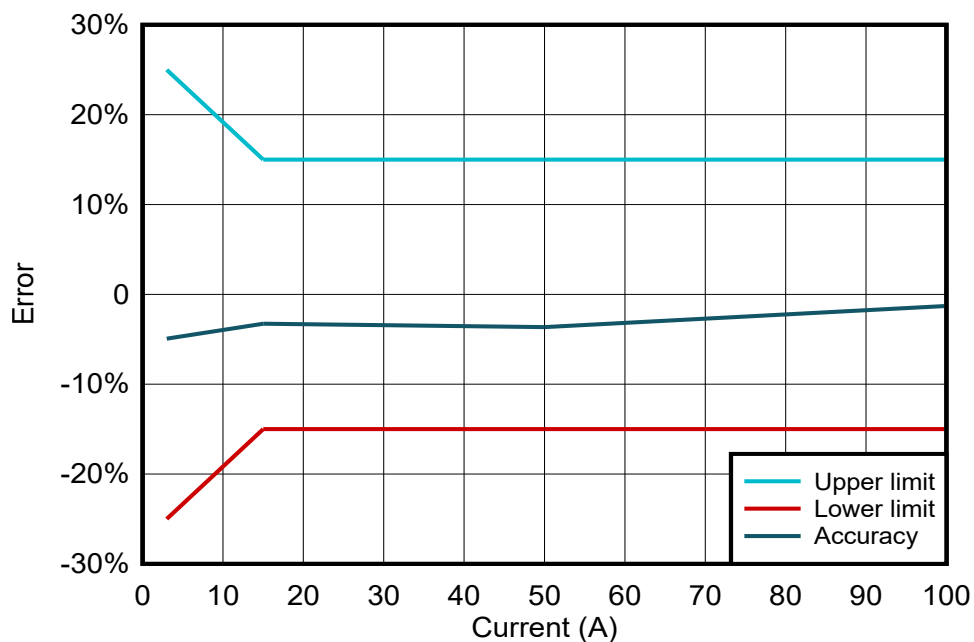


图 4-9. 全电流范围 PF = 0.5 (滞后) 时的有功功率精度测量

观察结果：TIDA-011013 在全电流范围内能够实现 0.1 级精度。

4.5.3 无功功率精度测量

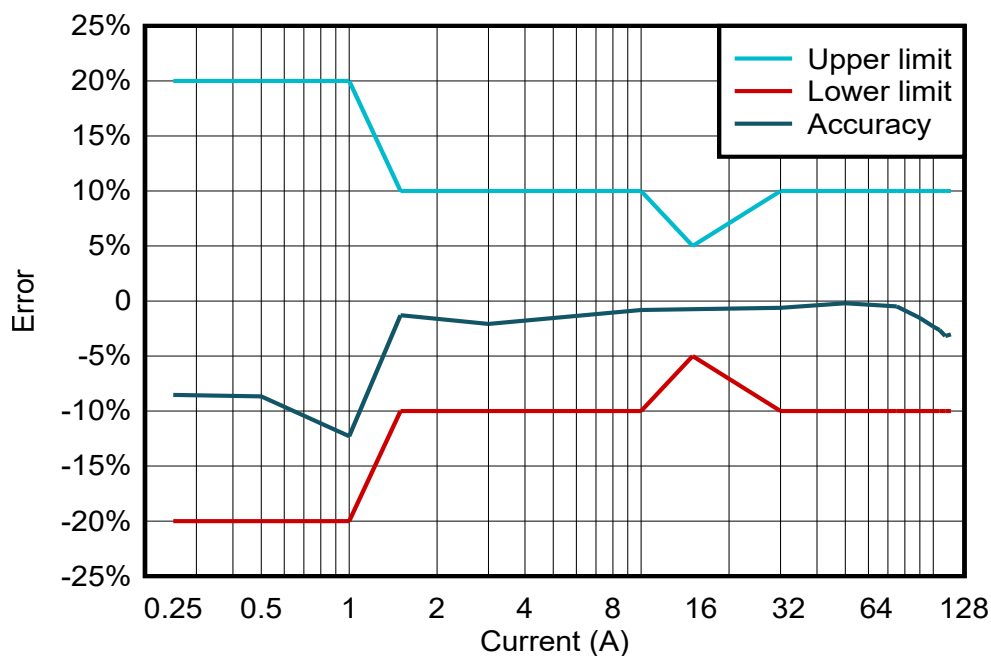


图 4-10. 全电流范围 PF = 1 时的无功功率精度测量

观察结果：TIDA-011013 在全电流范围内外均可实现 0.1 级精度。

4.5.4 无功功率精度测量 ($PF \neq 1$)

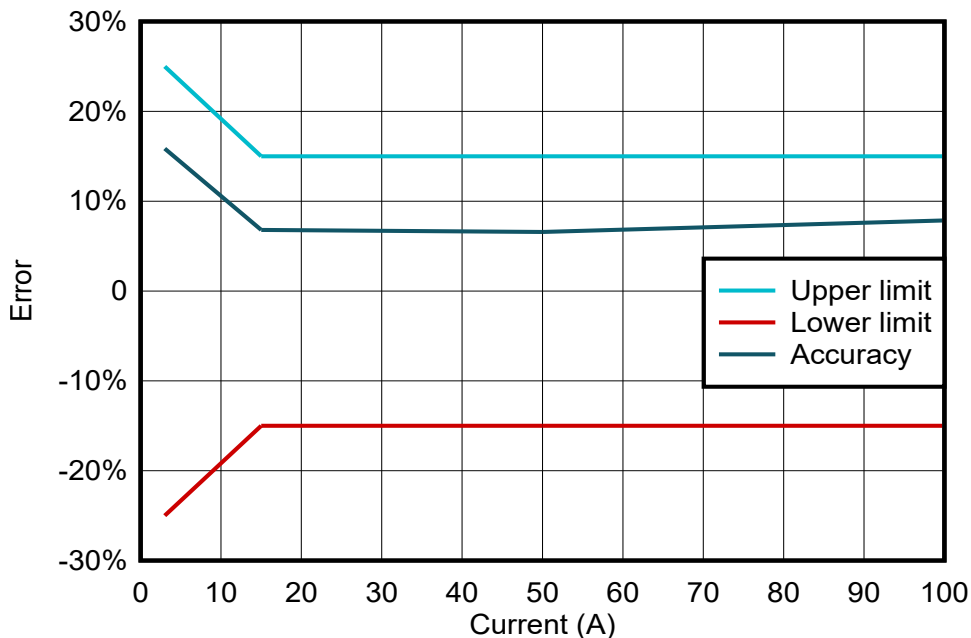


图 4-11. 全电流范围 $PF = 0.5$ (超前) 时的有功功率精度测量

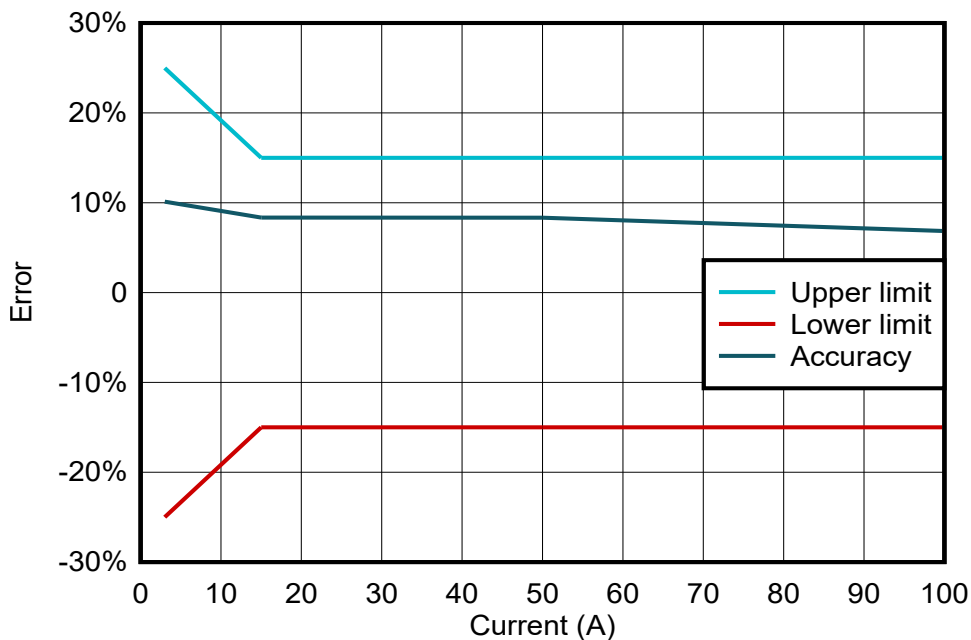


图 4-12. 全电流范围 $PF = 0.5$ (滞后) 时的有功功率精度测量

观察结果：TIDA-011013 在全电流范围内能够实现 0.1 级精度。

4.5.5 电压变化精度测量

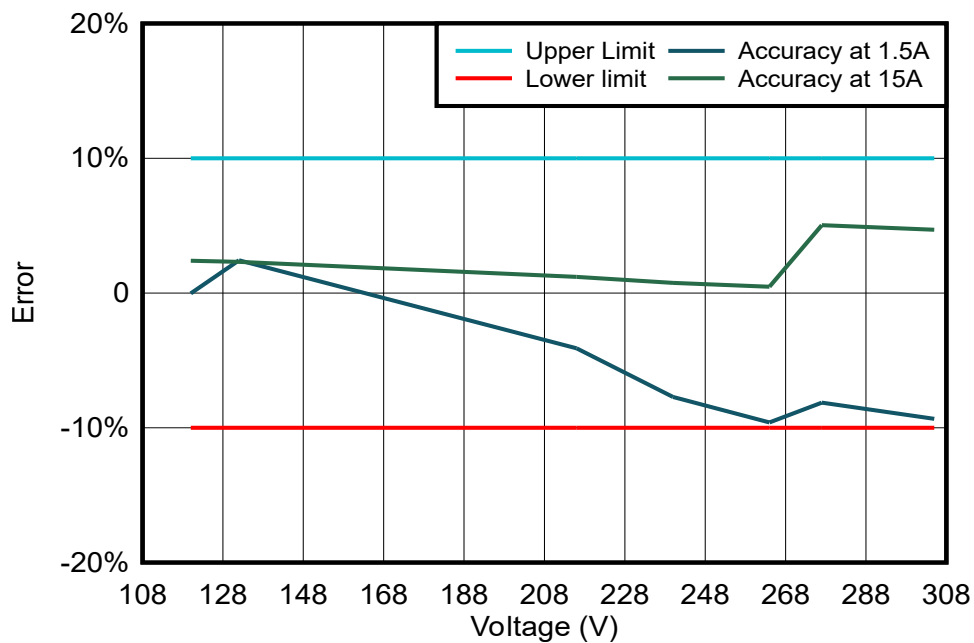


图 4-13. 不同电流电平下电压精度测量的变化

4.5.6 频率变化精度测量

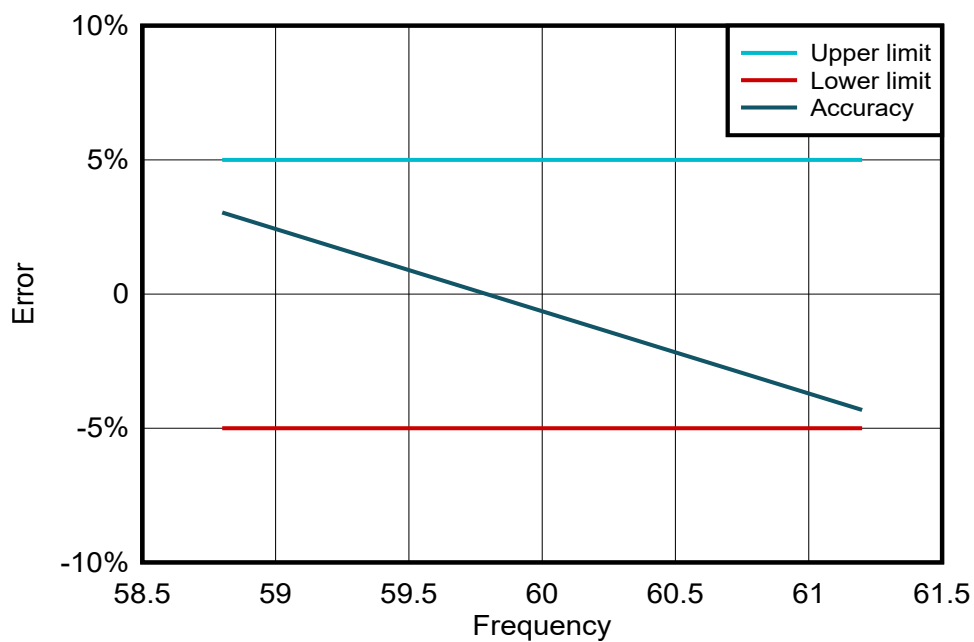


图 4-14. 参考频率 $\pm 2\%$ 范围内的频率精度测量变化

观察结果：TIDA-011013 在整个频率范围内能够实现 0.1 级精度。

4.5.7 电流电路精度测量的等效性

目标：在所有三个相位均已连接时测试参考设计的精度（基准），拨下除一个相位之外的所有相位，并仅在一次连接一个相位时记录精度测量值。

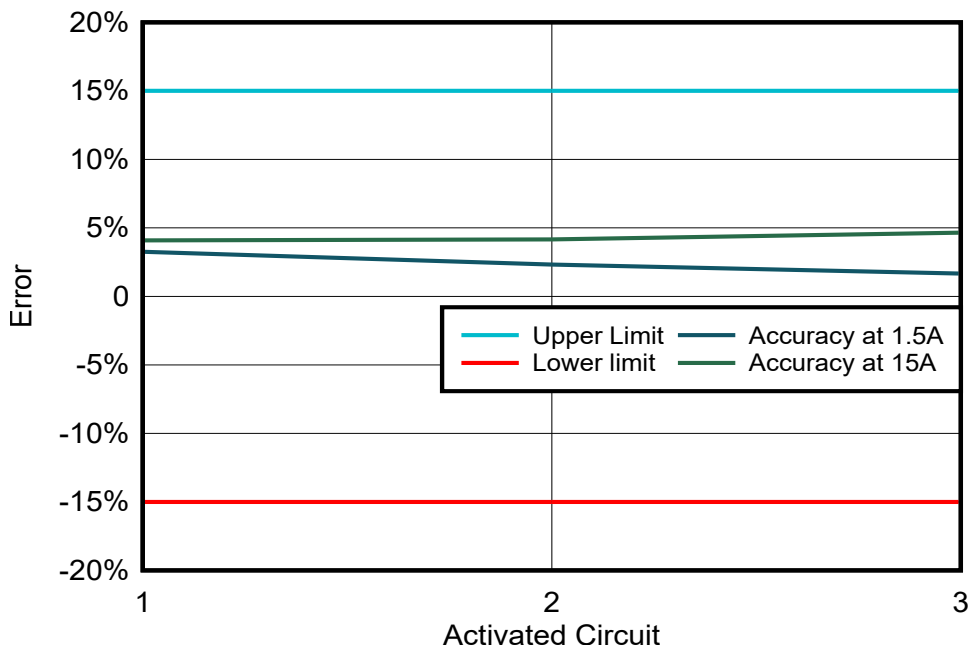


图 4-15. 电流电路精度测量的等效性

观察结果：当以不同的电流电平一次仅激活一个电路时，TIDA-011013 能够实现 0.1 级精度。

4.5.8 相位反转精度测量

目标：在所有三个相位均已连接时测试参考设计的精度（基准），反转相位顺序（ABC 至 CBA），记录反转顺序后的精度，并比较精度。精度偏差不得超过 0.1 级精度限值。

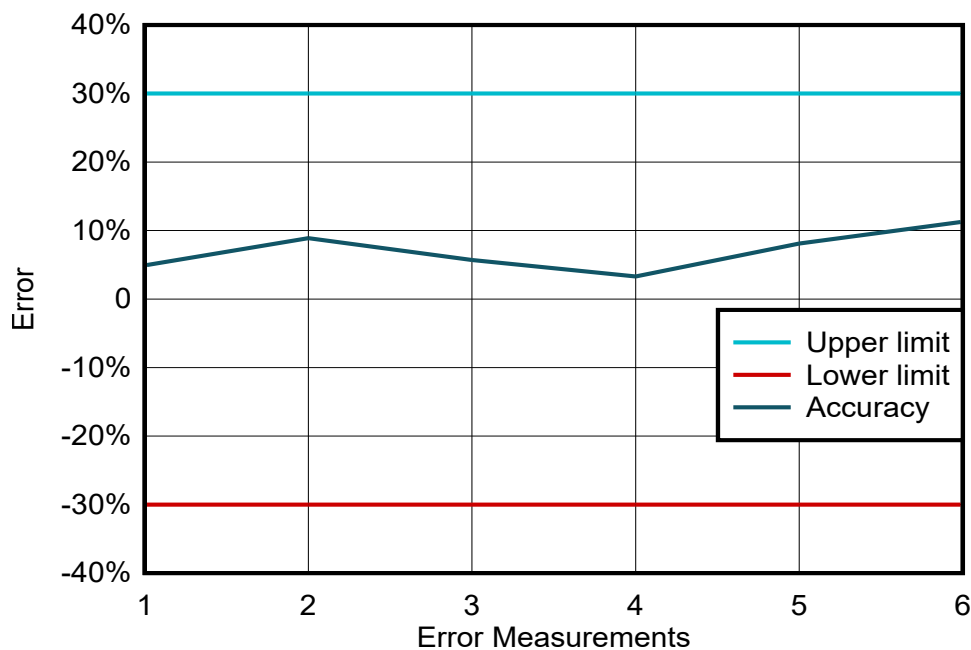


图 4-16. 电流电路精度测量的等效性

观察结果：在 30 分钟的时间范围内采集 6 个不同的精度读数（每个误差读数间隔 5 分钟）。相位序列反转时，TIDA-011013 能够实现 0.1 级精度。

4.5.9 温度变化精度测量

目标：记录参考设计的精度，将参考设计置于温控腔中，将温度更改为 -20°C ，等待一小时，然后记录误差测量值。对温度 50°C 重复相同的过程并记录误差测量值。

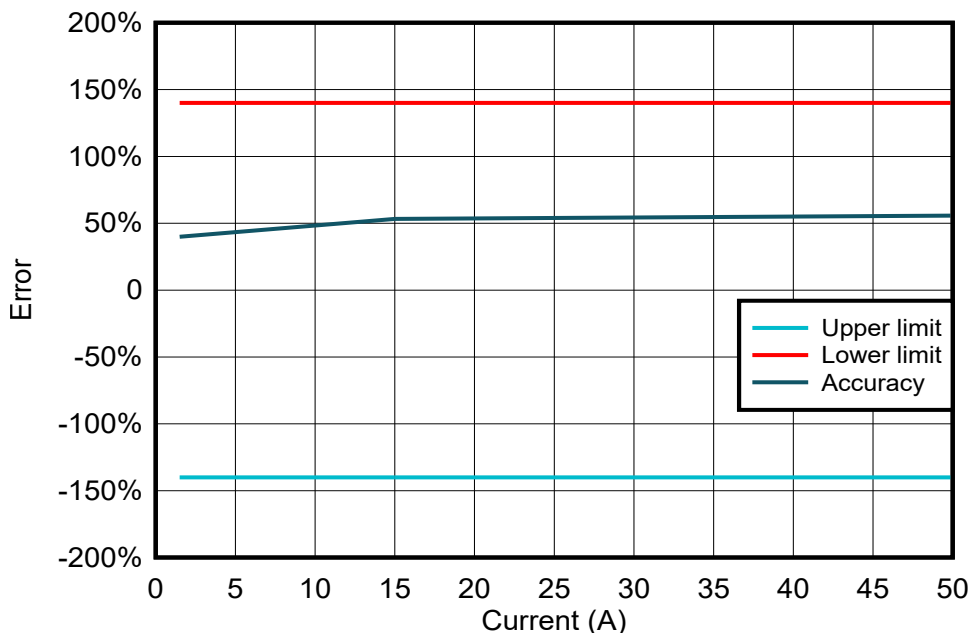


图 4-17. 50°C 时的精度测量

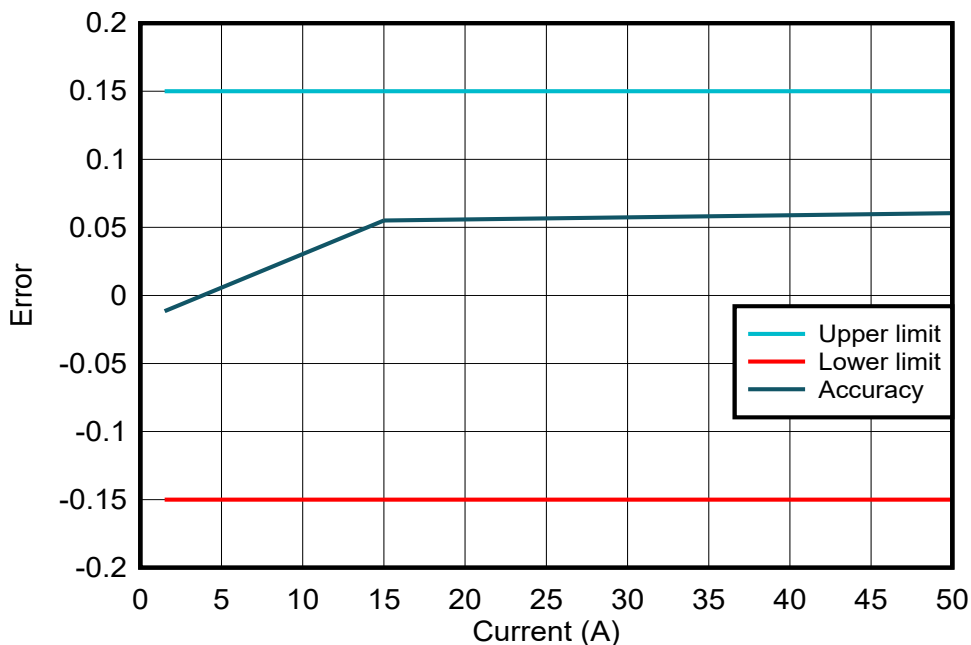


图 4-18. -20°C 时的精度测量

观察结果：TIDA-011013 在宽温度范围内能够实现 0.1 级精度。

4.5.10 串扰精度测量

目标：独立校准每个相位，对第一相施加 20A 电流，记录在第一相测得的电流；对具有 180° 相位偏移的第二相施加 100A 电流（最坏情况），然后观察串扰对第一相的影响。对第二相和第三相重复该过程。串扰的影响必须保持在允许的限值以下。

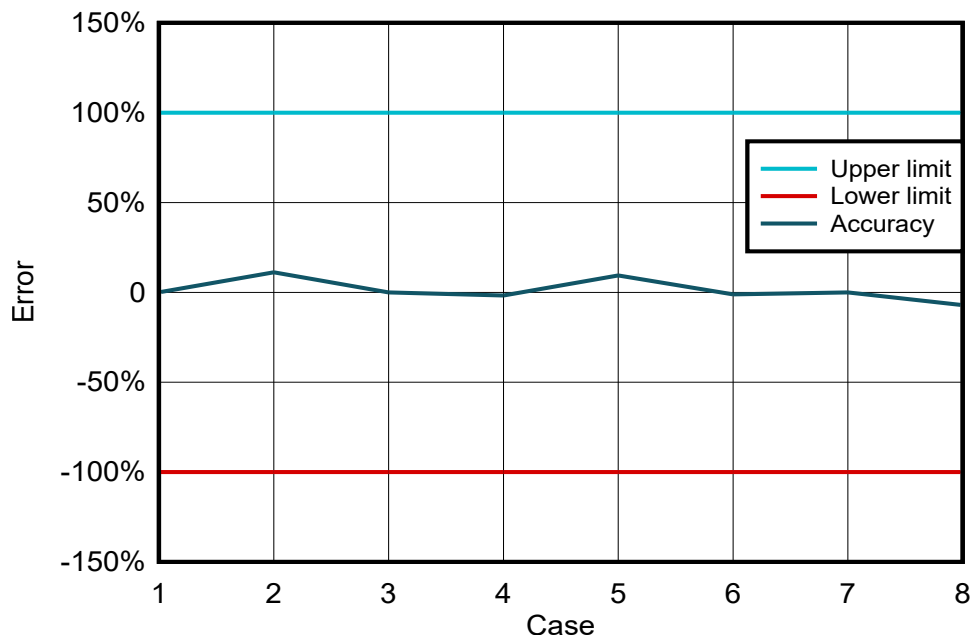


图 4-19. TIDA-011013 抗串扰性

观察结果：x 轴表示 TIDA-011013 进行测试的不同情况。下表说明了各种情况。在所有情况下，TIDA-011013 在相邻相位产生的外部磁场影响下都能够保持在允许的误差范围内。

表 4-1. 串扰测试情况

用例	I1	I2	I3
1	20A	0	0
2	20A	100A	0
3	0	20A	0
4	100A	20A	0
5	0	20A	100A
6	100A	20A	100A
7	0	0	20A
8	0	100A	20A

4.5.11 外部磁场影响下的精度测量

目标：在该区域没有外部磁场时校准参考设计，将参考设计置于直径为 1 米的导线圆圈内，同时施加 60A/匝的电流，并通过将误差测量值与基准测量值进行比较来记录外部磁场的影响。

设置：对于此测试，使用亥姆霍兹线圈生成外部磁场。请参阅图 4-20。

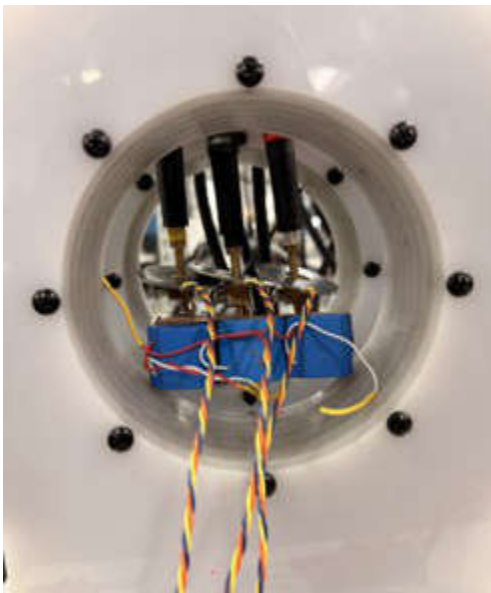


图 4-20. 亥姆霍兹线圈内的 PCB 罗氏线圈

亥姆霍兹线圈产生的磁场 = 0.5mT

结果：

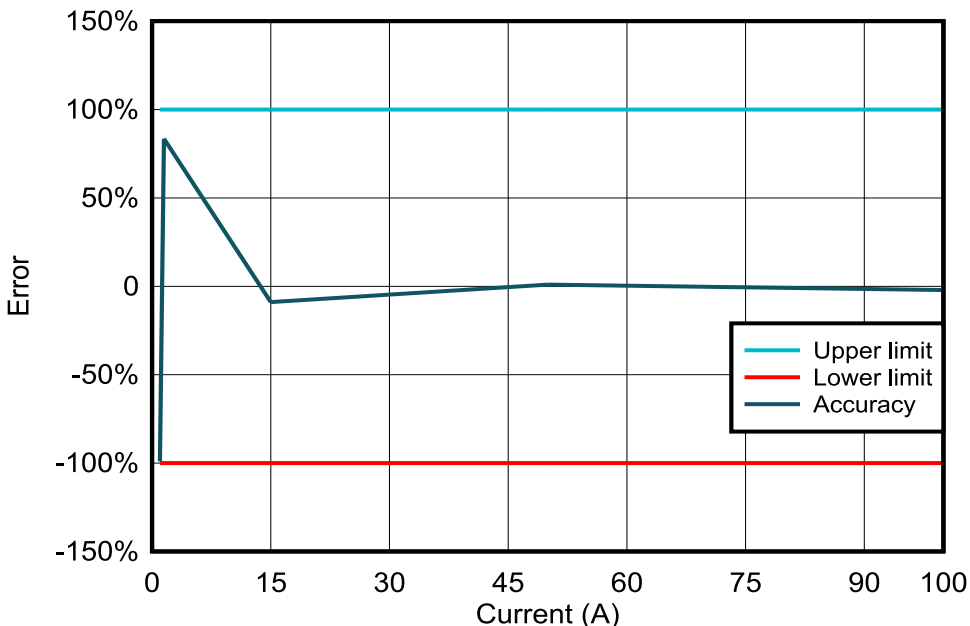


图 4-21. TIDA-011013 在外部磁场影响下的精度测量

观察结果：TIDA-011013 在亥姆霍兹线圈产生的外部磁场影响下仍能够保持在允许的误差范围内。

5 设计和文档支持

5.1 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [LMR436x0-Q1 在 150°C TJMAX 下 \$I_Q < 2.5 \mu A\$ 且采用 4mm2 HotRod QFN 封装的 36V、1A/2A 汽车级降压转换器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI), [TPS62850x-Q1 采用 SOT583 封装的 2.7V 至 6V、1A、2A、3A 汽车级降压转换器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI), [TLIN1021A-Q1 具有抑制和唤醒功能的故障保护 LIN 收发器](#) 数据表

商标

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、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