

## Design Guide: TIDA-010987

# 罗氏线圈电流传感器参考设计



## 说明

该参考设计让最终用户能够评估适用于各种电流检测应用的不同尺寸和灵敏度的 PCB 罗氏线圈。该设计支持低电流测量和高达 500A 的高电流测量，具有 0.2% 的高精度和超过 1MHz 的宽带宽检测。设计将这些功能整合到一个与多种电流检测应用兼容的平台中。

## 资源

TIDA-010987	设计文件夹
ADS131M08MET-EVM	设计文件夹
TIDA-010971、TIDA-010986	设计文件夹
INA333、TLV9002、TLV2387	产品文件夹
LOG300、TL081H、LM2664	产品文件夹

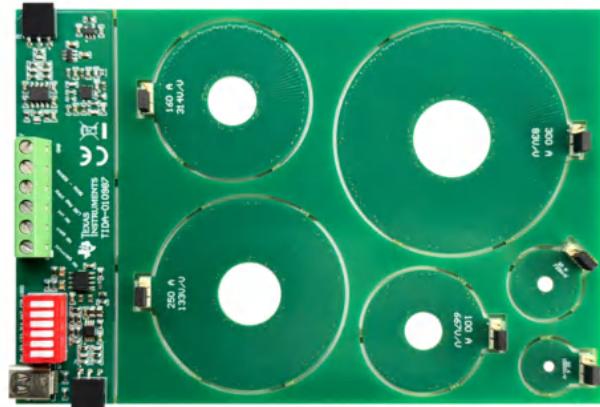
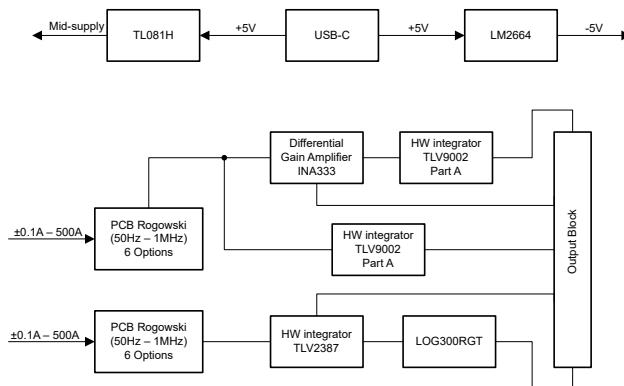


## 特性

- 采用多元件序列进行信号调节，可在多种应用中进行评估
- 宽电流范围：
  - 通过增益设置调整到 0.1A – 500A
- 不同的线圈尺寸：
  - 电路板上包含六种不同尺寸的可拆式线圈
- 易于使用的插件式外形，无需焊接料

## 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

TIDA-010987 参考设计支持将 PCB 罗氏线圈用于各种电流检测应用。电流传感器是现代电源系统和电子器件中的关键部分，可在电子计量、电能质量分析和电路保护等领域提供精确监测和保护。这些传感器通过检测过载、跟踪功耗并为控制系统提供反馈来确定安全高效的运行。

罗氏线圈具有宽带宽、宽电流范围内的线性响应以及固有的安全性，非常适合这些应用。线圈不会像磁芯传感器(CT)那样饱和。线圈常用于电子计量以实现精确计费，并用于断路器以快速检测高频故障电流。在需要精确电流波形测量的太阳能和风能系统以及工业设备中，线圈还可用作电源转换器。

TIDA-010987 设计采用多种元件配置，可为不同用例提供有效的信号调节。例如，该设计采用精密放大器以及硬件积分器，在实现高精度性能的同时还支持低频应用。有效的布局将不同尺寸的线圈与必需的信号调节电路一起放置在单个 PCB 上，提供一致的紧凑型参考设计。

对于需要在多种电流检测应用中评估罗氏线圈技术的工程师和系统设计人员，该参考设计特别有用。通过提供灵活的线圈几何形状和信号调节级，该设计支持在实际条件下对灵敏度、带宽和噪声特性等性能指标进行快速比较。该设计不仅用作演示平台，还可作为开发工具将罗氏线圈集成到下一代电流检测方法。

## 2 系统概述

TIDA-010987 参考设计提供一个通用 PCB 罗氏线圈平台，可在各种应用中进行精确电流测量。该系统将多种线圈尺寸、精密放大器、差分信号调节和硬件积分器集成到一个紧凑型电路板中，为灵活且可扩展的用例提供支持。

TIDA-010987 参考设计为电流测量应用提供了几项主要优势：

- 紧凑的 PCB 外形将多种线圈尺寸和信号调节电路整合到单个参考设计中。
- 笨重电流互感器和分流电阻器具有成本效益的替代方案。
- 不受饱和和磁篡改影响，可在工业和电力电子环境中提供更强的稳健性。
- 专为单个电路板上的多个电流检测用例而设计，可缩短设计时间并提高评估灵活性。

### 2.1 方框图

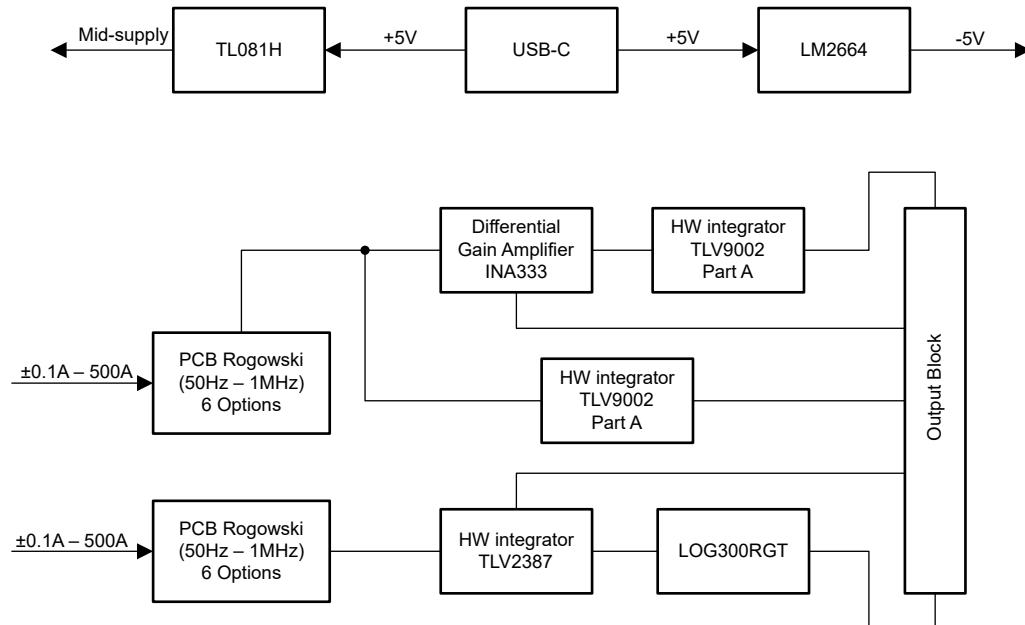


图 2-1. TIDA-010987 方框图

#### 2.1.1 PCB 罗氏线圈

TIDA-010987 参考设计集成了六种不同的 PCB 罗氏线圈尺寸，每种线圈均在印刷电路板上精心布置成差分绕组。该设计利用基于 Python® 的自动脚本编写功能，最大程度减少人为错误并提供精确的对称性，这对于线圈精度和

噪声抑制至关重要。这种方法不仅提高了制造领域中的可重复性，而且还在原型和量产器件中提供了一致的线圈性能。

每个线圈都清楚地标记出最大可测量电流额定值以及调节电路的相关增益要求。无论是测量住宅计量中的低电平电流，还是处理工业保护系统的更大电流范围，标签都能使最终用户轻松识别和选择最适合应用的线圈。标记和标准化外形避免了盲目尝试，因此对于需要在实际条件下评估罗氏线圈的工程师来说，该设计非常实用。

该实现的一个主要优势是用户友好的插件架构。与需要焊接或外部连接器（跳线电缆）的传统罗氏线圈布置不同，TIDA-010987 提供冲孔和插件式外形。工程师无需修改电路板或重新配置布置，即可在线圈尺寸之间快速切换，显著缩短评估和原型设计时间。在为应对给定的电流检测挑战而比较多种线圈的几何形状时，模块化特性使得该设计对于研发实验室、学术机构和产品团队特别有用。

### 2.1.2 积分器级

罗氏线圈输出端感应的电压 (**VS**) 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  $90^\circ$  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。相移是使用积分器实现的。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  $-20\text{dB}/\text{十倍频程}$  的衰减和恒定的  $90^\circ$  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。精确的数字积分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。相位校正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。该参考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  $90^\circ$  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。

罗氏线圈输出，尤其是 PCB 罗氏线圈输出非常低，为  $10 \mu\text{V/A} - 100 \mu\text{V/A}$ 。低输出在电流较低（例如  $100\text{mA}$ ）时会成为问题，在这种情况下，信号需要根据线圈灵敏度放大 ( $100\text{V/V} - 500\text{V/V}$ )。有源积分器电路可充当衰减器，同时将电流波形偏移  $90^\circ$  度。衰减低输入信号会降低精度，因为信号会变得非常低，使信号达到 ADC 的本底噪声。积分器的增益必须设置为单位增益，以消除相关频率 ( $50\text{Hz}-60\text{Hz}$ ) 下的积分衰减。为了实现  $90^\circ$  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数学运算的类型。采用分立式方法时，建议将薄膜电阻器以及 COG 和 NPO 电容器用于高精度应用。

### 2.1.3 输入级

罗氏线圈是  $\text{di}/\text{dt}$  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，导致线圈输出端出现急剧的电压峰值和高频振铃。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。低通滤波器旨在衰减高频分量（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 差分放大器级

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 INA333 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。该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。

### 2.1.5 高带宽、低噪声放大器级

#### 2.1.5.1 混合积分器

该级使用有源积分和无源积分的组合。无源滤波器位于有源滤波器前方，可减少使放大器饱和的高频尖峰和振铃。有源积分器具有 2676 的增益和  $1048\text{Hz}$  的转角频率。这种配置会产生  $2.8\text{MHz}$  的增益交叉频率。所选增益的无源滤波器电阻值为  $210\Omega$ ，为了继续积分，要为  $2.8\text{MHz}$  的转角频率选择电容器。

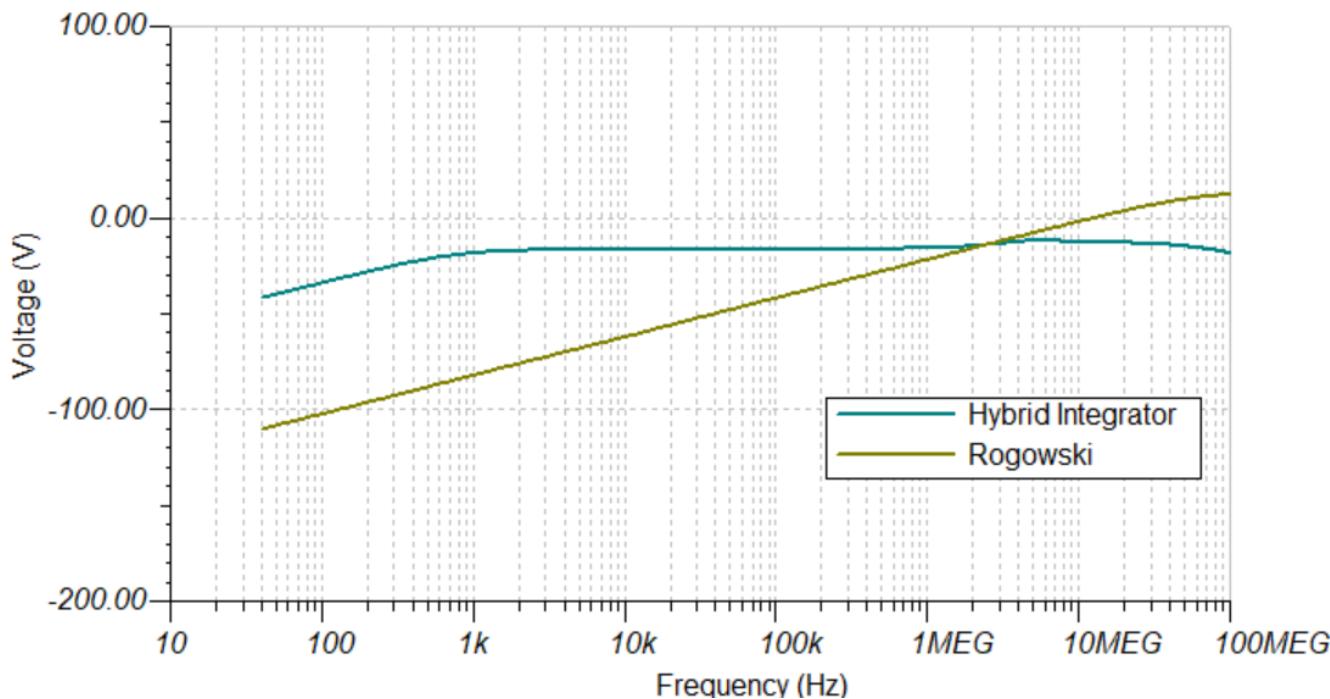


图 2-2. 混合积分器和 PCB 罗氏线圈的 TINA 仿真

#### 2.1.5.2 带通滤波器

在包括电弧故障检测在内的一些应用中，对特定频段进行滤波对于隔离相关信号很有用。该设计采用 5kHz 至 50kHz 带通滤波器，可以通过更改组成其高通和低通部分的 RC 对来调整该滤波器。之所以选择 5kHz 频率，是因为 60Hz 负载的谐波通常低于 5kHz。例如，典型的交流有刷电机以 1kHz 至 4kHz 的每分钟转数 (RPM) 运行。

#### 2.1.5.3 对数放大器

LOG300 是一款宽带宽 AFE (40MHz)，在可调滤波输入下提供能够检测 98dB 动态范围的对数输出。凭借配置的增益，该器件可用于测量  $\mu$  A 至 A 范围的电流信号。该放大器还应用于电弧检测，它提供一种无需高速 ADC 和数字信号处理器 (DSP) 来处理信号即可检测高频电弧信号的方法。

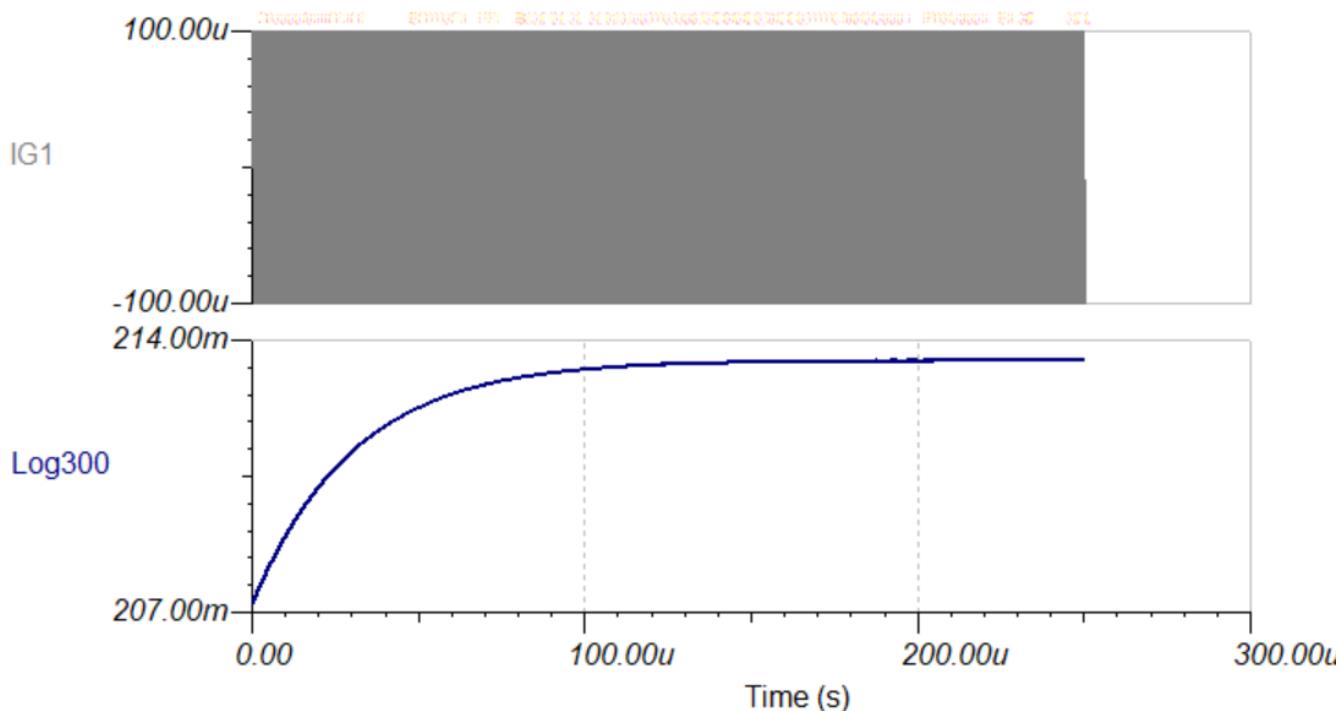


图 2-3. 可使用 100A、1MHz 正弦输入的 LOG300 和 PCB 罗氏 TINA 仿真

## 2.2 设计注意事项

### 2.2.1 元件选型

系统增益可在三个不同的级控制，即差分放大器 (INA333) 上的增益级、放大器级后的积分器级和独立积分器。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。对于精确测量至关重要的保护应用，电流会下降至 mV 范围，增益放大器在该范围内放大信号。积分器（设置为衰减）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 1000V/V，具体取决于罗氏线圈的类型和灵敏度，其中积分器增益已设置为多个元件配置的单位增益。

### 2.2.2 RC 元件选择

该设计在不同元件配置下实现多种特性，例如低相位误差，低噪声、快速趋稳、精密测量和高频。为了实现低相位误差，选择了少于 30ms 的 RC 时间常数。选择  $100\text{k}\Omega$  电阻器和  $0.3\text{\mu F}$  电容器来为积分器获得 30ms 的趋稳时间。选择具有低（小于  $\pm 5\%$ ）容差和较低温度漂移的积分电容器。C0G 和 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  $\pm 0.1\%$  的容差，并且采用薄膜材料来提高精度和可重复性，并且不会给系统带来额外的噪声。

对于独立积分器，选择了  $470\text{k}\Omega$  电阻器和  $100\text{nF}$  电容器，以实现更短趋稳时间（10ms）以及单位增益和更好的频率响应。

### 2.2.3 增益设置

增益放大器仅使用单个电阻器 (RG) 来控制增益选择。电阻器 RG 连接到 INA333 器件的引脚 1 和引脚 8。将该电阻器尽可能靠近放大器的引脚布置，以减小引脚 1 和引脚 8 之间的线路电容。根据方程式 1 正确设置放大器增益。

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

其中

- S = 线圈灵敏度 (以  $\mu V$  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

$$G_s = Gain_{amp} \times Gain_{int} \quad (2)$$

其中

- 增益  $Gain_{amp} = 1 + (100k\Omega / RG)$
- 增益  $Gain_{int} = (RF/RI) \times 1 / \sqrt{1 + 2\pi \times F \times RF \times C}$

方程式 3 展示了设置独立积分器增益的传递函数。

$$\frac{\sqrt{(1 + 2 \times (\frac{RF}{RI}))^2 + (4 \times \pi \times RF \times F \times C)^2}}{\sqrt{(1 + (2 \times \pi \times RF \times F \times C))^2} \times \sqrt{(1 + (2 \times \pi \times RI \times F \times C))^2}} \quad (3)$$

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 INA333

INA333 器件是一款低功耗精密仪表放大器，可提供出色的精度。这款放大器采用多功能三级运算放大器设计，尺寸小巧且功耗低，适用于多种便携式应用。可通过单个外部电阻器在 1 到 1000 范围内设置任意增益。INA333 的设计适用业界通用的增益公式： $G = 1 + (100k\Omega / RG)$ 。INA333 器件提供极低的失调电压 ( $25 \mu V$ ,  $G \geq 100$ )、出色的失调电压漂移 ( $0.1 \mu V/\text{^\circ C}$ ,  $G \geq 100$ ) 和高共模抑制 ( $G \geq 10$  时为  $100\text{dB}$ )。该器件采用低至  $1.8V$  ( $\pm 0.9V$ ) 的电源电压，并且静态电流仅为  $50\mu A$ ，非常适合电池供电系统。INA333 器件采用自动校准技术，可在扩展工业级温度范围内提供出色的精度，还可提供向下扩展至直流的超低噪声密度 ( $50nV/\sqrt{Hz}$ )。

### 2.3.2 TLV9002

TLV9002 是一款具有轨到轨输入和输出摆幅功能的低压 ( $1.8V$  至  $5.5V$ ) 运算放大器。这些运算放大器为空间受限、需要低电压供电和高容性负载驱动器的应用 (例如烟雾探测器、可穿戴电子设备和小型电器) 提供了一种具有成本效益的方法。TLV900x 系列的容性负载驱动器具有  $500pF$  的电容，而电阻式开环输出阻抗使其能够在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。这些运算放大器专为低电压供电 ( $1.8V$  至  $5.5V$ ) 而设计，性能规格类似于 TLV600x 器件。TLV9002 系列的稳健设计有助于简化电路设计。这些运算放大器具有单位增益稳定性，集成了 RFI 和 EMI 抑制滤波器，并且在过驱情况下不会出现相位反转。

### 2.3.3 LM2664

LM2664 CMOS 电荷泵电压转换器将  $1.8V$  至  $5.5V$  范围内的正电压转换为  $-1.8V$  至  $-5.5V$  范围内的对应负电压。该器件使用两个低成本电容器提供高达  $40mA$  的输出电流。LM2664 在  $160kHz$  振荡器频率下工作，可减少输出电阻和电压纹波。由于工作电流仅为  $220\mu A$  (在大多数负载条件下工作效率大于  $91\%$ ) 且典型关断电流为  $1\mu A$ ，LM2664 能够为电池供电系统提供卓越性能。

### 2.3.4 TLV2387

TLV2387 是一款精密放大器，可提供出色的性能。通过零漂移技术，TLV2387 的失调电压和温漂可提供出色的长期稳定性。仅凭借  $570\mu A$  的静态电流，TLV2387 就能实现  $5.7MHz$  的带宽、 $8.5nV/\sqrt{Hz}$  的宽带噪声和  $177nV_{PP}$

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。  
TLV2387 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不需校准。

### 2.3.5 LOG300

LOG300 是一款集成模拟前端 (AFE)，由低噪声放大器 (LNA) 和对数检测器块组成。该器件支持 50Hz 至 40MHz 的输入频率范围和 98dB 的典型动态范围。适用于需要宽动态电压范围和信号测量的应用。LOG300 的对数检测器块支持单端和差分输入。集成 LNA 具有低输入噪声，支持测量低至  $7\mu V_P$  的信号。可以通过调整连接在 Log\_Out 引脚上的电容器来调节瞬态输出响应。借助 LOG300 的集成频率检测功能，用户能够提取输入信号频率和过零信息。

### 2.3.6 TL081H

TL081H 器件是业界通用 TL08x (TL081、TL082, 和 TL084) 器件的下一代版本。该些器件为成本敏感型应用提供了卓越的价值，其特性包括低失调电压 (1mV, 典型值)、高压摆率 (20V/ $\mu s$ ) 和正电源的共模输入。得益于高 ESD (1.5kV, HBM)、集成 EMI 和射频滤波器以及 -40°C 至 125°C 的完整运行温度范围，TL081H 器件可用于要求严苛的应用。该器件为信号调节电路生成一个  $1/2\text{ Vs}$  基准点，以便可以采用单电源运行。

## 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

### 3.1 硬件要求

为准确评估罗氏线圈的性能和相关信号调节电路，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的电源。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（例如钳形电流表，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）：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。

### 3.2 测试设置

#### 3.2.1 计量设置

图 3-1 展示了模拟在 ANSI C12.1 标准中达到 0.2 级 - 0.3 级精度的商用级电表所需的完整系统设置。测试设置包含四个主要部分：

1. 可编程电流和电压源 (PTS3.3C 测试系统)
2. 配备多个 PCB 罗氏线圈的信号调节板 (TIDA-010987)
3. ADS131M08 计量评估模块
4. 用于电表性能监控和校准的 GUI

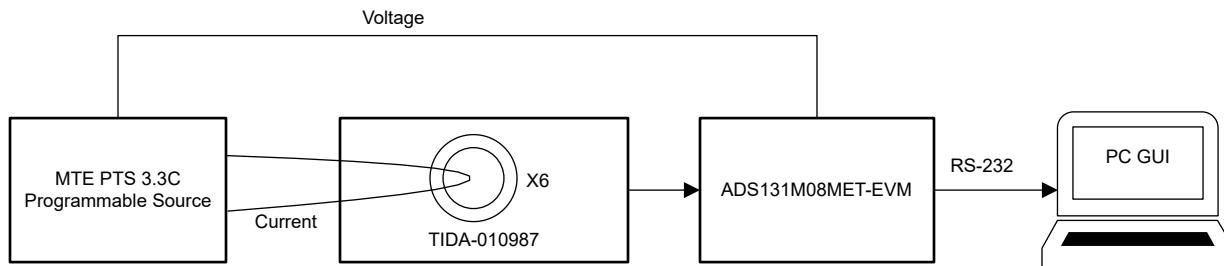


图 3-1. 完整系统设置

### 3.2.1.1 精确的电流源

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



图 3-2. 自动测试设备 (MTE)

### 3.2.1.2 TIDA-010987

图 3-3 展示了采用冲孔和插件式外形且配备六种不同尺寸线圈和模拟信号调节电路的电路板，方便易用。

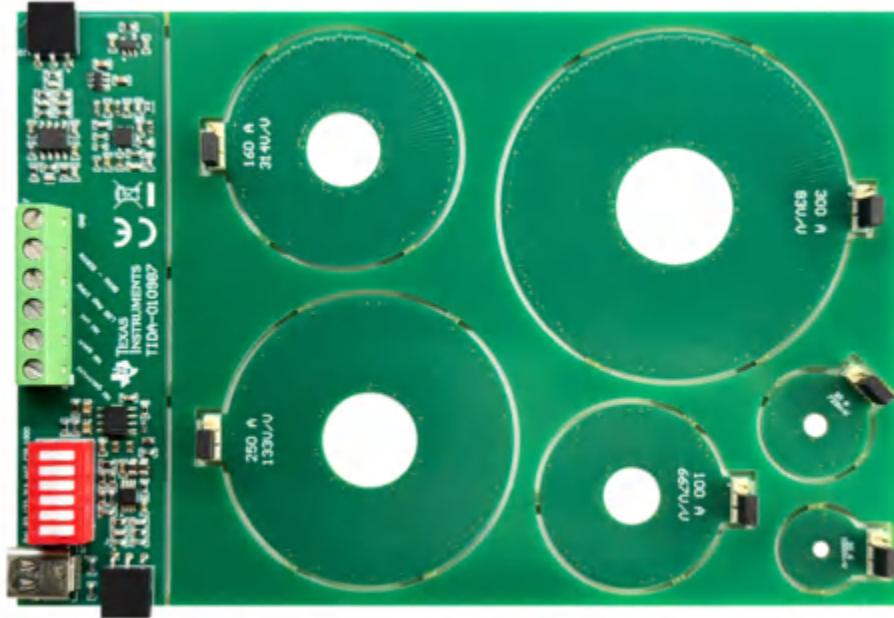


图 3-3. 冲孔板

### 3.2.1.3 ADS131M08 计量评估模块

图 3-4 展示能量计算和消耗测量所需的、配备 ADC 和 MCU 的 EVM。

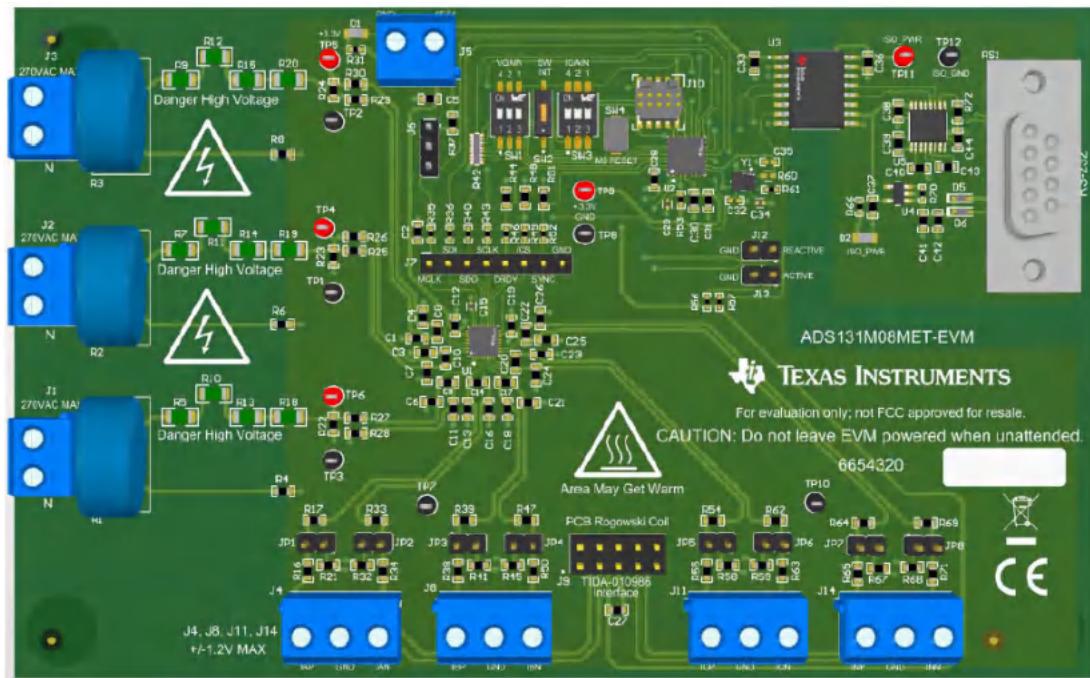


图 3-4. 采用 ADC 和 MCU 适用于电能计算及耗电量测量的 EVM

### 3.2.1.4 GUI

图 3-5 展示用于跟踪电表消耗和电表校准的 PC GUI。



图 3-5. 跟踪仪表消耗和仪表校准

### 3.2.2 5kHz 至 50kHz 带通和对数放大器测试设置

#### 3.2.2.1 示波器

建议进行测试时使用以下示波器设备，该设备未包含在参考设计中：

- Tektronix MDO3050
- 2 个 Tektronix TPP0500B 500MHz 探头

#### 3.2.2.2 函数发生器

建议进行测试时使用以下函数发生器，该函数发生器未包含在参考设计中：

- Agilent 33210A 10MHz 任意波形函数发生器

## 3.3 测试结果

本节讨论在 PCB 罗氏线圈和信号调节电路板 (TIDA-010987) 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和线圈下的精度、线性度和抗噪性能。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。

**表 3-1. 灵敏度增益指南**

线圈尺寸 ( 外圈 × 内侧 ) mm	60Hz 时的灵敏度 ( $\mu$ V/A)	所需增益	RG
60 × 20	41.77	475	210
50 × 16	34.71	572	175
40 × 12	27.85	713	140
32 × 10	21.79	911	110
16 × 4	11.1	1000 ( 最大增益 )	100
13 × 3	9.1	1000 ( 最大增益 )	100

### 3.3.1 无负载条件

#### 3.3.1.1 目标

该测试验证当没有电流流过电路时系统是否记录无有脉冲 ( 电流读数 ) 。

#### 3.3.1.2 设置

电路中必须存在电压，且电流必须与电路断开。

#### 3.3.1.3 要求

在空载条件下，请遵循以下要求：

- 在前 10 分钟内：
  - 不得发出超过一个测试脉冲
  - 累积的能量不得超过一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

#### 3.3.1.4 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。

### 3.3.2 初始负载测试

#### 3.3.2.1 目标

该测试验证仪表能否在最小额定电压下和初始负载条件下持续可靠地工作，并在两个方向上正确测量能量。

#### 3.3.2.2 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。

### 3.3.2.3 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。

### 3.3.2.4 结果

图 3-6 展示了起始负载测试结果。

Meter 1	
Phase A	
RMS voltage	120.002V
Phase V->I	10.10°
Phase V->I (Reported)	10.07°
Fund voltage	120.009V
Voltage THD	2.26%
RMS current	0.114301A
Fund current	0.048217A
Current THD	0.00%
Active power	5.977W
Fund. active power	5.777W
Reactive power	1.061var
Fund. reactive power	0.397var
Apparent power	6.071VA
Fund. apparent power	2.574VA
Power factor	0.985L

图 3-6. 起始负载测试结果

### 3.3.3 有功功率测量

#### 3.3.3.1 目标

该测试验证电表在不同负载条件下是否保持 0.1 级至 0.2 级精度，并保持在允许的误差范围内。

#### 3.3.3.2 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。

### 3.3.3.3 要求

精度必须保持在相对于参考值的允许偏差范围内。

### 3.3.3.4 结果

表 3-2 展示了有功功率测量结果。

表 3-2. 有功功率测量结果

电流	(0 度)											
	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	误差 6	平均误差 %	增量误差	与基准的差值	限值 (%) [0.5 级]	限值 (%) [0.2 级]	限值 (%) [0.1 级]
1.0	-0.296	0.174	-0.013	-0.236	0.044	-0.280	-0.1012	0.4700	-0.0955	1.000	0.400	0.200
1.5	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.0062	0.2350	0.0118	0.500	0.200	0.100
3.0	0.028	-0.086	-0.151	0.102	0.167	0.029	0.0148	0.3180	0.0205	0.500	0.200	0.100
10.0	-0.040	-0.035	-0.082	-0.032	0.034	-0.090	-0.0408	0.1240	-0.0352	0.500	0.200	0.100
15.0	<b>-0.028</b>	<b>-0.048</b>	<b>-0.045</b>	<b>0.073</b>	<b>0.023</b>	<b>-0.009</b>	-0.0057	<b>0.1210</b>	(基准)	<b>0.200</b>	<b>0.100</b>	<b>0.050</b>
30.0	0.025	0.017	0.034	0.008	0.000	-0.013	0.0118	0.0470	-0.0175	0.500	0.200	0.100
50.0	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.0235	0.0300	-0.0292	0.500	0.200	0.100
75.0	0.022	0.035	0.031	0.026	0.037	0.014	0.0275	0.0230	-0.0332	0.500	0.200	0.100
90.0	0.041	0.036	0.056	0.054	0.051	0.039	0.0462	0.0200	-0.0518	0.500	0.200	0.100
100.0	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.0667	0.0150	-0.0723	0.500	0.200	0.100

### 3.3.4 功率因数变化

#### 3.3.4.1 目标

本测试验证电表能否在除单位功率因数以外的不同功率因数下持续、可靠且准确地工作。

#### 3.3.4.2 设置

应用不同的功率因数，包括超前（电容）和滞后（电感）。

#### 3.3.4.3 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。

### 3.3.4.4 结果

表 3-3 和表 3-4 展示了不同条件下功率因数结果的变化。

**表 3-3. 60 度功率因数结果的变化**

电流	(60 度) 超前										
	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	误差 6	平均误差 %	增量误差	与基准的差值	限值 (%) [0.5 级]	限值 (%) [0.2 级]
1.500	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.006	0.235	(基准)	不适用	不适用
3.000	-0.180	0.099	0.082	-0.110	0.102	0.055	0.008	0.282	-0.002	1.000	0.500
15.000	-0.028	-0.048	-0.045	0.073	0.023	-0.009	-0.006	0.121	(基准)	不适用	不适用
15.000	-0.040	-0.181	0.018	0.036	0.080	-0.013	-0.017	0.261	0.011	0.600	0.300
50.000	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.024	0.030	(基准)	不适用	不适用
50.000	0.055	0.020	0.032	0.073	0.026	0.003	0.035	0.070	-0.011	0.600	0.300
100.000	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.067	0.015	(基准)	不适用	不适用
100.000	-0.042	-0.036	-0.062	-0.056	-0.051	-0.021	-0.045	0.083	0.111	0.600	0.300

**表 3-4. 323.13 度功率因数结果的变化**

电流	(323.13 度) 滞后											
	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	误差 6	平均误差 %	增量误差	与基准的差值	限值 (%) [0.5 级]	限值 (%) [0.2 级]	限值 (%) [0.1 级]
1.500	0.035	0.113	0.109	0.005	-0.103	-0.122	0.006	0.235	(基准)	不适用	不适用	不适用
3.000	0.086	0.012	-0.120	-0.092	-0.062	0.053	-0.021	0.206	0.027	1.000	0.500	0.250
15.000	-0.028	-0.048	-0.045	0.073	0.023	-0.009	-0.006	0.121	(基准)	不适用	不适用	不适用
15.000	0.022	-0.038	-0.115	-0.086	-0.104	-0.001	-0.054	0.137	0.048	0.600	0.300	0.150
50.000	0.027	0.017	0.014	0.010	0.033	0.040	0.024	0.030	(基准)	不适用	不适用	不适用
50.000	0.074	0.104	-0.012	0.027	-0.007	0.009	0.033	0.116	-0.009	0.600	0.300	0.150
100.000	0.066	0.061	0.068	0.059	0.072	0.074	0.067	0.015	(基准)	不适用	不适用	不适用
100.000	0.093	0.104	0.106	0.100	0.109	0.118	0.105	0.025	-0.038	0.600	0.300	0.150

### 3.3.5 电压变化测试

#### 3.3.5.1 目标

该测试验证电表能否在除标称电压以外的各个电压范围内持续、可靠且准确地工作。

#### 3.3.5.2 设置

根据电表的指定电压范围施加不同的电压。测试点条件如下：

- 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%

#### 3.3.5.3 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。

### 3.3.5.4 结果

表 3-5 展示了电压变化的结果。

表 3-5. 电压变化测试结果

电压	cos φ = 1 ( 0 度 )							ANSI C12.1 2022		
	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	增量误差	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					
<b>120 (REF)</b>	<b>0.023</b>	<b>0.068</b>	<b>0.018</b>	<b>0.129</b>	<b>0.113</b>	<b>0.111</b>	0.070	( 基准 )	REF	REF
<b>108</b>	0.114	0.177	0.09	0.046	-0.113	<b>0.290</b>	0.0628	0.007	±0.1	±0.2
<b>235</b>	-0.076	-0.022	-0.019	-0.053	0.109	<b>0.185</b>	-0.0122	0.082	±0.1	±0.2
<b>270</b>	0.046	0.006	-0.073	-0.039	0.012	<b>0.119</b>	-0.0096	0.080	±0.1	±0.2
<b>297</b>	0.006	0.029	-0.005	-0.068	-0.062	<b>0.097</b>	-0.0200	0.090	±0.1	±0.2
	测试电流 (TA)									
	15	15	15	15	15					
<b>120 (REF)</b>	<b>-0.077</b>	<b>-0.073</b>	<b>-0.065</b>	<b>-0.117</b>	<b>-0.077</b>	<b>0.052</b>	-0.0818	( 基准 )	REF	REF
<b>108</b>	-0.071	-0.1	-0.077	-0.119	-0.086	<b>0.048</b>	-0.0906	0.009	±0.1	±0.2
<b>235</b>	-0.019	0.094	0.032	0.09	0.009	<b>0.113</b>	0.0412	0.123	±0.1	±0.2
<b>270</b>	0.02	-0.003	-0.05	0.036	0.012	<b>0.086</b>	0.0030	0.085	±0.1	±0.2
<b>297</b>	-0.05	-0.081	-0.081	-0.097	-0.057	<b>0.047</b>	-0.0732	0.009	±0.1	±0.2

### 3.3.6 频率变化

#### 3.3.6.1 目标

该测试验证电表能否在除标称频率以外的各个频率范围内持续、可靠且准确地工作。

#### 3.3.6.2 设置

根据电表的指定频率范围施加不同的频率。测试点条件如下：

- 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

#### 3.3.6.3 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。

### 3.3.6.4 结果

表 3-6 说明了频率结果变化。

表 3-6. 频率结果变化

频率	误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5	增量误差	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										
50 (REF)	0.067	0.18	0.112	0.164	-0.066	0.246	0.0914	(基准)	REF	REF					
49	0.193	-0.126	0.059	0.176	0.23	0.356	0.1064	0.015	±0.05	±0.1					
51	0.152	0.224	0.187	0.177	-0.195	0.419	0.1090	0.018	±0.05	±0.1					
60 (REF)	-0.048	0.140	-0.069	-0.139	-0.080	0.279	-0.0392	(基准)	REF	REF					
58.8	-0.08	-0.073	0.099	0.042	-0.025	0.179	-0.0074	0.032	±0.05	±0.1					
61.2	0.13	-0.107	0.11	-0.296	0.076	0.426	-0.0174	0.022	±0.05	±0.1					
测试电流 (TA)															
	15	15	15	15	15										
50 (REF)	0.008	-0.028	-0.036	-0.006	-0.014	0.044	-0.0152	(基准)	REF	REF					
49	0.007	0.016	0.000	0.000	-0.012	0.028	0.0022	0.017	±0.05	±0.1					
51	-0.008	-0.033	0.010	0.008	0.000	0.043	-0.0046	0.011	±0.05	±0.1					
60 (REF)	0.069	0.073	0.097	0.085	0.050	0.047	0.0748	(基准)	REF	REF					
58.8	0.079	0.090	0.095	0.094	0.094	0.016	0.0904	0.016	±0.05	±0.1					
61.2	0.097	0.079	0.086	0.013	-0.002	0.099	0.0546	0.020	±0.05	±0.1					

### 3.3.7 带通

#### 3.3.7.1 目标

该测试验证 AFE 的频率响应。

#### 3.3.7.2 设置

将函数发生器连接到 AFE 输入端，代替罗氏线圈。在以接地为基准的 5kHz 至 50kHz 标记输出测试点使用示波器测量 50Hz 至 400kHz 的频率响应。无源探头采用交流耦合方式，以进行调节和峰峰值测量。

系统会测量输入和输出电压。根据随频率而线性调节的有效罗氏线圈，应用归一化因子。图 3-7 中的组合图展显示了测得的 AFE 响应。

#### 3.3.7.3 要求

带通要求包括对应于 5kHz 和 50kHz 的 -3db 截止频率。

#### 3.3.7.4 结果

表 3-7 和图 3-7 展示了 TLV387 带通滤波器频率响应数据和图形。

表 3-7. 带通结果

频率	输入电压	输出幅度 (V)	归一化因子	V/V	dB
100	3.76	0.504	2	0.268085	-11.4345
500	2.8	1.78	10	6.357143	16.06524
1000	0.72	0.82	20	22.77778	27.15023
2000	0.72	1.56	40	86.66667	38.75704
4000	0.72	2.56	80	284.4444	49.07995
6000	0.72	3.16	120	526.6667	54.43072
8000	0.72	3.48	160	773.3333	57.76733
10,000	0.72	3.6	200	1000	60
12000	0.72	3.56	240	1186.667	61.48657
14000	0.72	3.52	280	1368.889	62.72736
16000	0.72	3.4	320	1511.111	63.58593

表 3-7. 带通结果 (续)

频率	输入电压	输出幅度 (V)	归一化因子	V/V	dB
18000	0.72	3.28	360	1640	64.29688
20000	0.72	3.08	400	1711.111	64.66556
25000	0.72	2.76	500	1916.667	65.65093
30000	0.72	2.36	600	1966.667	65.87462
35000	0.72	2.06	700	2002.778	66.03266
45000	0.72	1.54	900	1925	65.68861
55000	0.72	1.19	1100	1818.056	65.19214
65000	0.72	0.928	1300	1675.556	64.48318
80000	0.72	0.64	1600	1422.222	63.05935
100000	0.72	0.444	2000	1233.333	61.82161
200000	0.72	0.116	4000	644.4444	56.18371
400000	0.72	0.036	8000	400	52.0412

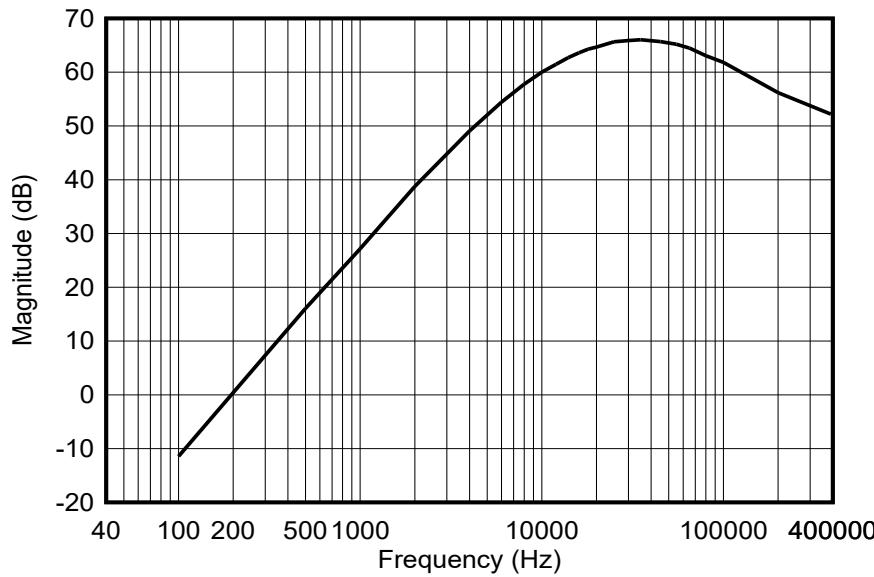


图 3-7. TLV387 带通滤波器频率响应

### 3.3.8 对数放大器

#### 3.3.8.1 目标

该测试验证 LOG300 AFE 的响应和幅度。

#### 3.3.8.2 设置

将函数发生器连接到 AFE 输入端，代替罗氏线圈。在对数放大器的标记输出测试点使用示波器。测量对数放大器输出的幅度（以伏特为单位）。根据低噪声放大器输出引脚和对数检测器输入引脚之间的 LC 对，峰值灵敏度出现在 1MHz 处。

#### 3.3.8.3 要求

以下列表展示了对数放大器相关要求：

- 输出以对数方式调节
- 峰值灵敏度出现在 1MHz 处

### 3.3.8.4 结果

图 3-8 展示了 LOG300 的输出幅度图形。

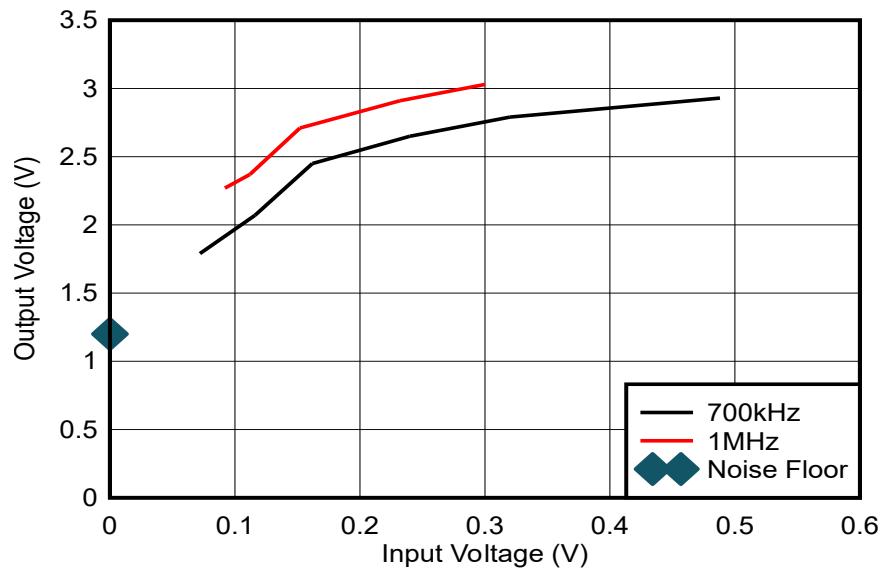


图 3-8. LOG300 输出幅度

## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

要下载设计文件，请参阅 [TIDA-010987](#) 中的设计文件。

#### 4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010987](#) 中的设计文件。

#### 4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010987](#) 中的设计文件。

#### 4.1.3 PCB 布局建议

##### 4.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010987](#) 中的设计文件。

### 4.2 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

### 4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI) , [INA333 微功耗 \(50 \$\mu\$ A\)、零漂移、轨至轨输出仪表放大器数据表](#)
- 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](#)
- 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](#)
- 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](#)
- 德州仪器 (TI) , [TLVx387 超高精度、零漂移、低输入偏置电流运算放大器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [TL08xx FET 输入运算放大器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [LM2664 开关电容器电压转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [ADS131M08 内存评估模块用户指南](#)
- 德州仪器 (TI) , [TIDA-010986 罗氏线圈的信号调节参考设计指南](#)

### 4.4 支持资源

### 4.5 商标

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

Python® is a registered trademark of Python Software Foundation.

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。

## 5 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一手经验，包括针对高精度测量的 EMC 测试和校准。

**NATHAN NOHR** 是德州仪器 (TI) 能源基础设施团队的系统工程师。他专注于智能断路器和故障检测。Nathan 拥有密歇根州大学电气和计算机工程硕士学位，专注于嵌入式系统。之前，他在 TI 电源设计服务团队工作。他从事各种新型电流检测技术相关工作，包括四层交错式 PCB 罗氏线圈、TI 的磁通门交流和直流剩余电流检测拓扑等，并且正在申请边缘 AI 电弧故障检测专利。

## 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出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 © 2025 , 德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期 : 2025 年 10 月