

## Design Guide: TIDA-010037

## 使用独立 ADC 的高精度分相 CT 电表参考设计



## 说明

本此参考设计使用高性能、多通道模数转换器 (ADC) 实现 0.1 级分相电能测量。该 ADC 以 8kHz 频率对电流互感器 (CT) 进行采样，以测量交流市电各分支的电流和电压。本参考设计在宽输入电流范围 (0.05 – 100 A) 内具有高精度，还支持实现独立谐波分析等电能质量功能所需的高采样频率。可以通过禁用某些软件功能来实现 32ksps 的 ADC 采样率。与集成式 SoC 相比，独立 ADC 允许灵活选择计量微控制器。本参考设计使用 SimpleLink™ ARM® Cortex® -M4 主机微控制器进行计量。必要的软件功能已在 ADC 电能计量库中实现。该软件库可以使用 Code Composer Studio™ 或 IAR Embedded Workbench® 进行编译。

## 资源

TIDA-010037	设计文件夹
ADS131M04、MSP432P4111	产品文件夹
TPS3840、TPS25921I、THVD1500	产品文件夹
ISO7731B、TRS3232E	产品文件夹
ADC 电能计量库	软件

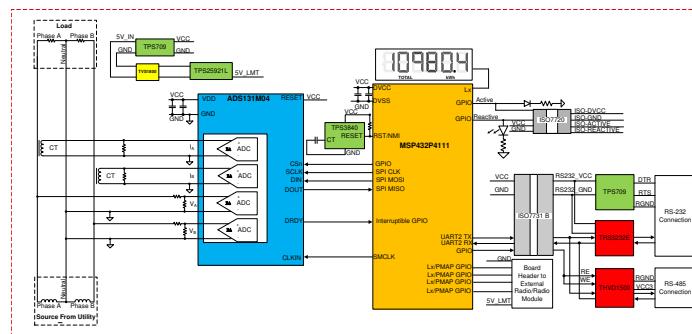
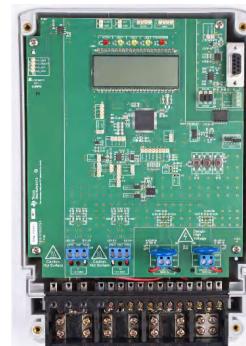
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

## 特性

- 电表分相计量，符合 10000:1 输入范围的 ANSI C12.20 0.1 级有功电能精度要求
- 有功和无功电能和功率、均方根 (RMS) 电流和电压、功率因数以及线路频率计算
- 具有 5kV<sub>RMS</sub> 隔离的隔离式 RS-232 和 RS-485
- 具有电流限制及过压和欠压保护的通信模块扩展
- 在 50mA 至 100A 输入范围内进行了测试
- 当 ADC 采样率提高到 32ksps 时，仍可获得很高的有功电能精度
- 电能计量软件，并且可在 Windows® PC GUI 上显示结果。

## 应用

- 电表
- 电源品质测定器
- 电能质量分析仪



## 1 系统说明

### 1.1 终端设备

#### 1.1.1 电表

随着公用事业提供商所需电表功能的增加，人们对具有更多功能的电表的需求也随之增加。仪表对于谐波分析等高级功能的需求与日俱增。为了满足这些需求，处理和精度要求通常也必须不断发展。例如，向电表添加谐波分析功能，可能需要增加电表采样率才能实现所需的频率范围。在提升采样频率的同时，往往必须确保测量精度不受影响，甚至还要进一步提高精度。高采样速率也意味着处理量显著增加。

随着对电表精度与数据处理能力的要求不断提升，要找到一款既能满足高精度要求，又具备强大处理性能的计量 SoC，变得愈发困难。要应对这一限制，可使用带有主机微控制器 (MCU) 的独立 ADC，以同时克服电表 SoC 的处理和精度限制。使用精确的独立式 ADC 通常具有以下优势：

- 能够满足最严格的精度要求
- 能够满足应用特定产品或计量 SoC 无法达到的最低采样率要求（不影响精度）
- 支持灵活地选择主机微控制器，因为您不必局限于选择具有高精度 ADC 的主机微控制器。能够仅根据应用要求（例如处理功能、用于记录电能使用情况的最小 RAM 和闪存存储）以及用于确保电表数据安全的微控制器安全功能来选择主机微控制器。

为了正确检测能耗，电压和电流传感器将市电电压和电流转换为 ADC 可以检测的电压范围。为了检测使用分相配电系统时的能耗，必须隔离电流传感器，使传感器正确检测两条不同线路消耗的电流，而不会损坏 ADC。因此，本身具有隔离功能的电流互感器一直用于分相、两相和三相电表的电流传感器。

在本参考设计中，通过使用独立 ADC 器件，实现了基于 CT 的 0.1 级分相电能测量。独立 ADC 可检测市电电压和电流。当有新的 ADC 样本可用时，主机 MCU 通过 SPI 总线与独立 ADC 进行通信，以获取新样本。主机微控制器利用独立 ADC 提供的最新采样数据来计算计量参数。除了计算计量参数外，主机 MCU 还驱动电路板的液晶显示器 (LCD) 并通过电路板上的隔离式 RS-232 电路或隔离式 RS-485 电路与 PC GUI 进行通信。为提供额外保护，在设计中添加了外部 SVS 器件，以便在为主机 MCU 供电的电压不足时复位主机 MCU。通常，使用外部 SVS 所带来的安全性高于主机微控制器上的内部 SVS。

在此设计中，测试软件专门支持计算分相电能测量的各种计量参数。这些参数可从校准 GUI 或 LCD 上查看。电能测量期间计算的关键参数包括：

- 有功功率、无功功率、视在功率和电能
- RMS 电流和电压
- 功率因数
- 线路频率

为了测试使用 32ksps 的 ADC 采样率时的有功电能百分比误差，对测试软件进行了精简，以便支持单相运行中使用的这些参数的子集。

该设计还支持添加外部无线电或无线电模块，以进行通信。在本设计中，这些外部无线电模块的电源轨受电流限制，以防通信模块的任何短路问题影响计量。

#### 1.1.2 电能质量监测仪，电能质量分析仪

除了用于电表外，这种独立式 ADC 架构还可用于电能质量分析仪和电能质量监测仪。电能质量监测仪和电能质量分析仪用于帮助公用事业和工业企业测量某些电能质量参数以监测和控制电能质量，如电压谐波、电流谐波、电源电压骤降、电源电压骤升以及其他参数。对于这些终端设备来说，计算电能质量参数需要大量的计算。此外，精度也很重要，这样才能满足不同电能质量参数的精度要求。正如本设计中的做法，对高精度和计算能力的要求是可以通过采用独立式 ADC 和单独主机 MCU 或处理器来充分满足的。

电能质量监测仪和电能质量分析仪通常测量的两个参数是电压谐波和电流谐波。为了进行最准确的谐波计算，应实施相干采样。实施相干采样的一种方法是，根据市电频率改变采样时钟。此设计中的独立式 ADC 能够接受变化时钟，因此可以支持相干采样。需要注意的是，虽然此设计中的独立式 ADC 的时钟可以变化，但此设计并不支持相干采样，因为采样时钟不能以适当的分辨率变化；然而，由于独立式 ADC 的时钟可以变化，因此可以在未来的设计中添加此功能。

## 1.2 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格

特性	说明
相位数	1 ( 测量两个电压的分相 ) 、 1 ( 测量一个电压的分相 ) 、 两相
电表精度等级	0.1 级
电流传感器	电流互感器
测试电流范围	0.05 - 100A
测试电压范围	15V - 240V
ADS131M04 CLKIN 频率	8,192,000Hz
ADS131M04 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制时钟频率	4,096,000Hz (= CLKIN / 2)
SPI 时钟	8,192,000Hz
过采样率 (OSR)	512
数字滤波器输出采样率	8,000 个样本/秒
相位补偿实现	软件
相位补偿分辨率	0.0088° ( 50Hz 时 ) 或 0.0105° ( 60Hz 时 )
选用的 CPU 时钟频率	48MHz
MCU 外部 SVS 电压	2.0-2.1 V
系统标称频率	50 或 60Hz
测量的参数	<ul style="list-style-type: none"> <li>有功功率、无功功率、视在功率和电能</li> <li>均方根 (RMS) 电流和电压</li> <li>功率因数</li> <li>线路频率</li> </ul>
被测参数的更新速率	约等于 1 秒
通信选项	<ul style="list-style-type: none"> <li>LCD</li> <li>通过 <math>5kV_{RMS}</math> 隔离式 RS-232 或隔离式 RS-485 实现的 PC GUI</li> <li>连接到通信接头的外部无线电或无线电模块           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5V 电压轨，限流到 1.6A，过流热关断事件后手动复位</li> <li>- 5V 电压轨测得的电源故障检测阈值 ( VIN 下降 ) = 4.05V</li> <li>- 5V 电压轨测得的解除 UVLO ( VIN 上升 ) = 4.28V</li> <li>- 5V 电压轨测得的解除过压条件 ( VIN 下降 ) = 5.62V</li> <li>- 5V 电压轨测得过压截止阈值 ( VIN 上升 ) = 5.81V</li> <li>- 必须编写自定义软件才能进行通信 )</li> </ul> </li> </ul>
使用的 LED	总有功电能和总无功电能
电路板电源	选项 1 : 3.3V 直接连接到 DVCC 轨；选项 2 : 5V 连接到 J4 接头

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

图 2-2 和图 2-1 展示的方框图显示了用于基于 ADS131M04 的分相电能测量应用的高级接口。对于双电压配置，直接测量每条火线的相电压。相比之下，对于单电压配置，仅直接测量线电压而不是相电压。

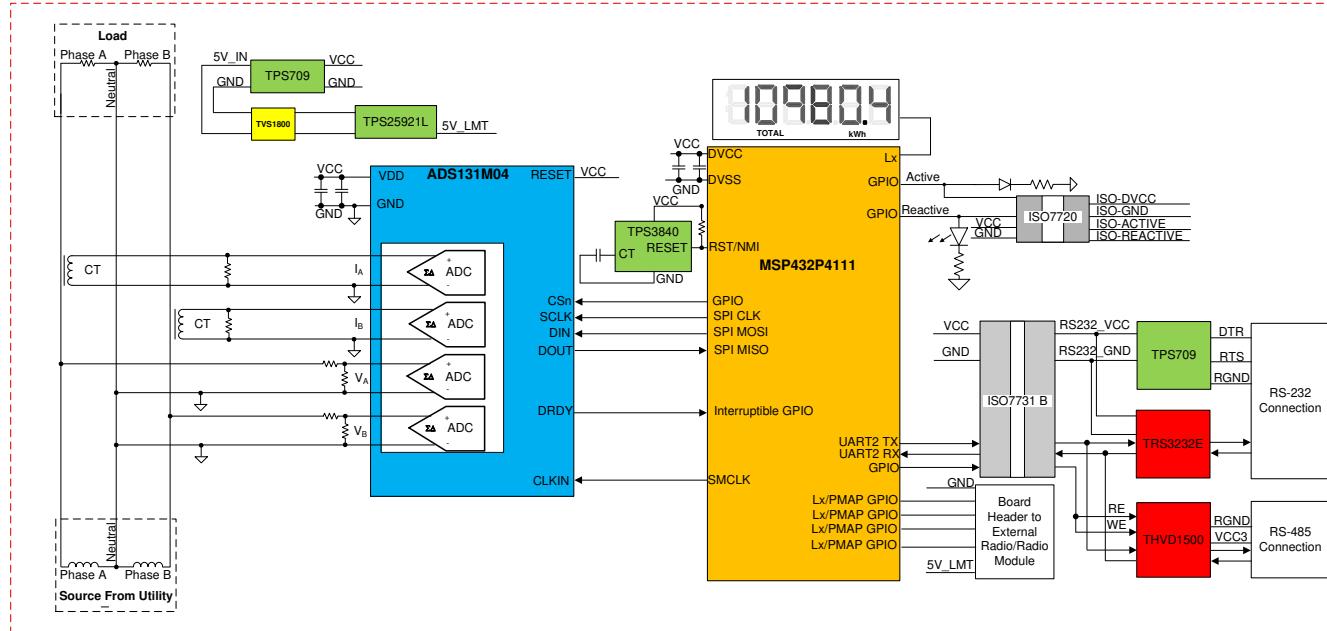


图 2-1. TIDA-010037 方框图，双电压配置

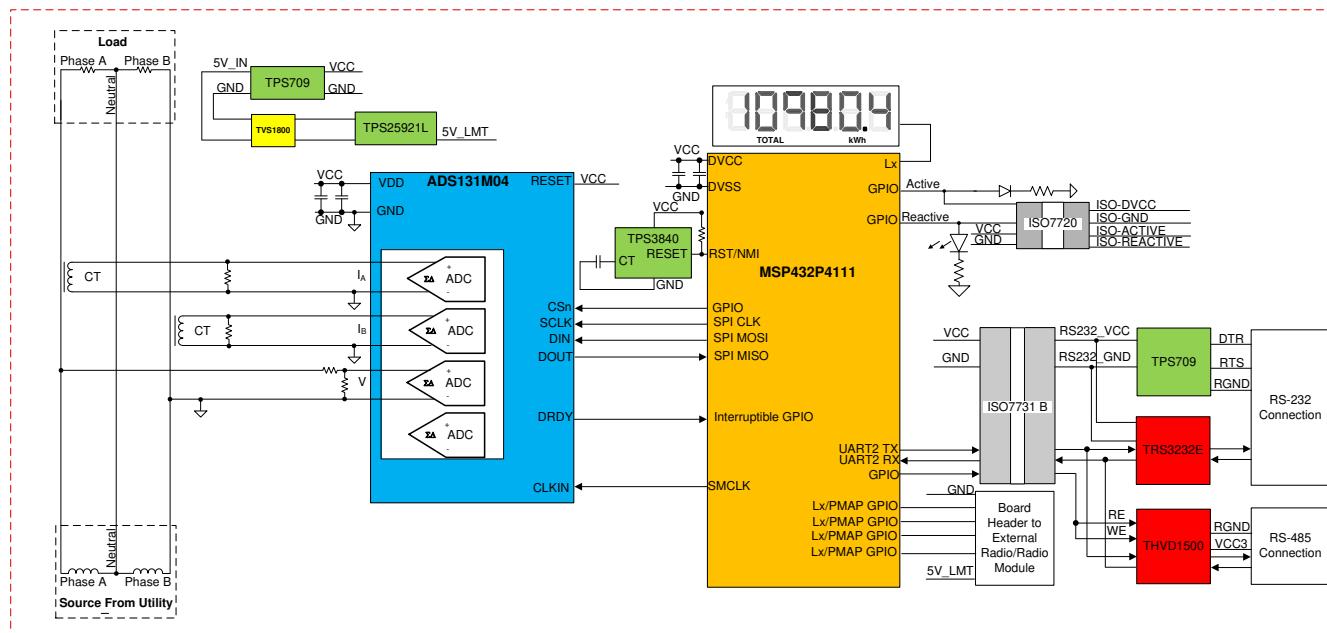


图 2-2. TIDA-010037 方框图，单电压配置

在方框图中，电流传感器连接到电流通道，并使用简单的分压器产生相应的电压。CT 有关联的负载电阻器，必须始终连接该电阻器以保护测量器件。CT 和负载电阻器的选择基于制造商和电能测量所需的电流范围。

在选择电压通道的分压电阻时，需要确保对市电电压进行分压后符合 ADS131M04 器件的正常输入电压范围。

ADS131M04 ADC 具有较大的动态范围，而测量电压时不需要较大的动态范围，因此特意选择了电压前端电路，

使 ADC 电压通道输入端的最大电压落在满量程电压范围内。通过降低馈送到 ADS131M04 ADC 电压通道的电压，电压-电流串扰（对计量精度的实际影响大于对 ADC 电压通道精度的影响）会减小（电压精度也会降低），从而在较低的电流下实现更准确的电能测量。

在本设计中，ADS131M04 器件通过以下方式与 MSP432™ MCU 进行交互：

1. ADS131M04 器件使用的 CLKIN 时钟由 MSP432 MCU 的 SMCLK 时钟信号输出提供。
2. ADS131M04 器件将其 CLKIN 引脚上提供的时钟进行二分频，并使用该分频时钟作为  $\Delta-\Sigma$  调制时钟。
3. 当新的 ADC 样本就绪时，ADS131M04 器件将  $\overline{DRDY}$  引脚置为有效，从而通知 MSP432 MCU 有新样本可用。
4. 在收到新样本通知后，MSP432 MCU 使用其中一个 SPI 接口和 DMA 从 ADS131M04 器件获取电压和电流样本。

在此设计中，TPS3840 器件用作 MSP432 MCU 的外部 SVS。尽管 MSP432 MCU 的内部 SVS 足以满足此应用需求，但本设计仍采用独立的 TPS3840 SVS 器件，因为使用独立于 MCU 的 SVS 能提供额外的安全保障。

图 2-1 和图 2-2 中的其他相关信号是用于精度测量和校准的有功和无功电能脉冲。ISO7720 器件为这些脉冲提供隔离式连接，以便连接到非隔离设备。单电压配置尤其需要这样，因为系统以该配置的两个高压线电压之一为基准。

除隔离脉冲输出外，该设计还通过采用 TPS70933、ISO7731B 和 TRS3232E 器件支持隔离式 RS-232 通信。该设计也可通过板载的 ISO7731B 和 THVD1500 器件配置为使用 RS-485 通信（替代 RS-232）。

该设计还支持使用连接到板载 J11 和 J12 接头的外部无线电或无线电模块进行通信。如果禁用 LCD，J11 接头可连接 P7.0、P7.1、P7.2 和 P7.3 端口引脚，且这些引脚可配置为端口映射 GPIO 引脚。通过将这四个引脚中的任何一个配置为通信引脚（SPI 或 UART）并适当写入和读取它们接收和发送的数据包，可以向 MSP432 MCU 中添加软件，以便与外部无线电或无线电模块进行通信。J12 接头是与无线电的电源轨和 GND 连接。J12 上的电源轨是 J4 处 5V\_IN 电源轨的限流版本。TPS25921L 器件专门对 J12 电源轨进行限流以提供 1.6A 电流。如果因为某种原因无线电模块短路或电流超过 1.6A，则该电源轨的电源将受到限制，防止电源影响该电路板计量相关部分的功率。如果发生瞬态过流事件，该模块将继续通电并不间断地运行。但是，如果模块上持续存在故障，TPS25921L 器件将进入热关断状态并断开电源。发生此热关断事件后，只能通过驱动 P5.2 GPIO 引脚手动将电源重新连接到无线电模块。此外，如果馈送到 J4 处 5V\_IN 电源轨的电压低于约 4.0V 或高于 5.8V，则 TPS25921L 器件配置为断开 J12 上的电源轨。为了保护 TPS25921L 器件免受开关时任何瞬态的影响，将 TVS1800 瞬态保护器件连接到该器件。

该设计可通过直接在 DVCC 接头 (J9) 上施加 3.3V 电压或者通过 TPS70933 器件在 5V\_IN 接头 (J4) 上施加 5V 电压）供电。有关在这两种方案中为电路板供电的正确跳线连接的更多详细信息，请参阅 表 3-1。

## 2.2 重点产品

### 2.2.1 ADS131M04

ADS131M04 器件是一款四通道、同步采样、24 位、二阶  $\Delta-\Sigma$  模数转换器 (ADC)，具有宽动态范围和内部校准功能，因此非常适合电能计量、电能质量和保护应用。ADC 输入可以直接连接到电阻分压器网络或变压器来测量电压或电流，也可连接到 Rogowski 线圈来测量电流。

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，这些器件集成了通道间相位对齐、失调电压和增益校准寄存器，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。循环冗余校验 (CRC) 选项可以在数据输入、数据输出和寄存器映射中单独启用，以确保通信完整性。图 2-3 显示了该器件的方框图。

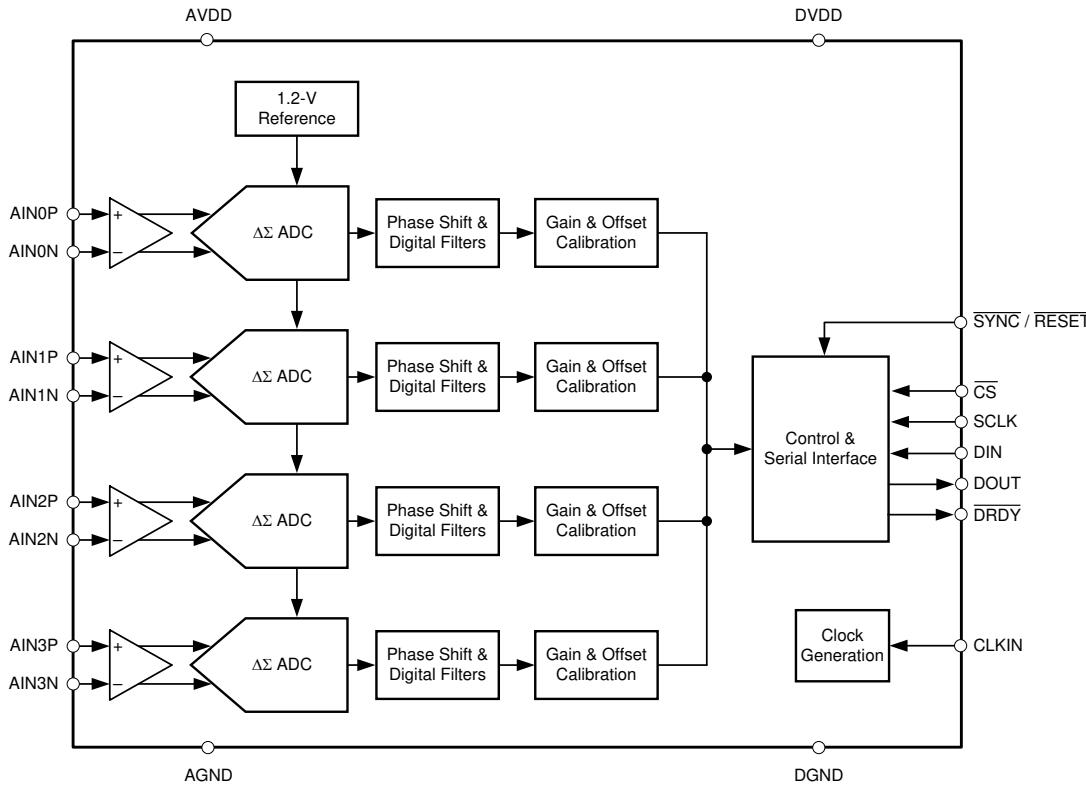


图 2-3. ADS131M04 功能框图

在图 2-3 中，必须在 AVDD 和 AGND 之间以及 DVDD 和 GND 之间馈送 2.7V-3.6V 电压。此外，必须将外部时钟连接到 CLKIN。当 ADS131M04 器件配置为高分辨率模式时，该时钟必须位于 1MHz 和 8.3MHz 之间，以便 ADS131M04 正常工作。ADS131M04 器件的 CLKIN 时钟可由 MSP432 MCU 的 SMCLK 时钟输出生成。ADS131M04 对该时钟进行二分频，然后将已分频的时钟用作  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器时钟。当新的 ADC 样本就绪时，ADS131M04 器件将 DRDY 引脚置为有效，从而通知主机 MCU 有新的 ADC 样本可用。ADS131M04 器件可以接受频率范围较宽的时钟，因此该器件本身也可用于需要相干采样的应用。

### 2.2.2 MSP432P4111

SimpleLink™ MSP432P4111 MCU 经过优化，可通过 FPU 和 DSP 扩展提供超低功耗性能。该器件包含带有浮点单元和存储器保护单元的 Arm® 32 位 Cortex®-M4F CPU、实时时钟、LCD 驱动器、端口可映射 GPIO、AES 加密和解密加速器以及多种串行通信选项。MSP432P4111 器件是 SimpleLink MCU 平台的一部分，包含 Wi-Fi®、低功耗蓝牙®、Sub-1GHz 器件和主机 MCU。所有这些器件均共用一个简单易用的通用开发环境，其中包括单核软件开发套件 (SDK) 和丰富的工具集。

此设计中的 MSP432 MCU 会从 ADS131M04 器件检索电压和电流样本，并且计算计量参数。此外，该器件还通过 RTC 模块跟踪记录时间，通过内部 LCD 驱动器模块驱动电路板上的 LCD，并使用其中一个 UART 接口，借助电路板的隔离式 RS-232 或隔离式 RS-485 电路与 PC GUI 进行通信。MSP432 MCU 的 CRC 模块还用于加速 CRC 计算，计算是为了验证由 ADS131M04 器件发送的 ADC 数据包的完整性。

### 2.2.3 TPS3840

TPS3840 系列电压监控器或复位 IC 可在高电压电平下工作，同时能够在整个 VDD 和温度范围内保持极低的静态电流。TPS3840 器件可提供优异的低功耗、高精度和低传播延迟组合。

当 VDD 上的电压降至负电压阈值 ( $V_{IT-}$ ) 以下，或者当手动复位被拉至低逻辑 ( $V_{MR_L}$ ) 时，器件的复位输出信号会被置为有效。当 VDD 升至  $V_{IT+}$  加磁滞 ( $V_{IT+}$ ) 以上，并且手动复位 ( $MR$ ) 浮动或高于  $V_{MR_H}$  且复位延时时间 ( $t_D$ ) 到期时，复位信号会被清除。通过将电容器与 CT 引脚中的接地相连，可以对复位延时时间进行编程，这是因为快速复位 CT 引脚可以保持悬空。其他功能包括低上电复位电压 ( $V_{POR}$ )、适用于  $MR$  和 VDD 的内置毛刺抑制保护、内置迟滞、低开漏输出漏电流 ( $I_{LKG(OD)}$ )。

对于电表来说，即使微控制器已经具有内部 SVS，但一些制造商仍倾向于使用外部 SVS 器件来重置系统中的任何微控制器。外部 SVS 器件有时优于使用微控制器内部的 SVS，外部选项可以比内部选项更安全，因为外部器件独立于微控制器运行。尽管 MSP432 MCU 的 SVS 足以满足此应用需求，但在此设计中添加了 TPS3840 外部 SVS 器件以提供额外一层安全保护。外部 SVS 器件有时还通过监控由市电供电的交流/直流电源轨之一，从而用来及早检测市电断电情况。

在此设计中，特别使用了 TPS3840DL20 型号，该型号具有 2V 阈值和漏极开路，低电平有功输出。

#### 2.2.4 TPS25921L

TPS25921 器件是一款设计紧凑、功能丰富的电子保险丝，具有一整套保护功能。宽工作电压范围可实现对很多常用直流母线的控制。室温下  $\pm 2\%$  的精密电流限制提供了出色的精度，因此 TPS25921 器件非常适合众多系统保护应用。该器件可为由 4.5V 至 18V 电压供电的所有系统和应用提供可靠的保护。对于热插拔电路板，该器件可提供浪涌电流控制和可编程输出斜率。

TPS25921 器件集成了过流和短路保护功能。精密过流限制有助于尽可能地减小输入电源的过设计，而快速响应短路保护功能可在检测到短路时立即将负载与输入隔离。该器件允许用户使用外部电阻器在 0.4A 和 1.6A 之间对过流限制阈值进行编程。

该器件可精确监控电压总线的欠压和过压情况，并断言下游系统的故障。其阈值精度为 3%，可确保对总线进行严密监控，无需单独的电源电压监控器芯片。TPS25921 器件旨在保护白色家电、STB、DTV、智能电表和气体分析仪等系统。

该器件的其他特性包括：

- 可在发生过流事件时安全关断的过热保护
- 针对欠压和过压故障的故障报告
- 可选择闭锁或自动重启模式

对于电表，许多制造商都使用无线通信传输数据。这些无线模块可能需要数百毫安至几安培的电流才能在信号发射期间工作。如果发生故障，导致无线模块消耗的电流超过分配给该模块的电流，则电源可能会发生故障，这时如果电表与无线模块共用同一电源而没有某种类型的电流限制，则可能会影响仪表的计量侧。为了确保在任何时候都能正确、准确地进行计量，必须采用一种方法来控制这种电流尖峰。TPS25921 器件通过限制提供给无线通信模块的电流来解决此问题。

本设计采用该器件的闭锁版本 (TPS25921L)，使系统能够选择在热关断事件后何时复位电子保险丝。当过流情况触发 TPS25921L 器件的热关断事件时，会通过快速打开该器件并触发  $\overline{FLT}$  信号来限制电流。此  $\overline{FLT}$  信号被馈送到 MSP432 MCU，让其知道发生了事件。发生热关断事件后，MSP432 MCU 可以将 ENUV 引脚拉至低电平以复位器件并再次开始为无线模块供电（假设过流情况不再存在）。

#### 2.2.5 THVD1500

THVD1500 器件是一款稳健的工业应用半双工 RS-485 收发器。这些总线引脚可耐受高级别的 IEC 接触放电 ESD 事件，因此无需使用其他系统级保护元件。

该器件由 5V 单电源供电。总线引脚具备宽共模电压范围和低输入泄漏，从而使 THVD1500 适用于长线缆上的多点应用。

THVD1500 器件采用可实现插接兼容性的业界通用 8 引脚 SOIC 封装。该器件的特征温度范围为  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $125^{\circ}\text{C}$ 。该器件还符合或超过 TIA/EIA-485A 标准和中国国家电网公司 (SGCC) 第 11 部分串行通信协议 RS-485 标准中的要求。

在本设计中，特别使用该器件来进行 UART 信号到 RS-485 信号的转换。

#### 2.2.6 ISO7731B

为了将隔离添加到 PC 的 RS-232 和 RS-485 连接，此参考设计的隔离式 RS-232 和隔离式 RS-485 部分使用电容式电隔离，与光隔离器相比，电隔离具有固有的使用寿命优势。尤其是工业器件的使用时间通常比消费类电子产品长得多；因此，在 15 年或更长时间内保持有效隔离非常重要。

此参考设计的 RS-232 和 RS-485 电路中使用的 ISO7731B 器件型号提供符合 UL 标准的长达 1 分钟、高达  $5\text{kV}_{\text{RMS}}$  的电隔离。此数字隔离器有三个隔离通道，其中两个通道是正向通道，另一个是反向通道。在此设计中，TX 和 RX 使用了两个隔离通道。如果选择使用 RS-485 进行通信，则第三个隔离通道用于控制信号，该信号用来启用接收器或驱动器。如果选择 RS-232，则不需要第三个隔离通道。如果客户的系统需要 RS-232 而不是 RS-485，则只需要两个隔离通道，因此可以使用双通道 ISO7721B 器件来降低成本，而不是使用三通道 ISO7731B 器件（请记住，这两个器件无法引脚对引脚兼容）。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲区均由双电容二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 绝缘栅相隔离。此芯片支持 100Mbps 的信令速率。这些芯片可在 2.5V、3.3V 和 5V 电源和逻辑电平下运行。

### 2.2.7 TRS3232E

为了正确对接 RS-232 标准，需要一个电压转换系统，用于在电路板上的 3.3V 域与端口本身的 12V 之间进行转换。为了方便转换，本设计使用了 TRS3232E 器件。TRS3232E 器件能够通过电荷泵系统，仅从 3.3V DVCC 驱动 RS-232 端口上的更高电压信号。

TRS3232E 器件由两个线路驱动器、两个线路接收器和一个双电荷泵电路组成，具有引脚对引脚（串行端口连接引脚，包括 GND） $\pm 15\text{kV}$  静电放电 (ESD) 保护。该器件满足电信行业协会和电子工业联盟 TIA/EIA-232-F 的要求，可以在异步通信控制器和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 3V 至 5.5V 单电源供电。这些器件以高达 250kbps 的数据信号传输速率和最大值为 30V/ $\mu\text{s}$  的驱动器输出压摆率运行。

### 2.2.8 TPS709

要为隔离边界的 **数据终端设备 (DTE)** 侧和 RS-232 电荷泵供电，有两种选择。接口可以实现隔离式电源，也可以从 RS-232 线路获取电源。集成电源会增加系统的成本和复杂性，在低成本检测应用中很难证明其合理性。

为了实现第二个选项，即通过 RS-232 端口本身获取电源，此参考设计使用了大多数嵌入式应用中忽视的流控制线路。RS-232 规范（当在主机或适配器电缆上正确实现时）会在端口处于工作状态时，使请求发送 (RTS) 线路和数据终端就绪 (DTR) 线路保持高电平。只要主机的 COM 端口开启，这两条线路就会保持自身电压。此电压可在 5V 至 12V 之间变化，具体取决于驱动器的实现情况。5V 至 12V 足以满足本设计的使用要求。

电压会通过一个二极管装置，以便阻止信号返回引脚。电压会对电容器充电以存储能量。当隔离栅和电荷泵所拉的电流大于瞬时允许的电流时，电容器会释放此能量。TPS70933 器件用于将线电压降至电荷泵和隔离器件的工作电压。

除了在 RS-232 电路中使用之外，还会再使用一个 TPS709 器件，以便将来自 5V\_IN 电源轨的 5V 输入电压向下调节至 3.3V，用于为电路板上的大多数元件供电。

TPS70933 线性稳压器是一款超低静态电流器件，设计用于功耗敏感型应用。高精度带隙与误差放大器可提供 2% 的过热精度。这些器件的静态电流仅为  $1\mu\text{A}$ ，因此对于由电池供电且要求极低空闲功耗的常开系统而言，是理想的解决方案。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。通过将使能 (EN) 引脚下拉至低电平可将这些稳压器置于关断模式。该模式的关断电流低至  $150\text{nA}$ （典型值）。

### 2.2.9 TVS1800

TVS1800 器件可将高达 40A 的 IEC 61000-4-5 故障电流进行可靠分流，以保护系统免受高功率瞬态冲击或雷击。该器件为满足常见的工业信号线路 EMC 要求提供了解决方案，可通过  $42\Omega$  电阻进行耦合的方式承受最高  $\pm 1\text{kV}$  IEC 61000-4-5 开路电压。TVS1800 器件使用独特的反馈机制确保在故障期间发挥精确的平缓钳位能力，从而保证系统接触电压低于 25V。精确的电压调节允许设计人员放心地选择具有较低电压容差的系统组件，从而能够在不影响可靠性的情况下降低系统成本和复杂度。此外，TVS1800 器件采用小型 2mm × 2mm SON 封装，非常适合空间受限的应用，与业界通用 SMA 和 SMB 封装相比，其尺寸可减小 70%。器件的漏电流和电容都非常低，可最大限度减少保护线路所受影响。为了确保在产品的整个寿命期间提供可靠保护，TI 在高温环境下对 TVS1800 器件进行了 5,000 次重复浪涌冲击测试，但器件性能未发生任何变化。在本设计中，TVS1800 器件布置在 TPS25921L 器件的输入端，以保护其免受在过流、过压或欠压事件期间 TPS25921L 断开负载时产生的任何瞬态电压的影响。

### 2.2.10 ISO7720

ISO772x 器件是高性能双通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的  $5000\text{V}_{\text{RMS}}$  (DW 封装) 和  $3000\text{V}_{\text{RMS}}$  (D 封装) 隔离额定值。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，

ISO772x 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区均由二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 绝缘栅相隔离。ISO7720 器件具有两条同向通道，而 ISO7721 器件具有两条反向通道。在输入电源或信号丢失的情况下，无 F 后缀器件的默认输出为高电平，而带 F 后缀器件的默认输出为低电平。通过创新的芯片设计与布局技术，ISO772x 器件的电磁兼容性得到了显著增强，从而简化了系统级静电放电、快速瞬变脉冲、浪涌和电磁发射符合性设计。ISO772x 系列器件采用 16 引脚 SOIC 宽体 (DW) 和 8 引脚 SOIC 窄体 (D) 封装。

为了测试电表的有功电能和无功电能精度，脉冲以与能耗成比例的速率输出。然后，参考表可根据这些脉冲和向电表提供的电能来计算误差，从而确定电表精度。在此参考设计中，脉冲针对累积的有功和无功能耗通过接头输出。使用 ISO7720 器件可提供隔离式接头来连接到非隔离式设备，这在设计配置为单电压工作时尤其需要，因为该设计以其中一条高压线路连接为基准。此设计采用 ISO7720 器件的 D 封装，可为这些信号提供 3000V<sub>RMS</sub> 的隔离电压。通过在隔离侧的 VCC (ISO\_VCC) 和 GND (ISO\_GND) 之间施加所选的最大电压输出，可以将这些隔离式有功和无功信号设置为具有最大 3.3V 或 5V 电压输出。

## 2.3 设计注意事项

### 2.3.1 设计硬件实现

#### 2.3.1.1 限流器电路

在智能电表中，通常需要限制流入系统中任何通信无线电的电流。限制通信器件的电流可防止任何问题影响计量，无论是意外短路意外引起的问题，还是有人为了篡改电表而故意引起的问题。当设计配置正确后，接头 J3 处的电压轨受到电流限制，因此可将其用于为外部无线电或无线电模块供电，同时确保无线电模块上的任何短路都不会影响计量或系统的任何其他部分。图 2-4 展示了此设计中使用的限流电路。

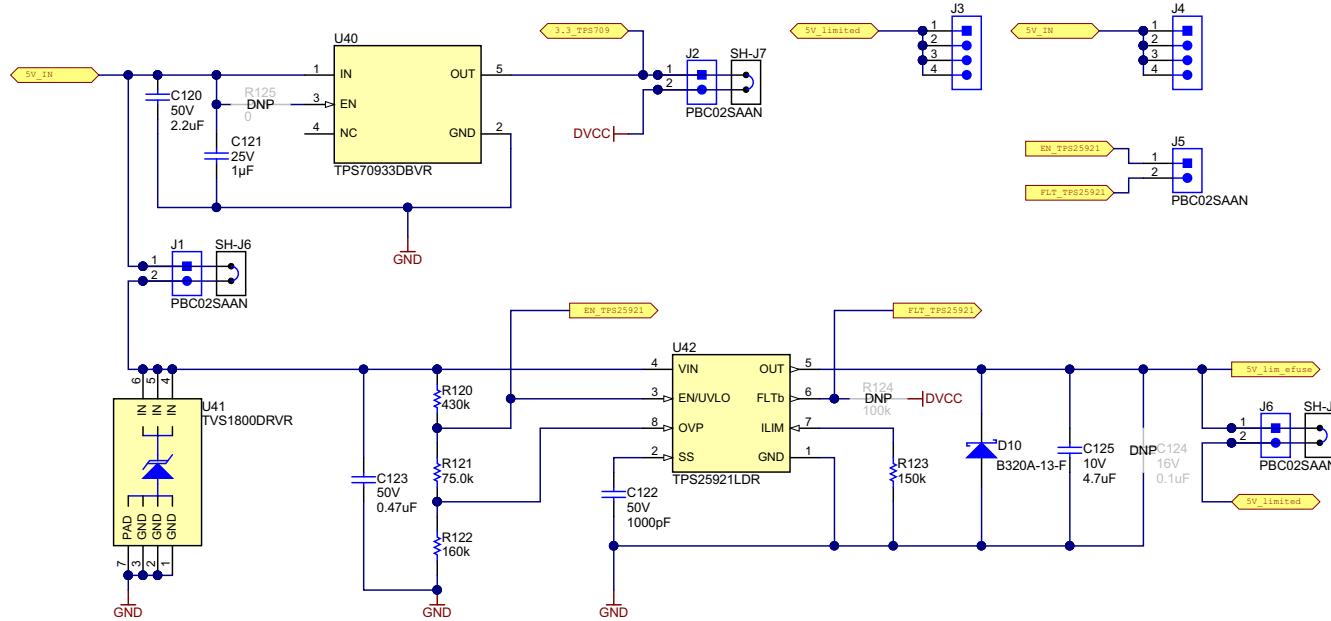


图 2-4. 限流电路

本设计中的限流功能由 TPS25921L 电子保险丝器件执行，该器件通过连接到 J4 上接头的电源为连接到 J3 接头的负载供电。为确保正常运行，连接到 J4 的电源提供的电压为 5V。TPS70933 LDO 可用于通过 J4 上施加的 5V 电压为 ADS131M04 器件和 MSP432 MCU 生成 3.3V 电压轨，这样就只需要一个输入电压轨。

如果提供给 J4 的电压低于 4.036V (基于内部欠压锁定电压) 或高于 5.78V，则 J4 处的电源将与 J3 处的负载断开连接。此外，如果负载消耗的电流超过 1.6A，最终会触发热关断并且电源与负载断开连接。在过压、欠压或热关断事件期间，连接到 TPS25921L 器件上 FLTb 引脚的 FLT\_TPS25921 GPIO 引脚被置为低电平。在热关断事件期间，TPS25921L 器件保持关断状态，直到切换 EN\_TPS25921 GPIO 引脚。如果过流条件立即得到处理并且之前没有出现过压、欠压或热关断事件，则在测试软件中，TPS25921L 器件仅在热关断后通过切换 EN\_TPS25921 GPIO 引脚复位。

在图 2-4 中，根据所需的过压阈值选择 R120、R121 和 R122。此外，根据所需的电流限值选择 R123。有关选择 R120、R121、R122 和 R123 新值以更改过压阈值和限流阈值的详细信息，请参阅 [TPS25921x 具有精密电流限制和过压保护功能的 4.5 V - 18 V 电子保险丝数据表](#)。在本设计中，内部欠压锁定电压用作欠压阈值。

将电源与负载断开可能会导致 TPS25921L 的输入端和输出端出现瞬变。为了保护 TPS25921L 器件免受开关时瞬态电压在输入端的影响，使用了 TVS1800 浪涌保护器件（图 2-4 中的 U41）。为了保护负载免受开关时瞬态电压的影响，使用了齐纳二极管（图 2-4 中的 D10）。

### 2.3.1.2

#### 2.3.1.3 TPS3840 SVS

TPS3840 器件是一款外部电源电压监控器 (SVS)，用于从外部复位 MSP432 MCU。TPS3840 可保持极低的静态电流，因此在发生断电且电表由备用电池供电时仍可使用此器件。MSP432 MCU 还有一个内部 SVS 器件可供使用，该器件能够胜任此应用；但是，使用外部 SVS 而不使用微控制器的内部 SVS 会额外增加安全性，因为它并未独立于微控制器，因此，受影响微控制器本身的问题的影响较小。

此设计专门使用了 TPS3840DL20 器件型号，其负电压阈值电压为 2V。当为 MSP432 MCU 供电的电压轨降至 2V 以下时，TPS3840 器件会复位 MSP432 MCU。当被监控电压上升到高于欠压阈值与迟滞电压值的和（总计约等于 2.1V）时，TPS3840 的 RESET 引脚在经过用户定义的复位延迟时间  $t_D$  后被拉回高电平。 $t_D$  是根据连接到 TPS3840 器件 CT 引脚的电容器的值确定的。在此设计中，0.33 $\mu$ F 电容器连接到 TPS3840 器件的 CT 引脚，产生的复位延迟时间约为 204ms。

TPS3840 器件可提供推挽输出和开漏输出。由于建议在 MSP432 MCU 的 JTAG 电路中使用 47k $\Omega$  上拉电阻，因此该设计专门选择了开漏输出。

#### 2.3.1.4 模拟输入

此设计中的模拟前端由 ADS131M04  $\Delta$ - $\Sigma$  独立式 ADC 构成。每个 ADS131M04 转换器均为差分，并要求引脚上的输入电压不超过  $\pm 1.2V$ （增益 = 1）。为了满足此输入电压规格，必须对电流和电压输入进行分压。此外，ADS131M04 器件可检测低至 -1.2V 的电压；因此，无需电平转换器即可直接连接市电交流信号。本小节将介绍用于电压和电流通道的模拟前端。

##### 2.3.1.4.1 电压测量模拟前端

市电的标称电压为 100V 至 240V，因此需要按比例缩小该电压，使其能被 ADC 检测到。图 2-5 显示了用于这一电压调节的模拟前端。J28 是施加电压的位置。

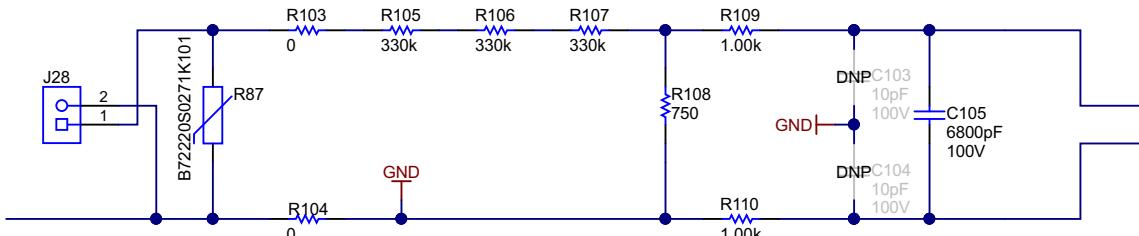


图 2-5. 电压输入的模拟前端

在电压的模拟前端中，包括尖峰保护压敏电阻 (R87)、电磁干扰滤波器磁珠封装（电阻器封装 R103 和 R104）、分压器网络（R105、R106、R107 和 R108），以及 RC 低通滤波器（R109、R110、C103、C104 和 C105）。

在较低电流下，如果不执行功率偏移校准，则电压-电流串扰对有功电能精度的影响要远大于对电压精度的影响。为了最大限度地提高在这类较低电流下的精度，在本设计中，电压通道并未使用整个 ADC 范围。ADS131M04 器件是高精度 ADC，因此即使此设计中的电压通道使用更小的 ADC 范围，仍可为测量电压提供足够的精度。[方程 1](#) 显示了在给定的市电电压和选定的分压器电阻值下，如何计算馈入 ADC 电压通道的差分电压范围。

$$V_{ADC\_Swing, Voltage} = \pm V_{RMS} \times \sqrt{2} \left( \frac{R_{108}}{R_{105} + R_{106} + R_{107} + R_{108}} \right) \quad (1)$$

根据此公式和图 2-5 中选定的电阻值，对于 120V 市电电压（在火线与零线之间测得），使用双电压配置时，ADC 电压通道输入信号的电压摆幅为  $\pm 128\text{mV}$  ( $91\text{mV}_{\text{RMS}}$ )。在单电压配置中，对于 120V 市电电压（在火线与零线之间测得），由于测量的是线电压而不是相电压，因此将 240V 输入图 2-5 中的前端电路。前端电路的 240V 输入产生  $\pm 257\text{mV}$  ( $182\text{mV}_{\text{RMS}}$ ) 的电压摆幅。用于双电压和单电压配置的  $\pm 128\text{mV}$  和  $\pm 257\text{mV}$  电压范围完全在  $\pm 1.2\text{V}$  输入电压范围内，对于用于电压通道的选定 PGA 增益值 1，ADS131M04 器件可以检测到它们。

请注意，从一个转换器转到另一个转换器时，ADS131M04 上的  $\text{AIN}_{\text{N}}\text{P}$  和  $\text{AIN}_{\text{N}}\text{N}$  引脚顺序会切换。例如， $\text{AIN}_{\text{2P}}$  为引脚 7， $\text{AIN}_{\text{2N}}$  为引脚 8，而  $\text{AIN}_{\text{3N}}$  为引脚 9， $\text{AIN}_{\text{3P}}$  为引脚 10。该交换顺序是导致正极输入电压和负极输入电压的顺序在 A 相 J28 电压输入端子块和 B 相 J29 电压输入端子块之间进行交换的原因。

### 2.3.1.4.2 电流测量模拟前端

用于电流输入的模拟前端不同于用于电压输入的模拟前端。图 2-6 显示了用于电流通道的模拟前端，其中 CT 的正极和负极引线连接到接头 J26 的引脚 1 和 3。图 2-6 中的接头 J26 连接至 ED120/3DS。

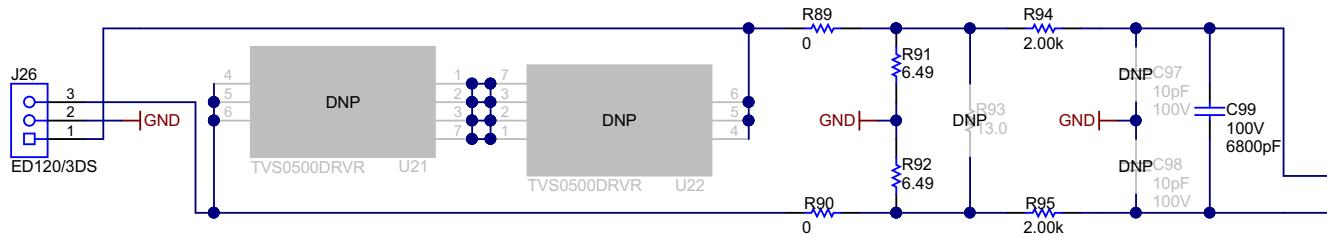


图 2-6. 电流输入的模拟前端

电流模拟前端包括电磁干扰滤波器磁珠占用区 (R89 和 R90)、电流互感器的负载电阻 (R91 和 R92)，以及用作抗混叠滤波器的 RC 低通滤波器 (R94、R95、C97、C98 和 C99)。此外，还提供 U21 和 U22 封装，如有需要，可以用 TVS0500 器件替代以提供额外的浪涌防护。

如图 2-6 所示，电阻 R91 和 R92 是负载电阻且彼此串联。为获得出色 THD 性能，在将公共点连接到 GND 的情况下，使用两个相同的串联负载电阻，而不是使用一个负载电阻。此分载电阻配置可确保馈送到 ADC 正负端子的波形彼此具有 180 度相位差，从而为此 ADC 提供出色的 THD 结果。总负载电阻是根据使用的电流范围和 CT 的匝数比规格来选择的（此设计使用匝数比为 2000 的 CT）。此设计的负载电阻总值为  $12.98\Omega$ 。

方程式 2 显示了如何针对给定最大电流、CT 匝数比和负载电阻值计算馈入电流 ADC 通道的差分电压范围。

$$V_{\text{ADC\_Swing, Current}} = \pm \frac{\sqrt{2} (R_{91} + R_{92}) I_{\text{RMS, max}}}{\text{CT}_{\text{URNS\_RATIO}}} \quad (2)$$

根据 100A 最大电流、2000 CT 匝数比和  $12.98\Omega$  负载电阻，在此设计中，当应用电表的最大电流额定值 (100A) 时，电流 ADC 输入信号的最大电压摆幅为  $\pm 918\text{mV}$  ( $649\text{mV}_{\text{RMS}}$ )。对于用于电流通道的所选 PGA 增益 1，此  $\pm 918\text{mV}$  最大输入电压完全在器件的  $\pm 1.2\text{V}$  输入范围内。

请注意，从一个转换器转到另一个转换器时，ADS131M04 上的  $\text{AIN}_{\text{N}}\text{P}$  和  $\text{AIN}_{\text{N}}\text{N}$  引脚顺序会切换。例如， $\text{AIN}_{\text{0P}}$  为引脚 3， $\text{AIN}_{\text{0N}}$  为引脚 4，而  $\text{AIN}_{\text{1N}}$  为引脚 5， $\text{AIN}_{\text{1P}}$  为引脚 6。该交换顺序是导致 CT 正极输出端子和负极输出端子的顺序在 A 相 J26 电流输入端子块和 B 相 J27 电流输入端子块之间交换的原因。

### 2.3.2 如何实现计量测试软件

用于评估此设计的 MSP432 软件是测试软件。本节将讨论测试软件的功能，让您了解如何实现用于计量测试的自定义软件。第一小节将讨论 ADS131M04 器件和 MSP432 MCU 上各种外设的设置。随后，计量软件被描述为两个主要进程：前台进程和后台进程。

本参考设计中包含的测试数据是使用通用测试代码获取的。此后，该测试代码已进一步开发为电能计量库软件。

对于所有新设计，TI 建议使用 ADC 电能计量库软件包。该软件包含支持 ADC 与 ARM® Cortex®-Mx 微处理器 (MCU) 之间进行通信的硬件抽象层，还有一个用于计算电能测量值的计量计算库。该软件库在 ARM® Cortex®-M4 MSP432P 微处理器上开发和测试，但也可以使用自带的硬件抽象层移植到其他 ARM® Cortex®-Mx

微处理器上。该软件中还包括 Windows® PC GUI，用于显示 TIDA-010036 和 TIDA-010037 参考设计中的计量参数。

### 2.3.2.1 设置

#### 2.3.2.1.1 时钟

根据 MSP432 MCU 的配置，其 CPU 时钟 (MCLK) 设置为 48MHz，且其子系统主时钟 (SMCLK) 设置为 8.192MHz。MCLK 的时钟源是 MSP432 MCU 的内部 DCO，其频率配置为 48MHz。SMCLK 的时钟源为外部 16.384MHz 晶体，该晶体在内部经过 2 分频，产生 8.192MHz 的 SMCLK 频率。外部 32.768kHz 晶体用作该器件辅助时钟 (ACLK) 的时钟源。将该 ACLK 时钟设置为 32.768kHz 频率。

#### 2.3.2.1.2 端口映射

MSP432 MCU 具有一个端口映射控制器支持将数字功能灵活映射到端口引脚。可移植到其他引脚的数字功能集取决于器件。特别是对于 MSP432 器件而言，EUSCIB0 SPI 模块的 SPI 时钟、SOMI 和 SIMO 功能都可移植到 P2、P3 和 P7 端口上的可用选项。此外，SMCLK 时钟输出同样可配置为输出到 P2、P3 或 P7 端口。在测试软件中，利用该端口映射特性以提高 PCB 布局的灵活性。

使用端口映射控制器，便会用到以下映射：

- PMAP\_SMCLK ( SMCLK 时钟输出 ) → 端口 P2.0 ( 连接到 ADS131M04 器件的 CLKIN 引脚，用于为 ADS131M04 生成调制器时钟。但请注意，此映射在初始化前未启用，只有在 ADS131M04 初始化完成后才会启用 )；这对应于接头 J32 的引脚 1，在电路板上标注为 SMCLK
- PMAP\_UCB0SIMO (EUSCIB0 SPI SIMO) → 端口 P2.1 ( 连接到 ADS131M04 器件的 DIN 引脚 )；这对应于接头 J32 的引脚 2，在电路板上标记为 SPI DOUT
- PMAP\_UCB0SOMI (EUSCIB0 SPI SOMI) → 端口 P2.2 ( 连接到 ADS131M04 器件的 DOUT 引脚 )；这对应于接头 J32 的引脚 3，在电路板上标记为 SPI DIN
- PMAP\_UCB0CLK ( EUSCIB0 SPI 时钟 ) → 端口 P2.3 ( 连接到 ADS131M04 器件的 SCK 引脚 )；这对应于接头 J32 的引脚 4，在电路板上标记为 SPI CLK

#### 2.3.2.1.3 用于 GUI 通信的 UART 设置

MSP432 MCU 配置为通过此参考设计上的 RS-232 或 RS-485 连接与 PC GUI 进行通信。MSP432 MCU 使用具有 8N1 和 9600 波特配置的 UART 模块与 PC GUI 进行通信。

#### 2.3.2.1.4 实时时钟 (RTC)

MSP432 MCU 的实时时钟模块配置为提供精确的一秒中断，并根据需要更新时间和日期。

#### 2.3.2.1.5 LCD 控制器

MSP432P4111 MCU 上的 LCD 控制器最多可支持 8 路复用显示屏和 320 个段或 4 路复用显示屏和 176 个显示段。在当前设计中，LCD 控制器配置为在使用 144 个段的 4 路复用模式下工作。8 段线路未在此设计的 4 路复用模式下使用，而是用于端口映射功能。在此参考设计中，LCD 配置如下：刷新率设置为 ACLK/64，即 512Hz。为了进行对比度控制，在 R23、R13、R03 引脚和 GND 之间添加了外部电阻器，如图 2-7 所示。

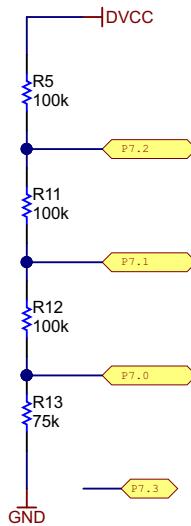


图 2-7. LCD 外部电阻器

如果不需要 LCD 并且 P7.0、P7.1 或 P7.2 用于某些其他功能（例如与外部无线电模块进行通信），请移除图 2-7 的电阻器并使用软件实现所需的自定义功能。

#### 2.3.2.1.6 直接存储器存取 (DMA)

直接存储器存取 (DMA) 模块在 MSP432 MCU 和 ADS131M04 器件之间传输数据包，且 MSP432 CPU 的带宽要求极低。两个 DMA 通道用于与 ADS131M04 进行通信。一个通道（通道 0）用于向 ADS131M04 发送数据，另一个通道（通道 1）用于从 ADS131M04 接收数据。一旦从 ADS131M04 接收到一个完整的数据包，就会产生一个中断以完成任何必要的传输后处理，例如 CRC 验证和数据包组装。图 2-12 显示了使用 MSP432 MCU 的 DMA 发送和接收的数据包。

#### 2.3.2.1.7 ADC 设置

图 2-8 显示了用于初始化 ADS131M04 的过程。当 MSP432 MCU 复位后首次设置 ADS131M04 以及每次执行校准时均遵循此流程。

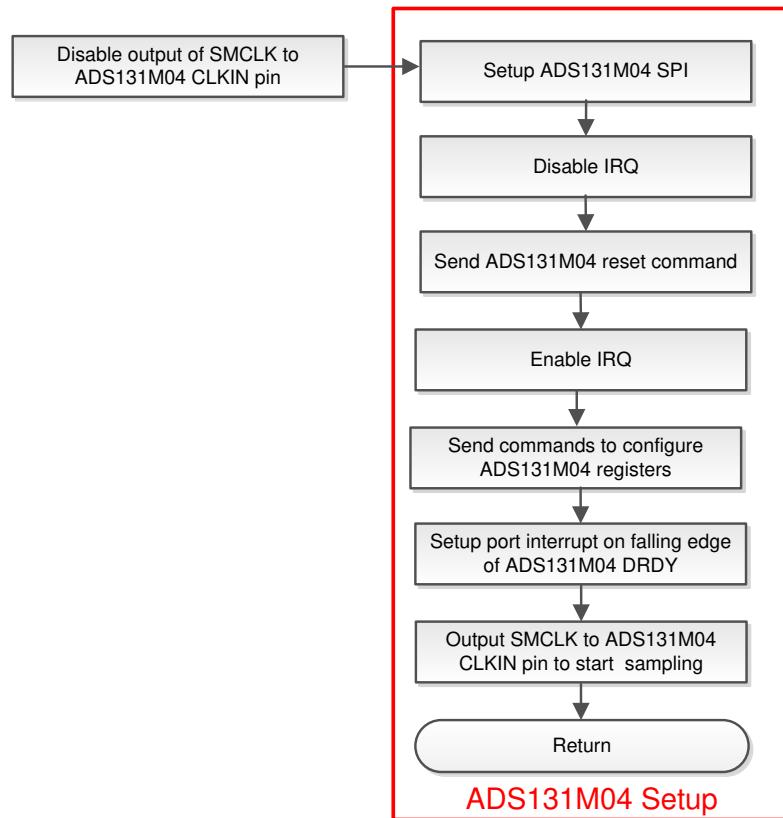


图 2-8. ADC 初始化和同步过程

在设置 ADS131M04 器件之前，ADS131M04 的调制器时钟被禁用，防止 ADS131M04 在尝试设置期间时生成新样本。该调制器时钟是通过禁用 MSP432 MCU 的 SMCLK 输出禁用的，该输出馈送到 ADS131M04 的 CLKIN 引脚。只需在校准后而不是在 MSP432 MCU 复位事件后禁用 SMCLK 输出，因为在 MSP432 MCU 复位后 SMCLK 时钟输出不会自动输出。

SMCLK 输出禁用后，配置 MSP432 MCU 的 EUSCIB0 SPI 模块，以便与 ADS131M04 器件进行通信。

EUSCIB0 SPI 模块专门配置为使用 3 线模式的主器件（片选信号在测试软件中手动置位为高电平和低电平，而不是使用 SPI 模块的片选功能）并具有源自 8.192MHz SMCLK 时钟的 8.192MHz SPI 时钟。设置 SPI 后，所有中断均被禁用，并且复位命令通过 SPI 从 MSP432 MCU 发送到 ADS131M04。然后重新启用中断，并且 MSP432 MCU 向 ADS131M04 发送命令以配置其寄存器。

此时，请注意，调制时钟尚未由 **MSP432 MCU** 输出，这意味着采样尚未开始。通过向 **ADS131M04** 发送命令以初始化 **ADS131M04** 寄存器，可以针对以下条件配置 **ADS131M04**：

- **MODE** 寄存器设置：使用 16 位 CCITT CRC，ADS131M04 数据包中每个字的长度为 24 位，在启用最滞后的通道上  $\overline{DRDY}$  信号置为有效，当转换值不可用时  $\overline{DRDY}$  置为高电平，当转换值准备就绪时  $\overline{DRDY}$  置为低电平
  - **GAIN1** 寄存器设置：所有四个 ADC 通道均使用 PGA 增益 1
  - **CFG** 寄存器设置：禁用电流检测模式
  - **CHx\_CNG** 寄存器设置（其中，x 为通道编号）
    - 双电压模式：所有四个 ADC 通道输入都连接到外部 ADC 引脚，且每个通道的通道相位延迟都设为 0（注意使用软件相位补偿而不是 ADS131M04 硬件相位补偿）
    - 单电压模式：通道 0、1 和 2 输入连接到外部 ADC 引脚，且通道 0、1 和 2 的通道相位延迟都设为 0（注意使用软件相位补偿而不是 ADS131M04 硬件相位补偿）；由于通道 3 不用于此配置，因此未修改通道 3 config 寄存器。
  - **CLOCK** 寄存器设置：512 OSR，所有通道均已启用，高分辨率调制器功率模式

ADS131M04 寄存器正确初始化后，MSP432 MCU 配置为在  $\overline{DRDY}$  引脚上出现下降沿的任何时候生成端口中断，这表明 ADS131M04 有新电流样本可用。接下来，MSP432 MCU 将 SMCLK 时钟输出到 ADS131M04，开始电压和电流采样。

ADS131M04 调制器时钟源自馈送到 CLKIN 引脚的时钟，MSP432 MCU 的 SMCLK 输出会输出该馈送时钟。馈送到 ADS131M04 器件 CLKIN 引脚的时钟在内部进行二分频后，即可生成 ADS131M04 调制器时钟。因此，ADS131M04 的采样频率定义为  $f_s = f_M / OSR = f_{CLKIN} / (2 \times OSR)$ ，其中  $f_s$  为采样率， $f_M$  为调制器时钟频率， $f_{CLKIN}$  为馈送到 ADS131M04 CLKIN 引脚的时钟，OSR 为所选的过采样率。在此设计中，馈送到 ADS131M04 CLKIN 引脚的 MSP432 MCU 的 SMCLK 时钟的频率为 8.192MHz。所选的过采样率 512。因此，ADS131M04 调制器时钟设置为 4.096MHz，采样率设置为 8000 个样本/秒。

对于测量每个相电压的双电压系统，至少需要四个 ADC 通道来独立测量两个电压和两个电流。在此设计中，以下 ADS131M04 通道映射在软件中用于双电压配置：

- AIN0P 和 AIN0N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电流 I1 (A 相电流)
- AIN1P 和 AIN1N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电流 I2 (B 相电流)
- AIN2P 和 AIN2N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电压 V1 (A 相相电压)
- AIN3P 和 AIN3N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电压 V2 (B 相相电压)

对于平衡分相系统，每个相电压都应为线电压的一半。在本设计的单电压配置中，仅测量线电压。线电压读数除以 2 (这种分压通过遵循校准过程自动完成)，得到每相的相电压。因此，软件中使用相同的 ADC 样本来计算两个相位的 RMS 电压和功率。该配置使用三个 ADC 通道：一个用于测量线电压，另外两个用于测量两个电流。在此设计中，以下 ADS131M04 通道映射在软件中用于单电压配置：

- AIN0P 和 AIN0N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电流 I1 (A 相电流)
- AIN1N 和 AIN1P ADS131M04 ADC 通道引脚 → 电流 I2 (B 相电流)
- AIN2P 和 AIN2N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 线电压 (A 相线电压 - B 相线电压)
- AIN3P 和 AIN3N ADS131M04 ADC 通道引脚 → 设计中未使用

由于在单电压配置中测量的线电压是 A 相线电压 - B 相线电压而不是 B 相线电压 - A 相线电压，因此 B 相电流的方向应反转，方法是交换 B 相电流互感器的正负输出端子的连接位置、交换馈送到设计中 B 相电流输入端的电流的极性，或者使用和 A 相同样的输入电流和 CT 输出端子极性但仅在软件中将电流通道 ADC 输入通道置为无效。为防止在从双电压模式切换到单电压模式时不得不进行任何硬件更改，本设计通过在测试软件中选择将 B 相电流通道值置为无效的选项来反转电流通道的极性。

### 2.3.2.2 前台进程

前台进程包括 MSP432 硬件和软件的初始设置，以及器件复位后立即进行的 ADS131M04 寄存器设置。图 2-9 展示了此过程的流程图。

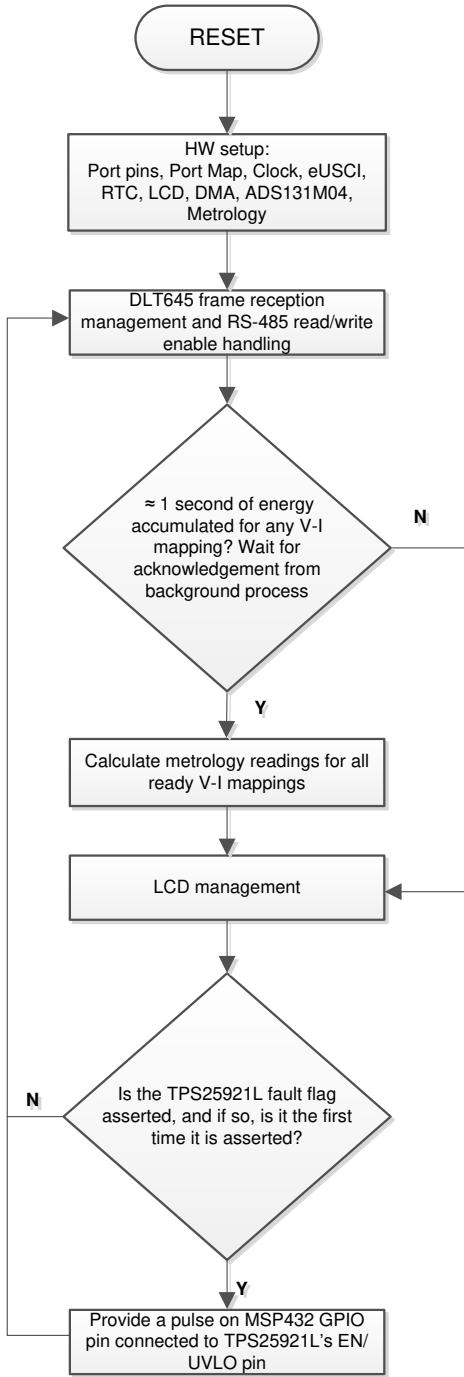


图 2-9. 前台进程

初始化例程涉及以下方面的设置：MSP432 通用输入/输出 (GPIO) 端口引脚和相关的端口映射控制器、MSP432 时钟系统、MSP432 USCI\_A0 (用于 UART 功能)、MSP432 RTC 模块 (用于时钟功能)、MSP432 LCD、MSP432 DMA、ADS131M04 寄存器以及 MSP432 计量变量。

硬件设置完成后，从 GUI 接收到的任何帧都会被处理。如果选择了 RS-485 与 PC GUI 进行通信，THVD1500 器件必须驱动 RE 和 DE 引脚信号，在适当的时间点启用接收器和驱动器，以接收来自 PC GUI 的数据包并将响应

发送回 GUI。任何数据包从 MSP432 MCU 发送到 PC GUI 后，前台进程负责在数据包完全从 MSP432 MCU 发出之后、GUI 发送下一数据包之前，将 RE 和 DE 引脚置为有效。

接下来，前台进程检查后台进程是否已通知前台进程为任何电压-电流映射计算新的计量参数。该通知是在存在可处理的数据帧时通过使“PHASE\_STATUS\_NEW\_LOG”状态标志有效来完成的。数据帧包含在后台进程中处理后累积约一秒的点积。这相当于累积了与输入电压信号同步的 50 或 60 个数据周期。此外，采样计数器会跟踪在此帧周期内累积的样本数。此计数会随着软件与传入的市电频率同步而变化。

处理的点积包括  $V_{RMS}$ 、 $I_{RMS}$ 、有功功率和无功功率。前台进程使用这些点积来计算以实际单位表示的相应计量读数。经过处理的电压点积、电流点积、有功电能点积和无功电能点积累积在单独的 64 位寄存器中，供进一步处理和获取 RMS 与平均值。使用前台进程的有功功率和无功功率计算值，可计算出视在功率。还可使用 [节 2.3.2.2.1](#) 中的公式，根据由后台进程计算出的参数值，计算出频率 (Hz) 和功率因数。

对于双电压配置，有两个电压-电流映射，其中每个电压-电流映射具有不同的电压和电流通道。具体而言，在双电压映射中，A 线的相电压测量值和 A 线电流测量值在一个映射中相互关联，而 B 线的相电压测量值和 B 线电流测量值在另一个映射中相互关联。然而，对于单电压配置，由于仅测量一个电压，因此每个电压 - 电流映射都使用相同的电压。单电压配置中，在第一个映射中线电压测量值与 A 线电流相关联，而在第二个映射中，相同的线电压测量值与 B 线电流相关联。为简单起见，请注意，在本文档的其余部分以及 PC GUI 中，每个电压至电流映射（无论是双电压配置还是单电压配置）都称为相位。

前台进程也会更新 LCD。LCD 显示项每两秒钟更改一次。有关 LCD 上不同显示项的详细信息，请参阅 [节 3.2.1.3.1](#)。

此外，如果 TPS25921L 器件的  $\overline{FLT}$  引脚被置为低电平（这表明发生了欠压、过压或热关断事件），前台进程也会执行操作。如果  $\overline{FLT}$  引脚已置为低电平并且这是 MSP432 MCU 复位后第一次发生这种情况，MSP432 MCU 会在 TPS25921L 器件的 EN/UVLO 引脚上提供脉冲来复位该器件。此复位脉冲用于将 TPS25921L OUT 引脚处的负载与 IN 引脚处的电源重新连接，因为如果故障源来自热关断事件，该连接会断开。复位 TPS25921L 后，如果发生另一个热关断事件，TPS25921L 输出会再次与输入断开连接，并且 MSP432 MCU 不会再进行任何尝试向 TPS25921L 提供复位脉冲，以将输出重新连接到输入轨。

### 2.3.2.2.1 公式

本节将简要介绍用于计算电压、电流、功率和电能的公式。如前文所述，电压和电流样本以 8000Hz 的采样率采集。在大约一秒帧数中采集的所有样本都将保留下来，用于计算每个相位的电压和电流 RMS 值。RMS 值通过以下公式计算：

$$V_{RMS,ph} = K_{v,ph} \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} v_{ph}(n) \times v_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - V_{offset,ph}} \quad (3)$$

$$I_{RMS,ph} = K_{i,ph} \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} i_{ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - I_{offset,ph}} \quad (4)$$

其中

- $ph$  = 计算的相位参数 [即 A 相 (= 1) 或 B 相 (= 2)]
- $V_{ph}(n)$  = 在采样时刻  $n$  获取的电压样本
- $V_{offset,ph}$  = 偏移量，用于消减电压转换器中加性高斯白噪声的影响
- $I_{ph}(n)$  = 在采样时刻  $n$  获取的每个电流样本
- $I_{offset,ph}$  = 偏移量，用于消减电流转换器中加性高斯白噪声的影响
- $\text{Sample count}$  = 当前帧内的样本数
- $K_{v,ph}$  = 电压的比例因数
- $K_{i,ph}$  = 电流的比例因数

可计算一帧有功和无功电能样本的功率和电能。这些样本经过相位校正并传递到前台进程，前台进程使用样本数量（样本计数）通过以下公式计算相位有功功率和无功功率：

$$P_{ACT,ph} = K_{ACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} v_{ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - P_{ACT\_Offset,ph} \quad (5)$$

$$P_{REACT,ph} = K_{REACT,ph} \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample Count}} V_{90,ph}(n) \times i_{ph}(n)}{\text{Sample Count}} - P_{React\_Offset,ph} \quad (6)$$

$$P_{APP,ph} = \sqrt{P_{ACT,ph}^2 + P_{REACT,ph}^2} \quad (7)$$

其中

- $v_{90}(n)$  = 在采样时刻“n”获取的电压样本（相移 90°）
- $K_{ACT,ph}$  = 有功功率的比例因数
- $K_{REACT,ph}$  = 无功功率的比例因数
- $P_{ACT\_offset,ph}$  = 偏移量，用于消减串扰对其他相位和中线有功功率测量的影响
- $P_{React\_offset,ph}$  = 偏移量，用于消减串扰对其他相位和中线无功功率测量的影响

请注意，对于无功电能，使用 90° 相移方法的原因有两个：

1. 这种方法可以准确测量很小电流的无功功率
2. 这种方法符合 IEC 和 ANSI 标准规定的测量方法

计算出的市电频率用于计算 90 度相移的电压样本。由于市电频率会发生变化，首先要准确测量市电频率以相应地对电压样本进行相移。

为了获得精确的 90° 相移，需要在两个样本之间使用插值。对于这两个样本，应使用在电流样本之前略大于和略小于 90° 的电压样本。此应用的相移实现由整数部分和小数部分组成。整数部分是通过提供 N 个样本的延迟来实现的。小数部分由一个单抽头 FIR 滤波器实现。在测试软件中，一个查找表提供用于创建分数延迟的滤波器系数。

除了计算每相位有功和无功功率，还使用 [方程式 8](#)、[方程式 9](#) 和 [方程式 10](#) 计算这些参数的累积和：

$$P_{ACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{ACT,ph} \quad (8)$$

$$P_{REACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{REACT,ph} \quad (9)$$

$$P_{APP,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 P_{APP,ph} \quad (10)$$

使用计算出的功率，可通过 [方程式 11](#) 中的以下公式计算电能：

$$\begin{aligned} E_{ACT,ph} &= P_{ACT,ph} \times \text{Samplecount} \\ E_{REACT,ph} &= P_{REACT,ph} \times \text{Samplecount} \\ E_{APP,ph} &= P_{APP,ph} \times \text{Samplecount} \end{aligned} \quad (11)$$

然后，还可以累积电能，以通过以下[方程式 12](#)、[方程式 13](#) 和 [方程式 14](#) 计算累积电能。

$$E_{ACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{ACT,ph} \quad (12)$$

$$E_{REACT,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{REACT,ph} \quad (13)$$

$$E_{APP,Cumulative} = \sum_{ph=1}^2 E_{APP,ph} \quad (14)$$

计算出的电能随后累积到缓冲区中。这些缓冲区存储自系统复位以来消耗的电能总量。请注意，这些电能不同于用来积累电能以输出电能脉冲的工作变量。有四组可用缓冲区：每个相位一组，相位累积一组。在每组缓冲区内将累积以下电能：

1. 有功输入电能 ( 有功电能  $\geq 0$  时的有功电能 )
2. 有功输出电能 ( 有功电能  $< 0$  时的有功电能 )
3. 无功正交 I 电能 ( 无功电能  $\geq 0$  且有功功率  $\geq 0$  时的无功电能；感性负载 )
4. 无功正交 II 电能 ( 无功电能  $\geq 0$  且有功功率  $< 0$  时的无功电能；容性发生器 )
5. 无功正交 III 电能 ( 无功电能  $< 0$  且有功功率  $< 0$  时的无功电能；感性发生器 )
6. 无功正交 IV 电能 ( 无功电能  $< 0$  且有功功率  $\geq 0$  时的无功电能；容性负载 )
7. 视在输入电能 ( 有功电能  $\geq 0$  时的视在电能 )
8. 视在输出电能 ( 有功电能  $< 0$  时的视在电能 )

后台进程还根据每个市电周期的样本数计算频率。然后，前台进程使用[方程式 15](#) 将这种每个市电周期的样本数转换为赫兹频率：

$$\text{Frequency (Hz)} = \frac{\text{Sample Rate (samples / second)}}{\text{Frequency (samples / cycle)}} \quad (15)$$

计算出有功功率和视在功率后，需要计算功率因数的绝对值。在系统功率因数的内部表示中，正功率因数对应于电容性负载，而负功率因数对应于电感性负载。功率因数内部表示的符号取决于电流是超前还是滞后电压，而这是在后台进程中决定的。因此，可使用[方程式 16](#) 计算功率因数的内部表示：

$$\text{Internal Representation of Power Factor} = \begin{cases} \frac{P_{Act}}{P_{Apparent}}, & \text{if capacitive load} \\ -\frac{P_{Act}}{P_{Apparent}}, & \text{if inductive load} \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3.2.3 后台进程

[图 2-10](#) 显示了进行电压和电流采样时发生的不同事件，其中用橄榄绿色标出的项目在硬件设置（而不是测试软件）中完成。

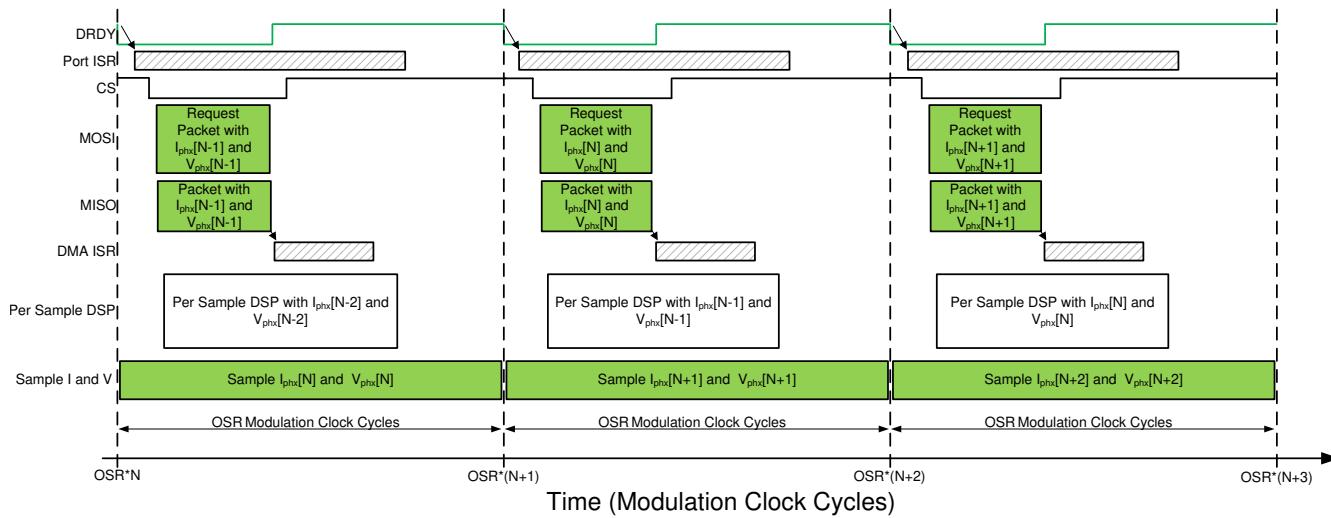


图 2-10. 电压和电流采样事件

回顾图 2-10 中提到的过程，每个相位的新电流样本在每 OSR (此设计中为 512) 个调制时钟周期准备就绪。假设 ADS131M04 器件最近一次就绪的相电流和电压样本对应于第  $N^{th}$  - 1 个电流和电压样本，即  $I_{phx}[N - 1]$  和  $V_{phx}[N - 1]$ 。一旦新样本准备就绪，ADS131M04 就会将 DRDY 引脚置位为低电平。ADS131M04 上 DRDY 引脚的下降沿将使 MSP432 MCU 上的 GPIO 端口中断，从而触发 MSP432 MCU 上的端口 ISR。后台进程在端口 ISR 内运行。图 2-11 显示了后台进程，该进程主要处理测试软件中有严格时序要求的事件。

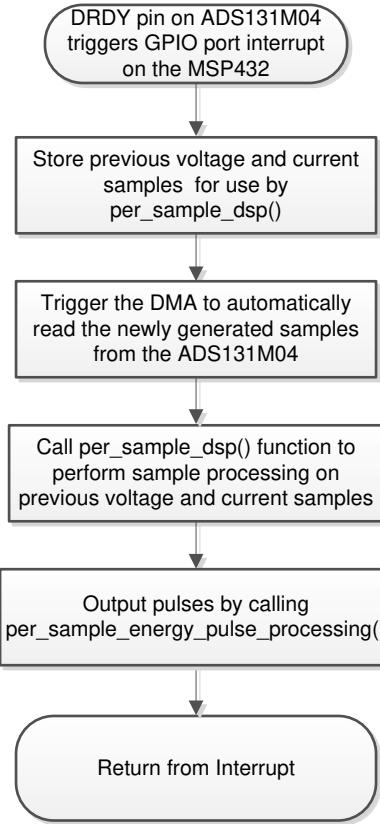


图 2-11. 后台进程

在后台进程中，先前获得的电压样本 ( $V_{phx}[N - 2]$ ) 和先前获得的电流样本 ( $I_{phx}[N - 2]$ ) 会存储起来，以便稍后供 `per_sample_dsp` 函数使用（该函数负责更新用于计算计量参数的中间点积数量）。在存储先前获得的电压和电流样本后，通过将片选信号置位为低电平来启用与 ADS131M04 的通信。然后，将 DMA 配置为针对 ADS131M04

器件最新电流和电压样本 ( $I_{phx}[N - 1]$  和  $V_{phx}[N - 1]$ ) 发送请求，并接收来自 ADS131M04 的数据包响应。电流样本的请求和接收由 DMA 模块自动完成，而不是由软件完成。

图 2-12 显示了由 MSP432 MCU 的 DMA 发送的数据包，以及同样由 DMA 接收和组装的来自 ADS131M04 的响应数据包。发送和接收数据包中包含六个字，其中每个字的长度为三个字节。

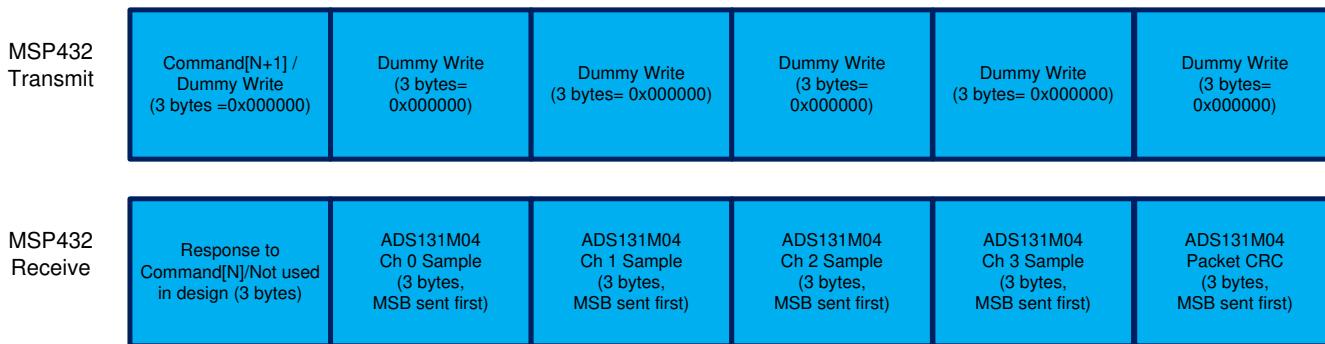


图 2-12. ADS131M04 ADC 采样请求数据包

从 ADS131M04 器件请求 ADC 数据时，必须发送到 ADS131M04 的第一个字是命令字。测试软件不需要在典型的 ADC 样本读出期间更改 ADS131M04 的设置或读取任何寄存器，因此会向 ADS131M04 发送 NULL 命令，这使您能够无需更改器件状态即可从 ADS131M04 获取 ADC 样本。null 命令的实际大小是 16 位；但是，由于使用的是 24 位字，16 位命令必须在命令末尾填充一个额外的值 0x00。因此发送的 NULL 命令字的值为 0x000000。当 MSP432 MCU 移出命令字时，MSP432 同时将响应字移入前一个数据包的命令字。NULL 命令的响应字是 STATUS 寄存器的内容。此设计中不使用 STATUS 寄存器的内容，因此从 ADS131M04 接收到的第一个字将被忽略。

写入命令字后，需要对每个要读取的字节执行一次虚拟写入。若要启用 SPI 时钟，便需要写入虚拟字节，这是从 ADS131M04 器件读取一个字节所必需的。每次写入虚拟字节时，都会将值 0x00 写入 EUSCIB0 的 SPI 发送寄存器。通过在写入命令字节后立即写入三个虚拟字节，MSP432 MCU 可以从 ADS131M04 的通道 0 接收 3 字节的 ADC 值。写入后续 9 个虚拟字节将分别获取通道 1、通道 2 和通道 3 的 ADC 数据。最后，写入接下来的三个虚拟字节将得到 CRC 字。CRC 字为 24 位；但是，请注意实际的 CRC 只有 16 位，这些位对应于 24 位字的最高有效位。因此，在解析 CRC 字时，不需要最后一个字节（但请注意，为了使 ADS131M04 正确运行，仍必须发送虚拟写入的这个零填充字节）。

图 2-12 显示了每当 DMA 接收到整个  $I_{phx}[N - 1]$  数据包时，便会自动调用 DMA ISR。在 ISR 内，CRC 基于五个命令和 ADC 字计算（共计 15 字节）。此 CRC 计算使用 MSP432 MCU 的 CRC 模块。CRC 模块使用偶数个字节，但总共有 15 个字节可用，因此 CRC 模块用于前 14 个字节。最终 CRC 在软件中根据 CRC 模块结果和第 15 个字节计算。请注意，只需要对最后一个字节进行软件 CRC 计算，因为在本设计中字大小选择为三个字节。如果字大小改为选择两个字节或四个字节，则不需要进行软件 CRC 计算，这是因为有偶数个字节。图 2-13 展示了使用 MSP432 CRC 模块和软件用 15 个字节计算 CRC 的代码片段。

```

CRC32->IHIRES16 = 0xFFFF; // Init CRC16 HW module
for(i=0; i<CRC_BYTE_START/2; i++) //This for loop uses the MSP432's CRC module for calculating CRC for first 14 bytes of packet
{
  CRC32->DIRB16 = ((uint16_t )packet[i<<1])<<8) | packet[(i<<1) +1];
  //no_operation();
}
CRC16_Result = (unsigned char) (CRC32->IHIRES16 >> 8) | (CRC32->IHIRES16 << 8); //Stores CRC result for first 14 bytes from CRC module
CRC16_Result ^= packet[CRC_BYTE_START-1]; //packet[CRC_BYTE_START-1] is the last (15th byte) not used by the CRC module's calculation
CRC16_Result ^= (unsigned char) (CRC16_Result & 0xFF) >> 4;
CRC16_Result ^= (CRC16_Result << 8) << 4;
CRC16_Result ^= ((CRC16_Result & 0xFF) << 4) << 1; //The final CRC result over 15 bytes is now stored in CRC16_Result after this line executes.

```

图 2-13. 使用 MSP432 MCU 的 CRC 模块基于奇数个字节计算 CRC 的代码片段

计算出数据包的 CRC 后，会将其与从 ADS131M04 发送的数据包中获得的 CRC 进行比较。发送的 CRC 根据 ADS131M04 数据包的字节 16 和 17 进行解析（字节 18 是 CRC 字的一部分，进行了补零，因此不用于解析）。如果计算出的 CRC 和解析的 CRC 相等，则 CRC 校验通过，并解析 ADC 数据以获取时间 N - 1 处的电压和电流样本值。解析的电压和电流样本被置于临时缓冲区中，以便在下一次中断调用 per\_sample\_dsp 函数时使用。在

DMA 中断结束之前，片选线被再次上拉回高电平，以便在下次来自 ADS131M04 的电流样本准备就绪之前正确复位 ADS131M04 通信。

在使用 DMA 从 ADS131M04 接收最新电流样本的同时，ADS131M04 对下一个电压样本 ( $V_{phx}[N]$ ) 和电流样本 ( $I_{phx}[N]$ ) 进行采样，并且测试软件还会对从 ADS131M04 获得的最后一个电压样本 ( $V_{phx}[N - 2]$ ) 和电流样本 ( $I_{phx}[N - 2]$ ) 执行逐样本处理。可使用这种逐样本处理方法来更新用于计算计量参数的中间点积。处理样本后，后台进程使用“per\_sample\_energy\_pulse\_processing”执行电能比例脉冲的计算和输出。一旦 per\_sample\_energy\_pulse\_processing 完成，测试软件便会从端口 ISR 退出。

### 2.3.2.3.1 per\_sample\_dsp()

图 2-14 显示了 per\_sample\_dsp() 函数的流程图。per\_sample\_dsp() 函数用于计算中间点积结果，这些结果会馈送到前台进程以计算计量读数。电压样本和电流样本均在专用 64 位寄存器中进行处理和累积。每相有功功率和无功功率也在 64 位寄存器中累积。

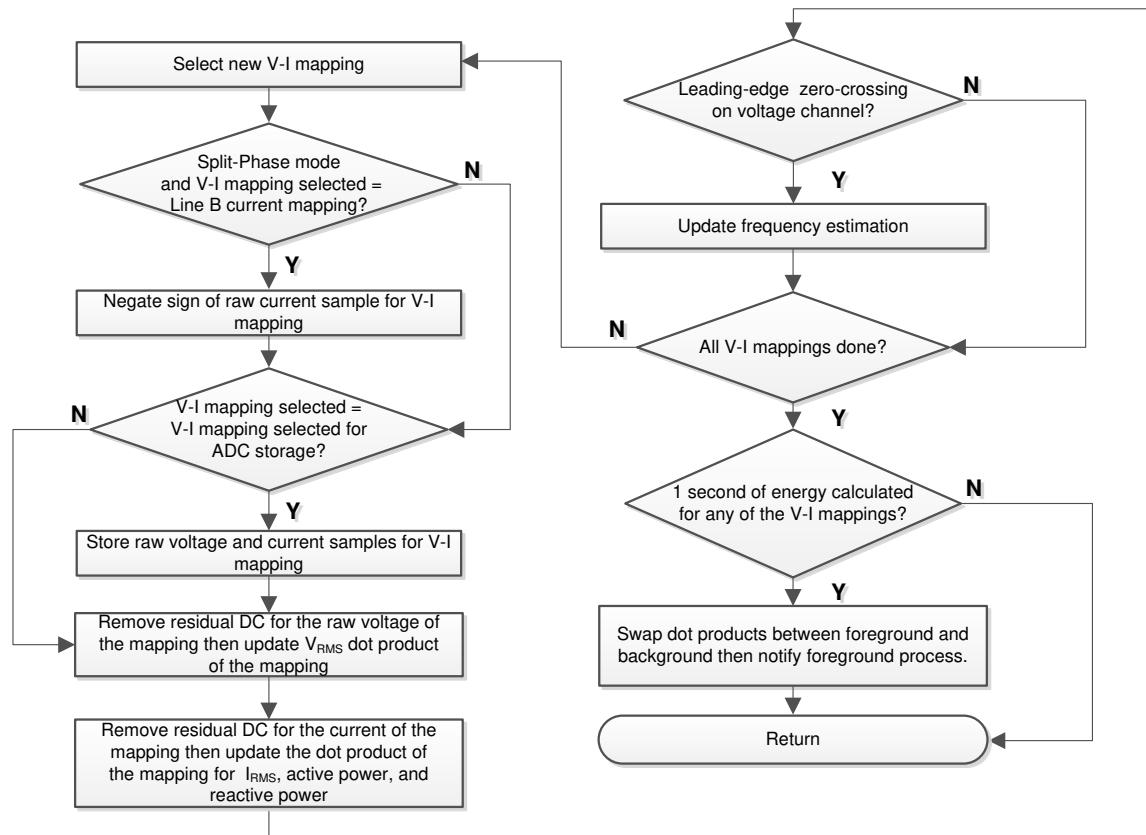


图 2-14. per\_sample\_dsp 函数

累积足够的样本（大约 1 秒）后，将会触发前台函数以计算  $V_{RMS}$ 、 $I_{RMS}$ 、有功/无功和视在功率、有功/无功和视在电能、频率以及功率因数的最终值。在测试软件中，一个相位有两组点积：在任何给定的时间，一组供前台用于计算，另一组供后台用作工作集。后台进程有足够的样本后会交换两个点积，使前台可以使用后台进程刚刚计算出的新点积，而后台进程可以使用新的空集来计算下一组点积。每当电压通道上出现前沿过零（- 到 + 电压转换）时，per\_sample\_dsp() 函数还负责更新相位的相应频率（以每周期样本数为单位）。

以下部分介绍 per\_sample\_dsp() 函数中的各个电量测量元素。

#### 2.3.2.3.1.1 电压和电流信号

对于单电压配置，请将 B 线电流测量的方向相对于线电压测量反转，以便功率读数带有正确符号。无需反转 CT 连接来切换 B 线电流测量的方向，在单电压配置中 B 线的原始电流样本被取反，这样无需将 CT 线路重新连接到电路板，即可在软件中切换双电压配置和单电压配置。该设计的测试软件支持存储 A 相或 B 相的原始电压和电流 ADC 值，不管是选择单电压配置还是双电压配置。

原始 ADS131M04 样本是有符号整数，并且这些转换器上的任何杂散直流或偏移值都会通过直流跟踪滤波器去除。分别使用滤波器、电压和电流样本可获得所有电压和电流的单独直流估计值。然后，从每个电压和电流原始 ADC 样本中减去该估计值。

得到的瞬时电压和电流样本用于生成以下中间结果：

- 电压和电流的累积平方值，分别用于计算  $V_{RMS}$  和  $I_{RMS}$
- 累积电能样本，用于计算有功电能
- 使用电流和  $90^\circ$  相移电压的累积电能样本，用于计算无功电能

前台进程会处理这些累积值。

#### 2.3.2.3.1.2 频率测量和周期跟踪

64 位寄存器保存累积的瞬时电压、电流、有功功率和无功功率。周期跟踪计数器和样本计数器会记录累积的周期数。当累积了约一秒的样本后，后台进程会存储这些累积寄存器，并通知前台进程生成平均结果，例如 RMS 和功率值。周期边界用于触发前台求平均值进程，因为此进程生成的结果非常稳定。

为了进行频率测量，需要在过零电压样本之间使用直线插值。图 2-15 显示了过零点附近的样本以及线性插值的过程。

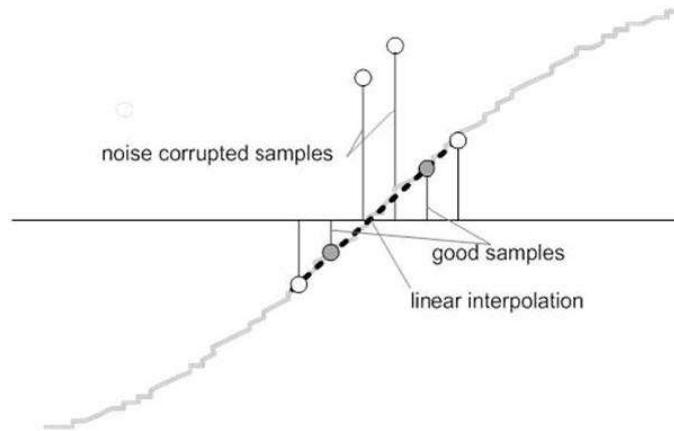


图 2-15. 频率测量

噪声尖峰也会导致错误，因此该应用通过变化率检查来滤除掉可能的错误信号，并确保这两个点是从真正的过零点插入的。例如，对于两个负样本，噪声尖峰会使其中一个样本成为正样本，从而使该正负对看起来像是有过零。

由此产生的周期间时序会通过一个弱低通滤波器，从而进一步平滑任何周期间变化。这种滤波会产生稳定且准确的频率测量值，并可以容忍噪声。

#### 2.3.2.3.2 LED 脉冲生成

在电表中，负载的能耗通常以千瓦时 (kWh) 脉冲的几分之一来测量。此信息可用于准确校准任何电表以实现精确测量。通常，测量元件 (MSP432 微控制器) 负责生成与能耗成正比的脉冲。为了有效满足这两项任务的需求，脉冲的生成必须准确且抖动相对较小。尽管时间抖动并不表示准确度不佳，但时间抖动呈现出了仪表整体准确度的负面指示。由于精度的这种负面指示作用，必须将抖动平均化。

此应用使用平均功率来生成这些电能脉冲。平均功率在每个 **DRDY** 端口 ISR 中断时进行累积，从而为当前一秒时间范围中的每个中断平均分配前一秒时间范围中累积的电能。此积累过程相当于将功率转化为电能。当累积的电能超过阈值时，便会产生一个脉冲。高于此阈值的电能值将保留下，然后在下一个中断周期中会有一个新的电能值加到此阈值之上。由于平均功率趋于稳定值，这种产生电能脉冲的方式非常稳定，没有抖动。

此阈值决定了电表制造商规定的电能刻度，并且是一个常数。该刻度通常以每千瓦时的脉冲数为单位或直接以千瓦时为单位进行定义。每个电能刻度都必须产生一个脉冲。例如，在此应用中，有功和无功电能每千瓦时产生的脉冲数设置为 6400。在这种情况下的电能刻度为  $1\text{kWh}/6400$ 。电能脉冲在接头上以及通过电路板上的发光二极管 (LED) 生成并可供使用。GPIO 引脚用于产生脉冲。

在参考设计中，标记为“有功”的 LED 对应于两相总和的有功能耗。“无功”对应于累积两相无功电能总和。

图 2-16 展示了脉冲生成流程图。

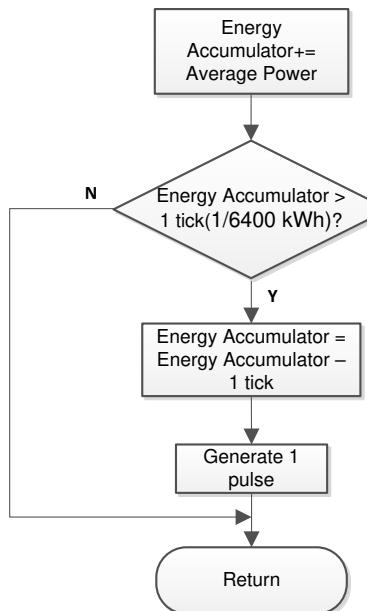


图 2-16. 用于电能指示的脉冲生成

平均功率以 0.001W 为单位，1kWh 阈值定义为：

$$1\text{-kWh 阈值} = 1 / 0.001 \times 1\text{kW} \times (\text{每秒的中断数}) \times (\text{一小时的秒数}) = 1000000 \times 8000 \times 3600 = 0x1A3185C50000$$

### 2.3.2.3.3 相位补偿

当使用电流互感器 (CT) 作为传感器时，它会在电流信号上引入额外的相移。此外，电压和电流输入电路的无源器件也可能会引入其他相移。为确保精确测量，用户必须补偿电压和电流样本之间的相对相移。相移补偿的实现由整数部分和小数部分组成。整数部分是通过提供  $N$  个样本的延迟来实现的。小数部分由在两个样本之间进行插值的单抽头有限脉冲响应 (FIR) 滤波器实现；该滤波器类似于用来为无功电能测量提供 90° 相移电压样本的 FIR 滤波器。在测试软件中，一个查找表提供用于创建分数延迟的滤波器系数。查找表提供精细到 1/256 样本的分数相移。此应用中使用的 8000Hz 采样率相当于 50Hz 下的 0.0088° 分辨率。除了滤波器系数之外，查找表中还具有与每组滤波器系数相关联的增益变量。该增益变量用于抵消因使用一组特定滤波器系数而产生的增益。

除了此设计中使用的软件相位补偿，另一种选择是使用 ADS131M04 器件上的相位补偿功能。如果使用这种硬件相位补偿方案，则不需要滤波器系数，因此不需要除以滤波器系数的增益。

### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

#### 3.1 所需的硬件和软件

##### 3.1.1 注意事项和警告

在高电流下，端子块可能会变热。此外请注意，相电压会馈送到电路板，因此请采取适当的预防措施。

###### 警告



表面高温！接触会导致烫伤。请勿触摸。操作时请采取适当的预防措施。

###### 小心



高压！将电路板连接到带电的导线时可能会发生电击。电路板应由专业人员小心处理。为安全起见，强烈建议使用具有过压或过流保护功能的隔离式测试设备。

### 3.1.2 硬件

参考设计的下列图示最能说明其硬件构成：图 3-1 是电能测量系统的顶视图，图 3-2 基于功能显示参考设计各部分的位置。

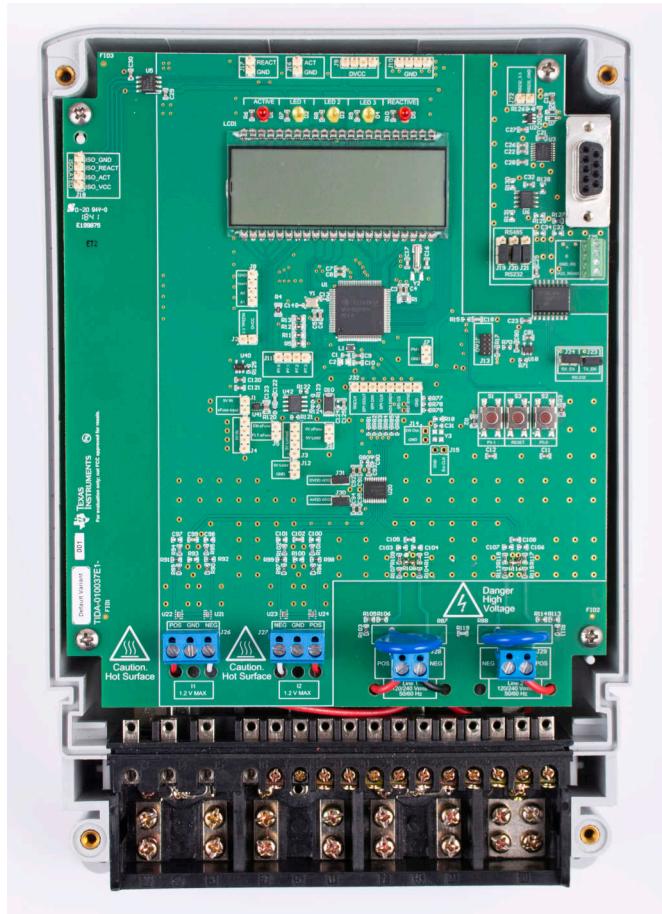


图 3-1. TIDA-010037 设计的顶视图

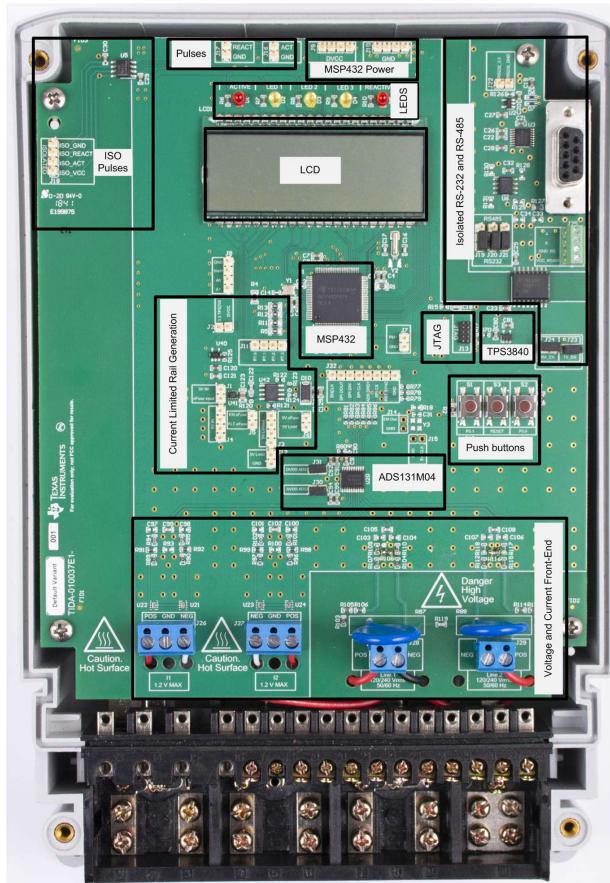


图 3-2. TIDA-010037 设计的俯视图 ( 突出显示元件 )

该设计支持双电压和单电压配置。硬件连接取决于选择了这两种配置中的哪一种。

#### 3.1.2.1 与测试设置的连接

##### 3.1.2.1.1 双电压连接

交流电压和电流可应用于电路板，以便在以下几点进行测试：

- 端子块“J28”对应于 A 相的线电压连接。该端子块是一个两位置端子，可提供 A 相线电压和中性点电压的连接。左侧的端子块位置标记为“POS”，是 A 相火线连接位的置。右侧的端子块位置标记为“NEG”，是进行零线连接的位置。此端子块盖的零线连接与“J29”上的零线连接短接，因此零线只需连接到这两个位置中的其中一个。请注意，此处相位火线和零线的顺序与 J29 上的顺序相反。
- 端子块“J29”对应于 B 相的线电压连接。该端子块是一个两位置端子，可提供 B 相线电压和中性点电压的连接。右侧的端子块位置标记为“POS”，是 A 相火线连接位的置。左侧的端子块位置标记为“NEG”，是进行零线连接的位置。此端子块盖的零线连接与“J28”上的零线连接短接，因此零线只需连接到这两个位置中的其中一个。请注意，此处相位火线输入和零线的顺序与 J28 上的顺序相反。
- 端子块“J26”对应于 A 相传感器之后的电流输入。该端子块是一个三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。最左侧的端子块位置标记为“POS”，是 CT 的正极端子应连接的位置。最右侧的端子块位置标记为“NEG”，是 CT 的负极端子应连接的位置。选择施加到 CT 输入端的电

流，使该电流不超过 100A。此外，在执行任何测试之前，请验证此端子块已安全牢固连接到 CT 的两个输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与“J27”上的顺序相反。

- 端子块“J27”对应于 B 相传感器之后的电流输入。该端子块是一个三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。最右侧的端子块位置标记为“POS”，是 CT 的正极端子应连接的位置。最左侧的端子块位置标记为“NEG”，是 CT 的负极端子应连接的位置。选择施加到 CT 输入端的电流，使该电流不超过 100A。此外，在执行任何测试之前，请验证此端子块已安全牢固连接到 CT 的两个输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与“J26”上的顺序相反。

图 3-3 和图 3-4 显示了使参考设计在双电压配置下正常工作所需的各种测试设置连接。

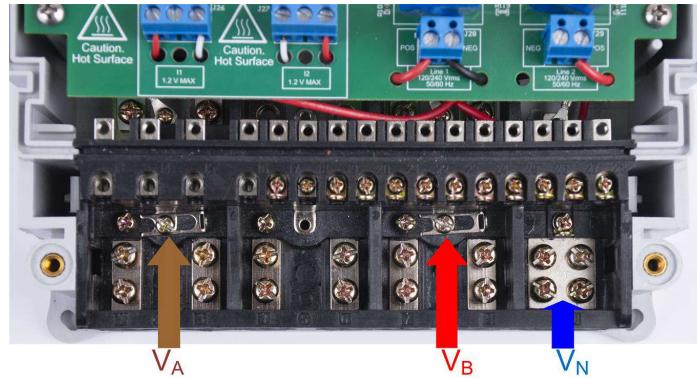


图 3-3. 适用于双电压配置且带有测试设置连接的参考设计顶视图

图 3-4 显示了前视图中的连接。 $V_A$  和  $V_B$  对应于 A 相和 B 相的火线电压。 $V_N$  对应于测试交流电源提供的零线电压。 $I_{A+}$  和  $I_{A-}$  对应于 A 相的电流输入，而  $I_{B+}$  和  $I_{B-}$  对应于 B 相的电流输入



图 3-4. 适用于双电压配置且带有测试设置连接的参考设计前视图

### 3.1.2.1.2 单电压连接

交流电压和电流可应用于电路板，以便在以下几点进行测试：

- 端子块“J28”对应于线电压连接。该端子块是一个两位置端子块，提供 A 线和 B 线的连接。左侧的端子块位置标记为“POS”，是 A 线的连接位置。右侧的端子块位置标记为“NEG”，是 B 线的连接位置。
- 此单电压配置不需要使用端子块“J29”。
- 端子块“J26”对应于 A 线传感器之后的电流输入。该端子块是一个三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。将 CT 的正极端子连接到最左侧的端子块位置，此位置标记为“POS”。将 CT 的负极端子连接到最右侧的端子块位置，此位置标记为“NEG”。选择施加到 CT 输入端的电流，使该电流不超过 100A。此外，在执行任何测试之前，请验证此端子块已安全牢固连接到 CT 的两个输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与“J27”上的顺序相反。
- 端子块“J27”对应于 B 线传感器之后的电流输入。该端子块是一个三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。最右侧的端子块位置标记为“POS”，是 CT 的正极端子应连接的位置。将 CT 的负极端子连接到最左侧的端子块位置，此位置标记为“NEG”。选择施加到 CT 输入端的电流，使该电流不超过 100A。此外，在执行任何测试之前，请验证此端子块已安全牢固连接到 CT 的两个输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与“J26”上的顺序相反。

图 3-5 和图 3-6 显示了使参考设计在单电压配置下正常工作所需的各种测试设置连接。



图 3-5. 适用于单电压配置且带有测试设置连接的参考设计顶视图

图 3-6 显示了前视图中的连接。 $V_A$  和  $V_B$  对应于 A 线和 B 线。 $I_{A+}$  和  $I_{A-}$  对应于 A 线的电流输入，而  $I_{B+}$  和  $I_{B-}$  对应于 B 线的电流输入。



图 3-6. 适用于单电压配置且带有测试设置连接的参考设计前视图

### 3.1.2.2 电源选项和跳线设置

本设计的 MSP432 MCU 和 ADS131M04 部分由单个电压轨 (DVCC) 供电，这可以通过两种可能的方法实现。在第一种方法中，可通过在 DVCC 接头 J9 和 GND 处连接一个 3.3V 外部电源来直接为 DVCC 供电。为了支持这种直接驱动 DVCC 的方法，不应在跳线接头 J2 上布置跳线。

在第二种驱动 DVCC 的方法中，DVCC 电压由 TPS70933 LDO 的 3.3V 输出产生。在第二种方法中，将跳线布置在跳线接头 J2 处并在 J4 和 GND 之间施加 5V 电压，以便为 TPS70933 提供必要的输入电压。如果跳线接头 J1 和 J2 上都布置了跳线，则接头 J4 上施加的 5V 电压轨用于为 DVCC 以及 TPS25921L 产生的限流电压轨供电。

各种跳线接头和跳线设置可增加电路板的灵活性。一些接头需要正确连接跳线，才能使电路板正常发挥作用。[表 3-1](#) 指示了板上每个跳线的功能。

#### 备注

主要功能列中包含 (警告) 字样的接头未隔离，因此以市电运行时，不应在这些接头处使用测量设备（尤其是对于系统接地连接到线电压的单电压配置）。如果设备通过电池供电且不连接市电，或者交流市电处于隔离状态，则适用此情况（除非此设计的电路板的外部某一隔离器用来在接头位置连接）。

**表 3-1. 接头名称和跳线设置**

接头或接头选项名称	类型	主要功能	有效用例	备注
J1	2 引脚跳线接头	TPS25921L 输入电压轨选择 (警告)	在此接头上布置一根跳线，将施加在 J4 接头上的电压用作 TPS2591L 的输入电压。在 TPS25921L 的输出端提供此输入电压的限流版本。要使用与施加在 J4 上的电压不同的电压，请在此接头上施加外部电压并且不要在其上布置跳线。	如果将一根跳线布置在 J1 处，另一根跳线布置在 J2 处，则 TPS25921L 输入电压和 DVCC 由同一电源（接头 J4）提供，因此只需要一个外部电源。如果需要为 DVCC 和 TPS25921L 分别使用单独的电源，则可以移除 J1 处的跳线，并且可以直接在 J1 接头的引脚 2 处施加所需的 TPS25921L。或者，不用移除 J1 处的跳线，而是可以移除 J2 处的跳线，并且可以直接在 DVCC 接头上施加 3.3V 电压，而不是使用 J4 接头处的电压和 TPS70933 LDO 为 DVCC 生成 3.3V 电压轨。
J2	2 引脚跳线接头	TPS70933 DVCC 输出选择 (警告)	在此接头处布置一根跳线，以便使用 TPS70933 LDO 和 J4 上施加的电压为 DVCC 生成 3.3V 电压轨。直接在 DVCC 接头 J9 上施加 3.3V 电压，不要在此处布置跳线以使用 TPS70933 进行旁路。	如果将一根跳线布置在 J1 处，另一根跳线布置在 J2 处，则 TPS25921L 输入电压和 DVCC 由同一电源（接头 J4）提供，因此只需要一个外部电源。如果需要为 DVCC 和 TPS25921L 分别使用单独的电源，则可以移除 J1 处的跳线，并且可以直接在 J1 接头的引脚 2 处施加所需的 TPS25921L。或者，不用移除 J1 处的跳线，而是可以移除 J2 处的跳线，并且可以直接在 DVCC 接头上施加 3.3V 电压，而不是使用 J4 接头处的电压和 TPS70933 LDO 为 DVCC 生成 3.3V 电压轨。
J3	4 引脚插头	限流 5V 电压轨 (警告)	将此接头和 GND 连接到您要限制电流的任何无线电或无线电模块。	如果将跳线布置在 J1 处，这就是施加在接头 J4 处的电压的限流版本。该限流电压也出现在接头 J12 的引脚 1 上。
J4	4 引脚插头	5V 输入 (警告)	在此处和 GND 之间施加 5V 电压，以在 J3 上产生 5V 限流输出，并生成可连接到 DVCC 的 3.3V 输出。	要通过 J4 在 J3 处生成限流输出，请在 J1 处布置跳线。要通过 J4 在 DVCC 处生成 3.3V 电压，请在 J2 处布置跳线。
J5	2 引脚插头	连接到 TPS25921 的 FLTb 和 EN/UVLO 引脚的接头 (警告)	在此接头的引脚 2 处进行探测，以确定 TPS25921L 是否将其故障标志置为有效。在引脚 1 处进行探测，了解 TPS25921L 的 EN/UVLO 引脚的状态。	在 TPS25921L 热关断事件期间，连接到 TPS25921L OUT 引脚的负载与连接到 VIN 引脚的源极断开。因此，接头 J3 将不再是施加到 J4 的电压的限流版本。EN/UVLO 可由微控制器驱动为低电平，以便尝试将 TPS25921L 器件输入引脚处的源极重新连接到其输出引脚处的负载。在测试软件中，热关断事件后最多尝试一次重试。
J6	2 引脚跳线接头	TPS25921L 输出连接 (警告)	在此处布置一根跳线，将 TPS25921L OUT 引脚连接到接头 J3，从而生成在 TPS2591L 器件 VIN 引脚上施加的电源轨的限流版本。	在此处布放置跳线。
J7	2 引脚插头	THVD1500 的 RE 和 DE 引脚 (警告)	在此接头处进行探测以查看馈送到 THVD1500 器件 RE 和 DE 引脚的信号，从而确定接收器或驱动器何时处于启用状态。	此接头有两个引脚：GND 和 PM1，其中 PM1 是 MSP432 MCU 的 P2.7 GPIO 引脚，用于驱动 THVD1500 器件的 RE 和 DE 引脚。
J8	4 引脚插头	MSP432 ADC14 和基准接头 (警告)	在此处进行探测以向 ADC 通道 A0 和 A1 提供输入并提供 ADC14 基准输入。	测试软件不使用此接头。如果需要使用 MSP432 MCU 的 14 位 SAR ADC 添加自定义检测代码，则添加此接头。
J9	4 引脚插头	DVCC 电压接头 (警告)	探测此处有无 DVCC 电压。直接通过 DVCC（而不是使用 TPS70933 LDO）从外部为电路板供电时，请连接工作台或外部电源的正极端子。	如果 DVCC 由 TPS70933 LDO 供电（跳线布置在接头 J2 上），请在此处和 J10 之间进行探测以测量 TPS70933 的输出电压。如果直接从外部为 DVCC 供电（从接头 J2 上移除跳线），则必须在此处和 J10 之间施加 3.3V 电压。
J10	4 引脚插头	接地电压接头 (警告)	探测此处有无 GND 电压。直接通过 DVCC（而不是使用 TPS70933 LDO）从外部为电路板供电时，请连接工作台或外部电源的负极端子。	如果 DVCC 由 TPS70933 LDO 供电（跳线布置在接头 J2 上），请在此处和 J9 之间进行探测以测量 TPS70933 的输出电压。如果直接从外部为 DVCC 供电（从接头 J2 上移除跳线），则必须在 J9 和此接头之间施加 3.3V 电压。

表 3-1. 接头名称和跳线设置 (续)

接头或接头选项 名称	类型	主要功能	有效用例	注释
J11	4 引脚插头	包含 MSP432 P7.0、7.1、P7.2 和 P7.3 引脚的接头 (警告)	探测此处有无 P7.0、P7.1、P7.2 和 P7.3 GPIO 引脚。	P7.0、P7.1 和 P7.2 引脚用于调节 LCD 的对比度。此设计并未使用 P7.3。这些引脚均可进行端口映射。如果不需要 LCD，可在软件中禁用它并且可以移除 R5、R11、R12 和 R13，以便能够将 P7.0、P7.1 和 P7.2 进行端口映射用作其他用途，例如可能与外部无线电或无线电模块通信。如果这些引脚用于与外部无线电或无线电模块通信，则接头 J12 可用于为这些外部模块供电并对其功率进行限流，这样在出现任何外部短路时不会影响为计量系统供电。
J12	2 引脚插头	限流电压轨 (警告)	将此接头连接到外部模块，为外部模块提供限流 5V 电压轨。	此接头的引脚 1 是 TPS25921L 的限流输出轨，也在接头 J3 上提供。此接头的引脚 2 是 GND 连接。要让此处出现 5V 限流电压，请在接头 J4 上施加 5V 电压并将跳线布置在 J1 和 J6 上。
J13	10 引脚 2 排 连接器	JTAG : MSP432 编程接头 (警告)	将 MSP-FET-432ADPTR 适配器连接到此连接器，以便为 MSP432 MCU 供电。	MSP-FET-432ADPTR 的作用是可以通过 MSP-FET 工具对 MSP432 器件进行编程。MSP-FET-432ADPTR 适配器的一个连接器连接到 FET 工具，另一个连接器连接到 MSP432 MCU 的 JTAG 连接器。请注意，必须从外部为 MSP432 供电才能对 MSP432 MCU 进行编程。由于此接头和 FET 工具未隔离，因此在使用市电运行且市电未隔离时，请勿连接到此接头。
J16	2 引脚插头	有功电能脉冲 (警告)	在此处探测累积的有功电能脉冲。此接头有两个引脚：GND 和 ACT，有功电能脉冲实际在这里输出。	此接头未与交流市电隔离，因此请勿在此处连接测量设备（尤其是对于单电压配置），请参阅 J18 的 “ISO_ACT” 引脚，该引脚是隔离引脚。如果需要测试有功功率脉冲，请改用 J18 的 “ISO_ACT” 引脚，因为它是隔离引脚。
J17	2 引脚插头	无功电能脉冲 (警告)	在此处探测累积的无功电能脉冲。此接头有两个引脚：GND 和 REACT，无功电能脉冲实际在这里输出。	此接头未与交流市电隔离，因此请勿在此处连接测量设备（尤其是对于单电压配置）。如果需要测试无功功率脉冲，请改用 J18 的 “ISO.REACT” 引脚，因为它是隔离引脚。
J18	4 引脚插头	隔离式脉冲接头	在此处探测隔离式累积有功电能脉冲和隔离式累积三相无功电能脉冲。建议使用这些接头产生脉冲（尤其对于单电压配置），因为系统将以该配置中的其中一个线电压为基准。	此接头有四个引脚：ISO_GND、ISO.REACT、ISO_ACT 和 ISO_VCC。GND_ISO 是电能脉冲的隔离式接地。ISO_VCC 是隔离式有功和无功电能脉冲的 VCC 连接。ISO_ACT 是输出隔离式有功电能脉冲的位置。ISO.REACT 是输出隔离式无功电能脉冲的位置。此接头与交流市电隔离，因此可以安全地连接到示波器或其他测量设备，这是因为已经存在隔离器。然而，必须在 ISO_GND 和 ISO_VCC 之间施加 3.3V 或 5V 电压，才能在此接头处产生有功电能脉冲和无功电能脉冲。产生的脉冲具有逻辑高电压，等于在 ISO_GND 和 ISO_VCC 之间施加的电压。
J19	3 引脚跳线 接头	RS-232 或 RS-485 选择-功率	将跳线布置在 RS-232 或 RS-485 位置，具体取决于需要这两个通信选项中的哪一个。	将跳线布置在此接头、J20 和 J21 上的 RS-232 位置，以选择 RS-232 通信。将跳线布置在此接头、J20 和 J21 上的 RS-485 位置，以选择 RS-485 通信。
J20	3 引脚跳线 接头	RS-232 或 RS-485 选择-TX	将跳线布置在 RS-232 或 RS-485 位置，具体取决于需要这两个通信选项中的哪一个。	将跳线布置在此接头、J19 和 J21 上的 RS-232 位置，以选择 RS-232 通信。将跳线布置在此接头、J19 和 J21 上的 RS-485 位置，以选择 RS-485 通信。
J21	3 引脚跳线 接头	RS-232 或 RS-485 选择-RX	将跳线布置在 RS-232 或 RS-485 位置，具体取决于需要这两个通信选项中的哪一个。	将跳线布置在此接头、J19 和 J20 上的 RS-232 位置，以选择 RS-232 通信。将跳线布置在此接头、J19 和 J20 上的 RS-485 位置，以选择 RS-485 通信。
J22	2 引脚插头	包含 RS232_3.3 ( 从 RS-232 线路获取的电压源 ) 和 RS232_GND ( 隔离式 RS-232 的接地连接 ) 的接头	探测此处有无 RS-232 的隔离栅侧生成的隔离式 3.3V 电源。	请注意，此处产生的 3.3V 电压轨来自 PC 的 RS-232 端口，因此在使用 RS-485 模式时该电压轨不适用。对于 RS-485 模式，必须提供外部电源，以便为 THVD1500 RS-485 收发器供电。
J23	2 引脚跳线 接头	TX_EN : RS-232 发送使能 (警告)	在此处布置跳线以启用 RS-232 传输。	
J24	2 引脚跳线 接头	RX_EN : RS-232 接收使能 (警告)	在此处布置跳线以启用通过 RS-232 接收字符。	
J25	4 引脚端子 块	RS-485 连接	RS-485 的连接点	要使用 RS-485 查看 GUI，请连接此处的 USB 转 RS-485 适配器。必须在该接头的引脚 1 上从外部提供 5V 电压。此接头的引脚 2 是 RS-485 地，引脚 3 是 B 总线 I/O 线，引脚 4 是 A 总线 I/O 线。
J26	3 引脚端子 块	A 相 ( 双电压配置 ) 或 A 线 ( 单电压配置 ) CT 连接 (警告)	A 线传感器之后的电流输入	这是三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。将 CT 的正极端子连接到最左侧的端子块位置，此位置标记为 “POS”。将 CT 的负极端子连接到最右侧的端子块位置，此位置标记为 “NEG”。在执行任何测试之前，请验证该端子块是否安全牢固地连接到 CT 的两条输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与 J27 上的顺序相反。
J27	3 引脚端子 块	B 相 ( 双电压配置 ) 或 B 线 ( 单电压配置 ) CT 连接 (警告)	B 线传感器之后的电流输入	这是三位置端子块，但仅使用最左侧和最右侧位置。中心位置连接至 GND，不连接至 CT。将 CT 的正极端子连接到最右侧的端子块位置，此位置标记为 “POS”。将 CT 的负极端子连接到最左侧的端子块位置，此位置标记为 “NEG”。在执行任何测试之前，请验证该端子块是否安全牢固地连接到 CT 的两条输出引线。请注意，此处 CT 引线的顺序与 J26 上的顺序相反。
J28	2 引脚端子 块	A 相电压 (警告)	A 相线路连接	对于双电压配置，该端子块使用导线连接到参考设计用例中的中性点电压和 A 相线电压连接。对于单电压配置，该端子块连接到 B 线而不是零线。将端子块上在 PCB 丝印上标注有 “NEG”的引脚连接到零线 ( 双电压配置 ) 或 B 线 ( 单电压配置 )。端子块上在 PCB 丝印上标注有 “POS”的引脚由连接到 A 相线路。J28 和 J29 上的零线连接在 PCB 均相互连接。这是 A 相线电压连接，因此仅在使用能够测量市电电压的设备时才在此处进行探测。请注意，此处相位输入和零线的顺序与 J29 上的顺序相反。
J29	2 引脚端子 块	B 相电压 (警告)	B 相线路连接	对于双电压配置，该端子块使用导线连接到参考设计用例中的中性点电压和 B 相线电压连接。对于单电压配置，不使用此端子块。将端子块在 PCB 丝印上标注有 “NEG”的引脚连接到中性点。将端子块上在 PCB 丝印上标注有 “POS”的引脚由连接到 B 相线路。J28 和 J29 上的零线连接在 PCB 均相互连接。这是 B 相线电压连接，因此仅在使用能够测量市电电压的设备时才在此处进行探测。请注意，此处相位输入和零线的顺序与 J28 上的顺序相反。此外，该端子块不用于单电压配置。

表 3-1. 接头名称和跳线设置 (续)

接头或接头选项 名称	类型	主要功能	有效用例	注释
J30	2 引脚跳线 接头	ADS131M04 AVDD 跳线 (警告)	为了使 ADS131M04 正常运行, 该跳线接头必须短接 (通过使用电流表的跳线)。	该接头与 J31 一起为测量 ADS131M04 的电流消耗提供支持。
J31	2 引脚跳线 接头	ADS131M04 DVCC 跳线 (警告)	为了使 ADS131M04 正常运行, 该跳线接头必须短接 (通过使用电流表的跳线)。	该接头与 J30 一起为测量 ADS131M04 的电流消耗提供支持。
J32	8 引脚插头	ADS131M04 MSP432 通信接头 (警告)	在此处探测与 ADS131M04 器件的芯片选择信号、SPI 信号、 <u>RST</u> 信号、CLKIN 信号和 <u>DRDY</u> 信号的连接。	<p>ADS131M04 器件的 <u>RST</u> 引脚用于复位 ADS131M04。初始化 ADS131M04 时, MSP432 会驱动该引脚以将 ADS131M04 复位。ADS131M04 器件的 DRDY 引脚用于提醒 MSP432 MCU 有新的电流样本可用。CLKIN 引脚从 MSP432 MCU 的 SMCLK 时钟输出馈送到 ADS131M04 器件, 后者对时钟进行分频以产生所使用的调制器时钟。此接头未与交流市电隔离, 因此, 除非可以使用参考设计的外部隔离器, 否则请勿在使用市电运行时连接测量设备。此接头上的引脚映射如下:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 引脚 1: SMCLK ( ADS131M04 CLKIN 引脚 )</li> <li>● 引脚 2: SPI DOUT ( ADS131M04 DIN 引脚/SIM0 )</li> <li>● 引脚 3: SPI DIN ( ADS131M04 DOUT 引脚/SOMI )</li> <li>● 引脚 4: SPI CLK ( ADS131M04 SCLK 引脚 )</li> <li>● 引脚 5: ADS DRDY ( ADS131M04 DRDY 引脚 )</li> <li>● 引脚 6: SPI CS ( ADS131M04 CS 引脚 )</li> <li>● 引脚 7: RST SYNC ( ADS131M04 SYNC/RESET 引脚 )</li> <li>● GND</li> </ul>

### 3.1.3 软件

用于评估此设计的 MSP432 软件是测试软件。节 2.3.2 将讨论测试软件的功能，其中介绍了如何实现用于计量测试的自定义软件。

## 3.2 测试和结果

### 3.2.1 测试设置

#### 3.2.1.1 SVS 和电子保险丝功能测试

除了计量精度测试之外，TPS3840 SVS 器件和 TPS25921L 电子保险丝器件上还进行功能测试。要进行 TPS3840 测试，需要通过将外部电源直接连接到 DVCC（为了正确向 DVCC 直接供电，不应将跳线连接到 J2 上），并且电源的输出电压从 3.3V 缓慢降到 1.9V。需要记录 TPS3840 器件将 MSP432 MCU 复位时的阈值电压，该电压称为负电压阈值。达到负电压阈值后，电源输出电压从 1.9V 缓慢增加至 3.3V。同时还会记录解除复位时的电压，该电压等于负电压阈值加上迟滞电压。

为了测试 TPS25921L 器件，通过在 J2 处连接跳线，经由 TPS70933 器件为 MSP432 MCU 供电。通过在 J1 处连接跳线，TPS70933 由接头 J4 处施加的 5V 电压轨供电。除了 J1 和 J2 处的跳线外，还在 J6 处布置了一根跳线，将 TPS25921L 输出连接到接头 J12。外部电源连接到 J4（电源的正极引线）和 GND（电源的负极引线）。此外，在接头 J12 上布置一个万用表，以测量 TPS25921L OUT 引脚上的输出电压。第一次测试时，通过将外部电源输出从 5V 缓慢降低至 4V 来测量欠压锁定阈值。在达到欠压阈值之前，TPS25921L OUT 引脚上的电压应等于外部电源提供的电压。达到欠压阈值时，OUT 引脚与其 IN 引脚断开连接，这会导致输出电压的读数为 0V 而不是外部电源电压。达到欠压电压后，电源电压缓慢回升至 5V。需要记录 TPS25921L OUT 引脚重新连接到其 IN 引脚时的电源电压，这可以通过 OUT 引脚电压再次等于外部电源电压而不是 0V 明显看出。

除了测试欠压阈值外，还会测试过压阈值。通过将电源电压从 5V 增加到 6V 并记录 TPS25921L 器件的 OUT 引脚与 IN 引脚断开连接时的电压来执行过压阈值测试。确定过压阈值后，电压再次下降回 5V，以确定 TPS25921L 器件的 OUT 引脚重新连接到其 IN 引脚时的外部电源电压。

为了测试 TPS25921L 的限流功能，使用了与欠压和过压测试类似的设置，但接头 J12 连接到 Chroma 直流电子负载而不是仅连接万用表。专门针对限流功能对热关断特性进行了测试，方法是增加连接到 TPS25921L 器件 OUT 引脚的负载的电流消耗，然后测量负载与 TPS25921L 器件 IN 引脚上施加的电压断开连接时的电流。达到热关断后，负载电流设置为较低的值并修改软件以在 TPS25921L ENUV 引脚上提供脉冲，验证 OUT 引脚是否重新连接到外部电源。

#### 3.2.1.2 电表计量精度测试

为了测试电表配置中的计量精度，使用源发生器在 节 3.1.2.1 中提到的正确位置向系统提供电压和电流。在此设计中，双电压配置的每个相位均使用了 120V 标称电压（火线和零线之间）、10A 校准电流和 60Hz 标称频率。对于单电压配置，两个线电压之间的电压为 240V，并使用了 10A 校准电流和 60Hz 标称频率。

当向系统施加电压和电流时，系统以 6400 个脉冲/kWh 的速率输出累积有功电能脉冲和累积无功电能脉冲。此脉冲输出馈入参考表（在此参考设计的测试设备中，该脉冲输出集成在用于电源发生器的同一设备中），而参考表根据提供给系统的实际电能和由此系统的有功与无功电能输出脉冲确定的电能测量值，确定电能百分比误差。对于双电压配置，在执行电能增益校准和相位补偿后，执行累积有功电能误差测试、累积无功电能误差测试、单个相位有功电能测试和频率变化测试，如节 3.2.1.3.2.2 所述。除了电能误差测试外，还针对双电压配置测量 RMS 电压百分比误差和 RMS 电流百分比误差。对于单电压配置，还执行累积有功电能误差测试和电压变化测试。对于单电压和双电压测试，请注意未执行功率偏移校准。

对于累积有功电能误差、累积无功电能误差测试和单个相位有功电能测试，电流在 50mA 到 100A 之间变化。对于累积有功电能和单个相位误差测试，在馈送到参考设计的电压和电流波形之间施加 0°、60° 和 -60° 的相移。根据有功电能输出脉冲的误差，针对 0°、60° 和 -60° 相移创建了一个有功电能百分比误差与电流间的关系图。对于累积无功电能误差测试，遵循了类似的过程（但未使用 30°、60°、-30° 和 -60° 相移），并且绘制了累积无功电能误差，而非累积有功电能误差。在累积有功和无功电能测试中，对每个相位的电能读数之和进行精度测试。相比之下，对于单个相位有功电能测试，测试了单个相位电能读数（A 相和 B 相）。在测试一个相位的单个电能精度时，通过为另一相位的电流提供 0A 输入来禁用该相位，这样，累积有功电能读数在理想情况下应等于单个相位电压，这允许使用累积电能脉冲输出来测试单个相位的精度。

除了通过改变电流来测试有功电能外，还通过将 **RMS** 电压从 240V 变为 15V 并测量有功电能百分比误差来测试有功电能。这种电压变化测试专门针对累积双电压有功电能测试、累积单电压有功电能测试和单个相位有功电能测试专门进行的。

执行的另一组电能测试是频率变化测试。对于此测试，频率在 60Hz 标称频率基础上以  $\pm 2\text{Hz}$  的步长变化。此测试在  $0^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $-60^\circ$  相移下以 0.5A 和 10A 电流进行。记录了在这些条件下产生的有功电能误差。

为了测试 **RMS** 精度，我们使用了 **GUI** 中的 **RMS** 读数，因为用于电能精度测试的脉冲输出不能用于 **RMS** 电压和电流的精度测试。对于电压测试，每个相位施加 10A 电流，同时每个相位上的电压在 9 - 270V 之间变化。由于电路板上存在 275V 压敏电阻，因此电压变化不超过 270V，可移除此压敏电阻以在 275V 以上电压下进行测试。施加每个电压后，在读数稳定后，记录了 **GUI** 中每个相位产生的 **RMS** 电压读数。从 **GUI** 获得测得的 **RMS** 电压读数后，需要从参考表获得实际的 **RMS** 电压读数，这是必要步骤，因为源发生器可能无法生成所需的电压值，尤其是在小电压下。使用由参考表测得的 **RMS** 电压和 **GUI** 中的 **RMS** 电压值，即可计算出 **RMS** 电压百分比误差。使用类似过程计算 **RMS** 电流百分比误差，对每个相位使用了 120V 电压以及介于 50mA 到 100A 之间的电流。

除了在正常 8ksps 采样率下测试有功电能误差外，还测试了 **ADC** 采样率为 32ksps 时的有功电能误差。为了支持这种高采样率，对计量软件进行了修改，以计算更少的计量参数并仅针对单相计算这些参数。这项 32ksps 测试表明，即使使用更高的采样率，**ADS131M04** 也能实现高精度，这对于需要谐波分析或负载分解的应用非常有用。

### 3.2.1.3 查看计量读数和校准

本部分介绍使用测试软件验证此设计结果的方法。

#### 3.2.1.3.1 从 LCD 中查看结果

LCD 每两秒滚动显示计量参数一次。对于 LCD 上显示的每个计量参数，屏幕上通常会显示三个项目：用于表示参数相位的符号，用来说明所显示参数的文本，以及参数的实际值。相位符号显示在 LCD 顶部，用一个三角形来表示。符号的方向决定了相应的相位。图 3-7 和图 3-8 显示了三角形的不同方向和相位描述符之间的对应关系：



图 3-7. A 相符号



图 3-8. B 相符号

与相位无关的聚合结果（例如累积有功和无功功率）和参数（如时间和日期）通过清除 LCD 上的所有相位符号来表示。

LCD 的底部一行用于表示所显示参数的值。LCD 的顶部一行显示所显示参数的说明文本。表 3-2 显示了 LCD 上显示的不同计量参数以及这些参数在显示时的相关单位。“名称”列显示字符与计量参数之间的对应关系。

表 3-2. 所显示参数

参数名称	名称位号	单位	注释
有功功率	A <sub>c</sub> P <sub>o</sub>	瓦特 (W)	为每个相位显示此参数。还会显示聚合有功功率。
无功功率	R <sub>c</sub> P <sub>o</sub>	无功功率 (var)	为每个相位显示此参数。还会显示聚合无功功率。
视在功率	A <sub>c</sub> P <sub>o</sub>	伏安 (VA)	为每个相位显示此参数。
功率因数	P <sub>F</sub>	0 到 1 之间的常数	为每个相位显示此参数。
电压	U <sub>c</sub> n <sub>s</sub>	电压 (V)	为每个相位显示此参数。
电流	I <sub>c</sub> n <sub>s</sub>	安培 (A)	为每个相位显示此参数。
频率	F <sub>r</sub> e <sub>2</sub> 9	赫兹 (Hz)	为每个相位显示此参数。
消耗的总有功电能	A <sub>c</sub> E <sub>n</sub>	kWh	为每个相位显示此参数。
消耗的总无功电能	R <sub>c</sub> E <sub>n</sub>	kVarh	为每个相位显示此参数。它显示象限 1 和象限 4 中无功电能之和。 。
时间	E <sub>c</sub> in <sub>e</sub>	时:分:秒	此参数仅在显示聚合读数序列时显示。此参数并不是每个相位显示一次。
日期	d <sub>c</sub> ate	年:月:日	此参数仅在显示聚合读数时显示。此参数并不是每个相位显示一次。

图 3-9 展示了 LCD 上显示的一个 59.99Hz A 相测量频率的示例。

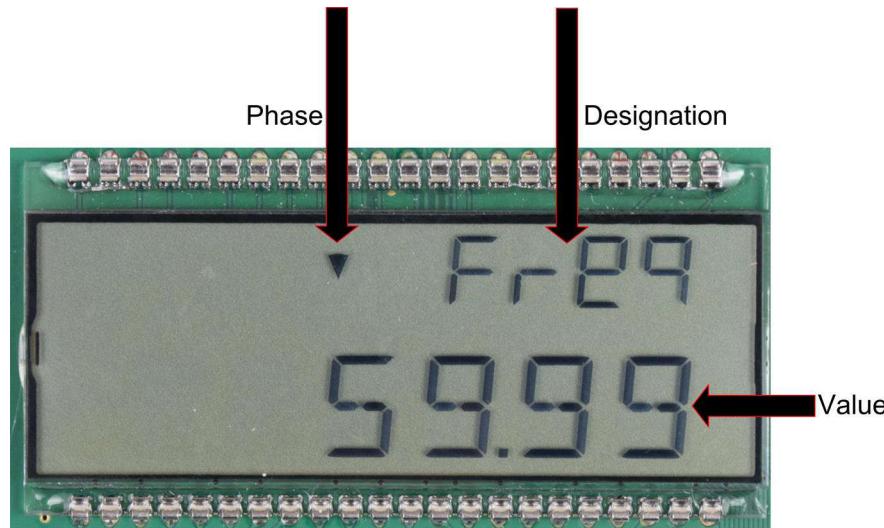


图 3-9. LCD

### 3.2.1.3.2 从 PC 校准和查看结果

#### 3.2.1.3.2.1 查看结果

要从 GUI 查看计量参数值，请执行以下步骤：

1. 选择是使用 RS-485 还是 RS-232 连接来与 PC GUI 进行通信。该选择通过跳线连接 J19、J20 和 J21 三个跳线接头实现。要选择 RS-485 通信选项，请将跳线布置于这三个接头上顶端两个引脚（电路板上标有 RS485）。要选择 RS-232 通信选项，请将跳线布置于这三个接头上底端两个引脚（电路板上标有 RS232）。
2. 将参考设计连接到 PC
  - RS-232 选项：使用 RS-232 电缆将参考设计连接到 PC。如果 PC 没有 RS-232 适配器，可以使用串行 RS-232 适配器。插入 RS-232 适配器后，此适配器应在 PC 上创建一个 COM 端口。
  - RS-485 选项：在此设计中，可以使用 USB 转 RS-485 适配器在 PC GUI 与 RS-485 端口之间进行通信。插入 USB 转 RS-485 适配器后，该适配器应在 PC 上创建一个 COM 端口。该适配器的另一端具有用于 RS-485 数据 A 和数据 B 连接、GND 连接和 5V 电源连接的电线，它们均应按照端子块引脚旁边的连接标签连接至此设计的 J25 螺钉端子块。为测试此电路，专门使用了以下 USB 转 RS-485 适配器：[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS\\_USB\\_RS485\\_CABLES.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_USB_RS485_CABLES.pdf)。对于此特定适配器，数据 A 连接为橙色，数据 B 连接线为黄色，GND 连接为黑色，5V 电源连接为红色。
3. 打开 GUI 文件夹，并在文本编辑器中打开 *calibration-config.xml*。

4. 将 *meter* 标签内的 *port name* 字段更改为连接到系统的 COM 端口。如图 3-10 所示，此字段更改为 COM7。

```

260      </correction>
261      </phase>
262      <temperature/>
263      <rtc/>
264      </cal-defaults>
265      <meter position="1">
266          <port name="com7" speed="9600"/>
267      </meter>
268      <reference-meter>
269          <port name="USBO::0x0A69::0x0835::A66200101281::INSTR"/>
270          <type id="chroma-66202"/>
271          <log requests="on" responses="on"/>
272          <scaling voltage="1.0" current="1.0"/>
273      </reference-meter>

```

图 3-10. 更改了 GUI 配置文件以与电能测量系统通信

5. 运行位于 GUI 文件夹中的 *calibrator.exe* 文件。如果 *calibration-config.xml* 中的 COM 端口在上一步中更改为连接到参考设计的 COM 端口，则 GUI 将打开（请参阅图 3-11）。如果 GUI 正确连接到设计，左上角的按钮为绿色。如果连接有问题或代码配置不正确，则此按钮为红色。点击绿色按钮查看结果。

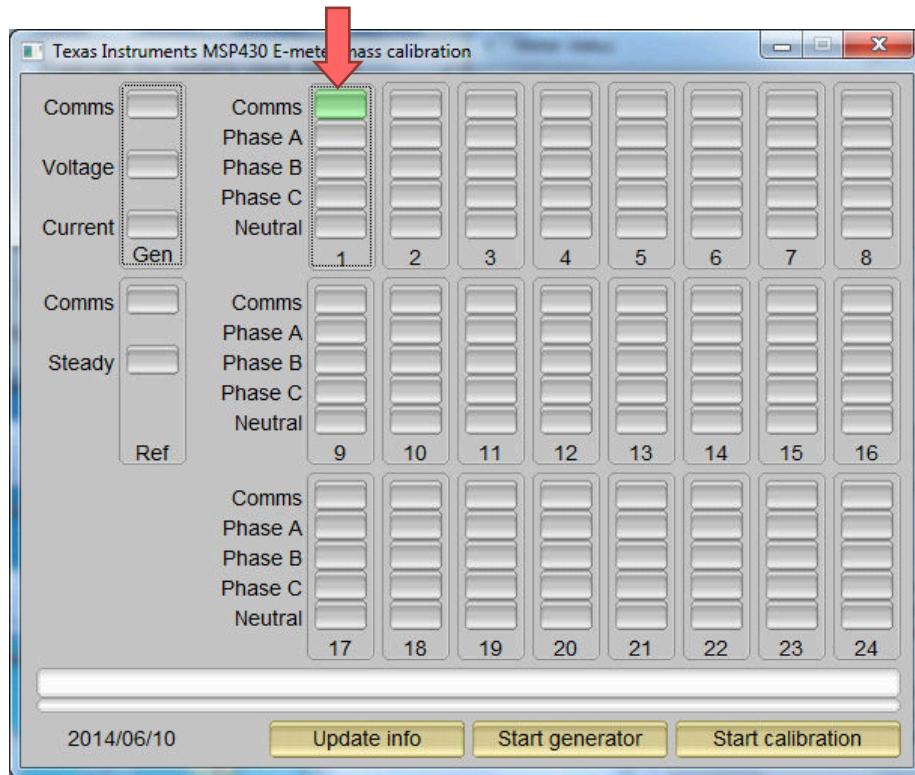


图 3-11. GUI 启动窗口

点击绿色按钮后，结果窗口将打开（请参阅图 3-12）。在此图中，*Power factor* 值末尾的“L”或“C”分别表示感性负载或容性负载。

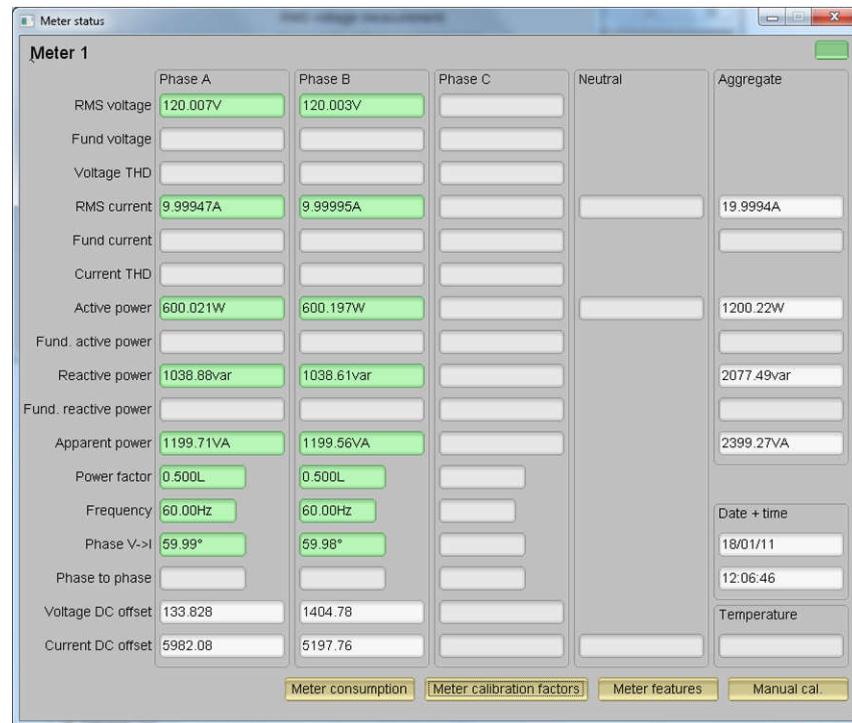


图 3-12. GUI 结果窗口

在结果窗口中，可通过点击 **Meter Consumption** 按钮来查看总能耗读数。用户点击此按钮后，将弹出 **Meter events and consumption** 窗口，如图 3-13 所示。

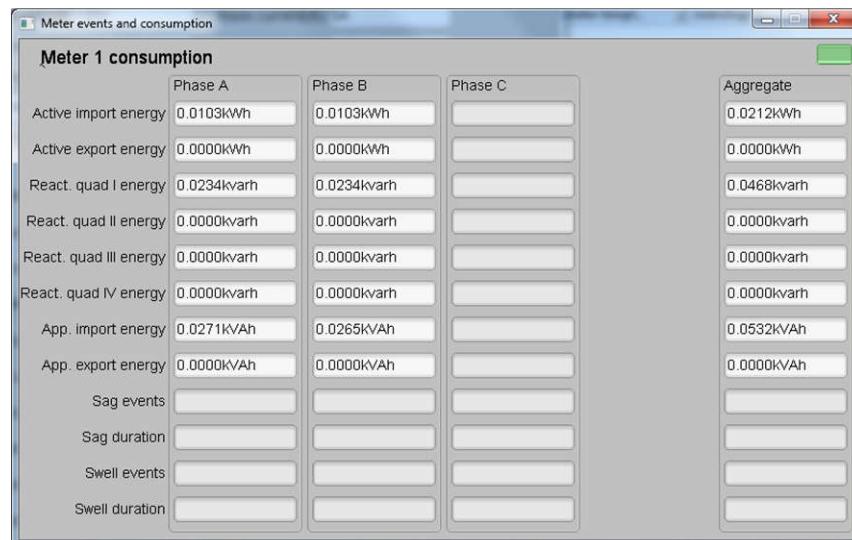


图 3-13. 电表事件和能耗窗口

在结果窗口中，用户还可以点击 **Meter features** 按钮查看电表设置，点击 **Meter calibration factors** 按钮查看系统校准因数，或点击 **Manual cal.** 按钮打开用于校准系统的窗口。

### 3.2.1.3.2.2 校准

校准是任何电表性能的关键，每个电表都必须进行校准才能发挥良好性能。最初，由于器件间差异、传感器精度和其他无源容差，每个电表的精度都不同。为消除其影响，必须校准每个电表。要准确执行校准，必须具有一个精确的交流测试源和一个参考表。此测试源必须能够生成任何所需的电压、电流和相移（V 和 I 之间）。为计算测量误差，参考表用作接口连接测试源与校准电表。本节论述了用于校准此三相设计的简单有效的方法。

用于显示结果的 GUI 可轻松用于校准设计。校准期间，将在测试软件中修改校准因数类参数，以在测量中实现最小的误差。对于此电表，每个相位有六个主要校准因数，分别为电压比例因数、有功功率偏移（在 GUI 中错误地称为电压交流偏移）、电流比例因数、无功功率偏移（在 GUI 中错误地称为电流交流偏移）、功率比例因数和相位补偿因数。电压、电流和功率比例因数将计量软件中测量的数量转换为实际值，分别以伏特、安培和瓦特为单位。功率偏移用于减去电压-电流串扰，该串扰表现为恒定功率偏移，并会在低电流下导致更大误差。请注意，偏移校准未用于测试此特定设计。最后一个校准因数是相位补偿因数，用于补偿电流传感器和其他无源器件引入的任何相移。请注意，电压、电流和功率校准因数相互独立。因此，校准电压不会影响 RMS 电流或功率的读数。

当电表软件首次在 MSP432 器件上刷写时，默认校准因数将加载到这些校准因数。校准期间，通过 GUI 修改这些值。校准因数存储在 INFO\_MEM 中，因此，如果重新启动电表，这些因数将保持不变。

任何比例因数的校准都称为增益校正。相位补偿因数的校准称为相位校正。在整个校准过程中，交流测试源必须打开，电表连接须与 [节 3.1.2.1](#) 一致，且电能脉冲须连接至参考表。

#### 3.2.1.3.2.2.1 增益校准

通常，可以对所有相位同时进行电压和电流增益校正。但是，要对有功功率进行增益校正，需要参考表中每个相位的电能精度（%）。此外，在对任何给定相位执行有功功率校准时，必须通过关闭电流并保持启用其他电压来关闭其他相位。

##### 3.2.1.3.2.2.1.1 电压和电流增益校准

要校准电压和电流读数，请执行以下步骤：

1. 连接 GUI 以查看电压、电流、有功功率和其他计量参数的结果。
2. 配置测试源，为所有相位提供所需的电压和电流。确保这些是每个相电压和电流间相移为零度的电压和电流校准点。例如，120V、10A、0°（PF = 1）。通常，每个相位的这些值都相同。
3. 点击 *Manual cal.* 按钮（如图 3-12 所示）。以下屏幕将弹出，如图 3-14 所示：

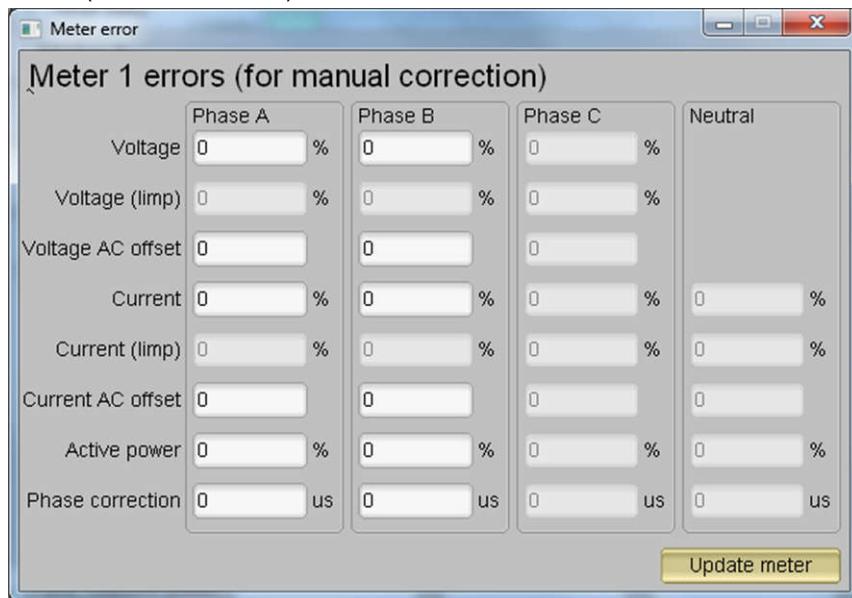


图 3-14. 手动校准窗口

4. 计算每个电压和电流的校正值。关于必须在电压和电流字段中输入的校正值，将使用 [方程式 17](#) 进行计算：

$$\text{Correction (\%)} = \left( \frac{\text{value}_{\text{observed}}}{\text{value}_{\text{desired}}} - 1 \right) \times 100 \quad (17)$$

其中

- $\text{value}_{\text{observed}}$  是 TI 仪表测量的值。
  - $\text{value}_{\text{desired}}$  是在交流测试源中配置的校准点
5. 计算所有电压和电流后，将这些值原样输入到相应相位的电压和电流字段中。
  6. 点击 **Update meter** 按钮，然后 GUI 上观察到的电压和电流值将立即稳定至所需的电压和电流。

### 3.2.1.3.2.2.1.2 有源功率增益校准

#### 备注

本部分是其中一个相位的示例。对于其他相位，可以重复这些步骤。

对电压和电流执行增益校正后，必须完成有功功率的增益校正。与电压和电流相比，有功功率的增益校正方式有所不同。尽管从概念上讲，可以像电压和功率一样计算有功电能百分比误差，但这种方法并不是最精确的，应避免使用。

获得校正 (%) 的理想选择是直接借鉴来自有功功率参考表的测量误差。此误差通过向参考表馈送电能脉冲来获得。如需执行有功功率校准，请完成以下步骤：

1. 关闭系统并将系统的电能脉冲输出连接到参考表。配置参考表，根据这些脉冲输入测量有功功率误差。
2. 打开交流测试源。
3. 使用节 3.2.1.3.2.2.1.1 部分中相同的电压、电流和 0° 相移，重复执行该部分中的步骤 1 至步骤 3。
4. 从参考表获取测量误差百分比。注意，此值可能为负值。
5. 在 GUI 窗口中相应相位下的 **Active Power** 字段中输入步骤 4 中获得的误差。此误差已是数值，无需计算。
6. 点击 **Update meter** 按钮，参考表上的误差值会立即稳定至接近零的值。

### 3.2.1.3.2.2.2 偏移校准

执行增益校准后，如果低电流下的精度不可接受，可进行偏移校准。偏移校准会消除所有串扰，如线电压对相位电流通道的串扰。

要对相位执行有功功率偏移校准，只需将要从有功功率读数中减去的偏移量（以 mW 为单位）添加到有功功率偏移的当前值（在仪表校准因数窗口中标为“**voltage AC off**”），然后将这一新值输入手动校准窗口中的 **Voltage AC offset** 字段。例如，如果“**voltage AC off**”在仪表校准窗口中的值为 200 (0.2W)，并且需要再减去 0.300mW，则应在手动校准窗口的 **Voltage AC offset** 字段中输入值 500。在手动校准窗口的 **Voltage AC offset** 字段中输入值后，按下“**Update meter**”。

要对相位执行无功功率偏移校准，所遵循的流程与用于执行有功功率偏移校准的流程相似。将要从无功功率读数中减去的偏移量（以 mvar 为单位）添加到无功功率偏移的当前值（在仪表校准窗口中标为“**Current AC offset**”），然后将该值输入手动校准窗口中的 **Current AC offset** 字段。在手动校准窗口的 **Current AC offset** 字段中输入值后，按下“**Update meter**”。

### 3.2.1.3.2.2.3 相位校准

执行功率增益校正后，请进行相位校准。与有功功率增益校准相似，要在一个相位上执行相位校正，必须禁用其他相位。要执行相位校正校准，请完成以下步骤：

1. 如果已关断或重新配置交流测试源，请执行节 3.2.1.3.2.2.1.1 中的第 1 步至第 3 步，同时使用与该部分中相同的电压和电流。
2. 将当前不进行校准的所有其他相位的电流设置为 0A，从而禁用这些相位。
3. 仅将相移修改为非零值；通常选择 +60°。参考表此时会显示不同的有功功率测量百分比误差。注意，此值可能为负值。

4. 如果步骤 3 中的误差不接近零或不可接受，请遵循以下步骤来执行相位校正：
- 对于要校准的相位，输入一个值以更新 **Phase Correction** 字段。通常，必须输入一个小的  $\pm$  整数，使误差更接近零。此外，若相移大于 0 (例如： $+60^\circ$ )，则正 (负) 误差需要一个正 (负) 数字作为校正。
  - 点击 **Update meter** 按钮，监测参考表上的误差值。
  - 如果此测量误差 (%) 不够准确，请在第 4a 步和第 4b 步的基础上递增或递减 1 以进行微调。请注意，在某个点之后，微调只会导致误差在零两侧振荡。必须选择使绝对误差最小的值。
  - 现在将相位更改为  $-60^\circ$ ，然后检查此误差是否仍可接受。理想情况下，在滞后和超前条件下，相同相移的误差必须对称。

执行相位校准后，即完成了一个相位的校准。必须对其他相位执行增益校准、偏移校准和相位校准。

至此已完成两个相位的电压、电流和功率校准。要查看新的校准因数 (参阅图 3-15)，请点击图 3-12 中 GUI 计量结果窗口的 **Meter calibration factors** 按钮。对于这些显示的校准因数，请注意“Voltage AC off”参数实际表示从每次测量值中减去的有功功率偏移量 (以 mW 为单位)，“Current AC offset”参数实际表示从无功功率读数中减去的无功功率偏移量 (以 mvar 为单位)。此外，这里还显示了使用双电压配置的仪表的校准因数示例。如果该仪表采用单电压配置，则电压和有功功率比例因数约为图 3-12 中所示值的一半，原因是通过线电压测量会得到两个相位的电压读数，而不是测量两个相电压。在分相系统的理想条件下，线电压测量值 RMS 是两个相电压测量值 RMS 中任一个的两倍，这意味着在测量线电压时，馈送到 ADC 的电压也是相电压测量值的两倍。因此，对于单电压配置，必须将电压和功率读数除以额外因数 2，这是通过遵循有功功率和电压增益校准步骤自动完成的。

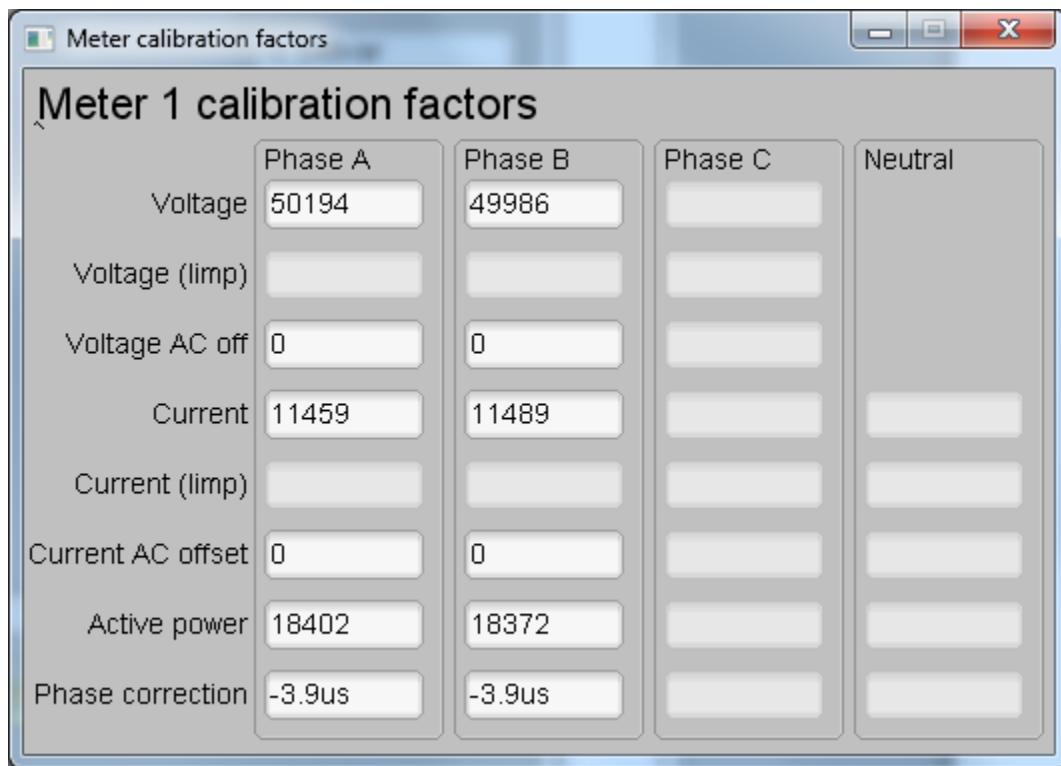


图 3-15. 校准因数窗口

点击图 3-12 中的 **Meter features** 按钮，进入图 3-16 所示窗口以查看系统配置。

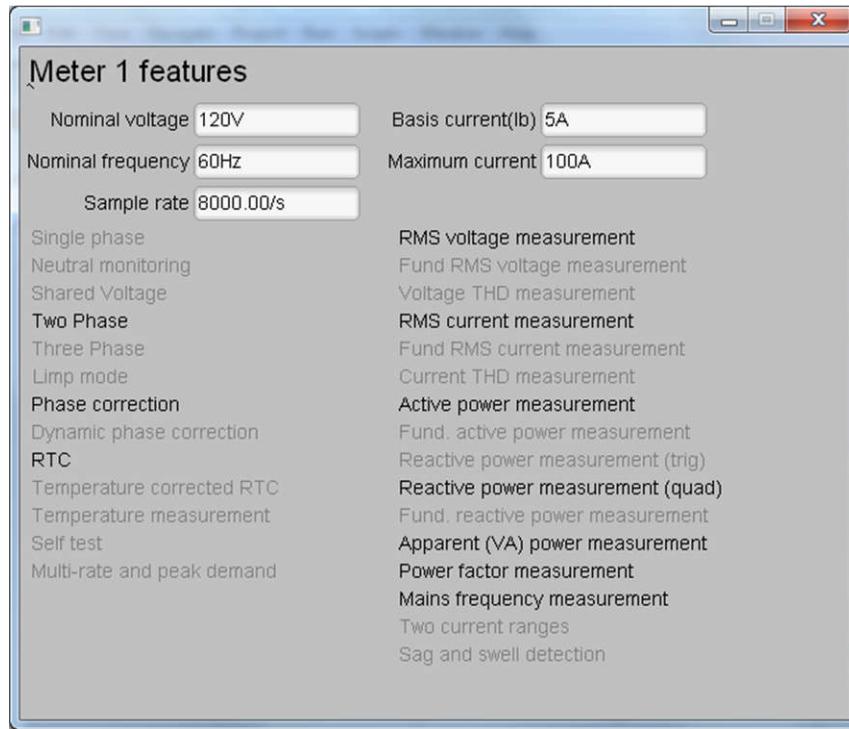


图 3-16. 仪表功能窗口

### 3.2.2 测试结果

#### 3.2.2.1 SVS 和电子保险丝功能测试结果

表 3-3. SVS 测试结果

条件	已测得的电压 (V)	数据表中的典型电压值 (V)
负电压阈值, VIT-	2.00V	2.00 ±1% V
正电压阈值, VIT+ = VIT- + VHYS	2.11V	2.10V
迟滞电压, VHYS = VIT+ - VIT-	2.11 - 2.00 = 0.11V	2.1 - 2.0 = 0.10V

VIT- 和 VHYS 的测量值与数据表中的预期值非常匹配。

表 3-4. 电子保险丝测试结果

条件	已测得的电压 (V)	预期电压值 (V)
电源故障检测阈值 (VIN 下降)	4.05V	4.26 - 0.224 = 4.04V ( 基于数据表中内部 UVLO 阈值的典型值, 上升和迟滞 )
解除 UVLO (VIN 上升)	4.28V	4.26V ( 基于数据表中内部 UVLO 阈值的典型值, 上升 )
解除过压条件 (VIN 下降)	5.62V	5.57V ( 从 TPS25921 计算表和所电阻值中获得 )
过压截止阈值 (VIN 上升)	5.81V	5.78V ( 从 TPS25921 计算表和所电阻值中获得 )

电源故障检测阈值和过压截止阈值的测量值与预期值非常接近。此外, 测得的用于导致热关断的过流阈值为 1.62A。

### 3.2.2.2 电表计量精度结果

对于以下测试结果，对电表应用了增益和相位校准。在以下结果中，有功电能结果在  $0^\circ$  相移下处于 0.1% 以内。在  $60^\circ$  和  $-60^\circ$  相移（允许这些相移，从而在电表标准中实现宽松的精度）下，结果在较高电流下出现偏差的趋势是 CT 相移随电流变化。此外，有功电能与电压结果以及 RMS 电压结果表明，尽管仅对电压通道使用了 ADC 范围中的一小部分，但仍能获得良好的精度结果。

**表 3-5. A 相有功电能百分比误差与电压间的关系，双电压模式**

电压 (V)	百分比误差
240	0.0113
120	-0.0067
60	-0.01
30	-0.012
15	-0.015

**表 3-6. A 相有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式**

电流 (A)	$0^\circ$	$60^\circ$	$-60^\circ$
0.05	-0.02	0.007	-0.062
0.10	-0.025	0.017	-0.057
0.25	-0.007	0.031	-0.051
0.50	0.001	0.029	-0.031
1.00	0.0075	0.034	-0.021
2.00	0	0.04	-0.036
5.00	0.003	0.019	-0.019
10.00	0.007	0.009	-0.004
20.00	-0.007	0.006	-0.013
30.00	0.0007	-0.002	0.006
40.00	0.002	-0.007	0.013
50.00	-0.009	-0.04	0.032
60.00	-0.0007	-0.049	0.0445
70.00	0.0003	-0.052	0.058
80.00	0.004	-0.064	0.074
90.00	0.01	-0.065	0.0845
100.00	0.014	-0.07	0.101

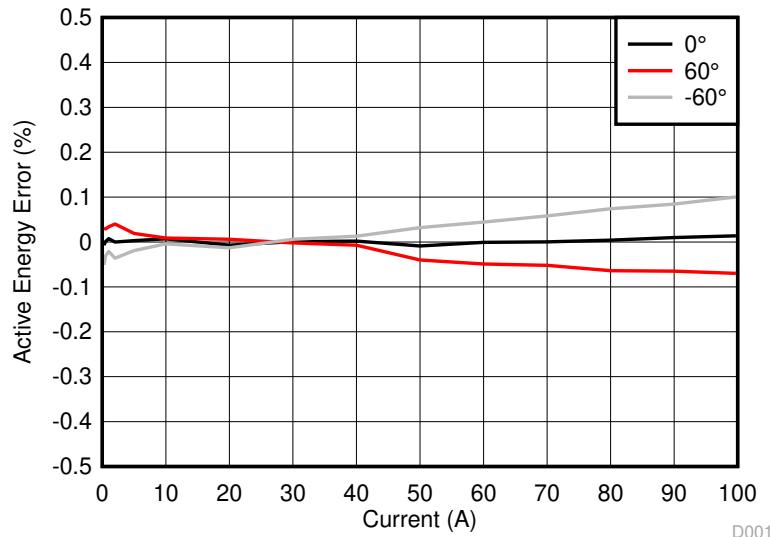


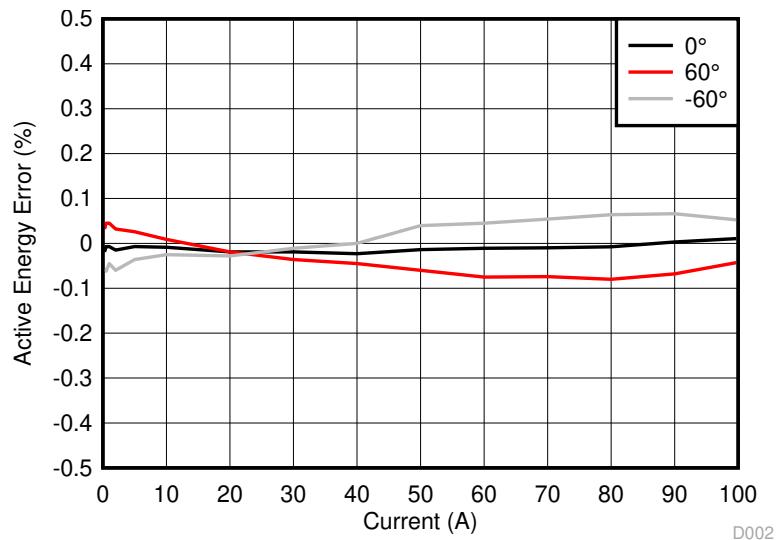
图 3-17. A 相有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式

**表 3-7. B 相有功电能百分比误差与电压间的关系，双电压模式**

电压 (V)	百分比误差
240	0.011
120	-0.0003
60	-0.004
30	-0.0047
15	-0.0067

**表 3-8. B 相有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式**

电流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	-0.032	-0.007	-0.122
0.10	-0.019	0.019	-0.083
0.25	-0.019	0.032	-0.058
0.50	-0.007	0.045	-0.062
1.00	-0.007	0.045	-0.045
2.00	-0.015	0.032	-0.06
5.00	-0.007	0.026	-0.036
10.00	-0.0087	0.009	-0.025
20.00	-0.019	-0.019	-0.028
30.00	-0.019	-0.036	-0.011
40.00	-0.023	-0.045	0
50.00	-0.014	-0.06	0.0395
60.00	-0.011	-0.075	0.045
70.00	-0.01	-0.074	0.054
80.00.	-0.0077	-0.08	0.064
90.00	0.003	-0.068	0.066
100.00	0.011	-0.042	0.052



**图 3-18. B 相有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式**

表 3-9. 累积相位有功电能百分比误差与电压间的关系，  
双电压模式

电压 (V)	百分比误差
240	0.0353
120	0.022
60	0.016
30	0.014
15	0.013

表 3-10. 累积相位有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式

电流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	0.019	0.045	-0.032
0.10	0.006	0.058	-0.032
0.25	0.0125	0.045	-0.0385
0.50	0.006	0.032	-0.032
1.00	0.015	0.045	-0.019
2.00	0.003	0.045	-0.039
5.00	0.006	0.024	-0.012
10.00	0.01	0.0165	0
20.00	-0.007	0.002	-0.013
30.00	0.002	-0.007	0.0085
40.00	0	-0.016	0.019
50.00	-0.003	-0.035	0.042
60.00	0.002	-0.047	0.053
70.00	0.009	-0.047	0.063
80.00.	0.007	-0.05	0.067
90.00	0.013	-0.045	0.08
100.00	0.0223	-0.04	0.092

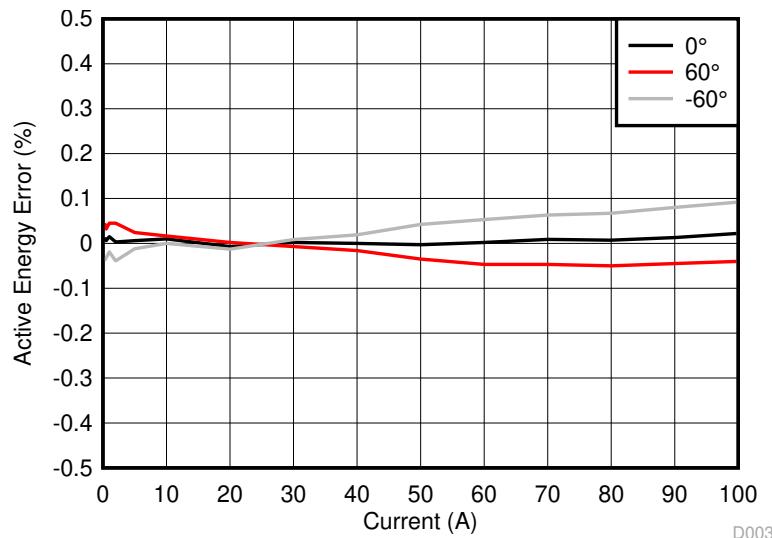


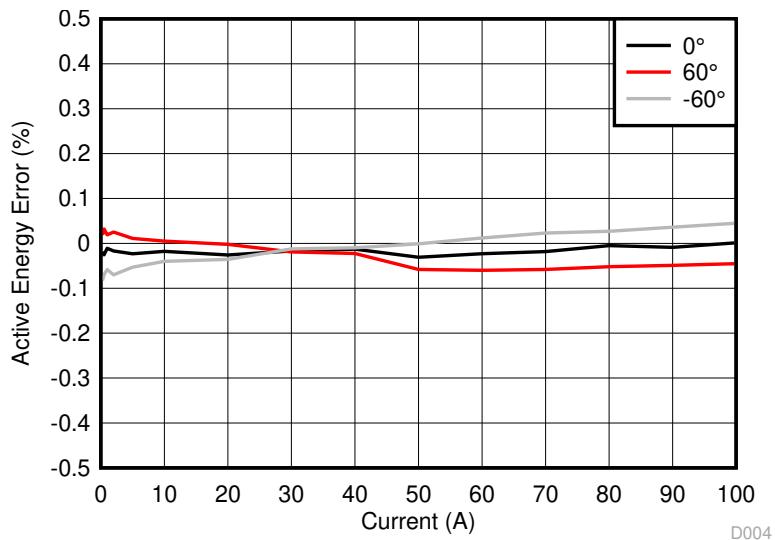
图 3-19. 累积相位有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式

**表 3-11. 累积相位有功电能百分比误差与电压间的关系，  
单电压模式**

电压 (V)	百分比误差
240	-0.005
120	-0.024
60	-0.031
30	-0.036
15	-0.043

**表 3-12. 累积相位有功电能百分比误差与电流间的关系，单电压模式**

电流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	-0.058	-0.045	-0.147
0.10	-0.045	-0.007	-0.096
0.25	-0.019	0.019	-0.083
0.50	-0.0255	0.032	-0.07
1.00	-0.011	0.019	-0.058
2.00	-0.017	0.025	-0.07
5.00	-0.0233	0.011	-0.053
10.00	-0.0177	0.005	-0.04
20.00	-0.026	-0.0023	-0.0355
30.00	-0.017	-0.019	-0.0123
40.00	-0.013	-0.0225	-0.01
50.00	-0.031	-0.058	-0.001
60.00	-0.023	-0.06	0.012
70.00	-0.0183	-0.058	0.023
80.00.	-0.005	-0.052	0.027
90.00	-0.009	-0.049	0.036
100.00	0.0013	-0.045	0.045



**图 3-20. 累积相位有功电能百分比误差与电流间的关系，单电压模式**

表 3-13. 累积有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式

电流 (A)	30°	60°	-30°	-60°
0.05	-0.003	0.004	-0.023	-0.027
0.10	-0.037	-0.013	0.011	-0.008
0.25	-0.067	-0.027	0.043	0.002
1.00	-0.044	-0.021	0.0415	0.011
5.00	-0.036	-0.0183	0.022	0.001
10.00	-0.03	-0.012	0.014	-0.003
20.00	-0.041	-0.026	-0.0035	-0.013
40.00	-0.01	-0.016	-0.021	-0.016
60.00	0.025	-0.0007	-0.047	-0.0247
80.00	0.041	0.0085	-0.048	-0.021
100.00	0.054	0.02	-0.044	-0.012

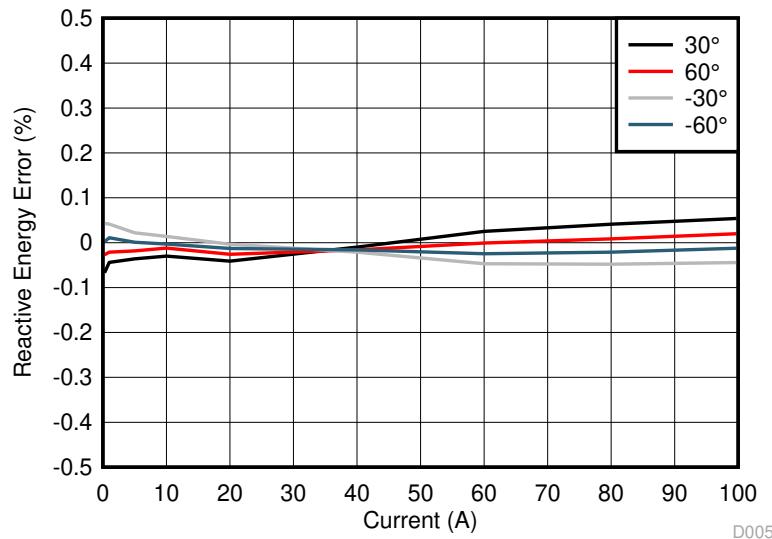


图 3-21. 累积有功电能百分比误差与电流间的关系，双电压模式

表 3-14. 累积有功电能测量误差与频率间的关系，±2Hz 标称频率

条件	58Hz	60Hz	62Hz
0.5A, 0	0.006	0.0017	-0.007
0.5A, 60	0.058	0.032	0.032
0.5A, 300	-0.045	-0.032	-0.032
10A, 0	0.0047	-0.001	-0.0033
10A, 60	0.025	0.0073	0.008
10A, 300	-0.0105	-0.009	-0.013

表 3-15. A 相 RMS 电流百分比误差, 双电压模式

电流 (A)	GUI 电流读数 (A)	参考表读数 (A)	百分比误差
0.05	0.050053	0.050031	0.0440
0.10	0.100039	0.099988	0.0510
0.25	0.250034	0.24997	0.0256
0.50	0.50005	0.49992	0.0260
1.00	1.00017	0.99979	0.0380
2.00	2.00021	1.9996	0.0305
5.00	5.00039	4.9986	0.0358
10.00	10.0013	9.9971	0.0420
20.00	20.0007	19.993	0.0385
30.00	30.0025	29.991	0.0383
40.00	40.0038	39.988	0.0395
50.00	50.0054	49.989	0.0328
60.00	60.0066	59.984	0.0377
70.00	70.0091	69.981	0.0402
80.00.	80.0127	79.981	0.0396
90.00	90.018	89.976	0.0467
100.00	100.024	99.974	0.0500

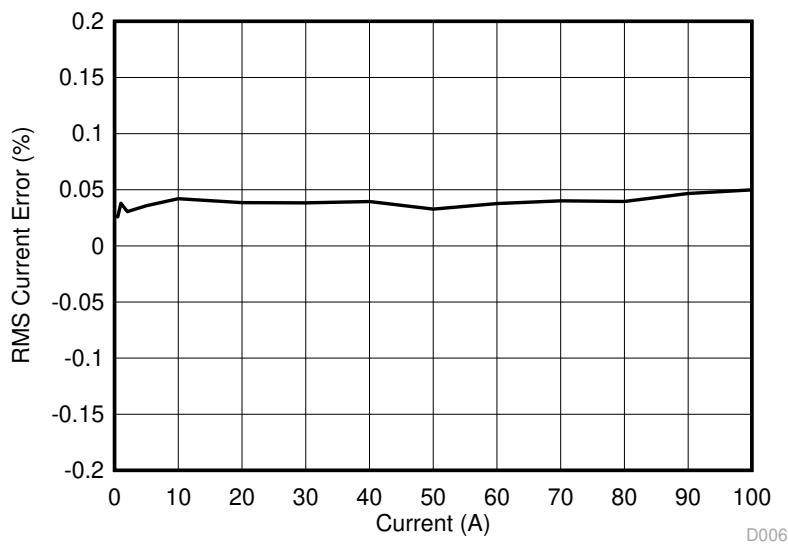


图 3-22. A 相 RMS 电流百分比误差, 双电压模式

表 3-16. B 相 RMS 电流百分比误差，双电压模式

电流 (A)	GUI 电流读数 (A)	参考表读数 (A)	百分比误差
0.05	0.050083	0.05005	0.0659
0.10	0.100055	0.10002	0.0350
0.25	0.250019	0.24996	0.0236
0.50	0.500016	0.49989	0.0252
1.00	1.00008	0.99984	0.0240
2.00	2.00016	1.9999	0.0130
5.00	4.99979	4.9987	0.0218
10.00	9.99998	9.9982	0.0178
20.00	19.9986	19.998	0.0030
30.00	29.9948	29.992	0.0093
40.00	39.9936	39.99	0.0090
50.00	49.9918	49.983	0.0176
60.00	59.9906	59.979	0.0193
70.00	69.9921	69.981	0.0159
80.00.	79.9924	79.976	0.0205
90.00	89.9942	89.97	0.0269
100.00	99.9997	99.97	0.0297

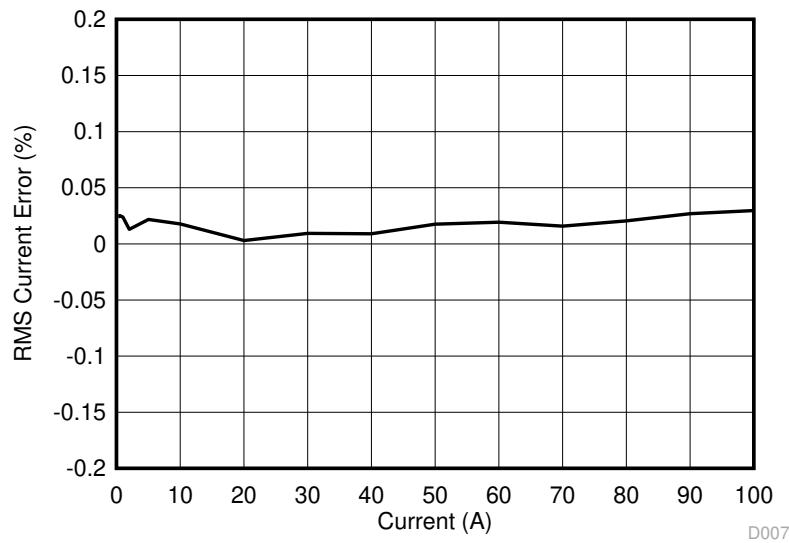


图 3-23. B 相 RMS 电流百分比误差，双电压模式

表 3-17. A 相 RMS 电压百分比误差，双电压模式

电压 (V)	GUI 电压读数 (V)	参考表读数 (V)	百分比误差
9	9.002	9.0034	-0.0155
10	10.003	10.004	-0.0100
30	29.999	30.002	-0.0100
50	50.002	49.999	0.0060
70	70.004	70.001	0.0043
90	90.007	89.999	0.0089
100	100.01	100	0.0100
120	120.016	120	0.0133
140	140.025	140.01	0.0107
160	160.028	160	0.0175
180	180.035	180	0.0194
200	200.049	200	0.0245
220	220.057	220	0.0259
230	230.067	230	0.0291
240.	240.074	240	0.0308
260	260.087	260.02	0.0258
270	270.104	270.03	0.0274

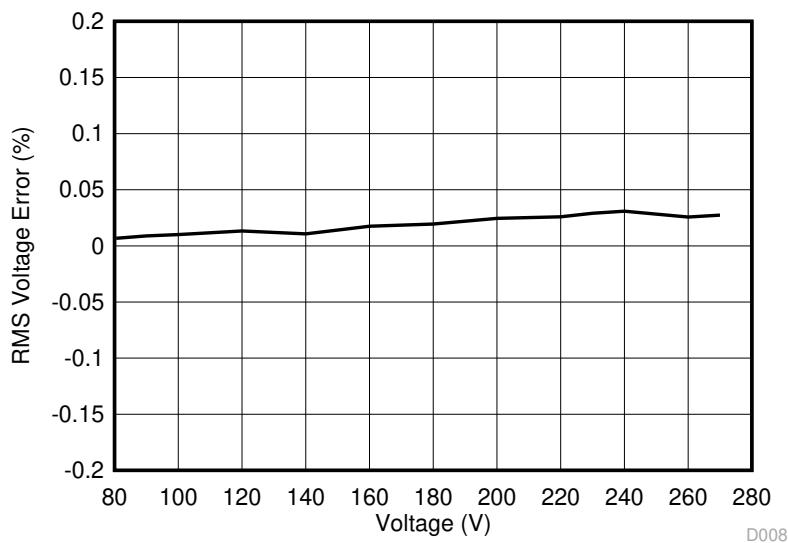


图 3-24. A 相 RMS 电压百分比误差，双电压模式

表 3-18. B 相 RMS 电压百分比误差, 双电压模式

电压 (V)	GUI 电压读数 (V)	参考表读数 (V)	百分比误差
9	8.999	9	-0.0111
10	9.99995	9.9995	0.0045
30	29.997	29.997	0.0000
50	49.999	49.995	0.0080
70	70.002	70	0.0029
90	90.009	90.002	0.0078
100	100.01	100	0.0100
120	120.017	120	0.0142
140	140.027	140.01	0.0121
160	160.03	160.01	0.0125
180	180.042	180	0.0233
200	200.056	200.01	0.0230
220	220.069	220.01	0.0268
230	230.079	230.02	0.0256
240.	250.087	250.02	0.0268
260	260.103	260.03	0.0281
270	270.114	270.03	0.0311

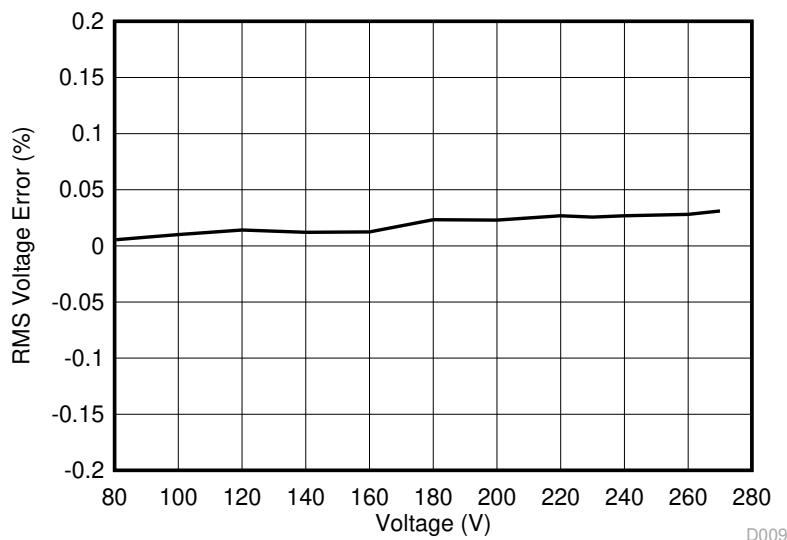


图 3-25. B 相 RMS 电压百分比误差, 双电压模式

表 3-19. 有功电能百分比误差与电流间的关系，32ksps

电流 (A)	0°	60°	-60°
0.05	0.033	0.078	0.028
0.1	0	0.002	-0.02
0.25	0.0225	0.035	-0
0.5	0.0183	0.032	-0.03
1	0.0063	-0.0063	-0.02
2	-0.0123	0.023	-0.04
5	0.008	0.014	-0.01
10	0.0025	0.004	-0
20	-0.013	-0.019	-0.02
30	-0.0077	-0.028	7E-04
40	-0.025	-0.045	0.018
50	0.0027	-0.07	0.061
60	-0.002	-0.075	0.076
70	0.002	-0.0833	0.085
80	-0.0015	-0.09	0.099
90	0.003	-0.096	0.109
100	0.009	-0.099	0.125

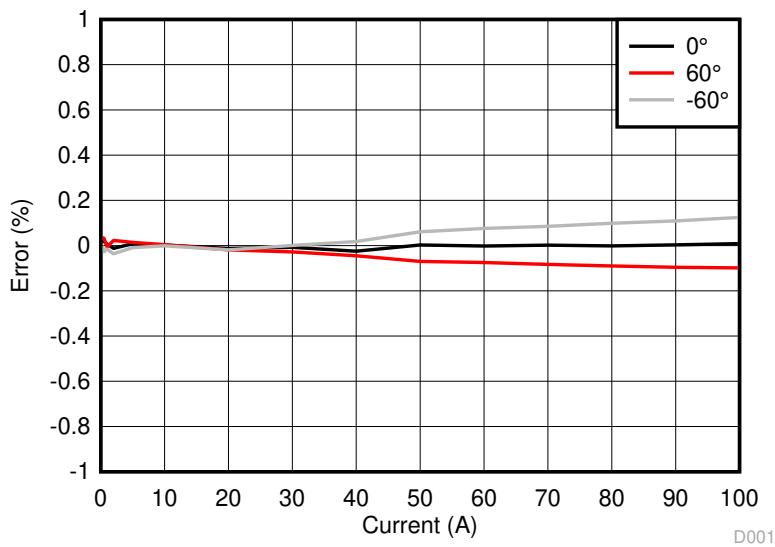


图 3-26. 有功电能百分比误差与电流间的关系，32ksps

## 4 设计文件

### 4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010037](#) 中的设计文件。

### 4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010037](#) 中的设计文件。

### 4.3 PCB 布局建议

就此设计而言，必须遵循以下通用指南：

- 将去耦电容放置在靠近其相关引脚的位置。
- 使用接地平面而不是接地布线，尽量减少接地平面中的切口，尤其是 ADS131M04 附近的切口。在本设计中，顶层和底层都有一个接地平面；这种情况下，请通过充分使用过孔来确保平面之间良好连通。
- 保持通往 ADC 通道输入端的两条布线对称，并且彼此尽可能靠近。
- 如果不执行功率偏移，则从电压通道到电流通道的串扰会降低较低电流下的精度。为了最大限度减少 PCB 上的电压—电流串扰，请将 ADC 通道 0 和 1 分配给电流通道，将通道 2 和 3 分配给电压通道；或者将 ADC 通道 0 和 1 分配给电压通道，将通道 2 和 3 分配给电流通道。
- 对于 ADS131M04 器件，应将  $0.1\ \mu\text{F}$  电容器放置在最靠近 AVDD 引脚的位置，而不是  $1\ \mu\text{F}$  电容器。对于连接到 DVDD 的  $0.1\ \mu\text{F}$  电容器和  $1\ \mu\text{F}$  电容器，同样如此。
- 请注意，从一个转换器转到另一个转换器时，ADS131M04 上的 AINxP 和 AINxN 引脚顺序会切换。本设计中处理该顺序交换的方法是交换连接到电压和电流端子的电线的连接顺序 (J26 和 J27 电流端子之间的电线顺序反转，J28 和 J29 电压端子之间的电线顺序也反转)
- 尽量缩短用于将晶体连接到微控制器的布线的长度。围绕晶体引线放置保护环，并将晶体外壳接地。此外，晶体下方必须有干净的接地层，并且必须避免在晶体下方进行任何布线。此外，要使高频信号远离晶体。
- 在电源连接中使用宽布线。
- 对隔离式 RS-232 和 RS-485 使用不同的接地层。这另一个接地层为 RS-232 和 RS-485 的地电位，而不是电路板中其他位置使用的 GND。
- 确保本设计中的 ISO7731B 和 ISO7720 隔离器件满足推荐的间隙和爬电间距。

#### 4.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010037](#) 中的设计文件。

### 4.4 Altium 工程

要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 [TIDA-010037](#) 中的设计文件。

### 4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010037](#) 的设计文件。

### 4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010037](#) 中的设计文件。

## 5 相关文档

- 德州仪器 (TI) , [ADS131M04 4 通道、同步采样、24 位  \$\Delta\$ - \$\Sigma\$  ADC 数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [MSP432P411x、MSP432P401x SimpleLink™ 混合信号微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [TPS3840 具有MR 和可编程延迟功能的毫微功耗、高输入电压监控器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [TPS25921x 具有精密电流限制和过压保护功能的 4.5V - 18V 电子保险丝数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [THVD1500 具有 \$\pm 8kV\$  IEC ESD 保护功能的 500kbps RS-485 收发器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [ISO773x 高速、基本绝缘三通道数字隔离器数据表](#)
- 德州仪器 (TI) , [TRS3232E 具有 \$\pm 15kV\$  IEC ESD 保护功能的 3V 至 5.5V 多通道 RS-232 线路驱动器和接收器数据表](#)

### 5.1 商标

SimpleLink™, TI E2E™, and MSP432™ are trademarks of Texas Instruments.

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

Arm® and are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries).

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth SIG.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 6 作者简介

**MEKRE MESGANAW** 是德州仪器 (TI) 电网基础设施集团的系统工程师，主要从事电网监控参考设计开发。

Mekre 在佐治亚理工学院获得计算机工程理学学士学位和理学硕士学位。

**MICKAEL CHOUTEAU** 在德州仪器 (TI) 担任现场应用工程师，负责为工业客户提供技术支持。他拥有硬件设计 (信号链, 电池监控) 和软件设计 (低级驱动程序、RTOS 和射频协议) 领域的设计经验。他获得了法国巴黎中央电子理工学院的嵌入式系统工程硕士学位

## 7 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 A (November 2020) to Revision B (February 2021)	Page
• 添加了 ADC 电能计量库的链接。	1

Changes from Revision * (March 2019) to Revision A (November 2020)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式	1
• 在说明和特性中添加了 32ksps ADC 采样率支持	1
• 在电表计量精度测试一节末尾添加了段落。	32
• 添加了有功电能百分比误差与电流间的关系, 32ksps 表和图表。	42

## 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