

Design Guide: TIDA-010971

基于边缘 AI 的断路器交流电弧故障检测参考设计



说明

本参考设计的核心为一套模拟前端电路，可实现交流电弧故障检测功能。嵌入式微控制器中运行 AI 模型。多个检测通道通过电流滤波器、电压检测和高频电弧能量对数检测来评估 AI 电弧故障检测。PCB 罗氏线圈电流传感器为信号链提供输入。该电路板需与兼容的 LaunchPad™ (例如 MSPM0G5187-LP) 搭配使用。

资源

TIDA-010971	设计文件夹
TLV387、TLV9054	产品文件夹
MSPM0G5187、LOG300	产品文件夹
UCC28881、TPS709	产品文件夹



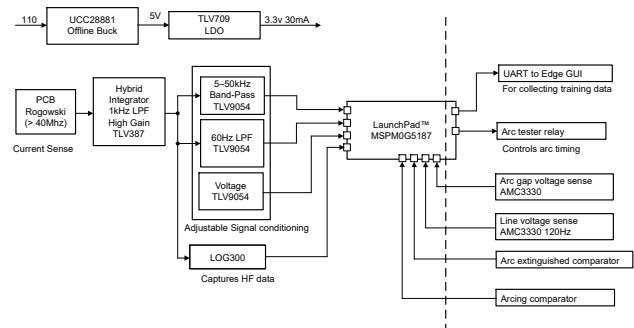
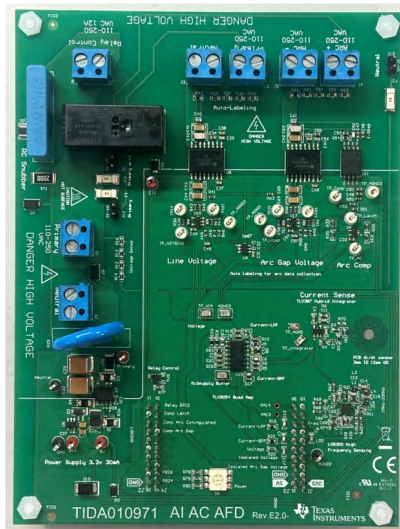
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 内置 PCB 罗氏线圈
- 支持 AI 加速器的 MSPM0G5187 配套 LaunchPad™ 开发套件连接
- 带宽 > 10MHz 的混合积分器
- 带宽 40MHz 的 LOG300
- 便于数据采集的自动标记电路

应用

- AFCI 断路器



1 系统说明

1.1 术语

AFCI	电弧故障断路器
AFD	电弧故障检测
电弧发生器	电弧由线性位移平台上的铜棒与石墨棒接触产生
碳化器	采用高压变压器与线材样品的电弧发生器

1.2 主要系统规格

表 1-1 展示了关键系统规格：

表 1-1. 主要系统规格

项目	说明
功耗	约 7mA 至 17mA
电源	在 10mA 下效率为 17%
输入电压	110 到 250VAC
罗氏线圈带宽	50Hz 至 40MHz
罗氏线圈尺寸	12mm 直径× 2 层 PCB 厚度
罗氏线圈灵敏度	在 6kHz 下约为 0.4mV/A
混合积分器带宽	2kHz 至 40MHz
增益放大器带通	6 kHz to 50kHz



小心

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。



警告

高电压！ 电路板中存在可接触到的**高电压**。可能发生电击。如电路板的电压和电流处理不当，则可能导致电击、火灾或伤害事故。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。为安全起见，强烈建议使用具有过压和过流保护功能的隔离式测试设备。

TI 认为在对电路板通电或进行仿真之前，用户有责任确认其已明确并理解电压和隔离要求。**通电后，请勿触摸该设计或与该设计相连的元件。**



警告

表面高温！接触会导致烫伤。请勿触摸！

电路板上电后，某些元件可能会达到 55°C 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时，不得触摸电路板，因为可能存在高温。



警告

TI 建议，该参考设计 **仅可在实验室环境中运行，不应视为成品** 供一般消费者使用。该设计旨在环境室温下运行，未在其他环境温度下进行运行测试。

TI 建议，该参考设计仅可由熟悉处理高压电子和机械部件、系统及子系统所存在相关风险的 **合格工程师和技术人员** 使用。

电路板中存在可接触到的高电压。如电路板的电压和电流处理不当或施加不正确，则可能导致电击、火灾或伤害事故。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。

2 系统概述

2.1 方框图

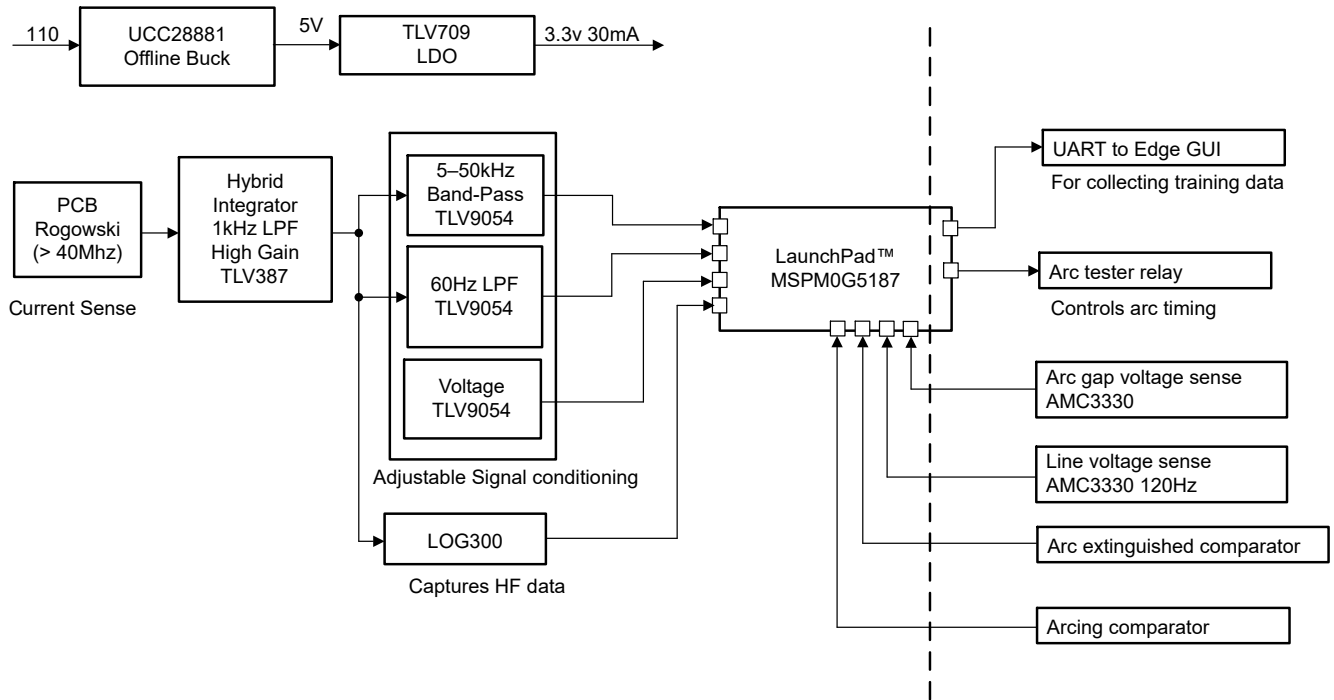


图 2-1. 系统方框图

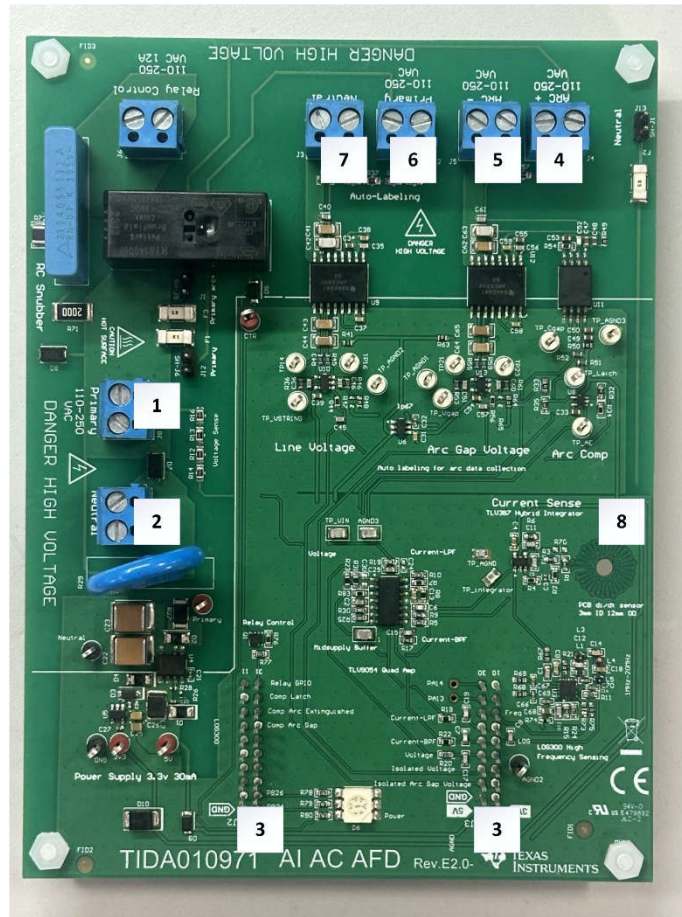


图 2-2. 带连接标签的电路板实物图

1. 初级侧输入电压：110-250VAC
2. 中性线输入电压：0V
3. LaunchPad 连接：(MSPM0G5187-LP)
 - a. PA16 A014 带通电流
 - b. PB16 A019 电压
 - c. PB22 A024 LOG300
 - d. PB14 A021 隔离电压
 - e. PB15 A020 隔离电弧间隙
 - f. PA15 A015 低通电流
 - g. PB4 红色 LED
 - h. PB5 绿色 LED
 - i. PA11 继电器 GPIO
 - j. PA10 继电器锁存
 - k. PA31 电弧熄灭比较器
 - l. 3.3V
 - m. 5V
 - n. GND
4. 电弧正极：120VAC (可选 J1 跳线至初级侧)
5. 电弧负极：120VAC
6. 隔离初级侧 110-250VAC (可选：J12 跳线连接到初级侧)
7. 隔离中性线 0V (可选：J13 跳线连接到中性线)
8. 继电器控制：输出：110-250VAC，12A (最大值)

9. PCB 罗氏线圈：12AWG，内径：3mm

2.2 设计注意事项

2.2.1 传感器选择

断路器必须对电路支路布线提供保护。电流传感器是实现这一保护的主要方式。实现该保护最简单的方法就是测量输入支路电流。

电弧故障检测可采用电压、电流、光传感器，或这些传感器的组合。电弧特征决定了电弧检测的传感器选型。电弧特征是指电弧特有的数据特征。对目标频率进行滤波可放大这些特征。快速傅里叶变换 (FFT) 等常见的 DSP 技术也可增强信号特征。

最终应用会带来额外的要求。断路器通常会中断 10,000A 的电流。电弧故障断路器可阻止 5A 至 500A 的电弧。电弧信号产生的频率可高达 10MHz 及以上。成本、尺寸、可制造性、线性度和温度稳定性均会影响传感器选型。

对电弧电流数据的分析表明，电弧属于时变粉红噪声。这会产生宽频谱。图 2-3 将此在 FFT 上展示为一条竖直线，且该信号会随频率升高而衰减。检测需在 MHz 级频率下进行。幅值随时间及频率呈随机变化特性。

交流电弧存在一段电压持续上升、电流却保持零值的阶段。电弧间隙电压必须达到足够幅值，方可使间隙内的空气发生电离。相较于测量电压，测量电流可通过捕捉这一电流断续特征，获取更显著的电弧特征。断路器标准 UL1699 规定了电弧放电的电流阈值。综合上述因素，电流传感器在支路电弧检测应用中具备显著技术优势。

电压检测方案则在其他应用场景中更具优势。电压的动态范围界定更窄。这使得滤波与 DSP 的要求更简单。光传感器不适用于本应用场景。电弧检测必须覆盖整个电路的任意位置。

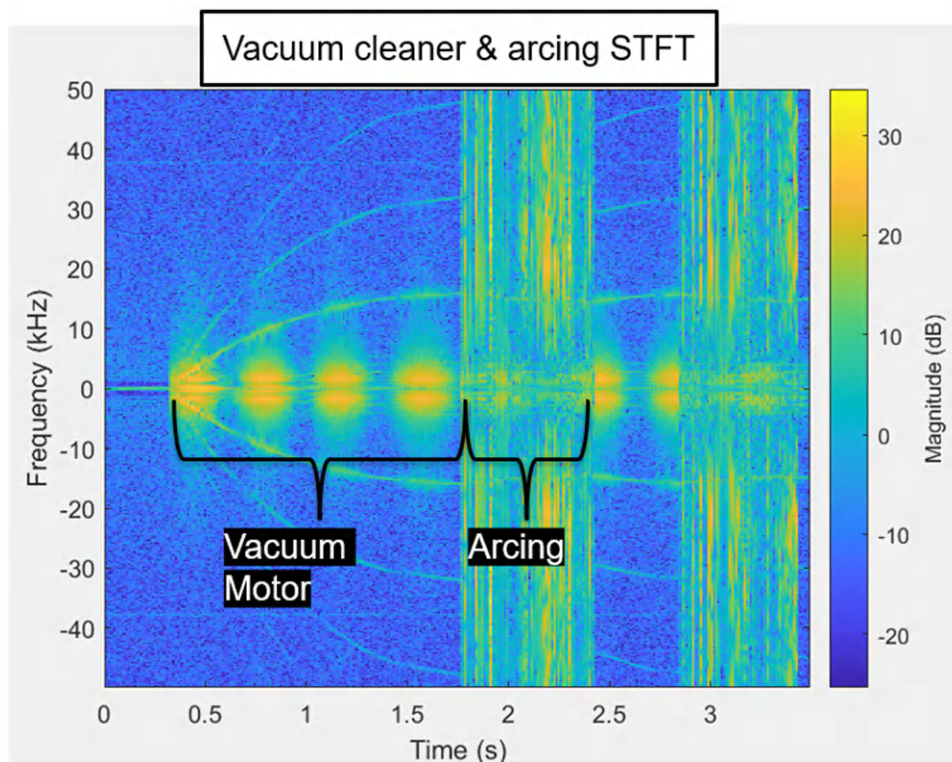


图 2-3. 真空负载下电弧频谱随时间的变化情况

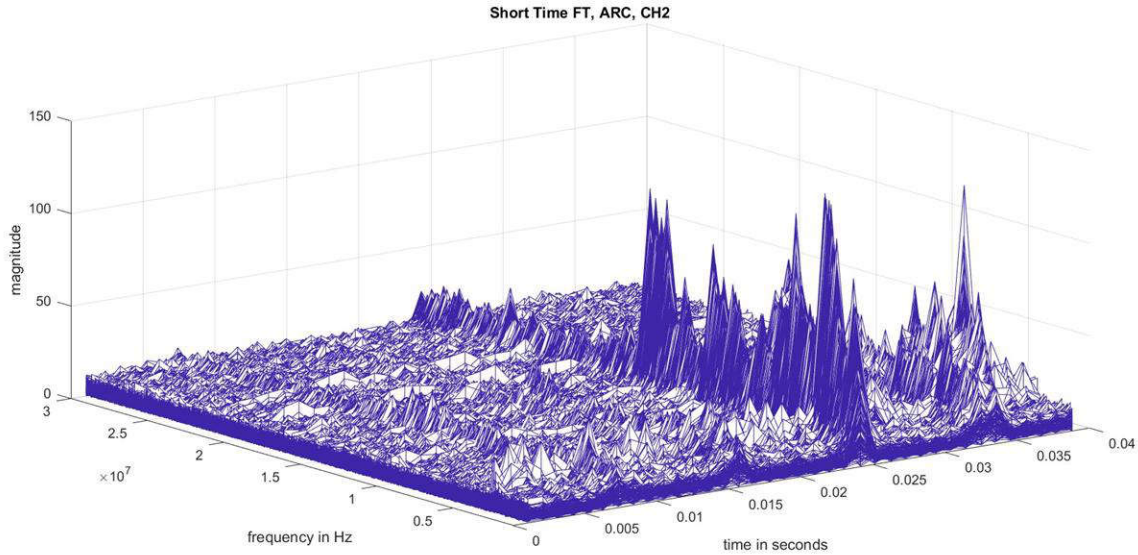


图 2-4. 真空负载下 40 ms 时段内的 MHz 级电弧频谱

本方案考量的电流传感器类型包括电流互感器、罗氏线圈及分流器。

表 2-1. 电流传感器对比

电流传感器	优点	缺点
分流器	体积紧凑、低成本、高带宽	易受温度影响、无电气隔离设计、需耐受 10,000A 大电流
CT	具备电气隔离能力、灵敏度良好、饱和特性会限制感应电压	体积较大、实现高带宽需付出较高成本
罗氏线圈	高带宽、对电弧频段灵敏度高、集成至 PCB 时体积小巧、成本低	需配套积分器使用、对低频信号灵敏度低

2.3 重点产品

2.3.1 TLV387

TLV387 精密放大器具备顶尖性能。零漂移技术为 TLV387 的失调电压和失调漂移提供出色的长期稳定性。TLV387 在 570 μ A 静态电流下，可实现 5.7MHz 的带宽。该放大器的宽带噪声为 8.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，1/f 噪声为 177nV_{pp}。这些规格性能可满足 16 位至 24 位模数转换器 (ADC) 的超高精度应用需求。这些规格性能可防止线性度劣化。TLV387 的偏置电流在整个温度范围内保持平稳。高输入阻抗应用在整个温度范围内几乎无需校准。

2.3.2 TLV9054

TLV9054 用作四通道运算放大器。该器件可在 1.8V 至 6.0V 的低压电源下工作。输入和输出在非常高的压摆率下可轨到轨运行。该器件适用于对成本敏感、要求低压工作、高压摆率和低静态电流的应用。

TLV905x 系列可驱动 150pF 的容性负载。电阻式开环输出阻抗使该器件在驱动更高电容负载时更易稳定。TLV905xS 器件具备关断模式。该模式可将放大器切换至待机状态，典型电流消耗低于 1 μ A。

TLV905x 系列操作简便。该器件可保持单位增益稳定。内置 RFI 和 EMI 滤波器。过驱情况下不会发生相位反转。

2.3.3 MSPM0G5187-LP

MSPM0G5187 微控制器 (MCU) 属于 MSP 高度集成的超低功耗 32 位 MCU 系列。这些 MCU 基于增强型 Arm® Cortex®-M0+ 32 位内核平台构建。平台的工作频率最高可达 80MHz。这些 MCU 兼具成本经济性与设计灵活性。应用需配备 32KB 至 128KB 的闪存。小型封装尺寸可低至 4mm×4mm。高引脚数封装的引脚数量最多可达 64 个。

这些器件集成了边缘 AI NPU 加速器、网络安全功能与高性能集成模拟模块。在整个工作温度范围内，器件均可保持优异的低功耗性能。最大 128KB 的嵌入式闪存程序存储器集成了内置纠错码 (ECC)。最大 32KB 的 SRAM 集成了 ECC 与奇偶校验保护。

闪存分为两个主存储区，支持现场固件升级功能。两个主存储区之间支持地址交换功能。TI 的边缘 AI NPU 用作集成式加速模块。该模块通过 MSPM0 平台中的检测、处理和控制在应用，增强了快速、安全的边缘 AI。

灵活的网络安全功能支持安全启动、安全现场固件更新、IP 保护 (仅执行存储器) 与密钥存储。硬件加速支持各种 AES 对称密码模式。该网络安全架构正在申请 Arm PSA 一级认证。

高性能模拟模块包括一个 12 位 1.6Msps 采样 ADC，支持最多 26 个外部通道。片上电压基准的工作电压为 1.4V 或 2.5V。一个高速比较器集成了内置 8 位基准 DAC。

2.3.4 LOG300

LOG300 用作集成模拟前端 (AFE)，由低噪声放大器 (LNA) 和对数检测器模块组成。此器件支持 50Hz 至 40MHz 的输入频率范围和 98dB 的典型动态范围。LOG300 适用于需要宽动态范围电压与信号测量的应用。对数检测器模块支持单端与差分输入。集成 LNA 的低输入噪声特性，可实现低至 7 μ V_r 的信号测量。用户可通过调整连接在 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。

2.3.5 UCC28881

UCC28881 在单片器件中集成了控制器和 14 Ω 、700V 功率 MOSFET。该器件还集成了高压电流源。该设计支持器件直接由整流后的市电电压启动并工作。UCC28881 与 UCC28880 属于同一系列器件，具备更高的电流处理能力。

该器件的低静态电流使其能够实现出色的效率。UCC28881 可构建降压、降压/升压和反激式等最常见的变换器拓扑。这些拓扑仅需极少的外部元件。

UCC28881 内置软启动功能，可实现功率级的受控启动。该功能可最大限度降低功率级元件承受的应力。

2.3.6 TPS709

TPS709 系列线性稳压器具备超低静态电流，适用于对功耗敏感的应用。精密带隙与误差放大器在整个温度范围内可实现 2% 的精度。仅 1 μ A 的静态电流，使其非常适用于电池供电、需长期工作且待机功耗要求极低的系统。该系列器件还具有热关断、电流限制和反向电流保护功能，提升了器件安全性。通过将 EN 引脚拉低启动关断模式。该模式的关断电流降至 150nA (典型值)。

3 系统设计原理

3.1 电流传感器

选择 PCB 罗氏线圈，是因其在宽带宽范围内具有线性度且成本低廉。TI 器件可解决该线圈在集成化设计与灵敏度偏低方面的技术难题。

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。传统绕制方案不具备过孔偏移设计。本发明借鉴了 TIDA01063 与 PCB 罗氏线圈绕制拓扑的研究成果⁽¹⁾。

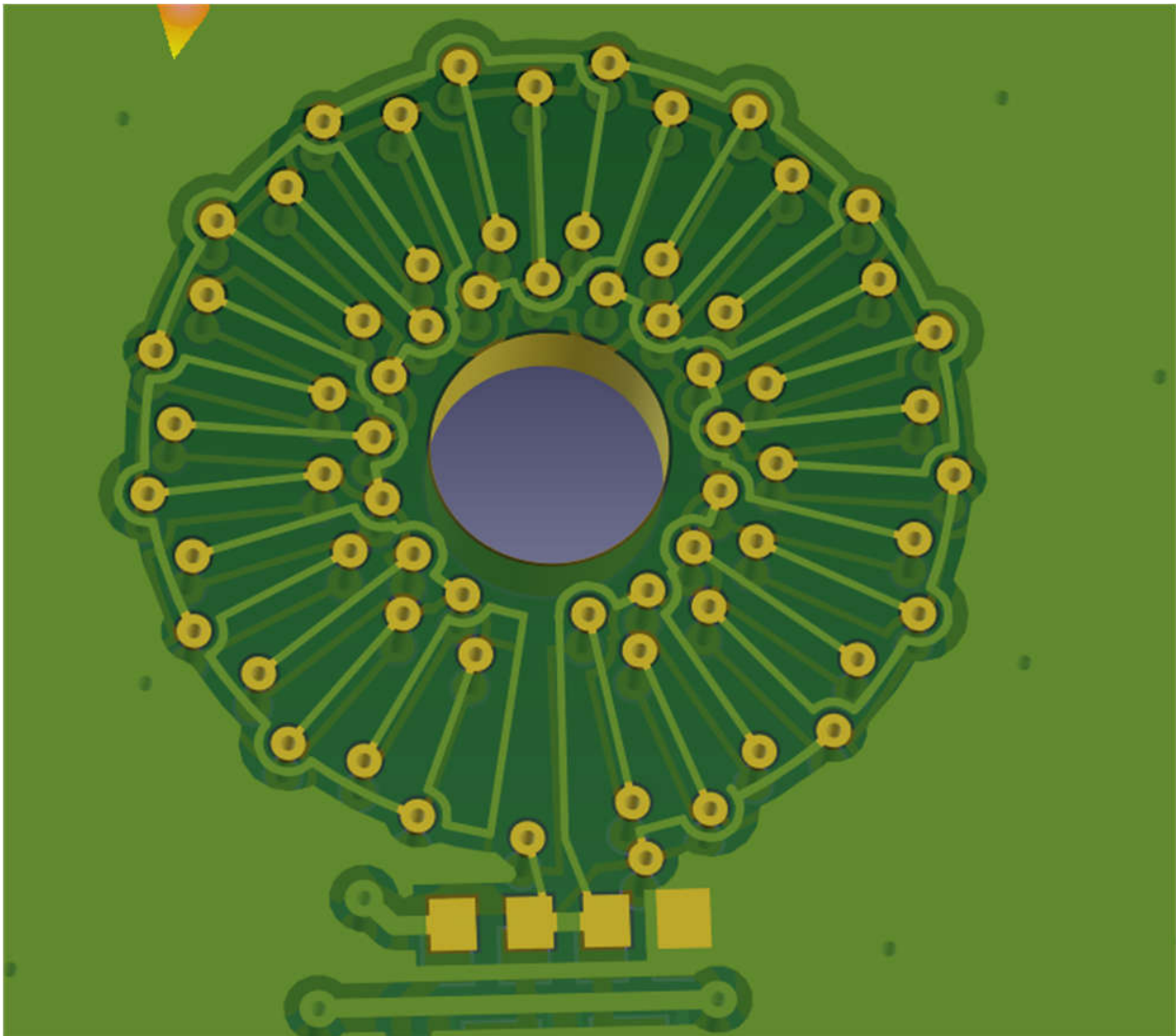


图 3-1. PCB 罗氏线圈绕制布局

图 3-2 展示了等效电路模型。

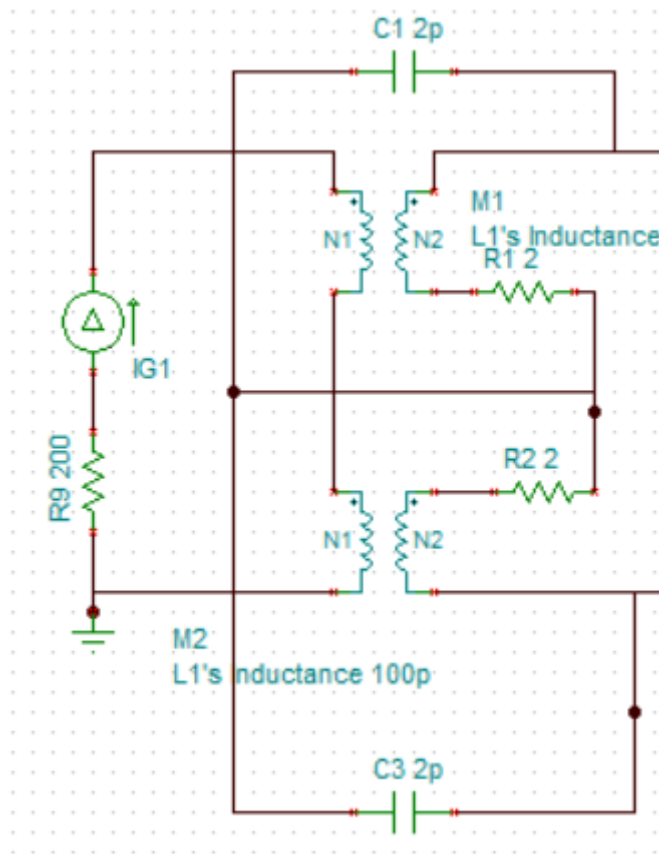


图 3-2. 罗氏线圈的 TINA 仿真原理图

罗氏线圈的输出信号与被测电流的微分值成正比。对于周期性信号，其微分值可通过[方程式 1](#) 计算得出。

$$\sin(\omega t) = \omega \times \cos(\omega t) \tag{1}$$

在 PCB 线圈的自谐振点以内，该结果与仿真传递函数一致。对于该小型线圈，理论自谐振点超过 40MHz。关于 PCB 罗氏线圈的设计详情，可参见 [TIDA-010987](#) 和 [TIDA-01063](#)。

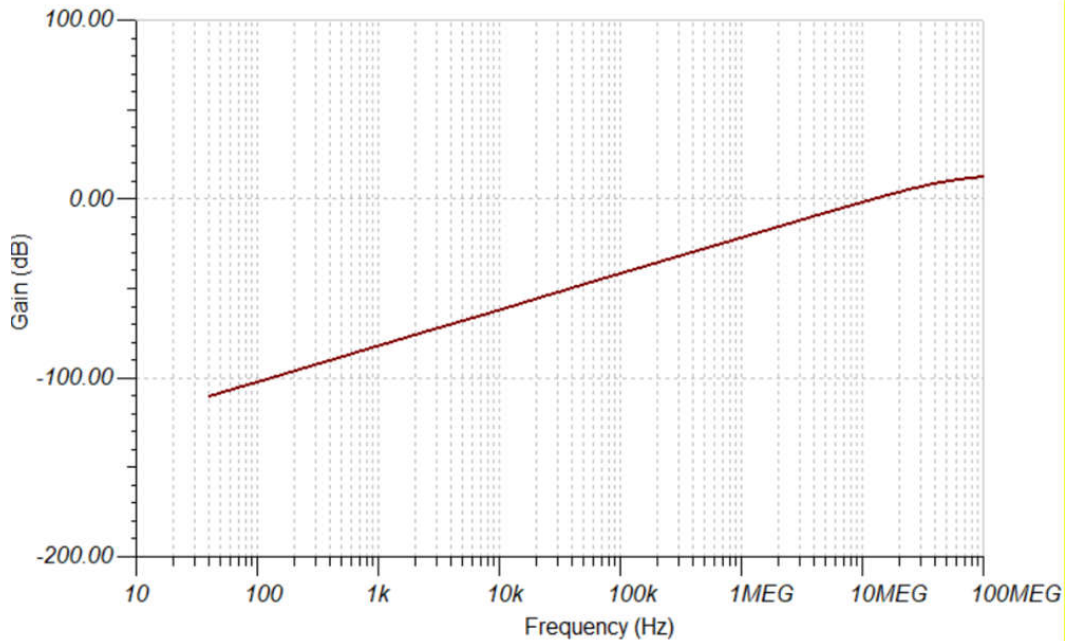


图 3-3. PCB 罗氏线圈的仿真波德图

3.2 混合积分器

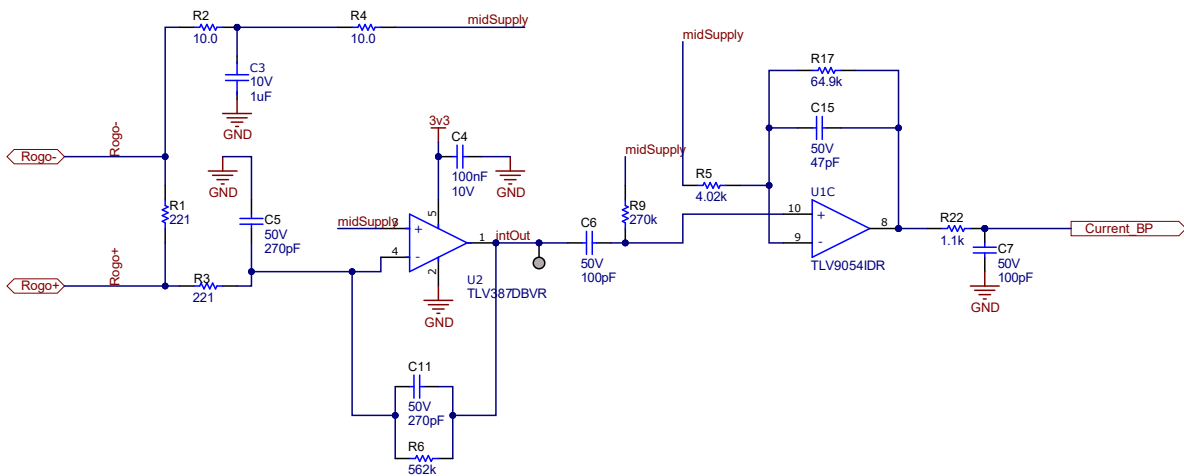


图 3-4. 混合积分器原理图

积分器可在 PCB 罗氏线圈的全带宽范围内提供平坦的线性响应，并对低频信号进行放大。积分器在直流下的增益为无穷大。这会导致误差随时间累积，因此需要对积分器进行复位。本设计通过在放大器上使用反馈电阻器 R6，规避了这一问题。随后由 R6 与 R3 设定直流增益。

放大器噪声是积分器放大器选型的考量因素。依据 TIDA-01063 中的公式计算，60Hz 下罗氏线圈的灵敏度为 $4\mu\text{V}/\text{A}$ 。约 8nV 的噪声可实现约 2% 的精度。罗氏线圈兼具高通滤波器的功能。频率越高，信号幅值越大。60kHz 下 1mA 的信号搭配 4nV 噪声，可实现 2% 的精度。同理，60MHz 下 $1\mu\text{A}$ 的信号也可实现 2% 的精度。TLV387 可满足这一低噪声要求。

积分器的截止频率选定为 1kHz (高于 60Hz)，以衰减负载信号，并为带通滤波器提供更陡峭的截止特性。

1kHz 下，开环增益可达 75dB。直流增益由 R6 与 R3 设定为 68.6dB (即 $2543\text{v}/\text{v}$)。这是该放大器在保留一定余量下可支持的最大增益。该电路的仿真相位裕度为 45.61° 。当积分器增益为 $2543\text{v}/\text{v}$ 、灵敏度为 $4\mu\text{V}/\text{A}$ 时，在 60Hz 频率条件下，其输出电压电流比与 60Hz 下的 $10\text{mV}/\text{A}$ 相等。

有源低通滤波器存在带宽限制。但无源 RC 滤波器可拓展带宽。无源滤波器的截止频率需与设计的有源低通滤波器的交叉频率一致⁽²⁾。在 68.6dB 增益下，交叉频率为 2MHz。选定 R3 与 C5 的截止频率为 2MHz，以拓展积分器带宽。

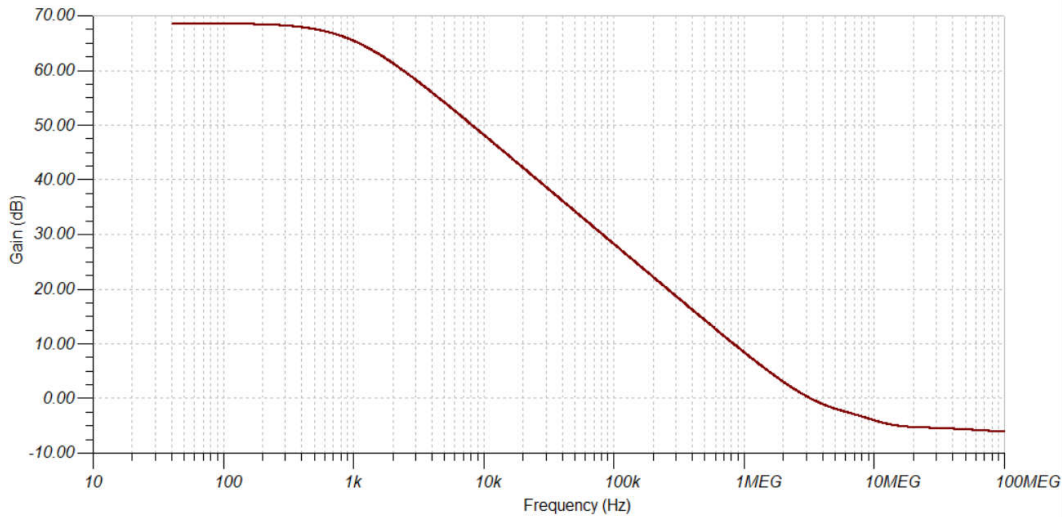


图 3-5. 无低通滤波器的积分器

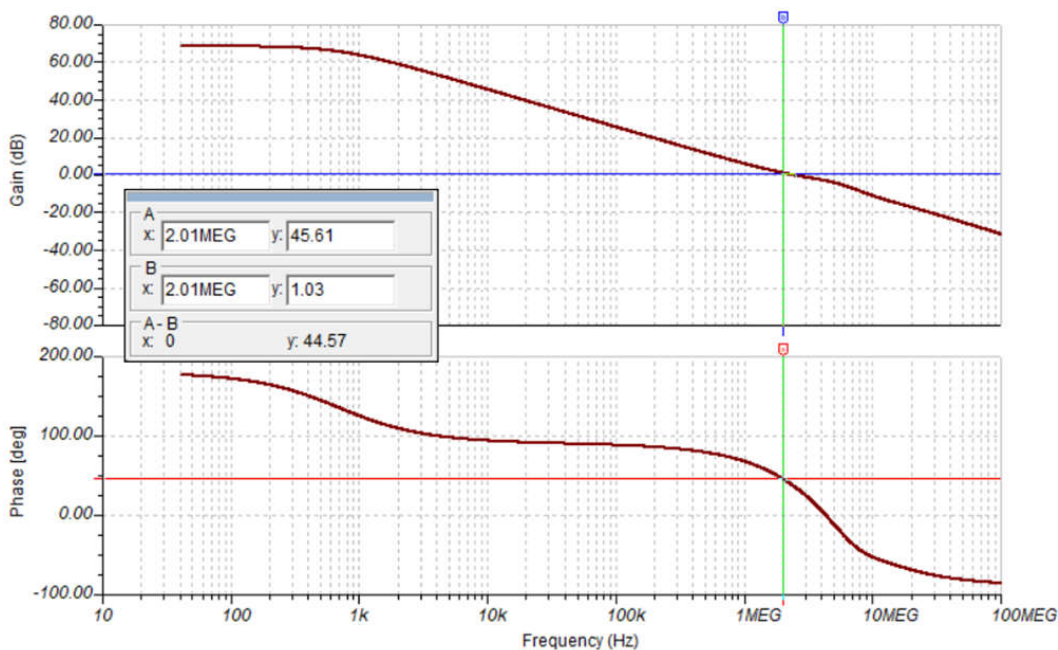


图 3-6. 添加低通滤波器后的混合积分器最终幅频与相频特性

在该增益下，输入失调电压也会被放大。在 0V 至 3.3V 的量程下，无信号余量时的最大失调电压为 1.29mV。TLV387 的最大输入失调电压为 10 μ V。这会产生 ± 25 mV 的直流失调，可通过带通级中的高通滤波器抵消。考虑到失调电压，放大器在全温范围内的调整后量程为 3.3V - 0.25V = 3.05V。该混合积分器在无削波情况下可检测的最大电流计算为：

$$(\text{adjustedrange})/(\text{gain} \times \text{sensitivity}) = 3.25\text{V}/(2543 \times 4\mu\text{V}/\text{A}) = 320\text{A} \quad (2)$$

本设计选择 TLV387，是因其具备低噪声与低输入失调的特性。这些特性可实现对 PCB 罗氏线圈小信号的大幅放大。单个放大器使混合积分器拓扑可适用于高带宽应用场景。无源 RC 低通滤波器可拓展放大器带宽。对于无需

高带宽的设计，采用两级“积分器 + 放大器”拓扑，搭配 OPAx323 或 TLV905x 即可满足需求。这种方案可避免输入失调电压导致的削波，但积分器带宽会受第二级放大器的限制。

表 3-1. 放大器比较

放大器	TLVx387	OPAx323	TLV905x
通道数量	1、2、4	1、2、4	1、2、4
噪声	9nV/√Hz	5.5nV/√Hz	20nV/√Hz
带宽	5.7MHz	20MHz	5.5MHz
静态电流	570 μA	1.6mA	330 μA
最大输入失调电压 (-40°C 至 120°C)	10 μV	1.35mV	2mV
典型输入失调电压	1 μV	150 μV	330 μV

3.3 带通滤波器

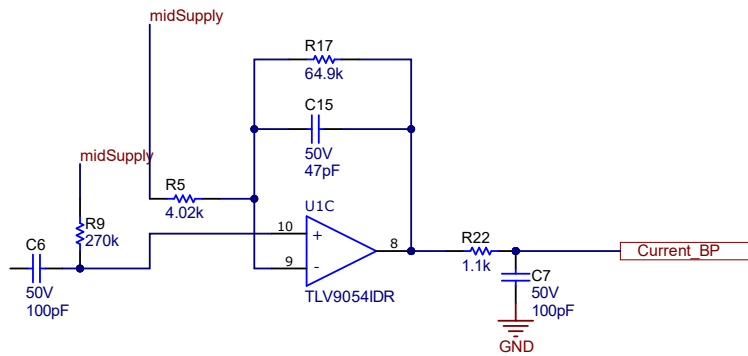


图 3-7. 带通滤波器原理图

该带通滤波器用作同相二阶带通滤波器。R9 和 C6 用于设置高通频率。R5 和 R17 用于设置增益。R17 和 C15 用于设置低通频率。负载产生的能量主要集中在 50Hz 至 5kHz 的范围内。滤除该频段信号可增加电弧信号的范围。此信号在 5kHz 及更高频段更易检测。根据数字信号处理限制，选定上限频率为 50kHz。这可降低混叠效应，并支持过采样。AI 电弧故障算法通常采用 FFT 进行特征提取。在 Arm M0+ 内核中，针对 50Hz~60Hz 交流电半周期的信号处理，按 2^n 步进规则设定采样点数时，可处理的最大采样点数为 1024。该采样点数对应的采样频率高于 100kHz。

如果计划对更高频率进行滤波或设计更高阶带通滤波器，可考虑选用 OPA4323。

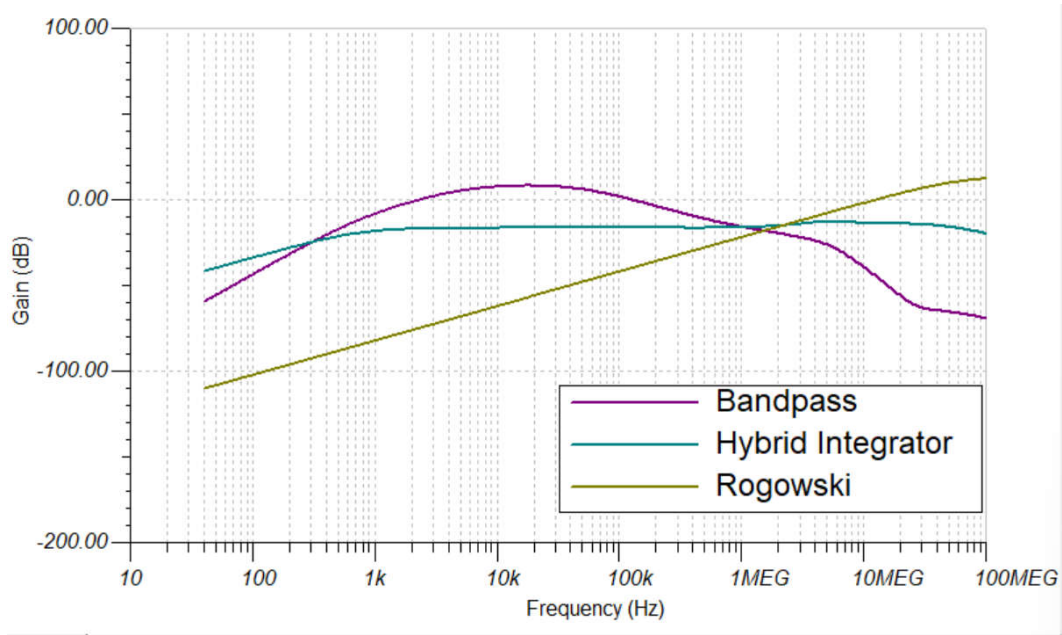


图 3-8. 罗氏线圈、积分器及带通滤波器联合 TINA 仿真

3.3.1 对数放大器

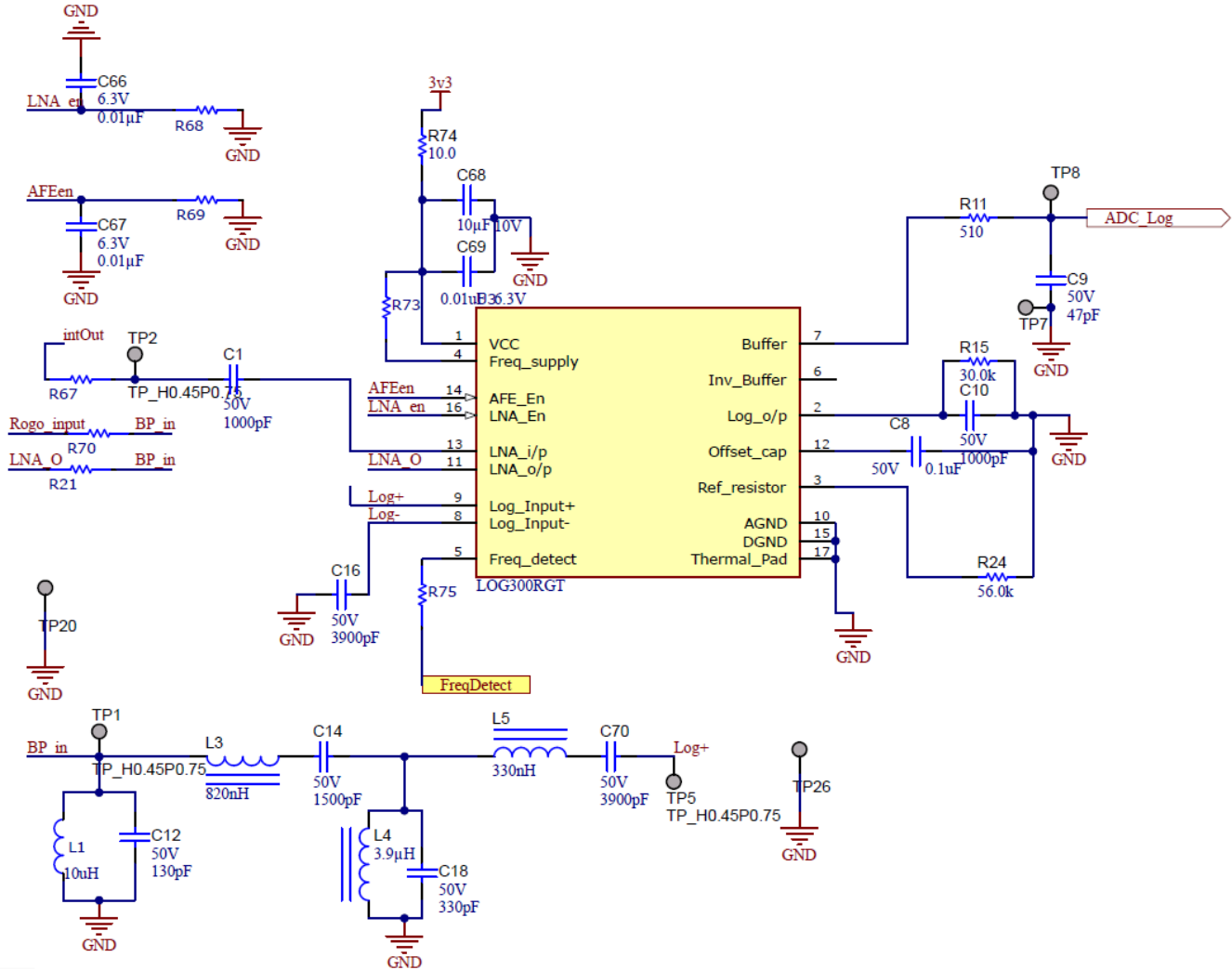


图 3-9. LOG300 原理图

LOG300 模拟前端在同一集成电路中内置了一个低噪声放大器 (LNA) 和对数检测器。积分器的输出接入 LOG300，以缓冲 PCB 罗氏线圈的信号。跳线 R70 将 PCB 罗氏线圈直接连接至 LNA。出于电源评估目的，R68 和 R69 可选择禁用 AFE。该带通滤波器用作四阶滤波器，带宽为 1MHz 至 10MHz。采用单个 LC 对 (C18 为 330pF、L4 为 681nH) 可构成 10MHz 的一阶带通滤波器。未使用的串联无源元件必须加装跳线，并联 LC 元件必须空贴不焊接。与四阶滤波器相比，一阶滤波器对数检测器电路输出中会出现更多来自负载的噪声。

R15 和 C10 可调整 LOG300 输出的幅值和趋稳时间。R15 的阻值越小，灵敏度越低。C10 的容值越大，输出越平滑。有关 LOG300 设置和评估的更多详细信息，请参阅数据表。选定的 R15 与 C10 构成低通滤波器，趋稳时间约为 0.183ms。与典型的负载噪声相比，本设计可提供充足的细节信息，以实现电弧边缘的精准检测。

3.3.2 电流低通滤波器

Replace with

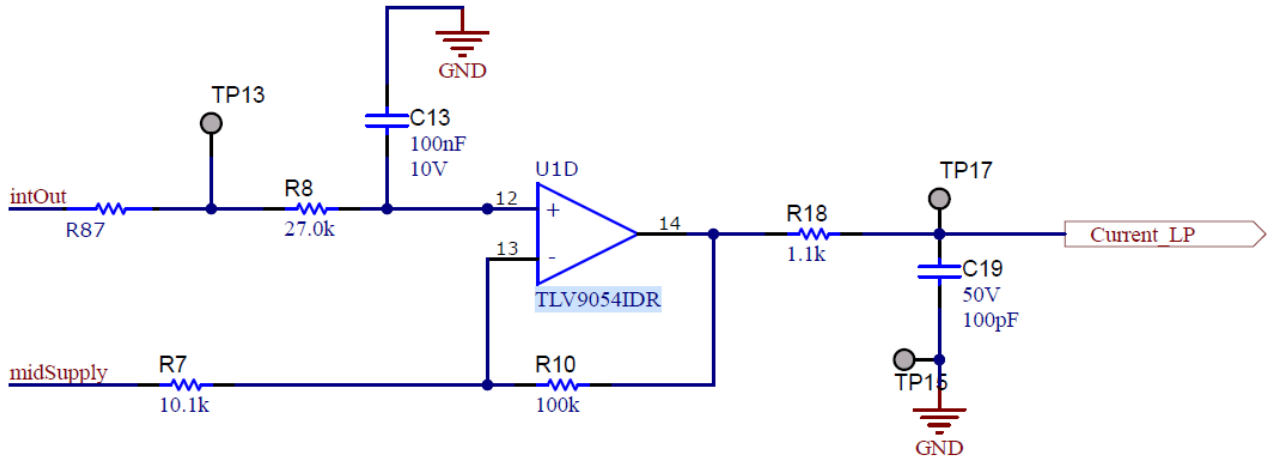


图 3-10. 低通滤波器原理图

该滤波器的截止频率为 59Hz。R22 与 C19 用于调整该频率。R18 与 R22 设定增益或衰减。该滤波器用于实现线路电流的测量。这使电弧故障算法可利用电流幅值调整电弧检测行为。该滤波器对 60Hz 至 1kHz 信号进行积分，与混合积分器配合使用时，可构成起始频率为 1kHz 的低通滤波器。该 60Hz 滤波器会使 60Hz 信号产生约 1.54ms 的延迟。由于高频信号的延迟不同，这会导致一定的失真。

3.3.3 非隔离式电压检测

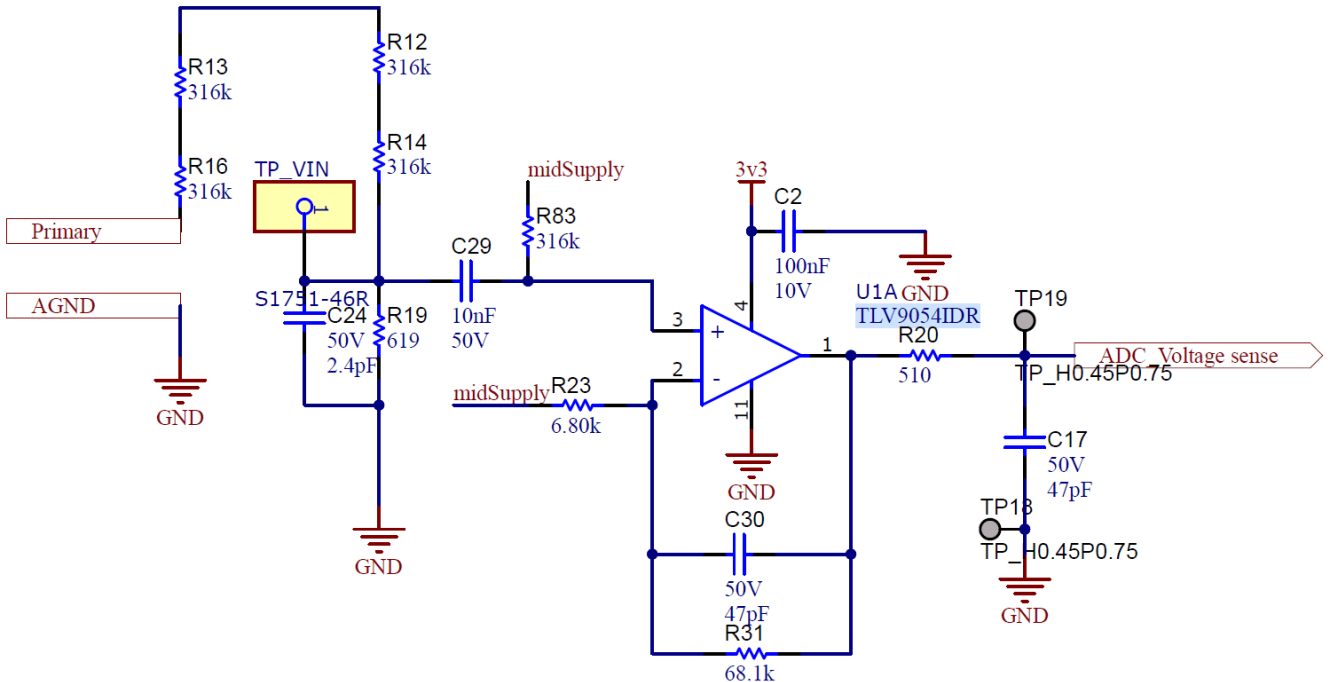


图 3-11. 电压检测原理图

电阻 R12、R13、R14、R16 及 R19 构成电阻分压器，实现电压降压。C24 和 C30 未贴装，但可贴装以提供一定的低通滤波。C29 和 R83 构成 50Hz 高通滤波器，可对信号进行容性耦合，并将信号电平钳位在电源中点参考电

位。这与电流低通输出配合，可实现简单的功率测量。对于电弧检测应用，宜选用更高的截止频率，因为电网可抑制大部分低频波动。

3.3.4 自动标记电路

电弧标记电路由两个隔离式放大器和一个隔离式比较器组成。电弧标记电路用于在受控的实验室环境中收集并标记电弧特征。与现场应用不同，实验室环境可同时获取交流线路电压与电弧间隙电压，本设计正是基于这一条件实现。图 4-2 展示了实验室中的典型电弧测试设置。电弧发生器可在不同工作条件下生成可重现的电弧。电弧发生器两端测得的电弧间隙电压与线路电压的关联特性，可作为电弧相关的指标。此信息随后会标记由标准电弧检测信号链采样的数据。然后，使用标记过的数据来训练嵌入式 AI 模型。该电路板部分需搭配兼容的 TI LaunchPad 开发套件使用，并由 LaunchPad 的 3.3V 输出供电。MSPM0 SDK 包含一个软件示例，用于将数据从 LaunchPad 传输至连接的计算机。

3.3.4.1 线路电压检测

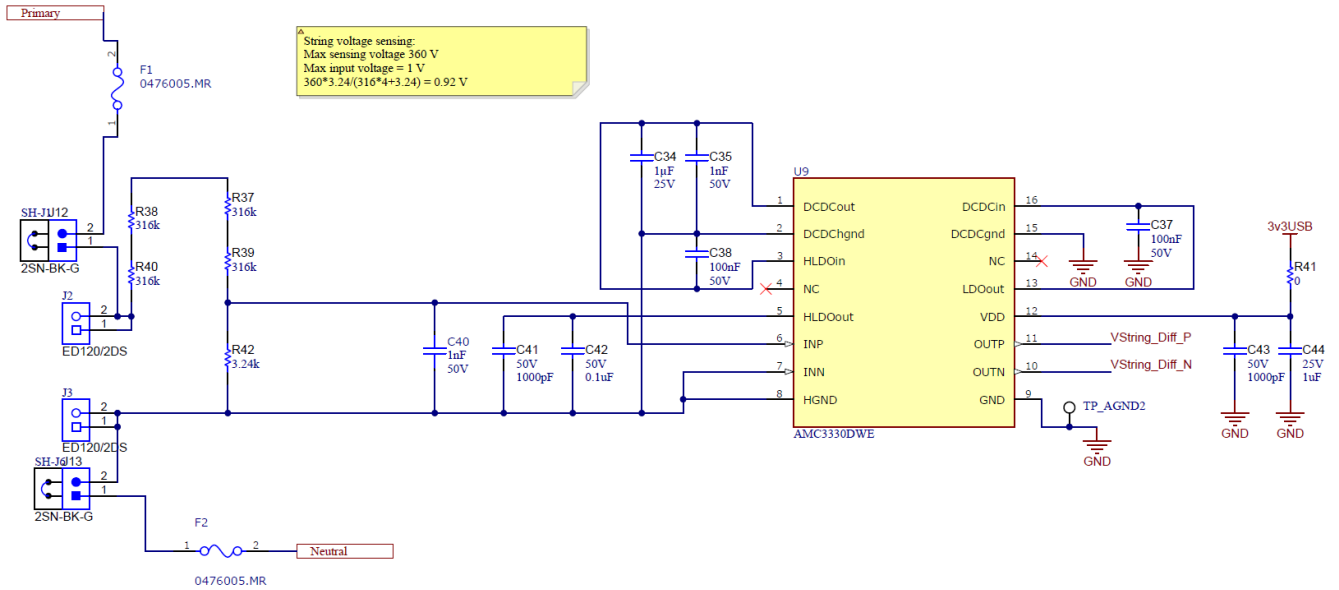


图 3-12. 隔离式线路电压检测原理图

图 3-12 展示了线电压检测电路。本电路由与 AMC3330（一款固定增益为 2.0V/V 的增强型隔离放大器）相连接的电阻分压器构成。AMC3330 的差分输出连接至 3.1.7.3 节所述的电路。这种差分至单端转换会引入 1.65V/V 的增益。转换后的输出随后连接至 MCU 的内部 ADC。

方程式 3 描述了 J2 和 J3 之间的输入电压与差分至单端转换的输出电压之间的关系：

$$V_{out} = V_{in} \times 3240\Omega / (4 \times 316000\Omega + 3240\Omega) \cong V_{in} \times 0.00256 \quad (3)$$

3.3.4.2 电弧间隙电压检测

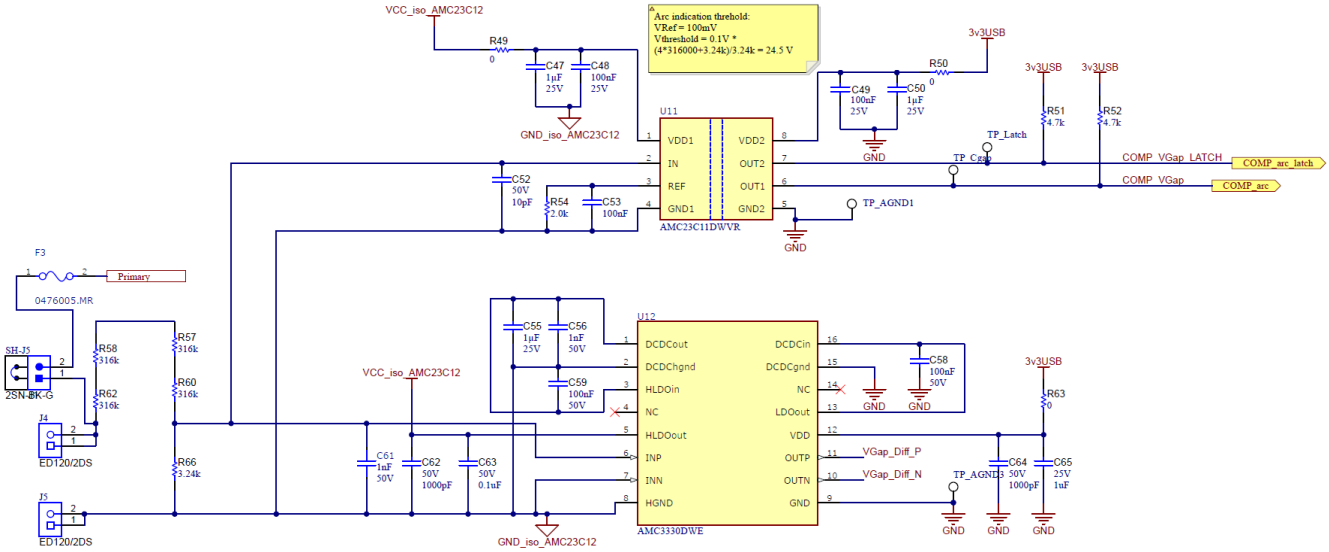


图 3-13. 电弧间隙电压检测

电弧间隙电压的检测电路与线路电压检测电路相同。此外，隔离比较器 AMC23C11 可指示电弧间隙电压何时超过阈值。此阈值根据 R54 设定。在 AMC23C11 的 REF 引脚中实现了一个 100µA 电流源，以产生阈值电压。选定 R54 的阻值为 1000Ω，使 REF 引脚的电压为 200mV。这相当于输入电压为 24.5V。现有电路原理图按 120VAC 电压规格配置。对于 240VAC，需要使用较低的负载电阻器 R86 (约 1.62kΩ) 和阈值电阻 R54 (约 500Ω)，以实现等效工作。

3.3.4.3 差分至单端转换

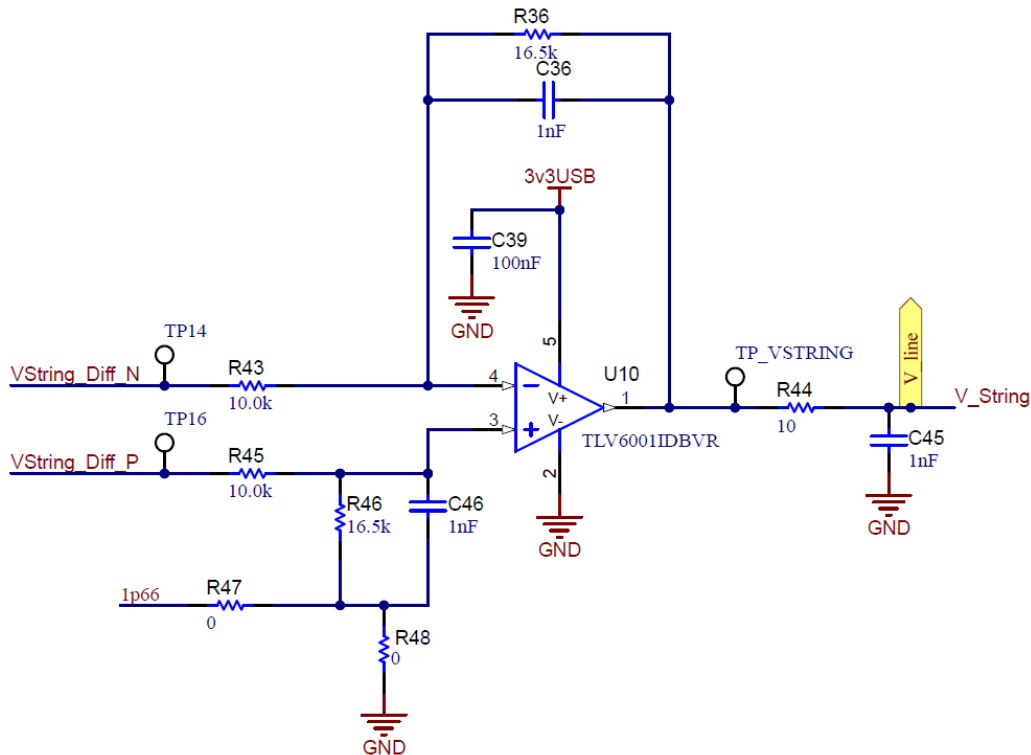


图 3-14. 差分至单端原理图

用于两条电压检测路径的 AMC3330 具有差分信号输出。为了将该信号连接到 LaunchPad MCU 的单端 ADC，使用 TLV6001 实现了一个转换级。另请参阅 [将差分输出 \(隔离式\) 放大器连接到单端输入 ADC](#) 应用简报。由于电路为双向运行，因此 R65 未贴装。此转换级的增益由 R55 与 R53 以及 R59 与 R61 之间的关系决定。由于 AMC3330 的最大输出为 2V，ADC 的最大输入为 3.3V，因此使用了 1.65 的增益。

3.3.5 电源

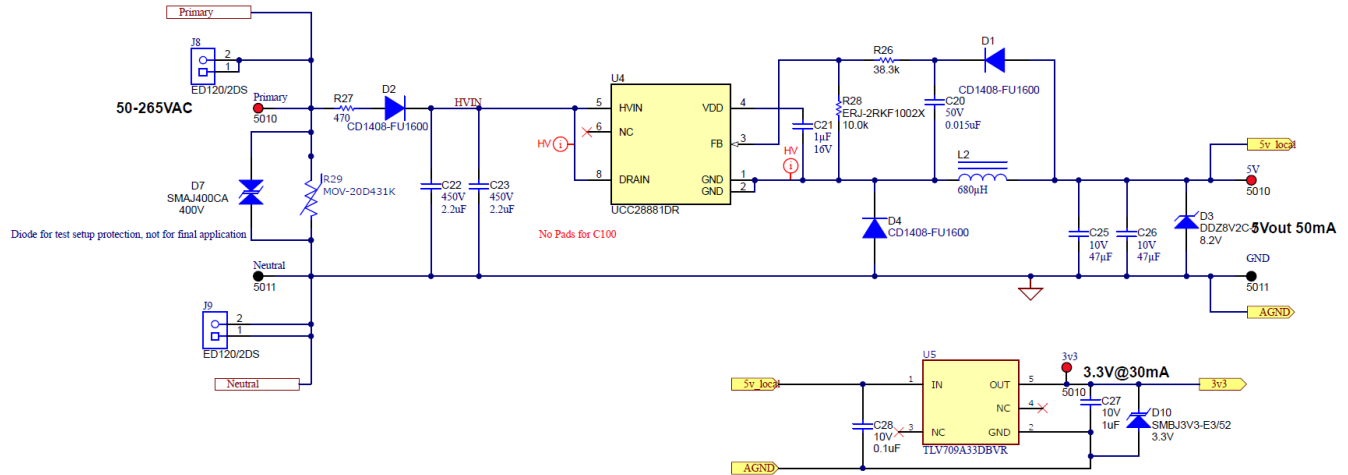


图 3-15. 电源原理图

该辅助电源的输入为 110V 至 250VAC，可提供稳定的 3.3V 电源轨。UCC28881 离线开关稳压器用于降压。无负载时，5V 电源轨的电压会超过 5V，由 D3 将其限制在 8.2V。MOV R29 与二极管 D7 用于提供过压保护。该电源用于测试板卡的模拟部分，但属于可选配置。3V3 电源轨不为板卡的自动标记部分供电，因为数据传输由 LaunchPad 连接处理。如果 110V 至 250VAC 输入无电，LaunchPad 的 5V 电源轨会为 LDO U5 提供输入供电。

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. 连接器和罗氏线圈的最大导线规格为 12AWG
2. 高压安全箱（测试前请参阅[警告](#)）
3. 电弧发生器测试装置
4. 示波器
5. 信号发生器
6. 用于数据采集的个人计算机
7. 兼容的 LaunchPad (MSPM0G5187-LP)
 - a. LaunchPad 用 USB 电缆 (USB Type-C®)
 - b. USB 转 USB 隔离电缆
8. AC 电源
9. 额定功率 1500W、阻值 $12\ \Omega$ 的功率电阻器
10. AC 负载

4.2 软件

详见 MSPM0SDK 和 EDGE AI Studio 链接。

4.3 测试设置

上电前需确认所有连接部件均已拧紧，且 LaunchPad 开发板的接地引脚与电源引脚连接符合参考设计要求。在高压测试之前，需首先完成模拟信号链路的功能验证。

1. 按照节 2.1 和图 2-2 的连接方式，将 LaunchPad 开发板连接至电路板下方的接口：

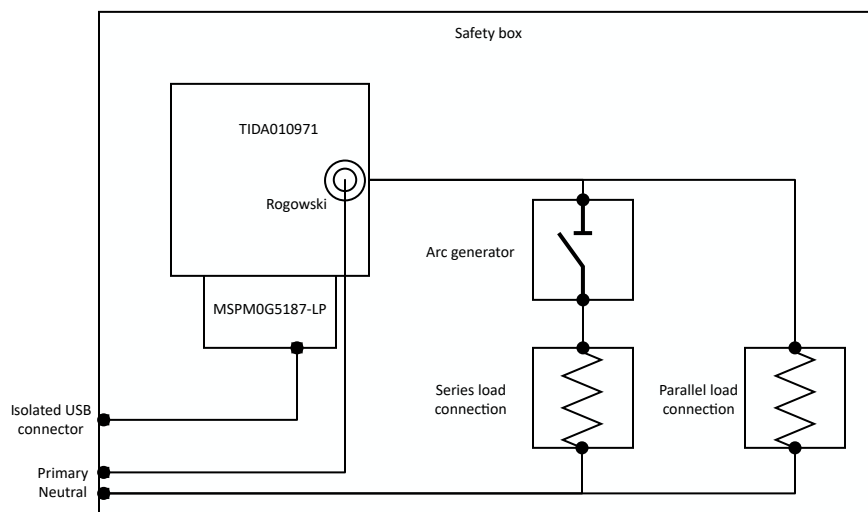


图 4-1. 测试设置图

2. 将一根 12AWG 绝缘导线穿过罗氏线圈，并将其连接至交流电源；在并联负载接口处连接一个阻值 $12\ \Omega$ 、额定功率不低于 50W 的功率电阻器。
3. 将 USB 线缆一端连接至 USB 电源，另一端连接至 LaunchPad。上电后，检查 LED D6 是否亮起蓝色。
4. 测试引脚标记为 *Current-LPF* 和 *LOG*。测试需遵循低压优先原则，首先接入 12VAC、1A、60Hz 负载进行测试。在示波器端，将低通滤波器和带通滤波器的输入设置为交流耦合模式。
 - a. 验证 *Current LPF* 输出的峰峰值为 134mV
 - b. 验证 *Integrator* 输出的峰峰值为 15mV

- c. 验证 LOG：输出为 900mV — 该值会随环境噪声变化产生波动。

4.3.1 电弧测试装置

电弧测试请遵循图 4-1 中的连接方式。

电弧测试用的其他设备：

- 符合 UL1699 标准的电弧发生器
- 12AWG 导线
- 额定功率的电阻负载
- Nema 5-15p 插头

数据采集或电弧检测软件及用户指南均可在 MSPM0 SDK 中获取。

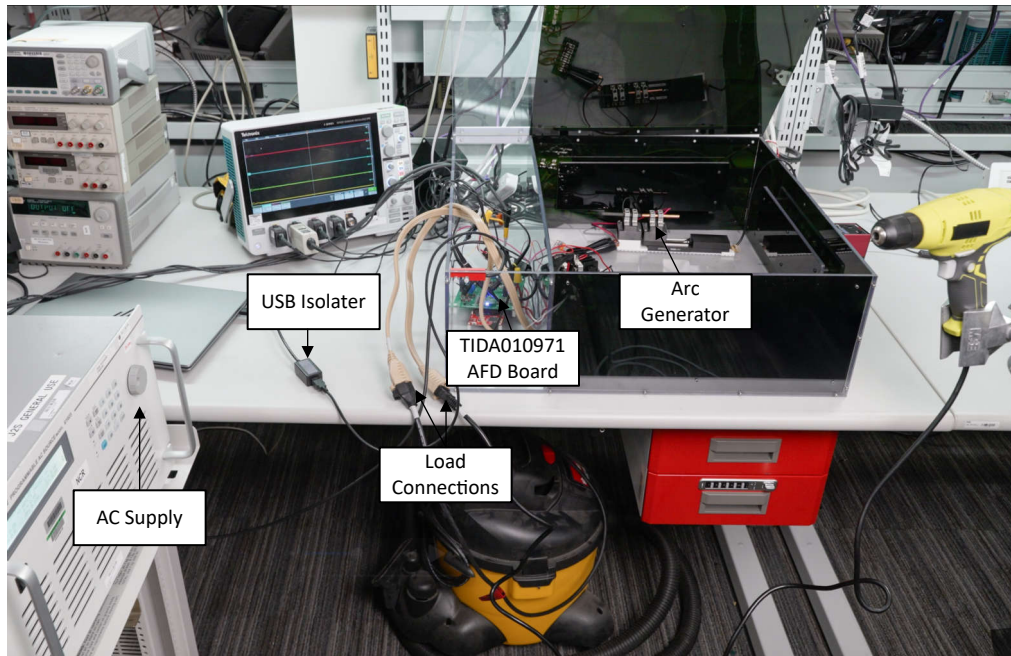


图 4-2. 电弧发生器测试装置

4.4 测试结果

图 4-3 展示了第 3.1.3 节中带通滤波器的传递函数。信号发生器输出的交流信号注入 C6 的输入端，该输入端与积分器输出走线相互隔离。在 R22 的输出端，使用示波器高带宽无源探针对带通滤波器输出信号进行测量。

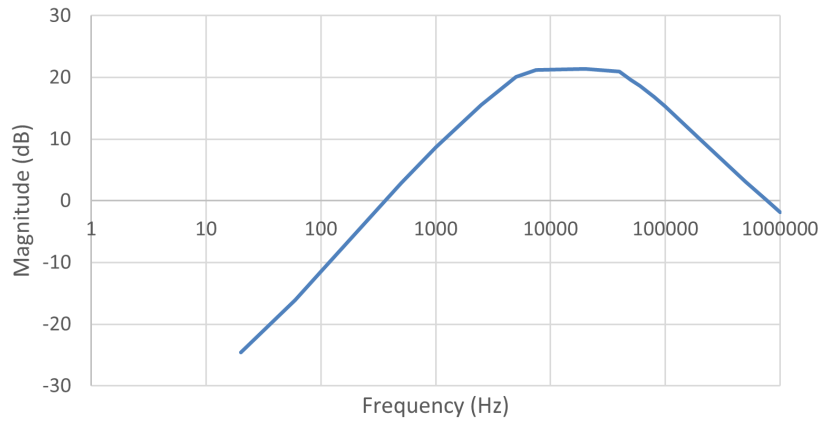


图 4-3. 电流带通滤波器幅频特性图

图 4-4 展示了带通输出噪声。该噪声低于 12 位 3.3V ADC 的分辨率。

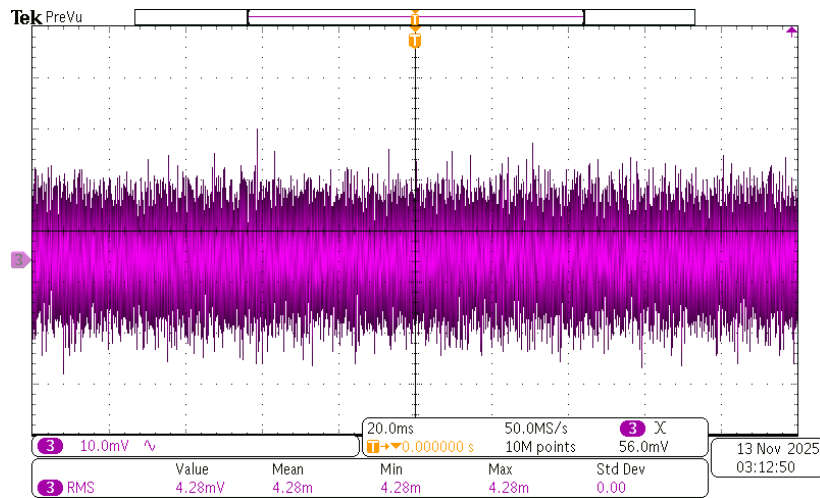


图 4-4. 带通滤波器的输出噪声

图 4-5 展示了 9.74A 阻性负载条件下低通滤波器的输出特性。RMS 电压对应公式为方程式 4。

$$472\text{mV}/9.74\text{A} = 180\text{mV}/\text{A}$$

(4)

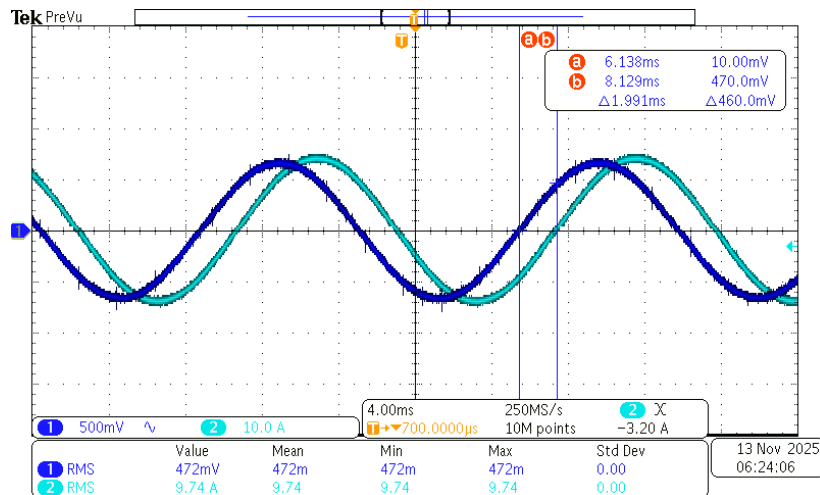


图 4-5. 阻性负载下低通滤波器的输出

图 4-6 和图 4-7 展示了两种不同负载下，正常状态与电弧状态的 LOG300 输出。上述曲线表明，电弧信号频率可覆盖 1MHz 至 10MHz 频段，且负载噪声得到显著抑制。图 4-6 和图 4-7 的上半部分为 LOG300 输出曲线，下半部分为示波器电流探针的测量曲线。

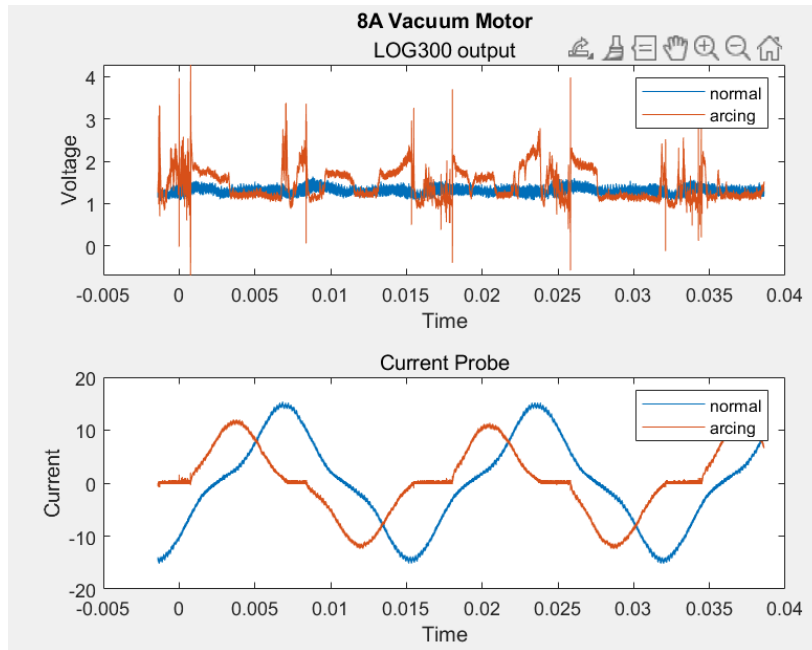


图 4-6. 真空电机负载 — 上半部分：LOG300 下半部分：电流探针

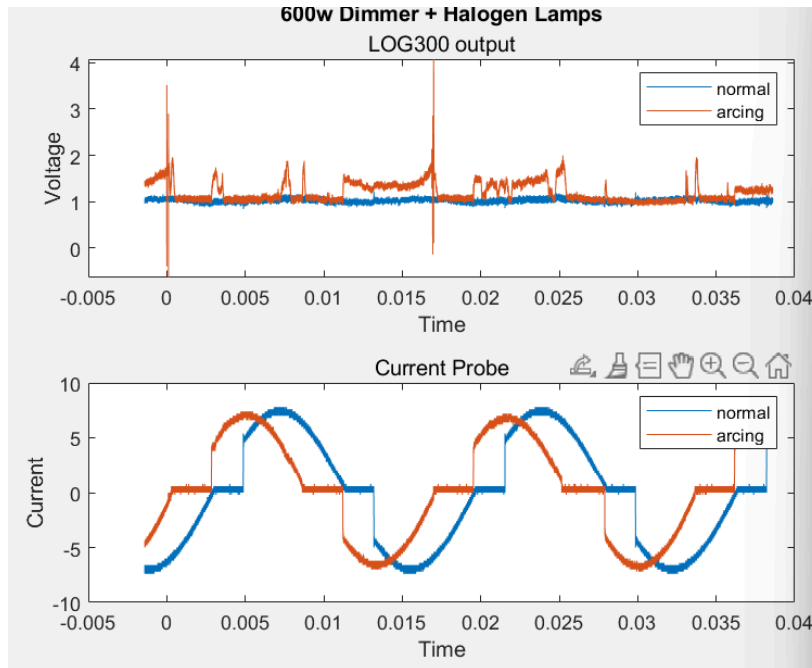


图 4-7. 600W 可调光钨丝灯负载 — 上半部分：LOG300 下半部分：电流探针

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

要下载设计文件，请参阅 [TIDA-010971](#) 中的设计文件。

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010971](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010971](#) 中的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

LP-MSPM0G5187	MSPM0G5187 LaunchPad™ 开发套件评估模块
CCSTUDIO	Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE)

软件

MSPM0-SDK	MSPM0 软件开发套件 (SDK)
TI 资源浏览器软件	TI 资源浏览器中的 TI 资源浏览器软件包
EDGE-AI-STUDIO	适用于边缘 AI 的软件开发工具

5.3 文档支持

1. Fritz, J. N.、Neeb, C.和 De Doncker, R. W. (2015 年 1 月) 。 [A PCB Integrated Differential Rogowski Coil for Non-Intrusive Current Measurement Featuring High Bandwidth and dv/dt Immunity](#). ResearchGate。资料来源：<https://www.researchgate.net/publication/302567997>
2. Xue, Y.、Lu, J.、Wang, Z.、Tolbert, L.M.、Blalock, B. J.、Wang, F. (2014) [A compact planar Rogowski coil current sensor for active current balancing of parallel-connected Silicon Carbide MOSFETs](#)。2014 年 IEEE 能量转换大会暨展览会 (ECCE)。IEEE, 2014.资料来源：<https://ieeexplore.ieee.org/document/6954042>
3. 德州仪器 (TI) , [TLVx387 高精度、零漂移、低输入偏置电流运算放大器 数据表](#)
4. 德州仪器 (TI) , [TLVx387 高精度、零漂移、低输入偏置电流运算放大器](#)
5. 德州仪器 (TI) , [AMC3330 具有集成式直流/直流转换器的 ±1V 输入、增强型隔离式精密放大器 数据表](#)
6. 德州仪器 (TI) , [AMC23C11 具有可调阈值和锁存功能的快速响应增强型隔离式比较器 数据表](#)
7. 德州仪器 (TI) , [MSPM0G5187-LP 用户指南](#)

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

LaunchPad™, TI E2E™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

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

USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

NATHAN NOHR 是德州仪器 (TI) 达拉斯分公司的能源基础设施系统工程师。**Nathan** 专注于故障检测与智能断路器。毕业于密歇根大学，获电子与计算机工程硕士学位。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月