



### 说明

此参考设计实现了用于光伏系统直流电弧检测的 4 通道模拟前端，支持高达 1000V 的直流电压和高达 10A 的电流。通过分析太阳能电池板和逆变器之间的直流电流所存在的交流噪声，可对电弧进行检测。在使用 C2000™ 实时微控制器进行频率分析之前，使用电流互感器采集信号，使用模拟滤波器级进行调节，并由 MCU 的内部 12 位 ADC 或 16 位 ADC ADC8363 进行采样。此设计与不同的 C2000 controlCARD 兼容，因此可根据系统调整 MCU。可以使用 ADS8363 的旁路选项来评估 C2000 MCU 的内部 ADC。

### 资源

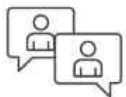
<a href="#">TIDA-010231</a>	设计文件夹
<a href="#">ADS8363、OPA4322</a>	产品文件夹
<a href="#">TMDSCNCD280049C</a>	工具文件夹
<a href="#">TPS562202、TPS745、TPS25947</a>	产品文件夹
<a href="#">TLV733P、REF5025</a>	产品文件夹

### 特性

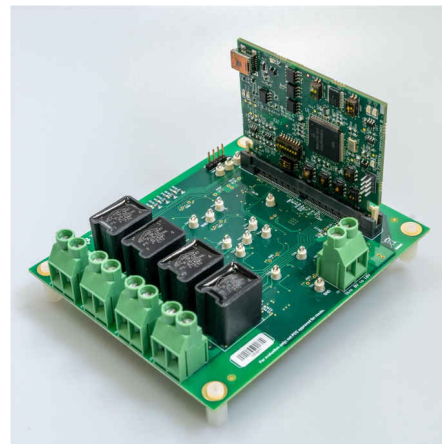
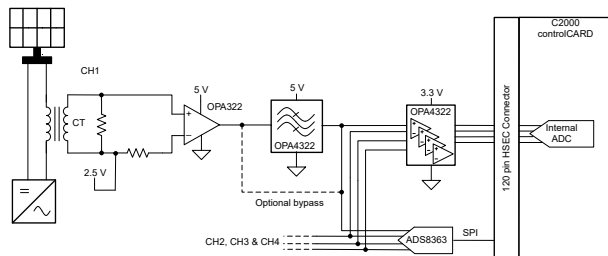
- 用于电弧检测的四个独立通道
- 1000V 直流电压和高达 10A 的直流电流
- 外部和内部 ADC 评估
- 工业温度范围(-40°C ~ +85°C)
- 凭借 120 引脚 HSEC 标准连接器，可为多种 C2000 controlCARD 灵活选择 C2000 MCU，而且还与 180 引脚 HSEC 连接器 controlCARD 兼容
- [DigitalPower-SDK](#) 中提供用于系统优化的可调节电弧检测软件

### 应用

- 太阳能电弧保护
- 串式逆变器
- 微型逆变器
- 智能汇流箱
- 中央逆变器



请咨询我司 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。必须检测高压线路之间的电弧，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 之类的标准要求所有额定电压低于 1500V 的太阳能系统使用电弧故障保护电路。此参考设计旨在展示用于此类电弧检测目的的模拟前端的可行实现方案。设计本身不满足 UL 1699B 标准。

直流电弧会在 PV 串之间的电缆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。在此设计中，针对电弧检测选择了 30kHz 至 100kHz 的频率范围。可以通过修改带通滤波器或软件进一步限制此范围，以避免使用具有已知噪声的频率，例如光伏逆变器的开关频率。信号链由以下部分组成：

- 隔离式电流测量
- 带通滤波器
- 模数转换
- 电弧检测算法

### 1.1 隔离式电流测量

为实现隔离式电流测量，使用了电流互感器 (CT)。这种方法有两个优点。第一，它提供了与较高的直流链路电压的必要隔离；第二，它滤除了与电弧检测无关的电流的直流分量。重要的一点是，应考虑 CT 在高达 10A 的高直流电流下的饱和行为。为了将负载电阻器上的压降连接到滤波器级和 ADC 的电压电平，实现了第一个增益级，该增益级还引入了信号偏置，以将 CT 输出转换为单极信号。由于逆变器的开关频率通常在 CT 的通带内，因此必须调整第一个放大级的增益，使纹波电流不会将放大器级驱动至饱和状态。

### 1.2 带通滤波器

为了限制所采集信号的范围，实现了带通滤波器。由于光伏逆变器系统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，但必须针对每个应用专门调整频带。

### 1.3 模数转换

此设计可对外部 ADC 和 C2000 MCU 的内部 ADC 进行评估。一般而言，ADC 的采样频率必须是所分析频率范围的至少两倍，才满足采样定理。由于频带为 30kHz 至 100kHz，此设计选择了 250kSPS 的采样速度。此外，必须对多达四个独立通道进行连续采样，这意味着至少需要 1MSPS 的采样速度。我们选择了 ADS8363 作为外部 ADC。这款 8 通道 16 位器件可实现高达 2MSPS 的采样速度，并通过 SPI 连接到 C2000 MCU。另一种可选的方案是使用 C2000 MCU 的内部 ADC。内部 ADC 的规格因版本而异。例如，TMS320F280049C 提供三个 3.45MSPS 12 位 ADC，每个 ADC 支持 7 个输入。

### 1.4 电弧检测算法

电弧检测算法基于频域分析。因此，可以确定定义频率范围内的交流噪声。在产生电弧时，这种噪声会因为所产生的电弧噪声而增加。此设计使用了 120 引脚 HSEC 连接器，因为它可以连接到不同的 C2000 controlCARD。这种方法可以连接到各种 C2000 controlCARD，以便根据所需的电弧检测通道数量以及 MCU 在系统中可能必须执行的其他任务来选择合适的 MCU。

## 1.5 关键系统规格

表 1-1 显示了主要系统规格的详细信息。

表 1-1. 关键系统规格

参数	规格	注释
最大直流电压	1000 V	
最大直流电流	10A	受限于 CT 电流能力和饱和行为
用于电弧检测的频带	10 kHz 至 100 kHz	可通过模拟滤波器和软件进行修改
每个通道的采样率	250kSPS	可针对更高的频带进行修改
通道数量	1 至 4	取决于所使用的 C2000 controlCARD
ADC 分辨率	16 位 (ADS8363)	可使用可选的 C2000 内部 ADC
辅助电源电压	8 V 至 16 V	
将 ADS8363 连接到 C2000	每 2 个活动通道 1 个 SPI 模块	自定义 SPI，如 <a href="#">连接到 ADS8363 伪差分工作模式</a> 应用手册所述



### CAUTION

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。



### WARNING

**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。



### WARNING

**表面高温！接触可致烫伤。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。



### WARNING

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组件、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

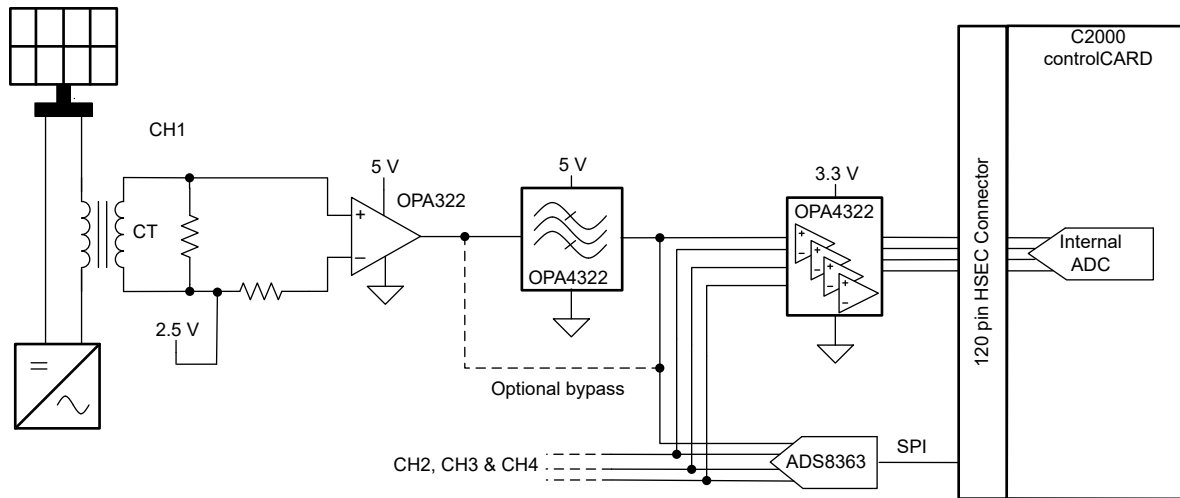


图 2-1. 系统方框图

### 2.2 设计注意事项

#### 2.2.1 电流互感器电路

为了检测太阳能串和逆变器之间的直流电流上的交流噪声，选择了基于电流互感器 (CT) 的方法。这样做的优点是，可以立即滤除与电弧检测无关的较大直流分量。由于较大的直流电流通过 CT 馈送，因此饱和行为非常重要。对于更高的直流电流，可能需要采用磁导率较低的带间隙铁氧体磁芯或金属粉末磁芯。图 2-2 中显示的电路由 CT、一些无源器件和一个放大器组成。根据数据表为负载电阻器 R5 选择了 200 Ω 阻值，导致 CT 频带 (10kHz 至 200kHz) 内的交流分量的电流与电压比为 1:1。之后，使用无源器件保护放大器并引入 2.5V 的偏置电压。放大器电路引入 10 的增益，以便输出信号适合接下来的滤波器部分的输入电压范围。如果存在较大的交流分量，可以降低此增益。

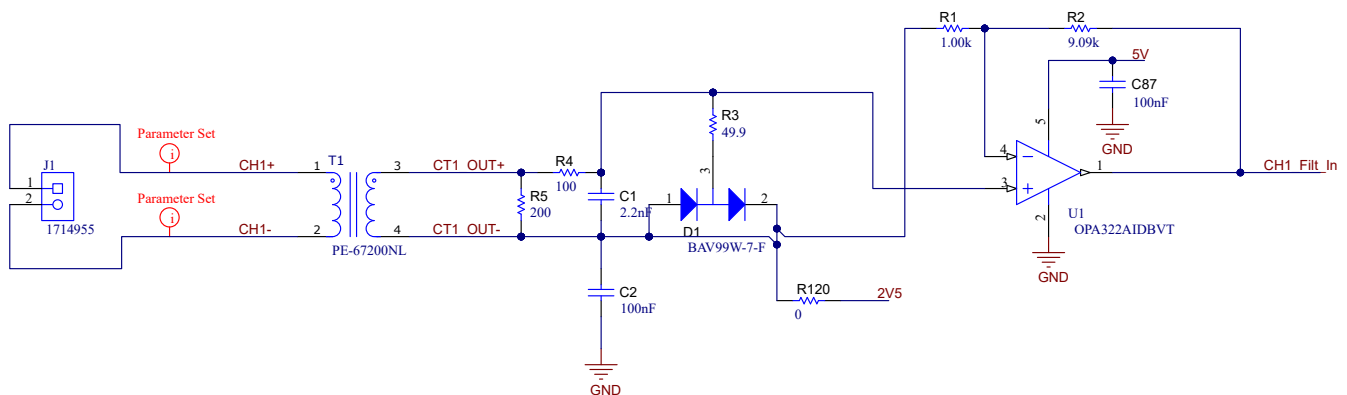


图 2-2. 电流互感器电路和增益级原理图

#### 2.2.2 模拟带通滤波器

图 2-3 所示的滤波器级由一个 4 通道运算放大器 OPA4322 组成。U6A 和 U6B 构成一个截止频率为 100kHz 的低通滤波器。U6C 和 U6D 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。

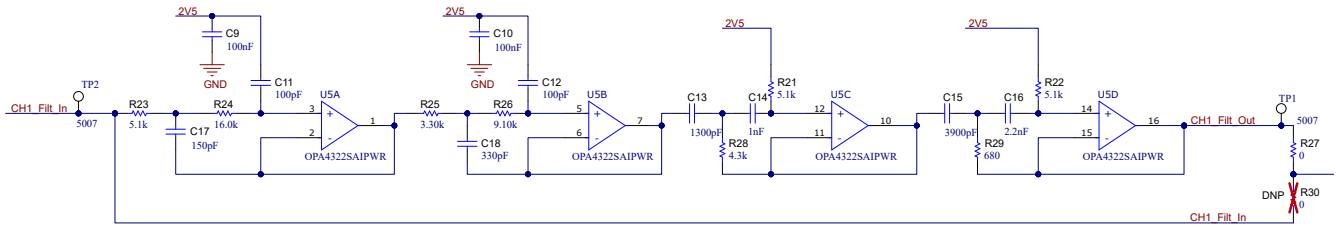


图 2-3. 滤波器级原理图

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 中显示了 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  $3.14\text{V}/\mu\text{s}$ 。OPA4322 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。使用 PSpice for TI 仿真工具对滤波器的传递函数进行了验证。滤波器级的增益如图 2-4 所示。此滤波器的输出通过另一个放大器连接到外部 ADC ADS8363 以及内部 ADC，该放大器负责将 C2000 MCU 的电压电平从 5V 转换为 3.3V。

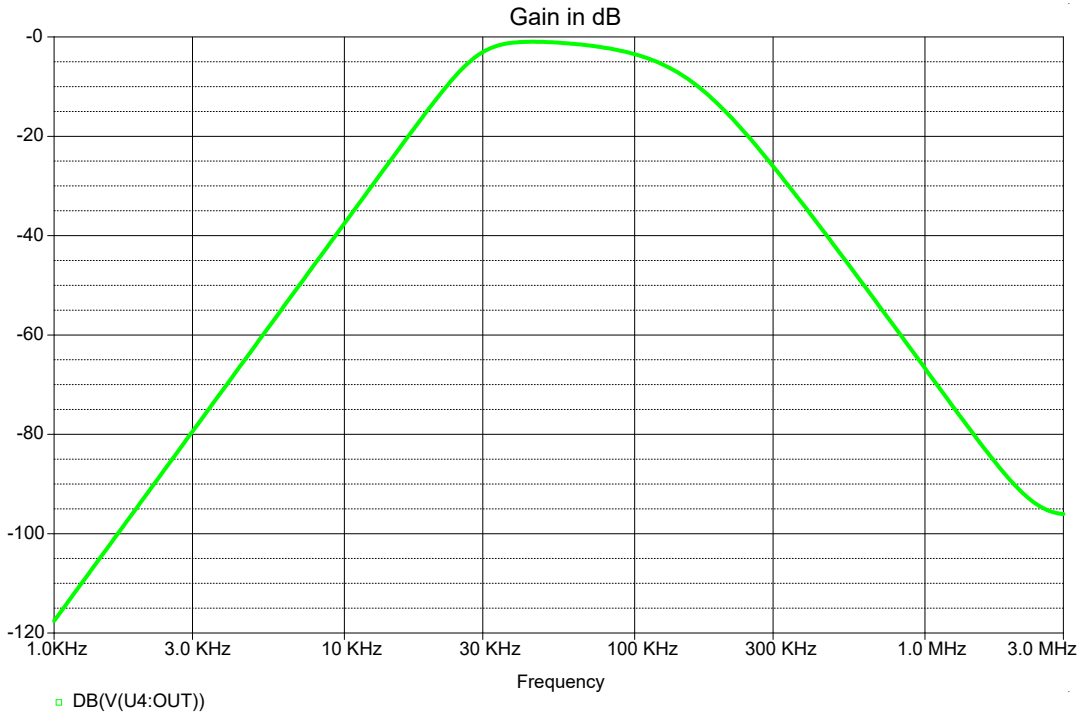


图 2-4. 滤波器级频率响应的仿真幅度

### 2.2.3 模数转换

接下来，将滤波信号转换到数字域。此操作由外部 ADC ADS8363 或 C2000 MCU 的内部 ADC 完成。如果用 ADS8363 完成，则仅使用其八个通道中的四个。滤波器的输出通过附加的抗混叠滤波器连接到通道 CHA0、

CHA1、CHB0 和 CHB1。未使用的输入接地。CMA 和 CMB 是通道 A 和 B 的共模输入，连接到 REF5025 提供的 2.5V 基准电压，该电压也用作 ADC 的基准电压并用于在 CT 后偏置信号。ADS8363 的 SPI 允许使用两条数据线，如果实现了两个以上的电弧检测通道，则该功能是实现所需数据速率所必需的。有关如何实现具有两条数据线的 ADS8363 SPI 的指南，请参阅[连接到 ADS8363 伪差分工作模式](#)应用手册。

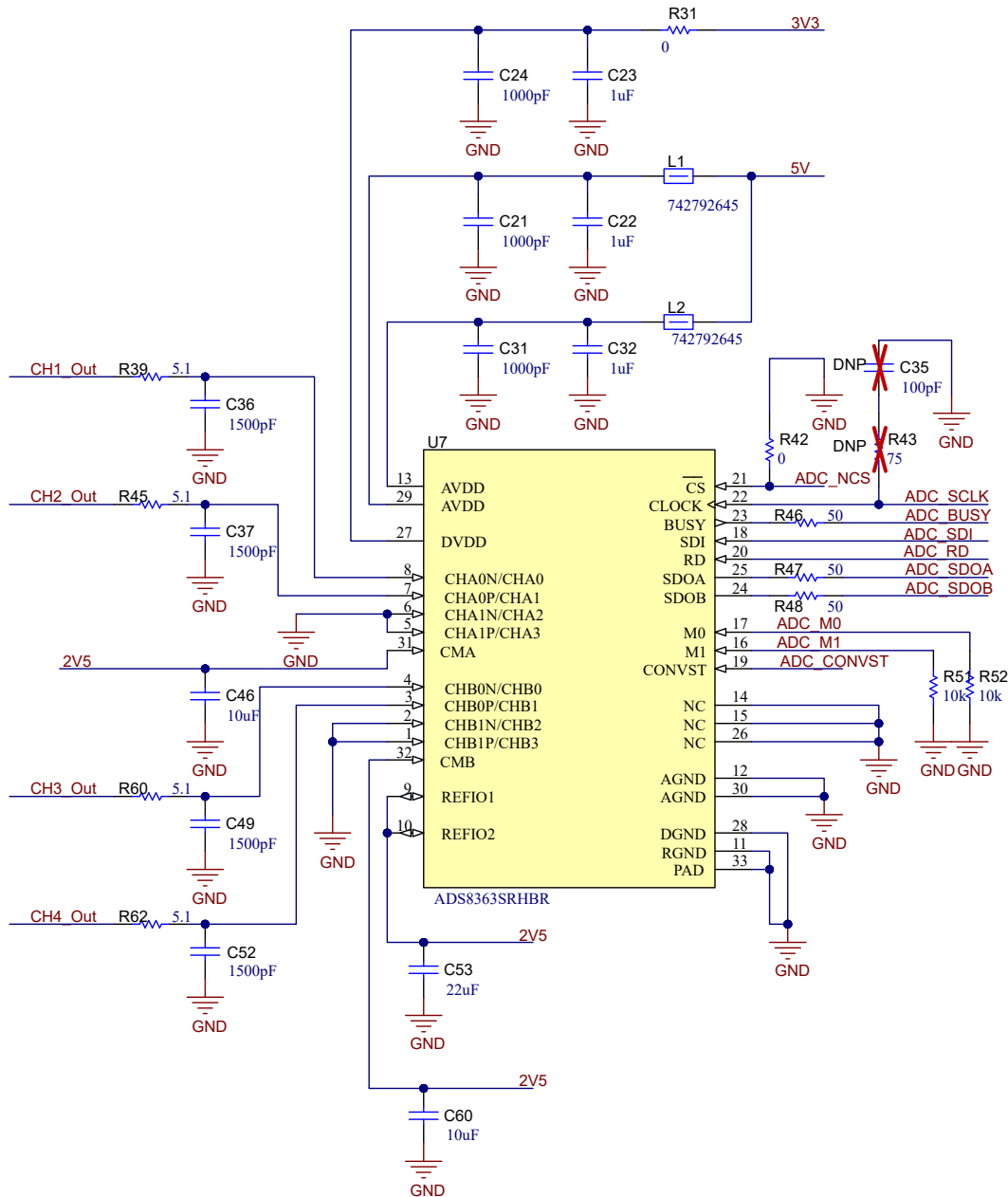


图 2-5. 使用 ADS8363 进行模数转换的原理图

此设计中所需的数据速率通过[方程式 3](#) 计算得出。

$$\text{Bitrate}_{\min} = \text{Number of Channels} \times f_s \times \text{Bits per Sample} \quad (3)$$

其中

- $f_s$  = 采样率

如之前提到的应用手册所示，采样率为 250kSPS，最多 4 个通道，每个样本为 22 位，则可计算出比特率为 22Mbit/s。由于 ADS8363 的最大 SPI 时钟频率  $f_{\text{SPI}}$  为 20MHz，因此必须使用两条数据线才能实现四通道运行所

需的比特率。调整比特率和采样率的最简单方法是使用 ADS8363 进行连续采样，并且只修改 SPI 时钟，因为该时钟用于进行转换和数据传输。SPI 时钟频率通过方程式 4 计算得出。

$$f_{SPI} = \frac{\text{Bitrate}}{\text{Number of data lines}} \quad (4)$$

其中

- 数据线数量可以是 1 或 2

最大比特率为 22MBit/s，使用 2 条数据线，则可计算出 SPI 时钟频率  $f_{SPI}$  为 11MHz。再举一例，如果仅使用一个通道，则所需的比特率为 5.5MBit/s，那么仅使用一条数据线和 5.5MHz 的  $f_{SPI}$  即可实现。

为了提高信号质量，对所有 SPI 信号实现了串联端接，并对时钟信号实现了交流端接。由于实现了连续采样，芯片选择信号被永久拉至低电平。

如果使用 C2000 的内部 ADC，滤波器输出信号将连接到由另一个 OPA4322 实现的电平转换级。其作用是，在将信号连接到 controlCARD 连接器上的模拟输入之前，将 5V 电平转换为 3.3V 电平。

### 2.2.4 电源

在电源方面，辅助电源电压应介于 8V 和 16V 之间。通过使用 TPS259474 电子保险丝实现了过压和反极性保护。如图 2-6 所示选择了 R104、R105、R112 和 R113。欠压锁定设置为 7.88V，过压锁定设置为 16.15V，电流限制设置为 0.59A。有关确切的设计过程，请参阅器件数据表。向输出添加了一个齐纳二极管以防止快速电压瞬变。

此设计需要三个电压轨。第一个是用于为 C2000 controlCARD 供电的 5.25V 电源。为此，使用 TPS562202 降压转换器降低了输入电压。按照 R107 和 R114 的使用值，输出电压为 5.32V，略高于所需的 5.25V。C2000 controlCARD 允许的最大输入电压为至少 5.5V。5.25V 电源轨还用于与 TPS745 搭配使用，为 ADC 和滤波器级生成 5V 模拟电源；以及与 TLV33P 搭配使用，为 ADC 的数字电源生成 3.3V 电源轨。每个电源轨上都添加了一个 LED 以指示是否成功上电。

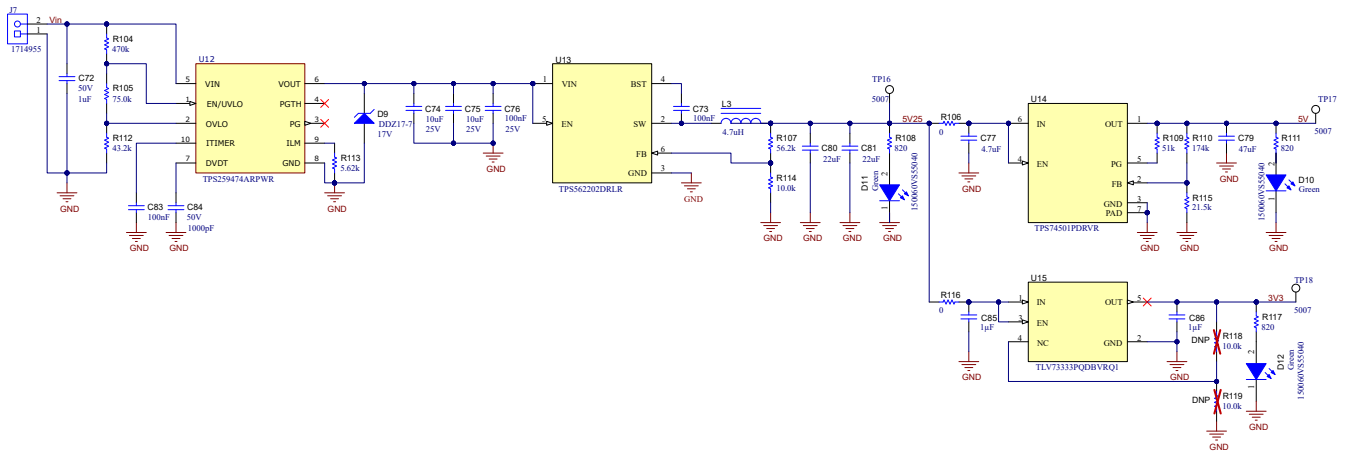


图 2-6. 功率级原理图

## 2.2.5 调试和状态指示选项

此设计中有几种不同的调试和状态指示方式。首先，针对三种电源电压提供三个 LED，分别为 5.25V (D11)、5V (D10) 和 3.3V (D12)，并额外添加四个 LED ( D5、D6、D7 和 D8 )，它们通过 C2000 controlCARD 的 GPIO 进行控制。此外，还有两个 DAC 通道从 C2000 controlCARD 路由到连接器 J6，该连接器也用于所指示的不同状态。此外，还有一个 GPIO 信号和 GND 连接到 J6，其中 GPIO 用于外部中断以启动电弧检测，或作为错误输出到系统的不同部分。电阻器 R100、R101、R102 和 R103 能够以不同的方式进行连接，以向软件指示不同的 PCB 版本。这些调试和指示方式在现有软件中尚未实现。表 2-1 概述了调试选项以及它们连接到的相关 GPIO 和引脚编号，并简要介绍了相应功能。

表 2-1. 调试和状态指示概述

器件	GPIO 编号	HSEC 引脚编号	功能
D11	-	-	5.25V 电源的状态指示
D10	-	-	5V 模拟电源的状态指示
D12	-	-	3.3V 电源的状态指示
D5	GPIO37	58	通用状态 LED ( 默认情况下不使用 )
D6	GPIO35	60	通用状态 LED ( 默认情况下不使用 )
D7	GPIO39	62	通用状态 LED ( 默认情况下不使用 )
D8	GPIO23	64	通用状态 LED ( 默认情况下不使用 )
J6 引脚 1	-	-	GND
J6 引脚 2	-	11	DACA 输出 ( 默认情况下不使用 )
J6 引脚 3	-	9	DACB 输出 ( 默认情况下不使用 )
J6 引脚 4	GPIO34	86	带下拉的外部输入 ( 默认情况下不使用 )
R100、R102	GPIO5	70	可选电路板指示。R100 为上拉，R102 为下拉。默认情况下它们均为 DNP
R101、R103	GPIO4	68	可选电路板指示。R101 为上拉，R103 为下拉。默认情况下它们均为 DNP

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 TPS259474

针对此设计选择了 TPS259474 电子保险丝用于过压和反极性保护。小尺寸且可编程的过压锁定、欠压锁定和最大电流提供了简单的小型电路保护。

### 2.3.2 TPS562202

TPS562202 是一款采用 SOT563 封装的简单易用型 2A 同步降压转换器。该器件经过优化，更大限度地减少了运行所需的外部器件并可实现低待机电流。其输入范围高达 17V，能够使用大多数实验室电源。580kHz 的开关频率不会干扰电弧检测的频带。

### 2.3.3 TPS745

选择 TPS745 是考虑到它的压降较低，因为 5.25V 电源仅略高于 ADC 所需的 5V 模拟电源。

### 2.3.4 OPAx322

在此设计中，OPAx422 用于多种用途。最关键的用途是滤波器级，它提供足够的 GBW 和压摆率。4 通道器件可实现小型布局。该器件还用于实现增益级和 5V 至 3.3V 电平转换。在这些情况下，规格并没有那么重要，因此选择了相同的器件来保持较少的 BOM 数量。

### 2.3.5 ADS8363

ADS8363 提供 16 位高分辨率和高通道数，并以低于 20MHz 的 SPI 速度实现高达 2MSPS 的数据速率。这些规格非常适用于电弧检测应用。该器件可实现准确灵活的设计，能够以较低的 SPI 速度提供较高的数据速率，非常适合与低端 C2000 型号结合使用，因为这些型号的 SPI 时钟频率通常限制为 25MHz。



### 2.3.6 REF5025

REF5025 是低噪声、低漂移、精度非常高的电压基准，可实现出色的线路和负载调节。

### 2.3.7 TMDSCNCD280049C

此 controlCARD 包含 TMS320F280049C C2000 MCU，它是一款中端单核 C2000 MCU。该器件提供足够的 SPI 模块和直接存储器存取 (DMA) 资源，能够以最短的主 CPU 运行时间实现连接至 ADS8363 的 SPI。这样就可以将大部分处理资源留给资源密集型电弧检测算法。120 引脚 HSEC 连接器可以使用许多其他 C2000 控制卡，还与 180 引脚 HSEC 连接器兼容，因此能够评估其他 C2000 MCU。

### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

#### 3.1 硬件和软件要求

##### 3.1.1 硬件

要实现初始启动，需要一个 TIDA-010231 电路板和一個 TMS320F280049C controlCARD (TMDSCNCD280049C)。

controlCARD 设置位于 [controlCARD 配置](#) 中。

必须使用直流电源为螺钉端子 J7 提供 8V 至 16V 的辅助电源。如果该连接器朝向底部，则左侧端子为 GND，右侧端子为电源电压。

对于初始低电压测试，使用了函数发生器向 CT 的初级侧提供正弦输入。通过此设置，可以测试模拟前端的不同部分，例如带通滤波器和 ADC。

对于带有电弧的系统测试，需要具备直流电源或光伏 (PV) 仿真器、光伏逆变器和电弧发生器。此设计支持高达 10A 的电流和高达 800V 的电压。由于这是一项高电压测试，必须采取必要的安全措施，以防止任何事故或伤害。

表 3-1 列出并描述了所有测试点和连接器。

**表 3-1. 连接器和测试点**

连接器或测试点	说明
J1、J2、J3、J4	输入 CH1、CH2、CH3 和 CH4 用于电弧检测。将它们连接到电流互感器的初级侧。与太阳能串和逆变器之间的直流线路串联。可处理高达 10A 的线路电流。
J5	120 引脚 HSEC 连接器，用于连接不同的 C2000 controlCARD。另外还兼容 180 引脚控制卡。
J6	调试连接。按从左到右的顺序，引脚 1 至 4 分别为：GND、DACB、DACA、GPIO ( F280049C 为 GPIO34 )。 DACA 和 DACB 可用于一些反馈信号传递 ( 未实现 )，GPIO 可用于外部中断。GPIO 具有外部下拉电阻。
J7	电源连接。将 8V 至 16V 之间的电压连接到此端子。GND 是左引脚，VCC 是右引脚。
TP1	CH1 的滤波器输出和 ADC 输入
TP2	CH1 的滤波器输入
TP3	CH2 的滤波器输出和 ADC 输入
TP4	CH2 的滤波器输入
TP5	CH3 的滤波器输出和 ADC 输入
TP6	CH3 的滤波器输入
TP7	CH4 的滤波器输出和 ADC 输入
TP8	CH4 的滤波器输入
TP9	2.5V 基准电压
TP10	DACA
TP11	DACB
TP12、TP13、TP14、TP15	GND
TP16	用于 C2000 controlCARD 的 5.25V 电源
TP17	5V 模拟电源
TP18	3.3V 数字电源电压

### 3.1.2 软件

用于评估 TMS320F280049C controlCARD 内部 ADC 的测试软件是 [DigitalPower-SDK](#) 的一部分。通过 [My Secure Software 门户](#) 申请用于评估外部 ADC 的软件。要运行该软件，需要具备 Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE) 版本 11.0 或更高版本以及 [C2000Ware SDK](#)。两者均在 [ti.com](#) 上公开提供。

有关该软件的更详细说明，请参阅可下载软件工程随附的“软件用户指南”。

有关如何使用和安装软件的更多详细信息，请参阅 [节 3.2](#)。

#### 3.1.2.1 电弧检测原理

此设计中实现的电弧检测算法是一种基于 FFT 的电弧检测算法。PV 系统中存在的电弧会在用于 PV 串的电缆中产生随机噪声电流。电弧本身的电流噪声符合高斯分布，其频谱可扩展至数 MHz。由于典型 PV 系统中布线的几何形状，高于 200kHz 的噪声电流密度会随着频率发生显著变化。出于这一原因，选择了介于 10kHz 和 100kHz 之间的一般频带进行电弧检测。该频带由电路板上的模拟带通界定。由于该频带内还有逆变器开关频率等其他噪声源，因此可以通过调整软件中的 `ArcTuningParams` 来进一步限制这一频带。[表 3-2](#) 显示了不同调优参数的说明。算法对采样信号执行 FFT，并对指定频带中的噪声求和。可以在变量 `AD_result` 中观察到计算出的电弧噪声。每 1024 个样本执行一次计算。由于电弧会在整个频带上产生噪声，因此 `AD_result` 值会在出现电弧时增加。

**表 3-2. ArcTuningParams 结构的要素及其说明**

名称	说明
float32 ArcTuningParams.B	分析带宽：分析频率的带宽。
float32 ArcTuningParams.I	最小频率：频带的初始频率。
float32 ArcTuningParams.F	滤波器权重：每半个频带的权重。
float32 ArcTuningParams.D	二进制丢弃因子：要丢弃的杂散峰值数量。
Int16 ArcTuningParams.T	电弧阈值：默认情况下不使用
Int16 ArcTuningParams.C	削波电平：默认情况下不使用
float32 ArcTuningParams.ADSampleRate	采样率：默认情况下设置为 250000

- **I** - 最小频率。用于计算电弧噪声的频带的初始频率。I 值指定用于计算电弧噪声的频带的起始频率。
- **B** - 分析带宽。此带宽必须大于 1.0 才能正常运行。电弧噪声的计算一直执行到频率  $B + I$ 。例如，如果 I 设置为 30000，B 设置为 30000，则使用 30kHz 至 60kHz 范围内的频率分量计算电弧噪声，而不使用该频带以外的任何频率分量。

计算电弧噪声时使用的附加参数是 **D** 和 **F**。这些参数用于消除可能出现的杂散峰值，这些峰值有时可能会被视为电弧：

- **D** - 二进制丢弃因子。此参数指定要丢弃的杂散峰值的数量，它控制过滤的激进程度，并且必须是介于 [0.0, 1.0] 之间的数字才能正常运行。根据 D 设置的值（规定了最高峰值）计算电弧噪声时，会消除 B 和 I 设置的频带内的峰值。如果 D 较高，则计算时会丢弃较多峰值；如果 D 较低，则丢弃较少峰值。请注意，更改 D 会影响电弧噪声计算算法消耗的周期。需要以大概 0.1 为增量尝试不同的 D 值，并研究实际电弧，了解电弧噪声计算如何变化。
- **F** - 滤波器权重。此参数指定所分析频带前半部分的权重，并且必须是大于 0.0 的数字才能正常运行。由 B 和 I 设置的频率的前半部分由滤波器权重加权，频带后半部分的权重则始终为 1。
- **T** - 阈值。此参数当前未使用，是 `AD_result` 阈值的占位符，如果超过此阈值，则会检测到电弧。更改 T 不会产生影响。
- **C** - 削波电平。此参数可产生一个用于检测电弧的变量，但当前未实现。更改 C 不会产生影响。
- **ADSampleRate** - 采样率。这是系统的采样率。在此设计中，该速率固定为 250kSPS，因此设置为 250000。

#### 3.1.2.2 软件实现

本节介绍示例软件的基本功能。[DigitalPower SDK](#) 中提供了内部 ADC 实现的示例软件。从 [MySecureSoftware](#) 申请支持 `ADS8363` 的软件。该软件仅用于评估，因为它仅计算定义频带内的电弧噪声，但不实现任何条件或阈值来指示是否存在电弧。可以在变量 `AD_result` 中观察计算出的电弧噪声。如果设置正确，在出现电弧时，该值会增加。

用于评估内部或外部 ADC 的项目之间的软件实现有所不同，但一般思路是相同的。软件从 ADC 中读取 1024 个样本，然后将这些样本传递给电弧检测算法。几乎所有采样和数据操作都是使用直接存储器存取 (DMA) 等后台资源完成的，可确保电弧检测持续运行。采样数据存储在一个名为 CH1Data 的数组中，大小为 1024 个样本。一旦这个数组被填满，系统就会将它传递给电弧检测算法，由算法将值复制到不同的存储器位置，以允许 DMA 在后台再次填充 CH1Data 数组，而不会破坏在前台运行的电弧检测算法使用的数据。

有关如何控制软件以及如何观察这些变量的更多详细信息，请参阅节 3.2。

## 3.2 测试设置

### 3.2.1 ControlCARD 配置

每个 controlCARD 都安装了开关，用于配置电路板上的不同引脚分配和其他连接。为了确保正常运行，在将 controlCARD 插入 TIDA-010231 电路板并上电之前，必须正确配置这些开关。表 3-3 显示了 TMS320F280049C controlCARD TMDSCNCD280049C 的配置。向上、向下、左侧、右侧位置是指控制卡的 HSEC 连接器朝下的方向。

**表 3-3. TMDSCNCD280049C 开关配置**

开关	设置	注释
S1:A	开关 1 打开, 开关 2 关闭	启用 USB JTAG 并禁用 USB UART
S1 ( 180 度旋转安装 )	开关 1 和开关 2 向上位置	选择闪存或 USB 引导模式
S2	向上位置	将 GPIO 10 连接到 HSEC 引脚 60
S3 ( 180 度旋转安装 )	向下位置	将 GPIO 8 连接到 HSEC 引脚 58
S4	向下位置	使用标准 4 引脚 JTAG
S5 ( 180 度旋转安装 )	开关 1 和开关 2 向上位置	将 GPIO 25 连接到 HSEC 引脚 77, 并将 GPIO 24 连接到 HSEC 引脚 75
S6	开关 1 和开关 2 向下位置	将 GPIO 26 连接到 HSEC 引脚 79, 并将 GPIO 27 连接到 HSEC 引脚 81
S7	所有开关都处于向上位置	将内部 ADC 连接到 HSEC 连接器
S8 ( 90 度旋转安装 )	开关 1 和 2 左侧位置	对所有内部 ADC 使用内部电压基准。仅适用于使用内部 ADC 的情况。

### 3.2.2 硬件和软件验证设置

随着设置的开发，可以在低压环境中验证硬件和软件。需要具备以下硬件：

图 3-1 展示了硬件设置。

- 一个 TIDA-010231 电路板
- C2000 controlCARD TMDSCNCD280049C
- 直流电源，用于为 J2 提供 8V 至 16V 辅助电源。将电流限制为 0.5A。有关极性，请参阅图 3-1。
- 函数发生器，用于为 CH1 输入 J4 提供可变频率高达 100kHz 的正弦信号
- 示波器，用于观察滤波器测试点的波形
- 装有 Code Composer Studio 软件的 PC，用于观察采样波形和电弧检测算法的输出。

软件工程可以直接从 DigitalPower SDK 导入到 Code Composer Studio IDE 中。（内部 ADC 软件）。

有关如何控制该软件的详细说明可在下载的软件包中所含的用户指南 PDF 文档中找到。

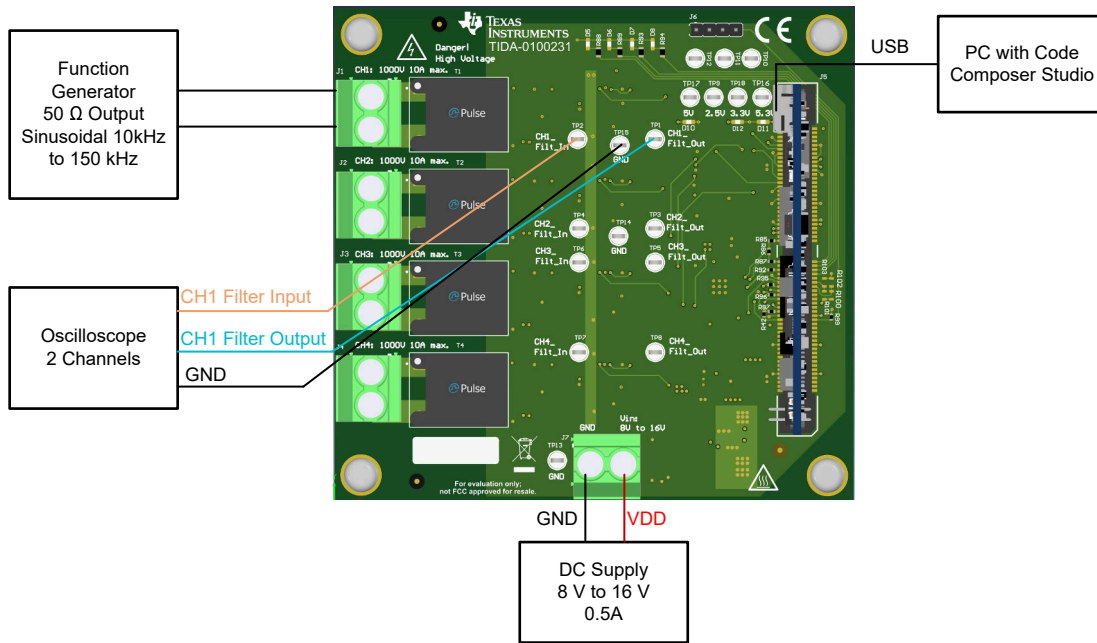


图 3-1. 硬件和软件验证设置

### 3.2.3 电弧测试设置

对于实际的光弧检测设置，需要具备以下硬件：

- 一个 TIDA-010231 电路板
- C2000 controlCARD TMDSCNCD280049C
- 直流电源，用于为 J2 提供 8V 至 16V 辅助电源。将电流限制为 0.5A。有关极性，请参阅图 3-2
- 充当太阳能电池板或太阳能串的直流电源或 PV 仿真器
- 光伏逆变器（电弧检测针对该器件进行了优化）
- 电弧发生器，用于以受控方式产生电弧故障
- 在安全环境中进行这些高压电弧实验的所有必备安全设备

#### WARNING

本实验中存在高电压和高电流，可产生开放式电弧。应采取一切必要的保护措施以防止伤害。将电弧发生器和电弧检测板放在保险箱内，防止人接触到高电压。确保所有承载高电压的导体都不会被人触摸到。

图 3-2 显示了电弧检测测试设置的方框图。

软件设置与硬件验证设置相同。

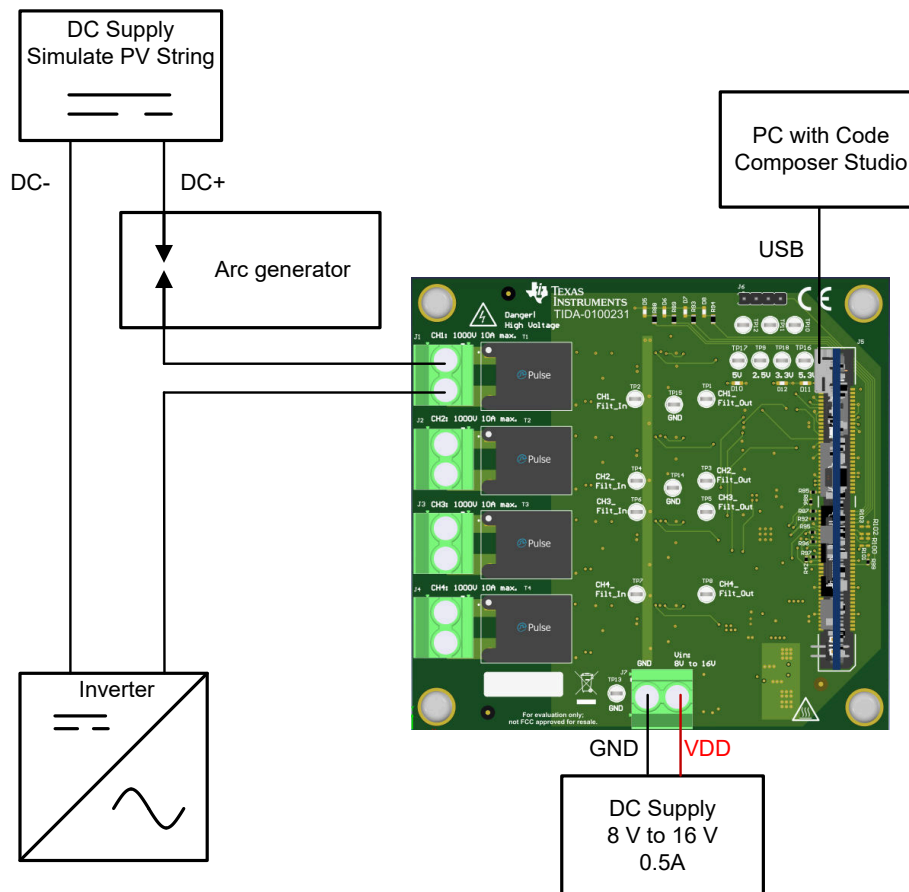


图 3-2. 电弧检测测试设置

### 3.3 测试结果

#### 3.3.1 硬件和软件验证的测试结果

图 3-1 显示了用于此测试的设置。对 CH1 输入和采样信号应用了具有不同频率的正弦输入信号。可在 Code Composer Studio 内观察到计算出的电弧噪声。图 3-3 和图 3-4 显示了将软件加载到 controlCARD 之后、启动代码之前的外部 ADC 版本和内部 ADC 版本的 Expressions 窗口。

Expression	Type	Value	Address
> CH1Data	int[1024]	[0,0,0,0...]	0x0000E000@Data
> AD_result	long[1500]	[0,0,0,0...]	0x0000B000@Data
BufferFillFlagCH1	unsigned int	0	0x0000BC76@Data
▼ ArcTuningParams	struct <unnamed>	{B=30000.0,I=30000.0,F=64.0,D=0.0,...	0x0000A80A@Data
B	float	30000.0	0x0000A80A@Data
I	float	30000.0	0x0000A80C@Data
F	float	64.0	0x0000A80E@Data
D	float	0.0	0x0000A810@Data
T	int	220	0x0000A812@Data
C	int	55	0x0000A813@Data
ADSampleRate	float	250000.0	0x0000A814@Data

图 3-3. 外部 ADC 的“Expressions”窗口

Expression	Type	Value	Address
> CH1Data	int[1024]	[0,0,0,0...]	0x0000D400@Data
> AD_result	long[1500]	[0,0,0,0...]	0x0000B000@Data
▼ ArcTuningParams	struct <unnamed>	{B=30000.0,I=30000.0,F=64.0,D=0.0,...	0x0000A80A@Data
B	float	30000.0	0x0000A80A@Data
I	float	30000.0	0x0000A80C@Data
F	float	64.0	0x0000A80E@Data
D	float	0.0	0x0000A810@Data
T	int	220	0x0000A812@Data
C	int	55	0x0000A813@Data
ADSampleRate	float	250000.0	0x0000A814@Data

图 3-4. 内部 ADC 的“Expressions”窗口

- **CH1Data** : 用于存储 1024 个输入信号样本的数组。
- **AD\_result** : 用于存储计算出的电弧噪声的数组。每个要素代表 1024 个样本的分析结果。
- **BufferFillFlagCH1 (仅适用于外部 ADC)** : 在使用外部 ADC 解决方案的情况下开始电弧检测的标志。启动后，内部 ADC 项目直接开始。
- **ArcTuningParams** : 请参考表 3-2。在这种情况下，电弧检测的频带设置为 30kHz 至 60kHz。

启动软件并在“Expressions”窗口中启用持续刷新选项后，显示的值会发生变化，如图 3-5 所示。可以在图形工具中观察输入信号和 AD\_result 变量。图 3-6 显示了 20kHz 正弦输入电流的采样输入信号。

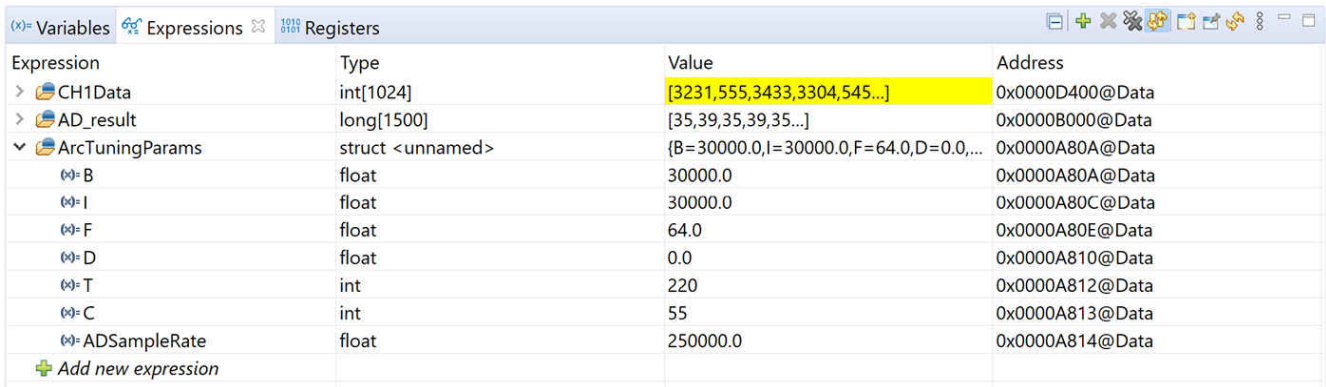


图 3-5. 20kHz 正弦输入电流的“Expressions”窗口

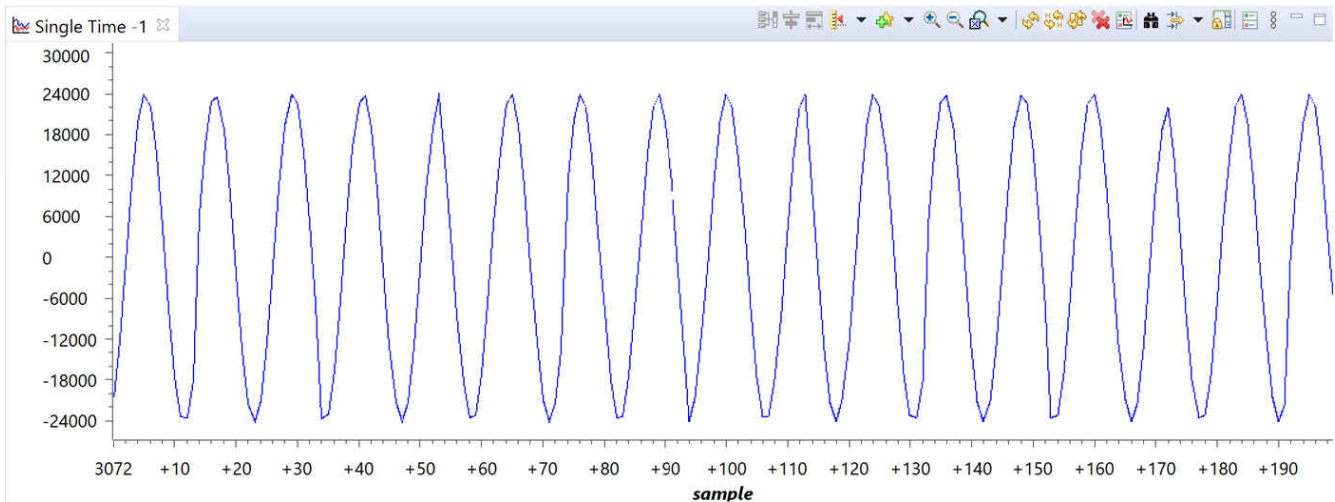


图 3-6. 20kHz 正弦输入电流下的 CH1Data 图形

表 3-4 显示了不同输入频率下外部和内部 ADC 软件的 AD\_result 值。对于电弧检测频带内的频率，观察到的 AD\_result 值高于预期值。一般而言，外部 ADC 解决方案的变化更为显著，这是正常现象，因为外部 ADC 的分辨率为 16 位，而内部 ADC 仅为 12 位。

表 3-4. 使用外部 ADC 和内部 ADC 的不同正弦输入的 AD\_result 值

频率 (单位 : Hz)	AD_result (使用外部 ADC)	AD_result (使用内部 ADC)
10000	46	23
20000	43	28
30000	89	47
40000	98	67
50000	80	49
60000	77	46
70000	35	33
80000	12	30
90000	16	29
100000	19	25



### 3.3.2 使用电弧进行测试

实际电弧条件下的测试结果因系统而异。在没有发生电弧时，AD\_Result 中的值应该是稳定的。在产生电弧期间，AD\_Result 值显著增长，表明存在电弧。绝对值可能因系统中已经存在的噪声、所选择的内部或外部 ADC 输入方法以及指定的 ArcTuningParams 而有所不同。开始测试时，建议使用表 3-5 中显示的默认值。选择 B 和 I 时，让逆变器开关频率在 B 和 I 定义的频带之外。如果 AD\_Result 值在未产生电弧时也很高，则将参数 D 增加到 0.1 或 0.2，或者调整模拟带通滤波器的截止频率。对不同参数进行详细测试可以确定每个系统的最佳设置。定义这些参数后，使用 AD\_Result 值实现自定义算法以检测电弧。这可以通过不同的方式来完成，例如简单地实现 AD\_Result 的阈值，或者在与阈值比较之前对 AD\_Result 的多个连续值应用一些过滤。

表 3-5. ArcTuningParams 结构的默认值

名称	值
float32 ArcTuningParams.B	30000
float32 ArcTuningParams.I	30000
float32 ArcTuningParams.F	64
float32 ArcTuningParams.D	0
int16 ArcTuningParams.T	不适用
int16 ArcTuningParams.C	不适用
float32 ArcTuningParams.ADSampleRate	250000

## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

#### 4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010231](#) 的设计文件。

#### 4.1.2 材料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010231](#) 的设计文件。

### 4.2 工具与软件

#### 软件

[C2000 电弧检测软件](#) [安全 TI 资源的链接 \(需要登录\)](#)。

### 4.3 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、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可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](#)》。

### 4.4 商标

C2000™, TI E2E™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

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) 电网基础设施系统工程师。Andreas 负责为全球电网基础设施领域的客户提供支持。Andreas 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

---

<b>Changes from Revision A (July 2022) to Revision B (April 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更改了表 3-3 中 S7 开关上的“设置”和“注释”单元格中的内容。.....	12

---

<b>Changes from Revision * (July 2022) to Revision A (February 2023)</b>	<b>Page</b>
• 添加了对设计指南修订版 A 的 <i>Digital Power SDK</i> 支持。.....	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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司