

Design Guide: TIDA-010955

在太阳能应用中用于机器学习电弧检测的模拟前端参考设计



说明

此参考设计有一个模拟前端用于太阳能应用中基于人工智能 (AI) 的直流电弧检测。串电流经过测量和滤波后馈送到在 C2000™ F28P55x 器件的 controlCARD TMDSCNCD28P55X 上运行的 AI 电弧检测算法中，用于检测直流串联电弧。与传统算法相比，基于 AI 的电弧检测具有更高的精度和稳健性。TI 提供了完整的工具链，用于收集电弧数据、训练嵌入式 AI 模型以及验证系统。此参考设计可通过器件型号 TIEVM-ARC-AFE 订购。

资源

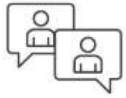
| | |
|---|-------|
| TIEVM-ARC-AFE | 工具文件夹 |
| TIDA-010955 | 设计文件夹 |
| TMS320F28P550SJ 、 TMDSCNCD28P55X | 工具文件夹 |
| AMC3330 、 AMC23C11 | 产品文件夹 |
| OPA4323 、 TPS562203 、 TPS7A20 | 产品文件夹 |

特性

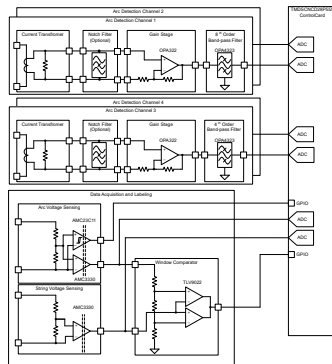
- 作为 4 通道模拟前端，用于基于 AI 的电弧检测
- 作为可配置模拟前端，具有带通和陷波滤波器
- 串电压和电弧间隙电压测量输入用于采集训练数据
- 自动标记电路可生成标记过的电弧数据
- 与 C2000™ F28P55x 器件的 controlCARD TMDSCNCD28P55X 以及 180 引脚连接器中的其他 C2000 controlCARD 配合使用
- 精选了一些嵌入式 AI 模型以快速开始基于 AI 的电弧检测

应用

- 太阳能电弧保护
- 串式逆变器
- 中央逆变器



请咨询 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

随着太阳能装置数量的增加，安全问题变得越来越重要。必须检测高压线路上的电弧，并且必须将太阳能串断电，以防止发生触电或火灾等危险。因此，UL 1699B 等标准要求所有额定电压低于 1500V 的太阳能系统都要有电弧故障保护电路。此参考设计旨在展示用于此类电弧检测目的的模拟前端实现方案。设计本身不满足 UL 1699B 标准。

直流电弧会在 PV 串的布线中产生交流噪声电流，该电流存在于宽达数 MHz 的频谱范围中。太阳能直流电弧检测面临的挑战是如何以可靠的方式检测 PV 电缆内的这种噪声增加情况，同时不会导致误报和关断。为了实现此功能，需要一个低噪声、高性能的模拟前端，因为电弧注入的交流噪声可能在几毫安的范围内，此噪声叠加在直流串电流之上，在住宅应用中该电流为 20A 级别，而在商业太阳能应用中该电流甚至更高。此外，太阳能系统中还有多个不能错误地解释为电弧的其他噪声源。其他的这些噪声源的示例包括逆变器的开关频率或 PV 电缆上的电力线通信。以前会使用算法来识别测得的电流中的电弧特征。为了实现可靠的电弧检测，通常需要针对每个系统对这些算法进行微调，因为电弧特征高度依赖于具体系统。

最近的一种方法是使用嵌入式人工智能 (AI) 模型来识别电弧。经过正确训练后，这种基于 AI 的方法可以实现更高的精度，具有更强的防误报能力。

要训练这些人工智能模型，必须采集训练数据。为此，此参考设计实施了电弧标记电路。此设计利用电弧上存在可测量的压降这一事实，将电流数据标记为电弧或正常工作条件。最所以能够实现这一目标，是因为在实验室环境中可以获取此电弧电压。

1.1 主要系统规格

表 1-1 展示了此参考设计的主要规格。

表 1-1. 主要系统规格

| 参数 | 规格 | 注释 |
|-------------------|-------------|---|
| 电弧检测通道数量 | 4 | — |
| 最大串电流 | 16A (板载 CT) | 如果需要更高的直流电流，可以通过连接器 J1、J2、J3 或 J4 连接一个外部电流传感器 |
| 模数转换 (ADC) 分辨率 | 12 位 | 内部 C2000 ADC。其他 C2000 支持分辨率更高的 ADC |
| 辅助电源 | 8V 至 16V | J7，建议使用实验室工作台电源 |
| 标记通道数量 | 1 | 用于采集训练数据的自动标记通道 |
| 串电压和间隙电压测量的最大输入电压 | 1500 | 用于生成和标记电弧训练数据的电压测量 |



小心

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。



警告

高压！ 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，该参考设计仅在 **实验室环境中运行**，**不可作为成品** 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 展示了 TIDA-010955 的简要方框图。

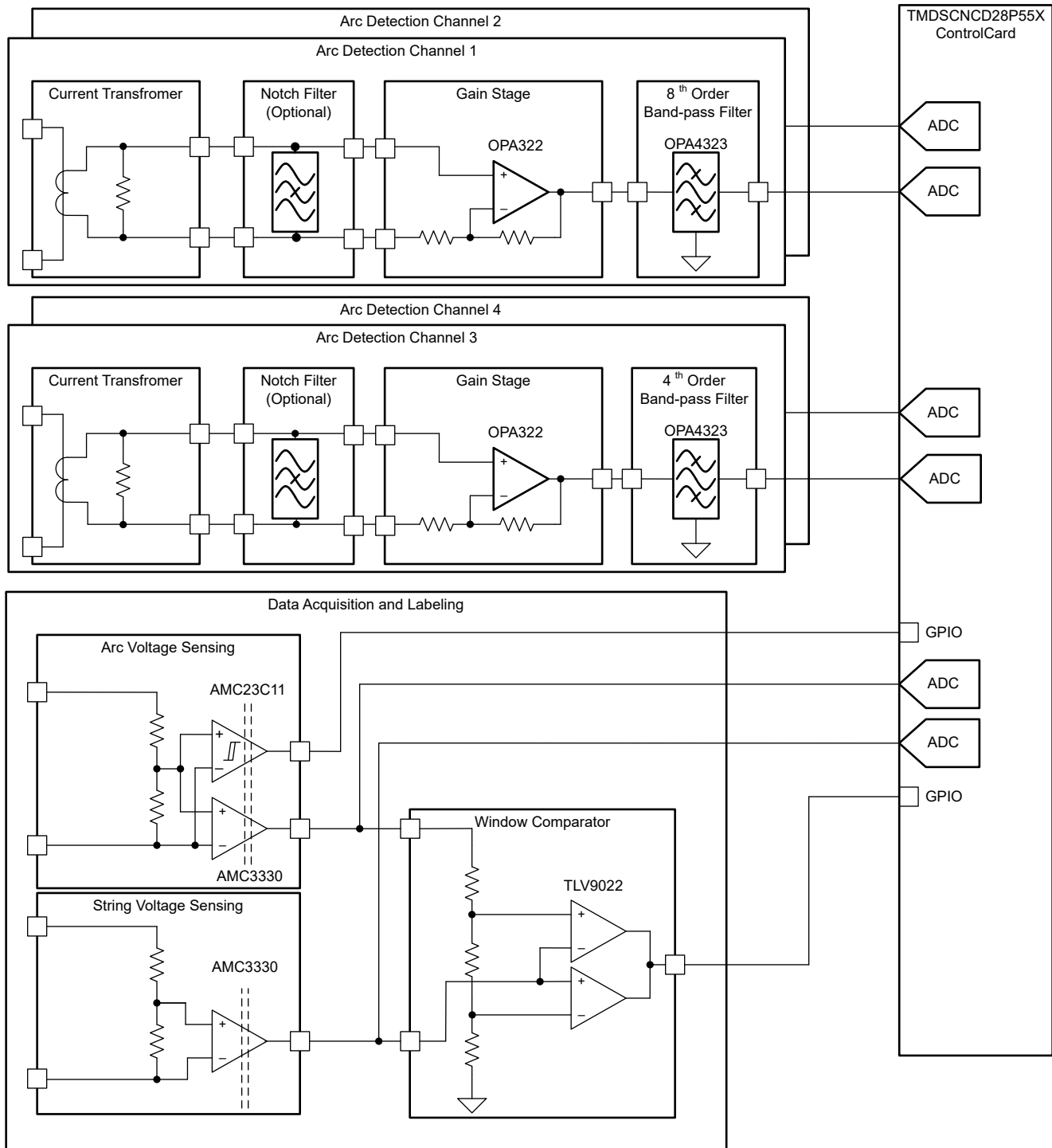


图 2-1. TIDA-010955 方框图

2.1.1 子系统

此设计包含两个主要子系统：

- 用于电弧检测的四个独立模拟前端通道
- 电弧标记电路，可用于从 AI 模型训练中获取标记过的训练数据

2.1.1.1 电弧检测通道

此参考设计中使用的电弧检测通道的信号链由四个主要块组成：

- 隔离式电流测量
- 带通滤波器
- 模数转换
- 采用嵌入式 AI 模型的电弧检测

2.1.1.1.1 隔离式电流测量

对于隔离式电流测量，每个通道有两个输入选项。

1. 板载电流互感器 (CT)
2. 用于外部电流传感器的连接器 (J1、J2、J3 或 J4)

使用电流互感器有两个优点。第一，电流互感器提供了与较高的直流链路电压的必要隔离；第二，电流互感器除了与电弧检测无关的电流的直流分量。重要的一点是要考虑 CT 在高直流电流下的饱和行为。所选互感器在高达 16A 的直流条件下具有良好的性能。为了使负载电阻器上的压降与滤波器级和 ADC 的电压电平相匹配，实施了增益为 10 的第一个增益级，这还引入了信号偏置，以便将 CT 输出转换为单极信号。

使用外部电流传感器时，设计人员必须注意要考虑隔离。信号必须与所有高压电位隔离，因为电路板上信号链的其余部分未隔离。此外，外部电流传感器支持的最大输入电压为 3.3V，但可能需要调整第一个增益级的增益以避免信号链饱和。默认情况下，增益级采用的增益为 10，增益级后信号链支持的最大电压为 3.3V。因此，如果外部电流传感器的最大输入电压高于 300mV，则必须修改增益级。

2.1.1.1.2 带通滤波器

此设计采用带通滤波器来限制所采集的信号频谱。由于光伏逆变器系统的环境可能有较多噪声，因此选择了 4 阶低通滤波器和 4 阶高通滤波器。选择了分离式结构，便于调整频率范围的上下边界。在设计此滤波器时，采用能够滤除开关频率以及其他噪声源的方式。此设计选择了 30kHz 至 100kHz 的频带，但可以针对每个应用专门调整频带。

2.1.1.1.3 模数转换

此设计使用 C2000 MCU 的内部 12 位 ADC。从多达 4 个电弧检测通道收集数据。此设计使用 250kHz 的采样频率来满足高达 100kHz 的所选频带的采样定理。

2.1.1.1.4 采用嵌入式 AI 模型的电弧检测

采集的数据被送入预处理块，然后由嵌入式 AI 模型处理。有关使用 AI 模型检测电弧过程的更多详细信息，请参阅软件下载文件夹中的软件用户指南。

2.1.1.2 电弧标记电路

标记电路不是电弧检测系统的一部分。该电路是一个附加子系统，用于在 AI 模型训练和验证阶段获取数据。标记电路不是实际终端应用电路的一部分。

该电路可用于在实验室环境中标记数据。该电路利用了以下事实：在产生电弧期间，电弧存在压降。在采用分立式电弧发生器的实验室环境中，可以获取这一电压，并可以将其用于指示是否正在发生电弧。为了收集 AI 模型的训练数据，需要在实验室环境中生成电弧，并对电弧电流和标记电路进行采样。在这些过程中将采集包含一系列电流样本和信息的数据集，并会在该序列中启动电弧。简而言之，收集的信息包括电弧期间的电流情况以及在正常运行期间的电流情况。

节 3.2 提供了有关设置的更多详细信息。

这些标记过的数据可用于训练 AI 模型。在此数据采集和模型训练过程中可以使用提供的相关工具和软件。链接位于 [TIDA-010955](#) 工具文件夹中。

该电路包含以下块：

- 隔离式串电压测量
- 采用隔离式比较器的隔离式电弧间隙电压测量
- 用于高级标记的窗口比较器

2.1.1.2.1 隔离式串电压测量

串电压由隔离式放大器进行测量。隔离式放大器的输出用于具有窗口比较器的高级标记电路。

2.1.1.2.2 采用隔离式比较器的隔离式电弧电压测量

可以通过两种方式监测电弧电压。第一种是使用隔离式放大器，第二种是使用隔离式比较器。如果电弧间隙电压上升到高于比较器阈值，比较器会指示电弧开始。隔离式放大器的输出用于具有窗口比较器的高级标记电路。

2.1.1.2.3 用于高级标记的窗口比较器

如果在电弧测试过程中电弧间隙增加太多，则电弧将消失，并会对电弧间隙施加全部串电压。这意味着电压仍高于隔离式比较器的阈值，但不再存在电弧。窗口比较器电路还可用于捕获这些情况，从而设置电弧启动时的下限阈值和电弧停止时的上限阈值。

2.2 设计注意事项

本章介绍主要设计注意事项。

2.2.1 电流传感器和输入级

此参考设计中使用串电流来检测电弧故障。通常，仅分析交流内容，这样便可以使用交流耦合电流传感器，如电流互感器。图 2-2 展示了此参考设计中的输入电路的原理图。有两个输入选项：可以使用板载 CT，也可以将外部传感器连接到 J1（通道 2、3 或 4 的 J2、J3 或 J4）。要选择板载 CT，请在连接器 J8 上的引脚 1 和 2 之间放置一根跳线。要选择外部传感器输入，请在 J8 上的引脚 2 和 3 之间放置一根跳线。

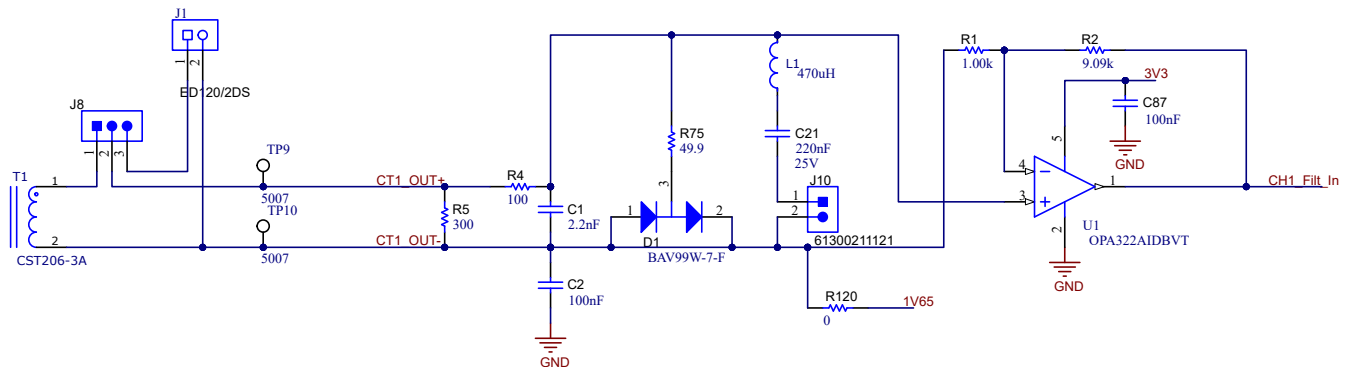


图 2-2. 原理图 - 电流检测电路

此设计选择了 CST206-3A 作为板载 CT，这是因为这款器件具有较高的饱和限值，允许在不切断 PV 电缆的情况下通过该电缆进行馈电。请参阅图 3-2 以了解饱和和测试。CT 的输出端连接到 300 Ω 负载电阻器 R5，因此可实现 1V/A 的灵敏度。该信号首先连接到 RC 滤波器 R4 和 C1。R75 和 D1 实现了增益级过压保护。L1 和 C21 提供了陷波滤波器的空间。该陷波滤波器可用于滤除逆变器开关频率以防止增益级饱和。U1 实现简单的增益级。由于典型电弧特征的振幅高达 100mA 或 200mA，因此选择的增益为 10。这些设置使得 R1 上出现 100mV 至 200mV 的压降。放大后的信号连接到滤波器级。

对于其他输入电压，或者如果使用了具有不同灵敏度的外部电流传感器，可以通过更改 R1 和 R2 来调整增益。

2.2.2 模拟带通滤波器

图 2-3 展示了包含 4 通道运算放大器 OPA4323 的滤波器级。U5A 和 U5B 构成一个截止频率为 100kHz 的低通滤波器。U5C 和 U5D 构成一个截止频率为 30kHz 的高通滤波器。它们结合起来构成一个通带为 30kHz 至 100kHz

的带通滤波器。选择了低通加高通滤波器的分离拓扑结构，便于单独调整带通滤波器的高低电平。U5D 还通过调整 R153 和 R154 来实现额外的增益。这可用于在滤波后引入进一步的增益。

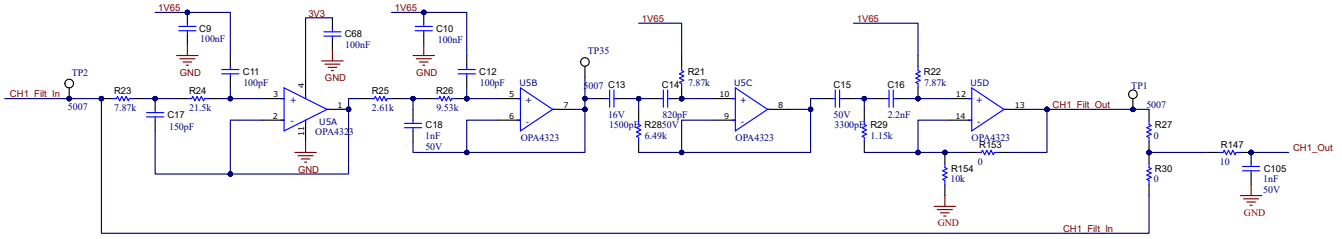


图 2-3. 原理图 - 8 阶模拟带通滤波器

在有源滤波器应用中，放大器最重要的两个规格是增益带宽积 (GBW) 和压摆率 (SR)。方程式 1 和方程式 2 中展示了 GBW 和 SR 的最低要求。

$$GBW_{\min} = 100 \times G \times f_c \quad (1)$$

$$SR_{\min} = 2 \times \pi \times f_c \times V_{P-P} \quad (2)$$

其中

- G = 闭环增益
- f_c = 低通滤波器的截止频率
- V_{P-P} = 峰峰值输出电压

当 $G = 1$ 、 $f_c = 100\text{kHz}$ 且 $V_{P-P} = 5\text{V}$ 时，计算出的最小 GBW 为 10MHz ，最小压摆率为 $3.14\text{V}/\mu\text{s}$ 。OPA4323 的 GBW 为 20MHz ，压摆率为 $10\text{V}/\mu\text{s}$ ，不仅满足以上标准，还留有一些余量，可满足更高的频带需求。传递函数在测试结果 LINK 中经过验证。滤波器级的输出连接到 C2000 MCU 的内部 ADC。组装 R30 并移除 R27 可实现模拟滤波器级的旁路。

对于通道 3 和通道 4，只会实现 2 阶低通和 2 阶高通，如图 2-4 所示。

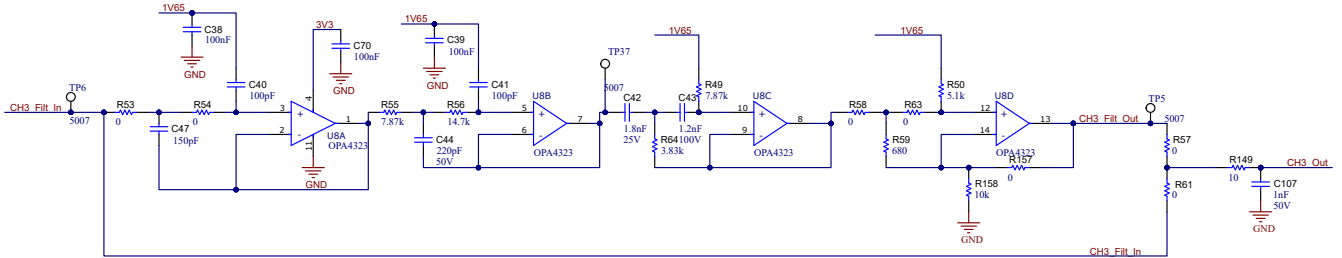


图 2-4. 原理图 - 4 阶模拟带通滤波器

因此，U8A 和 U8D 只是实现了一个电压跟随器，不是必需的。这样做是为了实现通道 3 和 4 上 4 阶带通与通道 1 和 2 上 8 阶带通比较。如果需要 4 个类似的通道，则可以调整电阻器和电容器。

2.2.3 电弧标记电路

电弧标记电路由两个隔离式放大器、一个隔离式比较器和一个模拟实现的窗口比较器组成。电弧标记电路的设计目的是在受控的实验室环境中收集并自动标记电弧特征。该设计的前提是在实验室环境中存在可用的串电压和电弧间隙电压，但在现场并非如此。图 2-5 展示了实验室中的典型电弧测试设置。电弧发生器用于在不同工作条件下生成可重现的电弧。电弧间隙电压（可以在电弧发生器上测量）与串电压之间的关系用作电弧的指标。此信息随后用于标记由标准电弧检测信号链采样的数据。然后，可以使用标记过的数据来训练嵌入式 AI 模型。

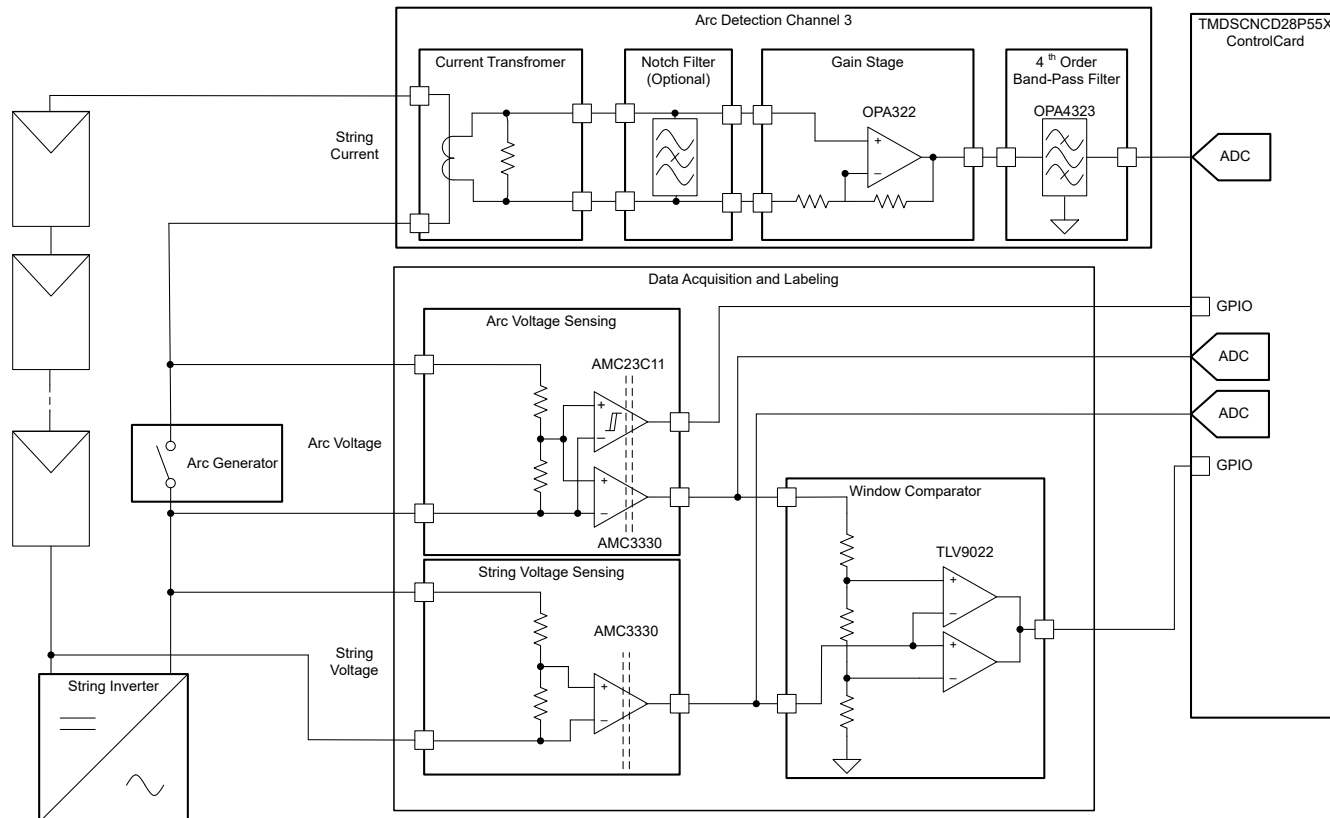


图 2-5. 方框图 - 电弧测试设置

2.2.3.1 串电压检测

图 2-6 展示了串电压检测电路。该电路包含一个连接到 AMC3330 的电阻分压器。AMC3330 是一个具有 2.0V/V 固定增益的增强型隔离式放大器。AMC3330 的差分输出连接到节 2.2.3.3 中所述的电路。这种差分至单端转换会引入 1.65V/V 的增益。然后，转换的输出连接到 MCU 的内部 ADC。

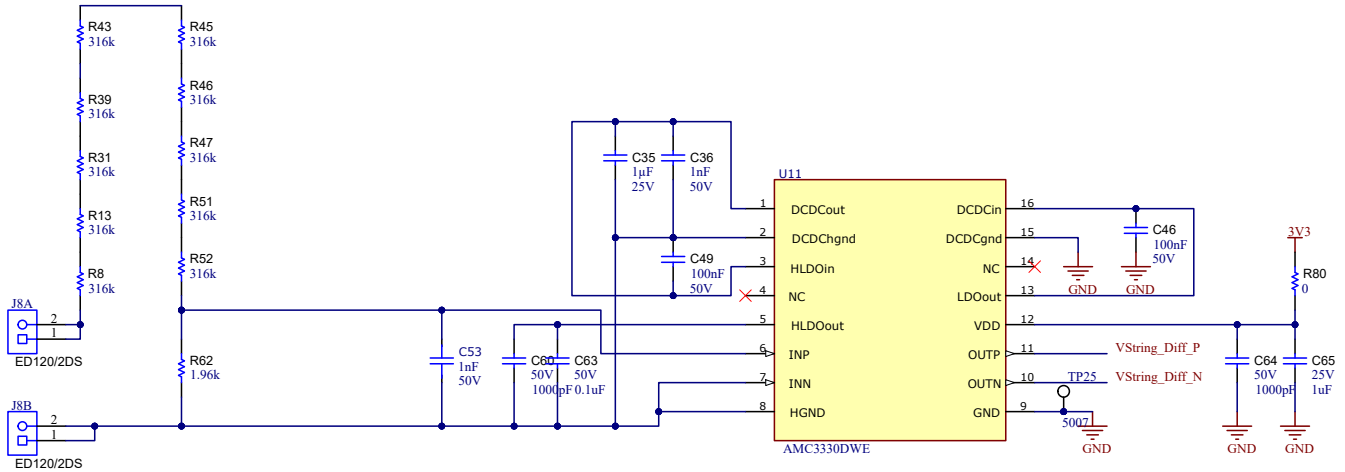


图 2-6. 原理图 - 串电压检测

方程式 3 描述了 J8A 和 J8B 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。

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{1960\Omega}{(10 \times 316000\Omega + 1960\Omega)} \approx V_{in} \times 0.00062 \quad (3)$$

2.2.3.2 电弧间隙电压检测

电弧间隙电压检测与串电压检测使用类似的电路。不过，为了提高对低电压的灵敏度并降低 AMC23C11 的阈值，增大了检测电阻 R110。

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{6490\Omega}{(10 \times 316000\Omega + 6490\Omega)} \approx V_{in} \times 0.00205 \quad (4)$$

典型的电弧间隙电压在 10V 至 50V 范围内，具体取决于串电流。不要超过 AMC3330 允许的最大输入电压，这一点很重要。这就是最大串电压。如果间隙太宽且电弧消失，则会向该分压器施加全部串电压。假设在这种情况下施加了 1500V 电压，这会导致 R110 上的输入电压为 3.1V。这远远超出了线性范围，但仍在绝对最大额定值范围内。

此外，还使用隔离式比较器 AMC23C11 来指示电弧间隙电压高于阈值的情况。该阈值由 R128 进行编程。在 AMC23C11 的 REF 引脚上采用 100 μA 电流源来生成该阈值电压。为 R128 选择的最小值为 200 Ω，因此在 REF 引脚上产生 20mV 的电压。这相当于输入电压为 9.75V。图 2-7 展示了原理图。

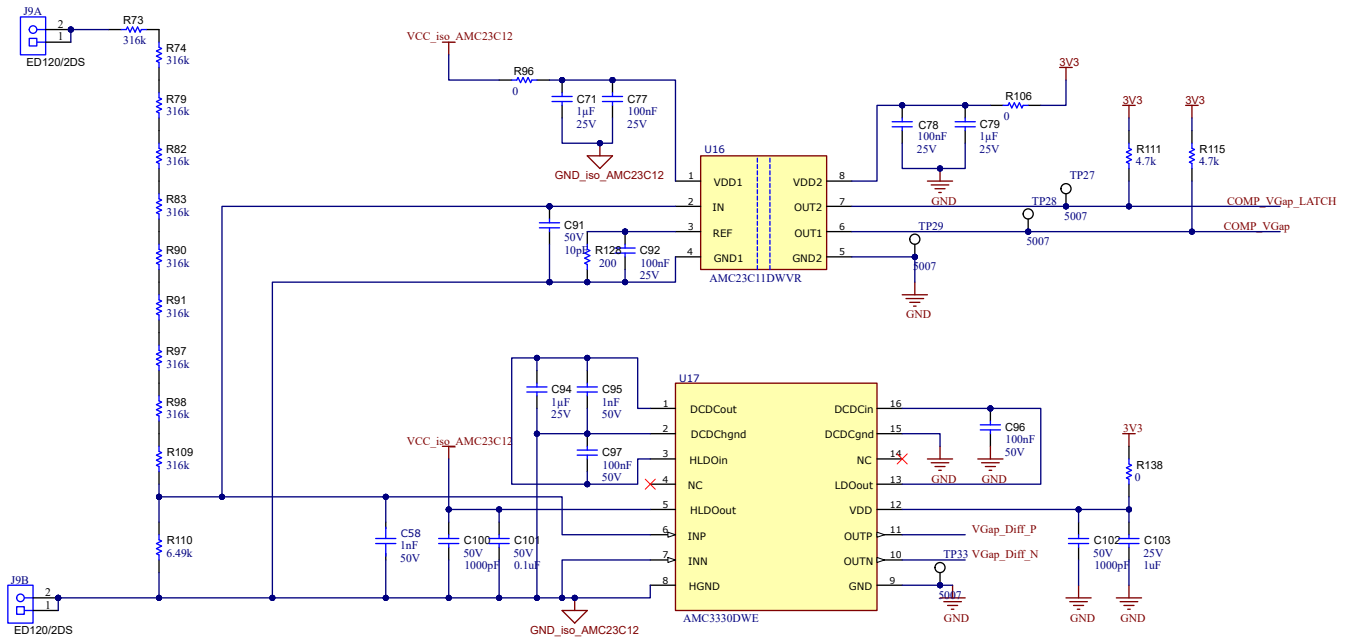


图 2-7. 原理图 - 电弧电压检测

2.2.3.3 差分至单端转换

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 C2000 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。由于输入电压始终为正，这意味着无需偏置，因此未安装 R92。此转换级的增益根据 R60 与 R84 和 R87 与 R86 之间的关系而定。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。

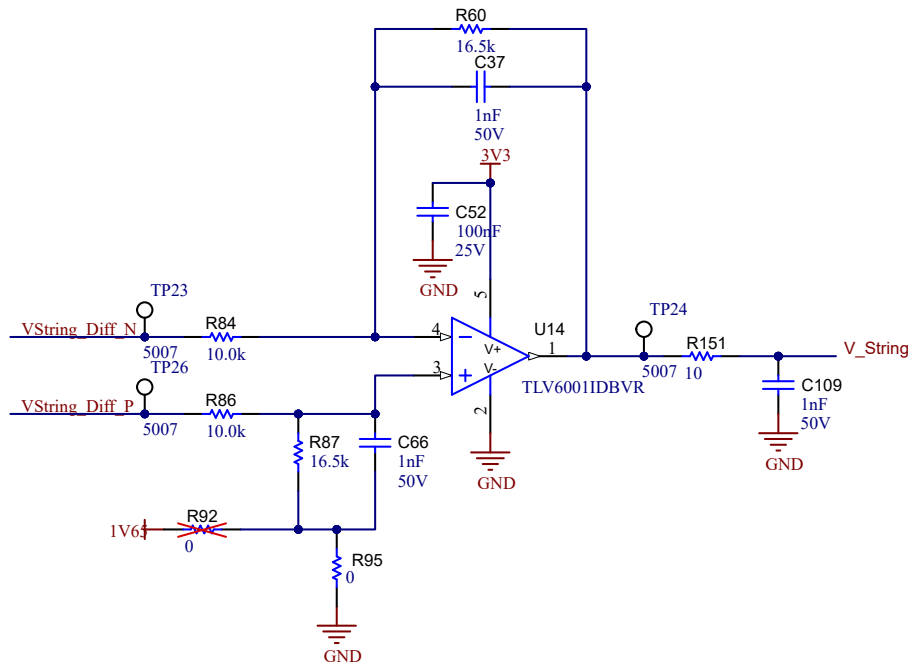


图 2-8. 原理图 - 差分至单端转换

2.2.3.4 用于电弧标记的窗口比较器

使用双通道放大器 TLV9022 实现了一个窗口比较器。该电路与 AMC23C11 一起用于电弧标记。虽然 AMC23C11 能够在电弧启动时提供非常快速的响应，但由于电弧停止后电弧间隙电压仍高于阈值，因此该器件无法检测电弧

何时停止。在这种情况下，窗口比较器电路就可以发挥作用。该比较器可以在电弧电压升至下限阈值以上时指示电弧启动，在电弧升至上限阈值以上时指示电弧结束。这两个阈值都是使用 R3、R42 和 R48 相对于串电压进行设置的。下限阈值如方程式 5 中所示。

$$V_{TH_L} = V_{String} \times \frac{3k\Omega}{(43k\Omega + 27k\Omega + 3k\Omega)} \approx V_{String} \times 0.041 \quad (5)$$

上限阈值如方程式 6 中所示。

$$V_{TH_H} = V_{String} \times \frac{(27k\Omega + 3k\Omega)}{(43k\Omega + 27k\Omega + 3k\Omega)} \approx V_{String} \times 0.41 \quad (6)$$

备注

V_{String} 是差分至单端转换电路的输出，不是输入电压。

在将这些公式应用于串电压 V_{String_in} 和电弧间隙电压 V_{Arc_IN} 的实际输入电压时，我们需要考虑两个检测电路的不同电压增益。

$$V_{ARC_TH_L} = V_{String_IN} \times \frac{0.0062}{0.0205} \times \frac{3k\Omega}{(43k\Omega + 27k\Omega + 3k\Omega)} \approx V_{String_IN} \times 0.0124 \quad (7)$$

$$V_{ARC_TH_H} = V_{String_IN} \times \frac{0.0062}{0.0205} \times \frac{(27k\Omega + 3k\Omega)}{(43k\Omega + 27k\Omega + 3k\Omega)} \approx V_{String_IN} \times 0.124 \quad (8)$$

例如，串电压 V_{String_IN} 为 800V 时，下限阈值 $V_{ARC_TH_L}$ 约为 10V，上限阈值 $V_{ARC_TH_H}$ 约为 100V。这意味着如果电弧间隙电压 V_{Arc_IN} 介于 10V 和 100V 之间，则窗口比较器会指示存在电弧。

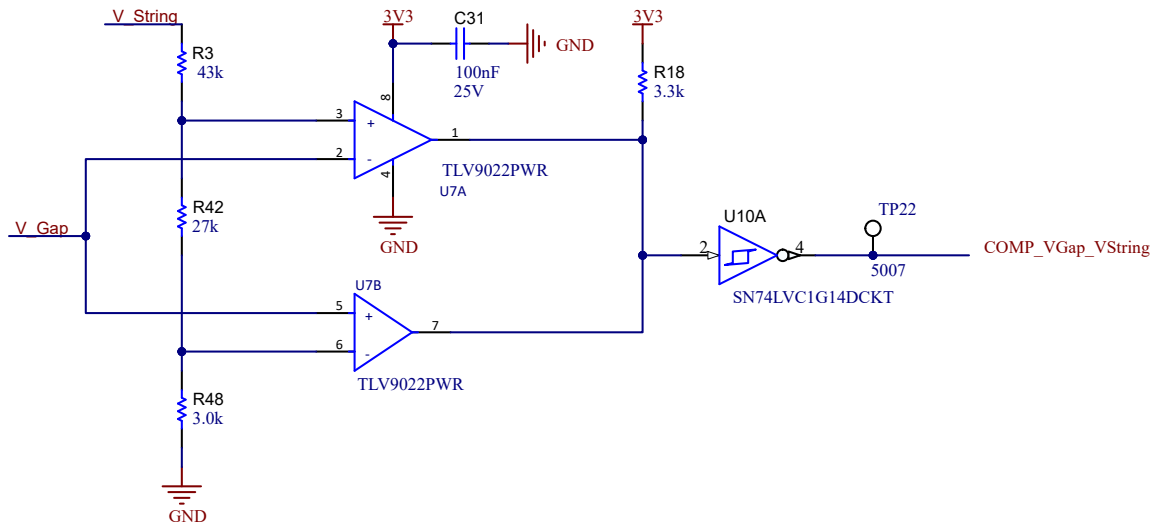


图 2-9. 原理图 - 电弧标记窗口比较器电路

2.2.4 辅助电源

图 2-10 展示了如何使用辅助电源为此参考设计供电。在此设计中，可以将 8V 至 16V 的电压施加到连接器 J7。此设计采用电子保险丝 TPS25947 来限制输入电流并再次提供反极性保护。电流限值由 R113 设置为 0.6A。欠压和过压锁定由电阻器 R104、R105 和 R112 设置为 6V 和 16.3V。有关详细说明和公式，请参阅数据表。

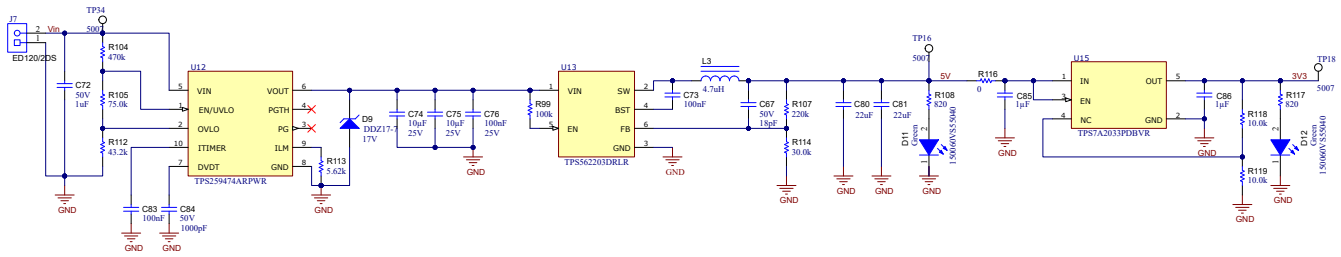


图 2-10. 原理图 - 辅助电源

TPS562203 用于将输入电压降至 5V。该 5V 电压用于为 C2000 控制卡供电。5V 电源轨由 TPS7A2033 降至 3.3V。此处使用低压降 (LDO) 稳压器生成低噪声 3.3V 电源轨。此电源轨用于模拟信号链。

2.2.5 controlCard 和调试接口

图 2-11 展示了此参考设计的 controlCard 和调试接口。该 controlCard 连接到连接器 J5。controlCARD 为模拟信号提供与 MCU ADC 的连接，并为比较器输出提供多个 GPIO 连接。此外，四个 LED 可由 MCU 控制。这可用于状态指示或调试目的。

J6 是一个附加的调试接头。该接头提供一个连接到 controlCard 的串行外设接口 (SPI)、三个附加的 GPIO 和电源轨。

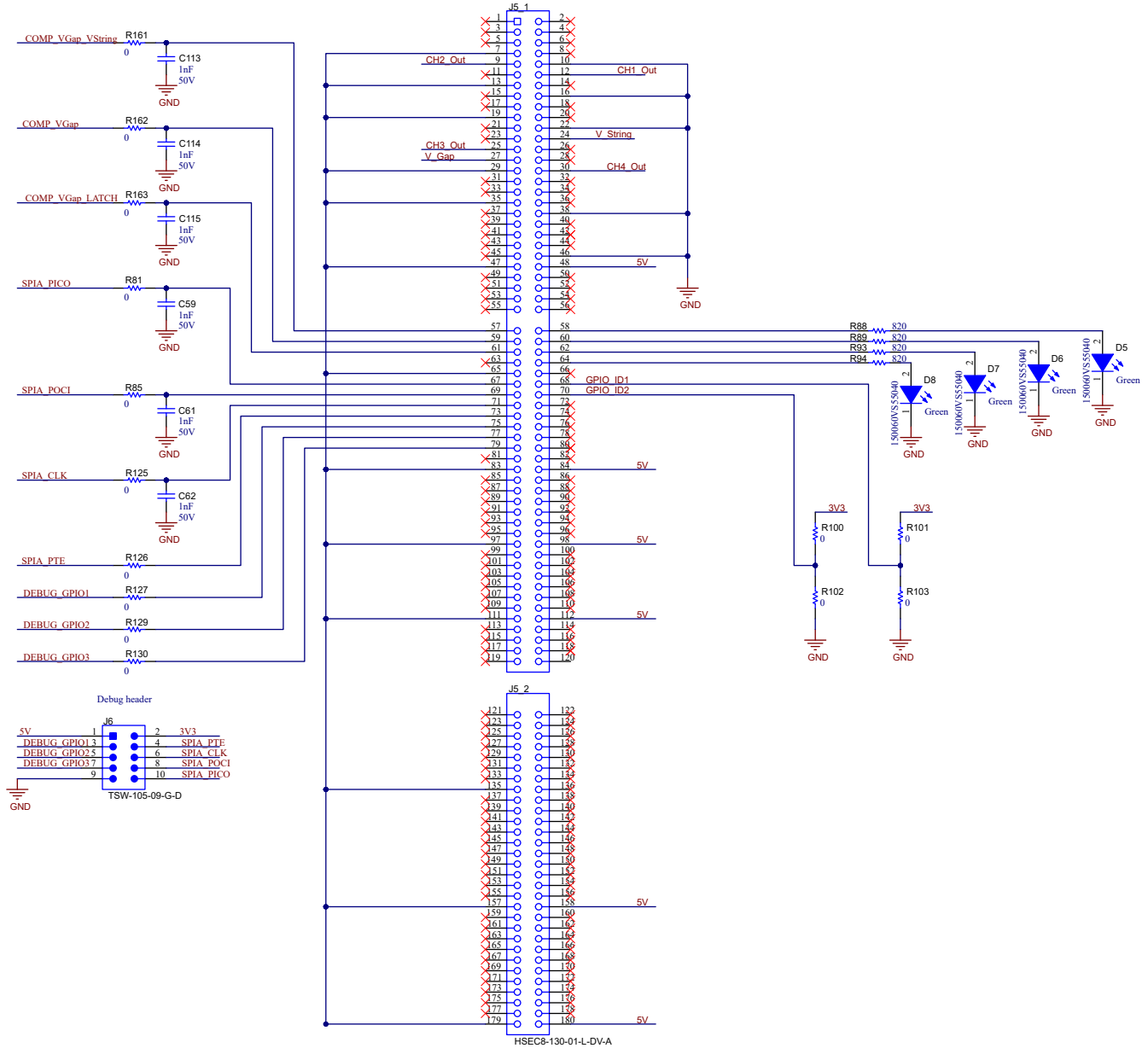


图 2-11. 原理图 - 非板载连接器

2.3 主要产品

2.3.1 TIEVM-ARC-AFE

TIEVM-ARC-AFE 是一种模拟前端，适用于太阳能应用中基于 C2000™ MCU 的机器学习电弧检测。

2.3.2 TMDSCNCD28P55X - TMDSCNCD28P55X controlCARD 评估模块

TMDSCNCD28P55X 是一款适用于 TI C2000™ MCU 系列 F28P55x 器件的低成本评估和开发板。该板附带 HSEC180 (180 引脚高速边缘连接器)，是一款非常适合初始评估和原型设计的 controlCARD。进行 TMDSCNCD28P55X 评估时，需要一个 180 引脚扩展坞 TMDSHSECDOCK，后者可单独购买或捆绑在套件中。

2.3.2.1 硬件特性

- 隔离式板载 XDS110 USB 转 JTAG 调试探针支持实时系统内编程和调试
- 标准 180 引脚 controlCARD 高速边缘卡 (HSEC) 接口
- 卡接口提供模拟 I/O、数字 I/O 和 JTAG 信号
- 硬件文件位于 C2000Ware 中的 boards\controlCARDs\TMDSCNCD28P55X

TMS320F28P55x (F28P55x) 是 C2000™ 实时微控制器系列中的一款器件，该系列为可扩展、超低延迟器件，旨在提高电力电子设备的效率，包括但不限于：高功率密度、高开关频率，并支持使用 GaN 和 SiC 技术。该器件具有 C28x 32 位 DSP CPU 和可编程控制律加速器 (CLA)，在从片上闪存或 SRAM 运行浮点或定点代码时的工作频率为 150MHz。浮点单元 (FPU)、三角函数加速器 (TMU) 和 VCRC (循环冗余校验) 扩展指令集进一步增强了 C28x CPU 的性能，从而加快了实时控制系统关键常用算法的速度。该器件还具有神经网络处理单元 (NPU)，针对深度卷积神经网络 (CNN) 进行了高度优化，其提供的 NN 推理性能比软件实现方案高 10 倍。

2.3.3 OPA4323 - 四通道 5.5V 20MHz 过零低噪声 (6nV/√Hz) RRIO 运算放大器

OPAx323 系列运算放大器包括单通道 (OPA323)、双通道 (OPA2323) 和四通道 (OPA4323) 的低压 (1.7V 至 5.5V)、高带宽 (20MHz) 运算放大器，具有零交叉输入级和轨至轨输出级。对于具有 ADC 驱动器应用中典型轨至轨摆幅的输入信号，OPAx323 零交叉输入级可实现高线性和低失真。在 0.5MSPS 至 5MSPS 之间的 ADC 采样速度下，20MHz 增益带宽可提供快速稳定响应，具体取决于所需的稳定性能。OPAx323 经良好优化可实现节能，因为该器件仅消耗 1.6mA 的典型静态电流。

OPAx323 具有 2μV/°C 的最大温漂、5.5nV/rt-Hz 热本底噪声以及最小 100dB 的 CMRR，因此该器件可在惠斯通电桥等高增益电压检测应用中轻松提供精密性能。这种更高精度 (低失调电压、漂移、噪声、失真和 CMRR) 和更高增益带宽 (快速稳定和转换) 的独特组合支持此类器件用于多种应用，例如电机旋转编码器、麦克风音频前置放大器和超声波传感器。

OPAx323 实现了 33V/μs 的高压摆率，可在电机电流检测应用中快速检测故障。与传统放大器不同，零交叉输入级可在低侧和高侧检测应用中提供相同的精度性能，因此 OPAx323 成为各种终端设备 (例如太阳能串式逆变器、电力输送、电网和电动汽车基础设施) 中用于电流检测的理想选择。OPAx323S 器件提供关断功能，可进一步降低功耗，并有助于在空闲时禁用放大器。该系列的所有通道型号均采用标准和小尺寸的引线和小尺寸的 QFN 封装。

2.3.4 OPA323 - 单通道 5.5V 20MHz 过零低噪声 (6nV/√Hz) RRIO 运算放大器

OPAx323 系列运算放大器包括单通道 (OPA323)、双通道 (OPA2323) 和四通道 (OPA4323) 的低压 (1.7V 至 5.5V)、高带宽 (20MHz) 运算放大器，具有零交叉输入级和轨至轨输出级。对于具有 ADC 驱动器应用中典型轨至轨摆幅的输入信号，OPAx323 零交叉输入级可实现高线性和低失真。在 0.5MSPS 至 5MSPS 之间的 ADC 采样速度下，20MHz 增益带宽可提供快速稳定响应，具体取决于所需的稳定性能。OPAx323 经良好优化可实现节能，因为该器件仅消耗 1.6mA 的典型静态电流。

OPAx323 具有 2μV/°C 的最大温漂、5.5nV/rt-Hz 热本底噪声以及最小 100dB 的 CMRR，因此该器件可在惠斯通电桥等高增益电压检测应用中轻松提供精密性能。这种更高精度 (低失调电压、漂移、噪声、失真和 CMRR) 和更高增益带宽 (快速稳定和转换) 的独特组合支持此类器件用于多种应用，例如电机旋转编码器、麦克风音频前置放大器和超声波传感器。

OPAx323 实现了 33V/μs 的高压摆率，可在电机电流检测应用中快速检测故障。与传统放大器不同，零交叉输入级可在低侧和高侧检测应用中提供相同的精度性能，因此 OPAx323 成为各种终端设备 (例如太阳能串式逆变器、

电力输送、电网和电动汽车基础设施) 中用于电流检测的理想选择。OPAx323S 器件提供关断功能, 可进一步降低功耗, 并有助于在空闲时禁用放大器。该系列的所有通道型号均采用标准和小尺寸的引线和小尺寸的 QFN 封装。

2.3.5 AMC3330 - 具有集成直流/直流转换器的 $\pm 1V$ 输入、精密电压检测增强型隔离式放大器

AMC3330 是一款具有完全集成的隔离式直流/直流转换器的隔离式精密放大器, 能够实现器件低侧的单电源运行。该增强型电容隔离层通过了 VDE V 0884-11 和 UL1577 标准认证, 将以不同共模电压电平运行的系统各部分隔开, 并保护低压域免受损坏。

AMC3330 的输入经优化, 可直接连接高阻抗电压信号源(例如电阻分压器网络), 用于检测高压信号。集成式隔离直流/直流转换器可测量不以地为基准的信号, 并使该器件成为充满噪音的空间受限型应用的独特设计。

该器件性能出色, 支持进行精确的电压监控。AMC3330 的集成直流/直流转换器故障检测和诊断输出引脚简化了系统级设计和诊断。

AMC3330 的额定工作温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

2.3.6 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

AMC23C11 是一款响应时间短的隔离式比较器。开漏输出与输入电路由抗电磁干扰性能极强的隔离栅隔开。该隔离栅经认证可提供高达 5kV_{RMS} 的增强型电隔离, 符合 VDE 0884-17 和 UL1577 标准, 并且可支持最高 1kV_{PK} 的工作电压。

在低迟滞模式下, 可通过单个外部电阻器在 20mV 至 450mV 之间调节跳变阈值, 在高迟滞模式下则可在 600mV 至 2.7V 之间调节跳变阈值。

器件上的开漏输出支持输出状态与输入状态保持一致的透明模式(锁存输入连接至 GND2)或在锁存输入信号的下降沿上清除输出的锁存模式。

AMC23C11 采用 8 引脚宽体 SOIC 封装, 其额定工业级工作温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

3 硬件、测试要求和测试结果

表 3-1 介绍了 TIDA-010955 连接点，表 3-2 列出了最大输入额定值。

表 3-1. 连接器和测试点说明

| 位号 | 说明 |
|---|-----------------------------------|
| T1、T2、T3、T4 | 通道 1、2、3 和 4 的电流互感器。通过 PV 电缆进行供电。 |
| J1、J2、J3、J4 | 通道 1、2、3 和 4 的外部电流传感器输入 |
| J7 | 辅助电源 (8V 至 16V) 连接器 |
| J5_1、J5_2 | 用于 C2000 控制卡的 HSEC 连接器 |
| J6 | 调试接头 (包含 GPIO、电压轨和 SPI) |
| J8A、J8B | 电弧标记电路的串电压正负输入 |
| J9A、J9B | 标记电路的电弧间隙电压正负输入 |
| TP9、TP11、TP17、TP20 | 通道 1、2、3 和 4 的 CT 正输出 |
| TP10、TP12、TP19、TP21 | 通道 1、2、3 和 4 的 CT 负输出 |
| TP2、TP4、TP6、TP7 | 通道 1、2、3 和 4 增益级后的带通滤波器输入 |
| TP35、TP36、TP37、TP38 | 通道 1、2、3 和 4 的带通滤波器低通级输出 |
| TP1、TP3、TP4、TP8 | 通道 1、2、3 和 4 的带通滤波器输出 |
| TP16 | 5V 电源轨 |
| TP18 | 3.3V 电源轨 |
| TP22 | 用于电弧标记的窗口比较器输出 |
| TP23、TP26 | 用于串电压检测的 U11 正负输出 (差分输出) |
| TP24 | 串电压检测的单端输出 |
| TP30、TP2 | 用于电弧间隙电压检测的 U17 正负输出 (差分输出) |
| TP31 | 电弧间隙电压检测的单端输出 |
| TP13、TP14、TP15、TP39、TP40、 TP25、TP29、TP33 | GND |

表 3-2. 最大输入额定值

| 连接器 | 最大电压 (V) | 最大电流 (A) |
|-------------|----------|--------------------------------|
| J9A、J9B | 1500 | 受电阻分压器限制 |
| J8A、J8B | 1500 | 受电阻分压器限制 |
| J7 | 16 | 0.6A (受电子保险丝限制) |
| J1、J2、J3、J4 | 3.3 | 受负载电阻器 (R5、R10、R15 或 R20) 限制 |

3.1 信号链验证

节 3.1.1、节 3.1.2 和节 3.1.3 说明了如何验证信号链。在使用实际电弧进行测试之前需要验证信号链，以确保硬件按预期工作。

3.1.1 硬件要求

低压信号链验证需要以下各项：

- TIDA-010955 电路板
- TMDSCNCD28P55X controlCARD
- USB Type-C® 电缆
- 辅助电源 (8V 至 16V、250mA)
- 信号发生器
- 带电压探头和电流探头的示波器
- 能够提供 20A 电流的实验室工作台电源 (用于饱和测试的可选装置)

3.1.2 测试设置

在设置测试板之前，请进行目视检查，以确保该板处于良好状态。

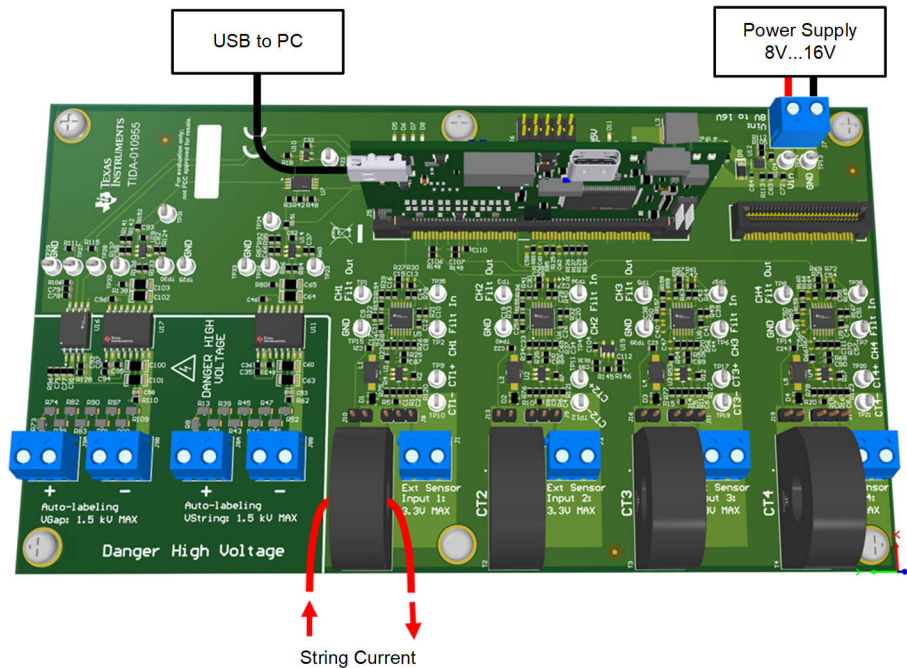


图 3-1. 测试设置

使用以下设置进行低压信号链验证：

1. 将一个辅助电源连接到 J7。该辅助电源接受 8V 至 16V 之间的电压，并需要低于 200mA 的标称电流。采用电子保险丝将电流限制到最大 600mA。
2. 确认 LED D11 和 LED D12 的 5V 和 3.3V 指示灯亮起。
3. 使信号发生器的输出短路，并通过其中一个电流互感器向电缆馈电。选择正弦输出。对于 50Ω 输出和 15V 电压，这会产生 0.3A 的电流。
4. 为了验证电流互感器的饱和行为，可以通过电流互感器向另一根传输直流电流的电缆馈电。
5. 无需与 PC 进行调试连接即可验证信号链的模拟部分是否正常工作。
6. 如果使用板载 CT，请确保在 J8、J9、J11 和 J12 的引脚 1 和引脚 2 之间放置一根跳线，如果使用外部传感器，则在引脚 2 和 3 之间放置一根跳线。

现在可以使用以下测试点来观察通过信号链的信号 (例如, 对于 CH1, 请参阅表 3-1 以了解其他通道的测试点位置) :

- TP9 (CT1+) : 电流互感器的正输出
- TP2 (CH1 滤波器输入) : 增益级输出端和带通滤波器输入端的信号
- TP35 : 带通滤波器低通部分之后的信号
- TP1 (CH1 滤波器输出) : 带通滤波器输出端和 ADC 输入端的信号

3.1.3 测试结果

图 3-2 展示了施加不同直流电流的电流互感器电路的传递函数。这是通过电流互感器向两根电缆馈电实现的。一根电缆传输不同频率的交流信号以用于交流分析, 另一根电缆传输直流电流。输入电流由示波器的高性能电流探头进行测量。输出电压在标记为 CT+ 的 TP9 上进行测量。

高直流电流会导致饱和效应, 尤其是在低频时。在用于电弧检测的 30kHz 至 100kHz 频带中, 20A 电流的衰减约为 3dB, 这是可以接受的。如果系统中存在更高的直流电流, 则可以使用能够处理这些电流的外部传感器。需要对信号链进行相应调整。

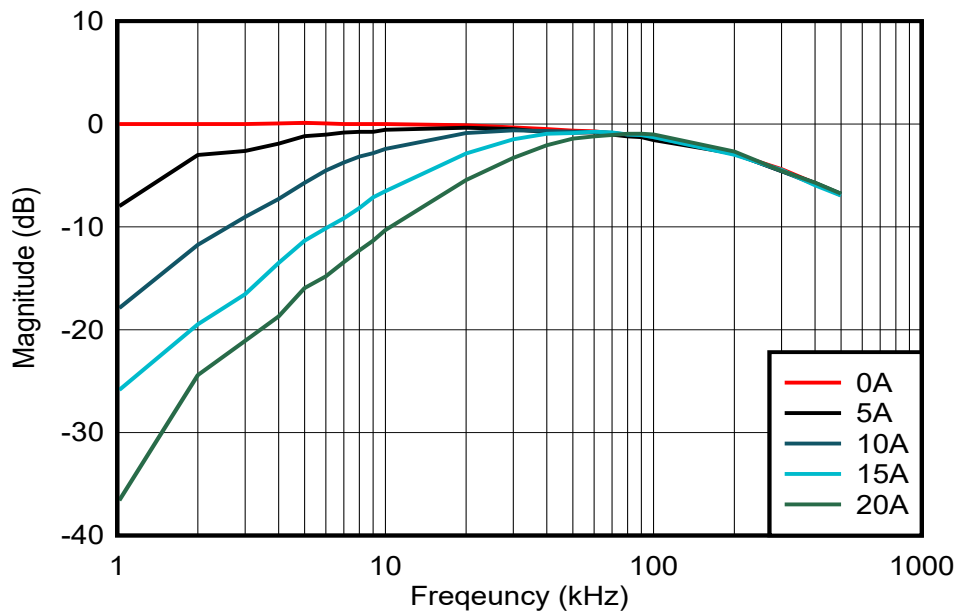


图 3-2. 电流互感器在不同直流电流下的传递曲线

图 3-3 展示了 CT 电路输出与增益级输出之间的传递曲线。在高达 100kHz 的频率 (这是用于电弧检测的频率范围的上限) 下可实现 20dB 的稳定增益 (增益为 10) 。

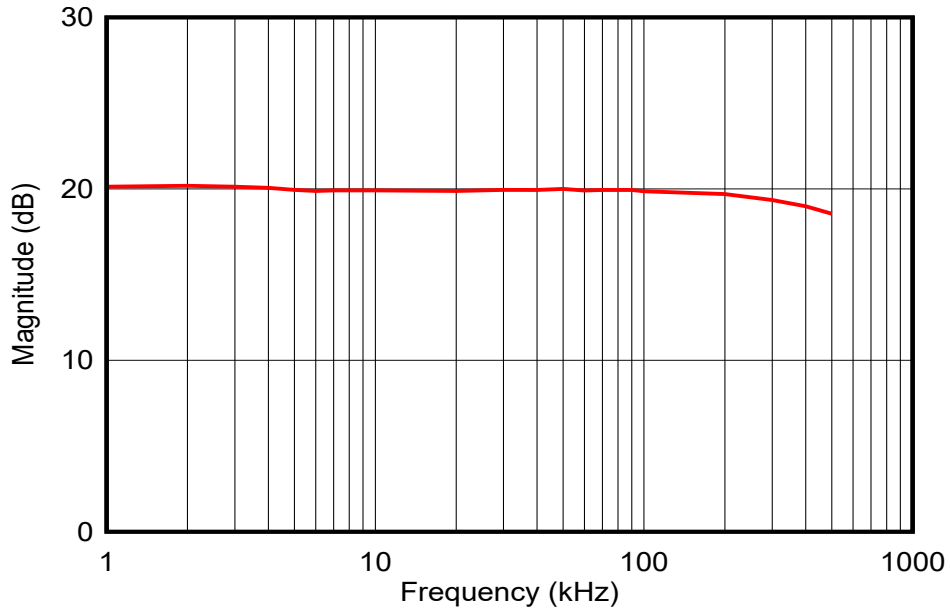


图 3-3. 增益级的传递曲线

图 3-4 和图 3-5 展示了滤波器级的传递曲线。通道 1 和通道 2 采用 8 阶带通滤波器，而通道 3 和通道 4 采用 4 阶带通滤波器。这些传输曲线反映了 TP2 (增益级的输出) 和 TP1 (带通滤波器级的输出) 之间的测量数据。

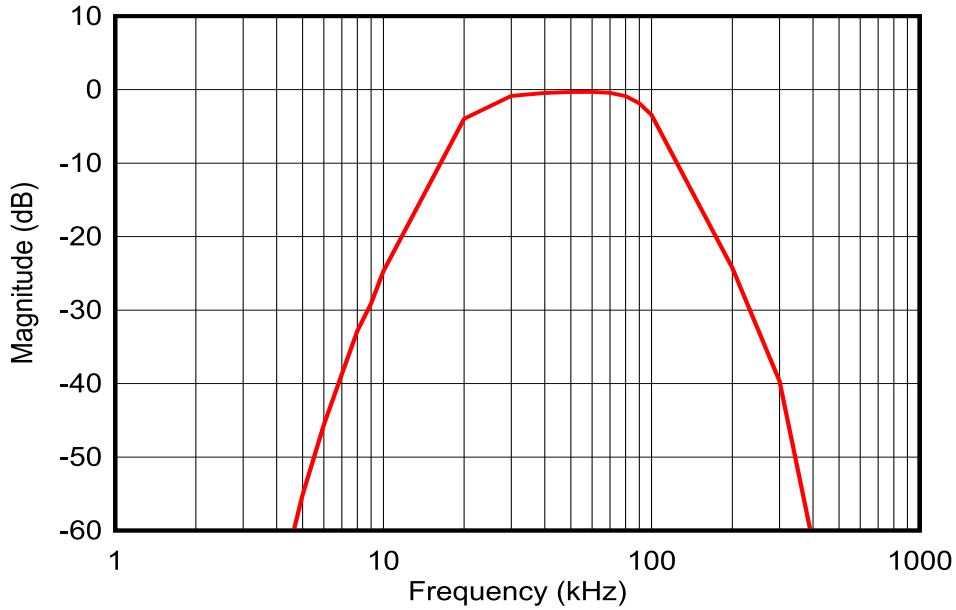


图 3-4. 8 阶带通滤波器级 (CH1 和 Ch2) 的传递曲线

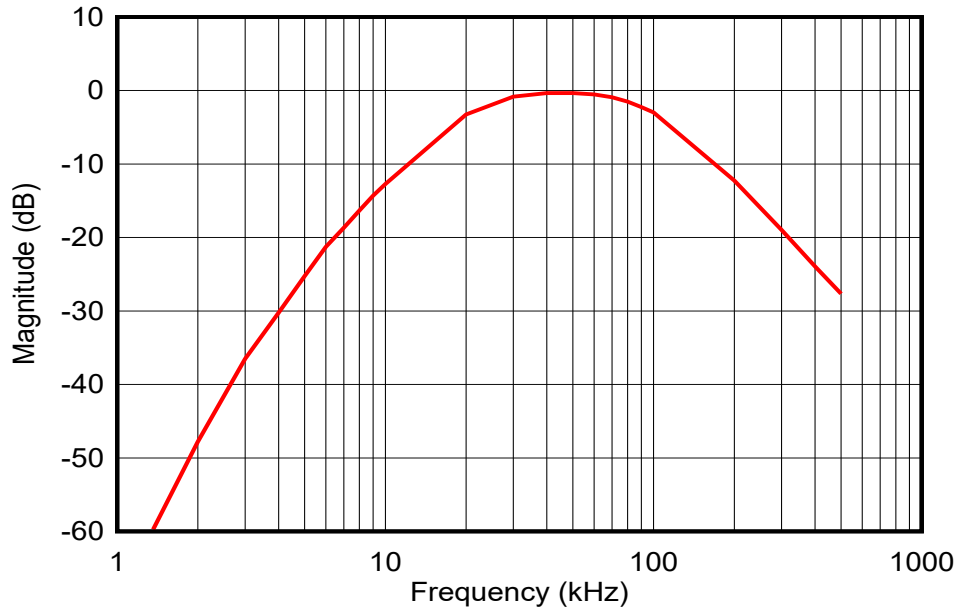


图 3-5. 4 阶带通滤波器级 (CH3 和 Ch4) 的传递曲线

图 3-2 和图 3-3 展示了通道 1 (采用 8 阶带通滤波器) 和通道 3 (采用 4 阶带通滤波器) 的完整信号链的传递曲线。

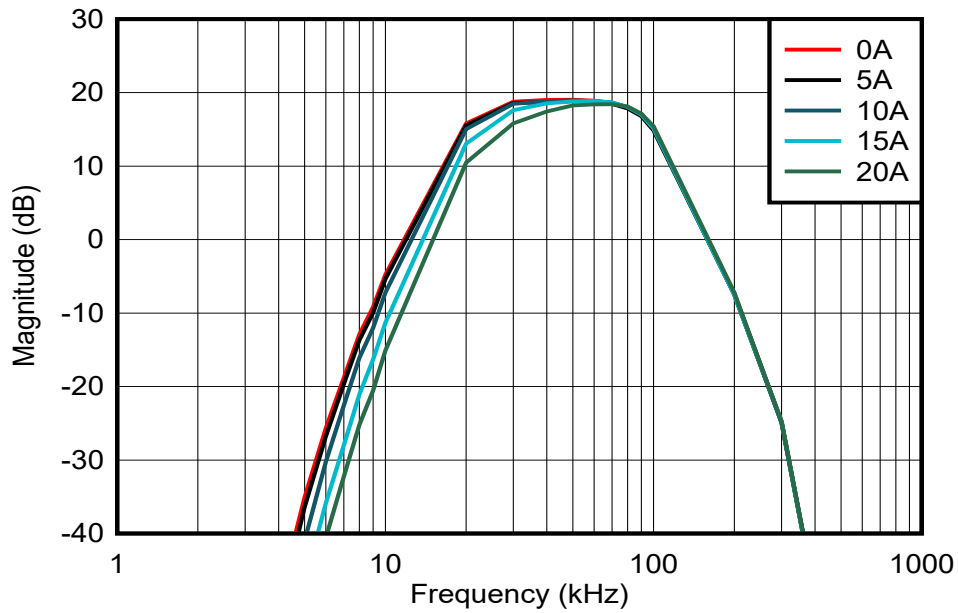


图 3-6. 采用 8 阶带通滤波器 (CH1 和 Ch2) 的模拟信号链的传递曲线

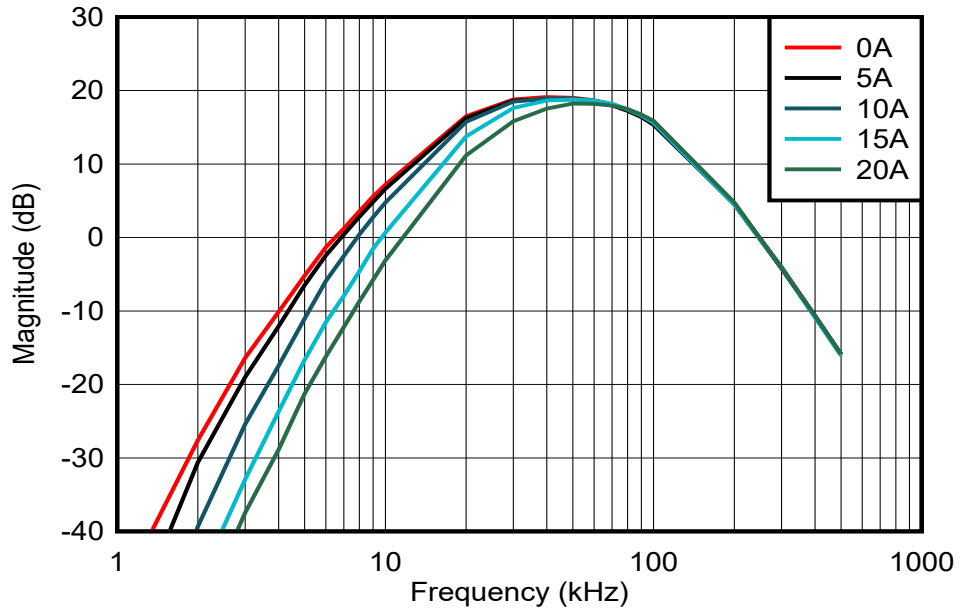


图 3-7. 采用 4 阶带通滤波器 (CH3 和 Ch4) 的模拟信号链的传递曲线

3.2 电弧测试

图 3-8 展示了使用实际电弧进行测试的设置。需要使用电弧发生器来仿真现实世界的电弧。PV 电池板串可由一个直流电流源仿真。在这种情况下，需要一个去耦和线路阻抗网络来模拟太阳能布线阻抗。UL1699B 等相关规范中说明了确切的设置和测试场景。

对于电弧标记电路，需要将具有低阻抗的电弧发生器上的电压接入到电弧标记电路输入 J9，这一点非常重要。需要通过电流互感器馈入串电流。应将串电压接入连接器 J8。

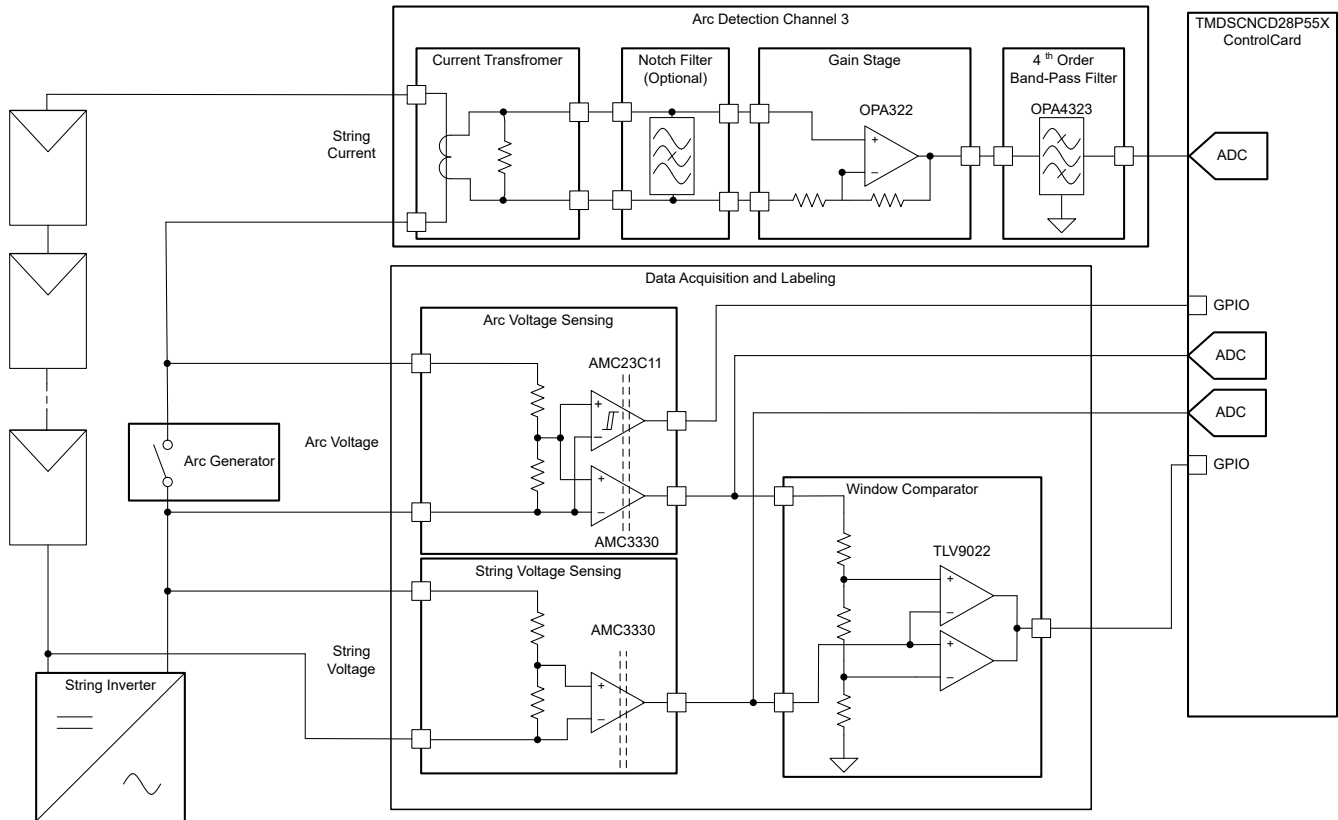


图 3-8. 使用实际电弧进行测试的测试设置

关于收集和标记数据、训练嵌入式 AI 模型和验证模型的软件工具和执行工作流程的说明超出了本文档的范围。[TIDA-010955](#) 和 [TIEVM-ARC-AFE](#) 的产品文件夹中提供了详细说明、用户指南、工具和其他资源的链接。所需的软件包含在 [C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK](#) 中。

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-010955](#) 中的设计文件。

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010955](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010955](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| TMDSCNCD28P55X | TMDSCNCD28P55X controlCARD 评估模块 |
| TIEVM-ARC-AFE | 此参考设计的可订购器件型号 |
| 滤波器设计工具 | 用于带通设计的滤波器设计工具 |

软件

| | |
|--|----------------------------|
| Code Composer Studio™ | 集成开发环境 (IDE) |
| C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK | SDK，包括用于该参考设计的测试软件 |
| TI Resource Explorer | TI Resource Explorer 中的软件包 |
| Edge-AI-Studio | 边缘 AI 项目的登录页面 |

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[TMDSCNCD28P55X controlCARD EVM 用户指南](#)
- 德州仪器 (TI)，[OPAx323 20MHz 高带宽、114dB CMRR、低压 \(1.7V 至 5.5V\) RRIO 零交叉运算放大器](#) 数据表
- 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
- 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

4.4 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](#)。

4.5 商标

E2E™, C2000™, and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.
USB Type-C® is a registered trademark of USB Implementer's Forum.
所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

ANDREAS LECHNER 是德州仪器 (TI) 能源基础设施系统工程师。Andreas 负责为全球能源基础设施领域的客户提供支持。他拥有德国兰茨胡特应用技术大学的硕士学位。

6 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 * (August 2024) to Revision A (December 2024) | Page |
|--|-------------------|
| • 在整个文档中添加有关 TIEVM-ARC-AFE 的上下文信息。..... | 1 |

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司