

摘要

该应用报告介绍了如何使用德州仪器 (TI) MSP430AFE2xx 计量处理器实现单相电子电表。它包含有关此单芯片实现的计量软件和硬件程序的必要信息。

WARNING

不遵守这些步骤和/或不遵守每个步骤的安全要求可能会导致电击、伤害和硬件损坏。对于因疏忽或未听从建议而造成的电击、伤害或损坏，德州仪器 (TI) 概不负责，也不承担任何责任。

本应用报告中讨论的工程配套资料和源代码可从以下 URL 下载：<http://www.ti.com/cn/lit/zip/sl原因494>。

内容

1 商标.....	2
2 引言.....	3
3 方框图.....	4
4 硬件实现.....	6
4.1 电源.....	6
4.2 模拟输入.....	7
5 软件实现.....	8
5.1 外设设置.....	8
5.2 前台进程.....	9
5.3 后台进程.....	12
5.4 能量计配置.....	16
6 能量计演示.....	18
6.1 EVM 概览.....	18
6.2 加载示例代码.....	20
7 结果.....	23
7.1 在 PC 上查看结果.....	23
7.2 在调试期间查看结果.....	23
8 重要注意事项.....	25
9 原理图.....	26
10 参考文献.....	29
11 修订历史记录.....	29

插图清单

图 3-1. 能量计 EVM 系统方框图.....	4
图 3-2. 使用 MSP430AFE2xx 的单相位两线制星形连接.....	5
图 4-1. 适用于 MSP430 能量计的简单电容式电源.....	6
图 4-2. 用于 MSP430 能量计的基于开关的电源.....	6
图 4-3. 电压输入的模拟前端.....	7
图 4-4. 电流输入的模拟前端.....	8
图 5-1. 前台进程.....	10
图 5-2. 后台进程.....	13
图 5-3. 使用 PRELOAD 寄存器进行相位补偿.....	14

图 5-4. 频率测量.....	15
图 5-5. 用于电能指示的脉冲生成.....	16
图 6-1. 单相能量计 EVM 的顶视图.....	18
图 6-2. 带有块和跳线的 EVM 的顶视图.....	19
图 6-3. Source 文件夹内容.....	20
图 6-4. 在 IAR 中编译工具套件.....	21
图 6-5. 在 IAR 中构建计量工程.....	22
图 7-1. 通过 UART 与 PC 的通信得出结果.....	23
图 7-2. 调试期间的结果结构.....	24
图 9-1. 原理图 1.....	26
图 9-2. 原理图 2.....	27
图 9-3. 原理图 3.....	28

表格清单

表 6-1. MSP430AFE253 的电源选择.....	20
表 6-2. MSP430F6638 的电源选择.....	20

1 商标

IAR™ is a trademark of IAR Systems AB.

IAR Embedded Workbench® is a registered trademark of IAR Systems AB.

所有商标均为其各自所有者的财产。

2 引言

MSP430AFE2xx 器件属于 MSP430F2xx 系列器件。这些器件在能源测量中得到应用，并具有必要的架构来为之提供支持。MSP430AFE2xx 器件具有功能强大的 12MHz 中央处理单元 (CPU) 和 MSP430 CPUX 架构。 Σ - Δ 前端包含多达三个模数转换器 (ADC)，这些转换器基于支持差分输入的二阶 Σ - Δ 架构。 Σ - Δ ADC (SD24) 可输出 24 位结果。它们可以组合在一起，以便在同一个触发器上同时对电压和电流进行采样。每个 SD24 转换器支持高达 -1V 的共模电压，并使所有传感器都以接地为基准。此外，该器件还具有集成增益级，支持高达 32 的增益，可对低输出传感器进行放大。此芯片上的 16 位 x 16 位硬件乘法器可用于在能量计算期间进一步加速数学密集型运算。该软件支持计算单相电能计量的各种参数。在能量计量期间计算的关键参数为均方根 (RMS) 电流和电压、有功和无功功率及能量、功率因数和频率。本应用报告以 [zip 文件](#) 的形式提供了完整的计量源代码。对于新设计，请从 [MSP-EM-DESIGN-CENTER](#) 下载电能测量设计中心 (EMDC) 和软件库。

3 方框图

图 3-1 展示了 EVM 的系统方框图。EVM 分为采用 MSP430AFE 的计量部分和采用 MSP430F6638 的应用部分。MSP430AFE 是从计量处理器，MSP430F6638 是主机/应用处理器。这两个 MSP430 器件通过串行外设接口 (SPI) 或通用异步接收器/发送器 (UART)，经由数字隔离器进行通信。

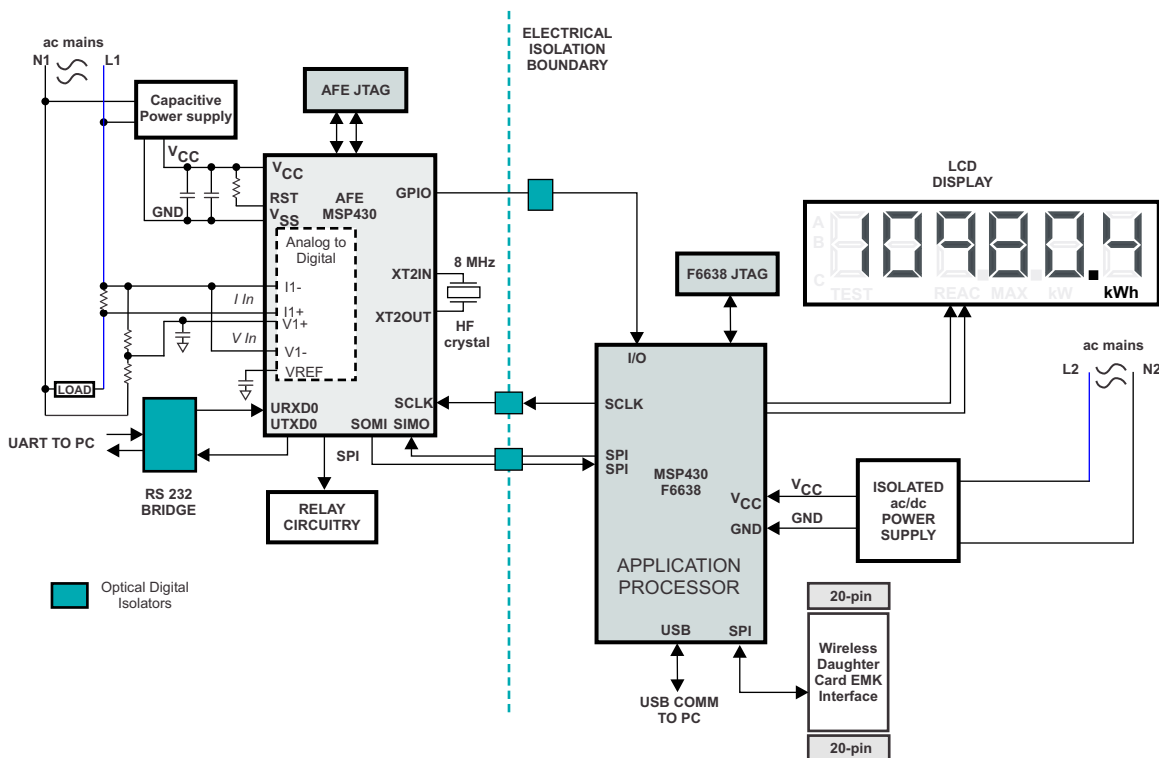


图 3-1. 能量计 EVM 系统方框图

图 3-2 展示了单相能量计应用的高级接口。图中显示了到市电的单相两线制星形连接，具有篡改检测功能。电流传感器连接到每个电流通道，并使用分压器来提供相应的电压。电流互感器 (CT) 具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。分流电阻值的选择取决于电流范围、AFE 上 SD24 的增益设置以及功率损耗容差。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对 MSP430 SD24 有效的正常输入电压范围。有关这些详细信息，请参阅 [MSP430x2xx 系列用户指南](#) 和器件特定数据表。

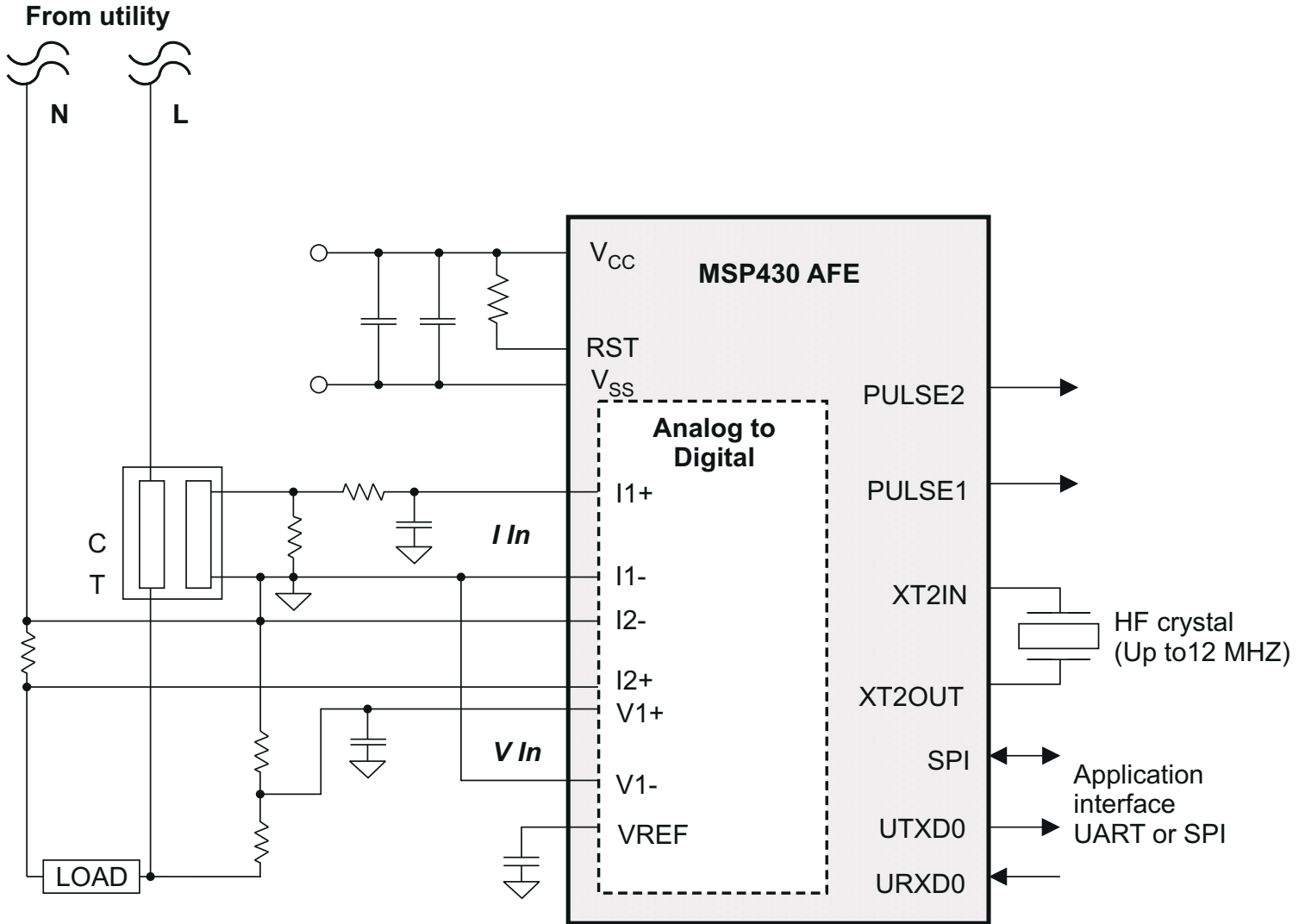


图 3-2. 使用 MSP430AFE2x3 的单相位两线制星形连接

4 硬件实现

本节将介绍使用 MSP430AFE2xx 的能量计所需的硬件。

4.1 电源

MSP430 系列器件是德州仪器 (TI) 提供的超低功耗微控制器。这些器件支持多种低功耗模式，并且当 CPU 和其他外设处于运行状态时，还可在运行模式期间实现低功耗。此器件系列的低功耗特性可简化电源设计并降低其成本。电源允许能量计直接使用市电运行。以下各节将讨论可用于支持您的设计的各种电源选项。

4.1.1 电阻电容 (RC) 电源

图 4-1 展示了通过 110/220V_{RMS} 交流电 (AC) 的市电直接获得 3.3V 单路输出电压时的简单电容器电源。

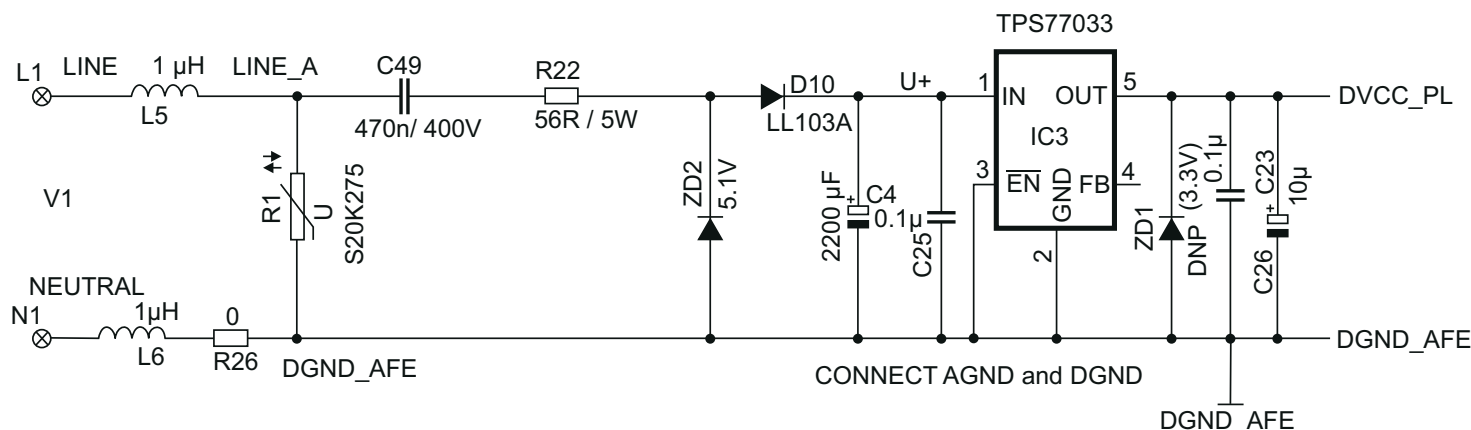


图 4-1. 适用于 MSP430 能量计的简单电容式电源

根据所需的电源输出电流驱动，选择合适的电阻器 R22 和电容器 C49 的值。市电电压被直接馈入基于 RC 的电路，随后是整流电路，为 MSP430 的运行提供直流电压。在 MSP430 全速运行时，这个直流电压被调节至 3.3V。对于图 4-1 中的电路，近似驱动提供了大约 12mA 的电流。如果需要额外的驱动，可以使用 NPN 输出缓冲器或基于变压器/开关的电源。

4.1.2 基于开关的电源

简单电容式电源无法为 MSP430F6638 提供足够的电流来驱动射频收发器。因此，需要基于开关的电源。板上的附加电源模块通过 110V 或 220V 交流电的交流电源提供 3.3V 直流电。本应用报告未提供此模块的内部电路。

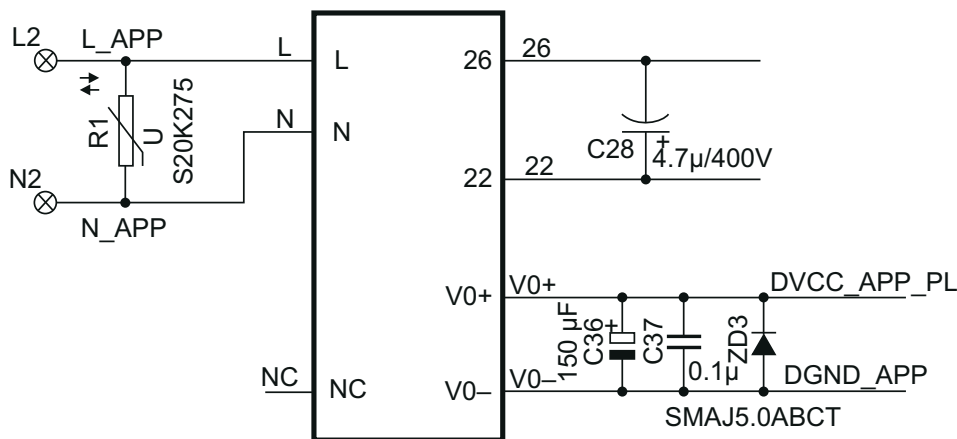


图 4-2. 用于 MSP430 能量计的基于开关的电源

由 SD24 ADC 组成的 MSP430 模拟前端是差分前端，要求引脚上的输入电压不超过 $\pm 500\text{mV}$ (增益 = 1)。为了满足此规格，必须对电流和电压输入进行分压。此外，SD24 允许最高 -1V 的负电压；因此，无需电平转换器即可直接连接市电交流信号。以下各节将介绍用于电压和电流通道的模拟前端。

市电的电压通常为 230V 或 110V，必须降到 500mV 的范围内（参阅图 4-3）。电压模拟前端由尖峰保护压敏电阻（未显示）、后跟一个简单的分压器和一个用作抗混叠滤波器的 RC 低通滤波器组成。

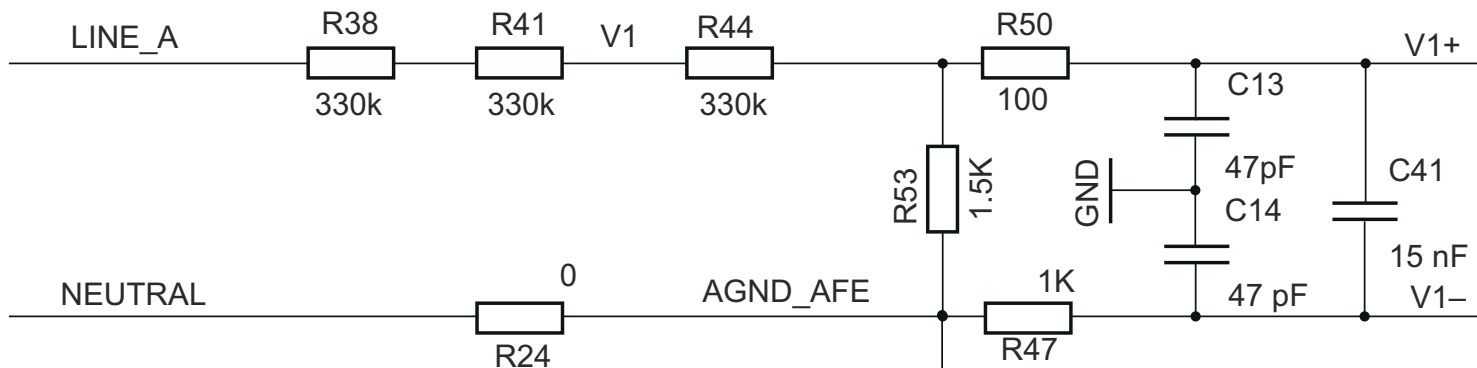


图 4-3 展示了 230V 市电电压下电压输入的模拟前端。该电压会降至约 350mV RMS (峰值为 495mV) 并馈入正输入。该等级符合 MSP430 SD24 模拟限制。零共模电压可以连接到 SD24 的负输入端。此外, SD24 具有 1.2V 的内部基准电压, 该电压可在外部使用, 如果需要, 还可用作共模电压。

请注意，正极侧和负极侧的抗混叠电阻器不同，因为正极端子的输入阻抗高得多，因此，会为抗混叠滤波器使用值较低的电阻器。如果不保持这一差异，则会导致几度的相对较大相移。

4.2.2 电流输入

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 4-4 展示了用于电流通道 I1 和 I2 的模拟前端。

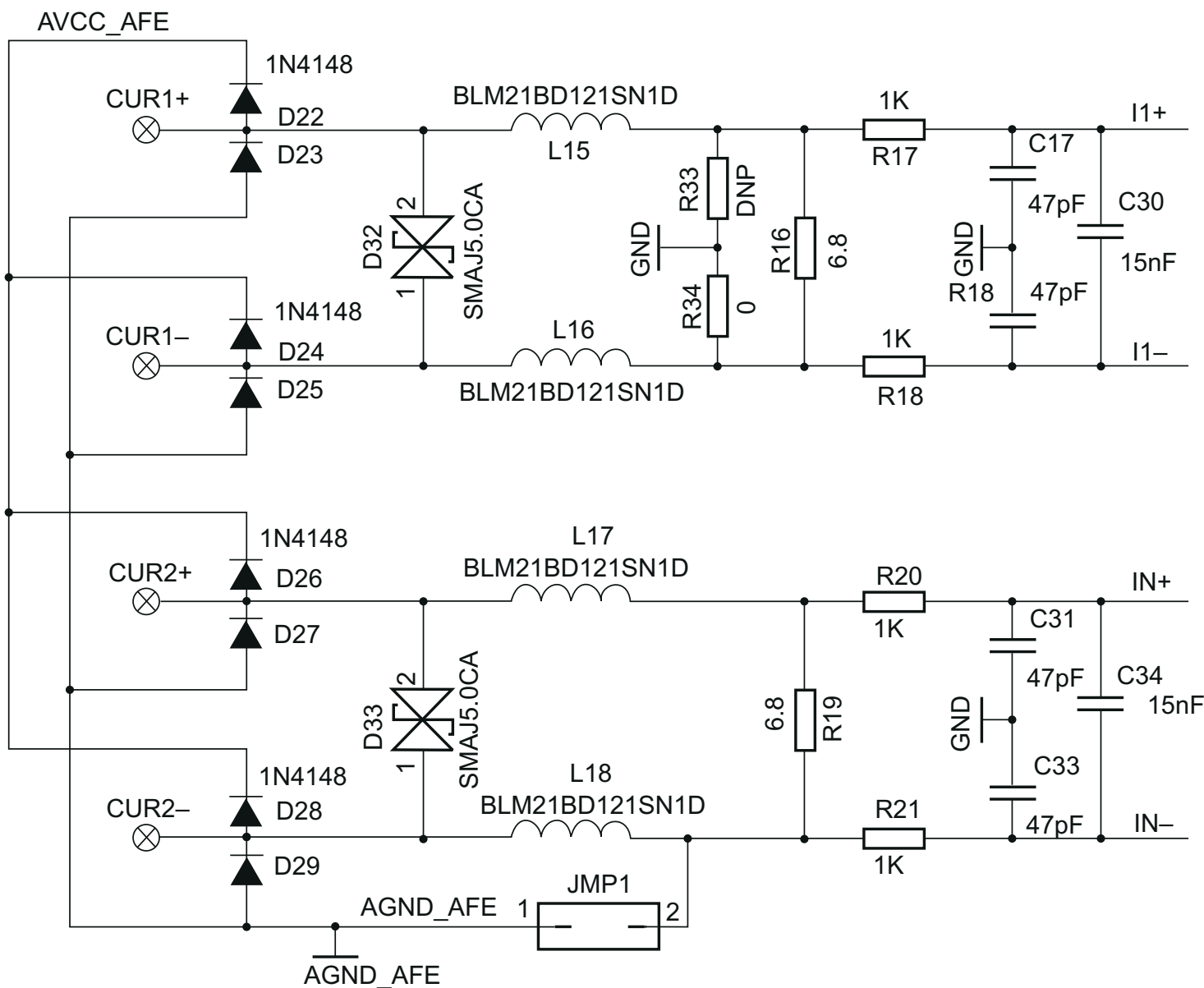


图 4-4. 电流输入的模拟前端

电阻器 R16 是根据电流范围和 CT 的匝数比规格选择的负载电阻器（分流器不需要）。此设计的负载电阻值约为 6.8Ω 。由 R 和 C 组成的抗混叠电路位于负载电阻器后面。转换器的输入信号是全差分输入，电压摆幅最大为 $\pm 500\text{mV}$ ，转换器增益设置为 1。与电压通道类似，共模电压可选择为模拟接地 (AGND_AFE) 或内部基准。

5 软件实现

以下各节讨论了用于实现单相计量的软件。节 5.1 讨论了 MSP430 各种外设的设置。节 5.2 和节 5.3 将计量软件描述为两个主要进程：前台进程和后台进程。

5.1 外设设置

主要外设是 24 位 $\Sigma-\Delta$ (SD24) ADC、时钟系统、计时器和看门狗计时器 (WDT)。

5.1.1 SD24 设置

如前所述，MSP430AFE25x 具有多达三个独立的 Σ - Δ 数据转换器。对于单相系统，至少需要两个 Σ - Δ 转换器才能独立测量一个电压和一个电流。本应用报告随附的代码说明了采用一些防篡改技术的单相系统计量。到 SD24 的时钟 (f_M) 来自一个 8MHz 外部晶体 (ACLK)。采样频率定义为 $f_S = f_M/OSR$ 。OSR 被选为 256，调制频率 f_M 被选为 1MHz，这样得到的采样频率为 3.906ksps。SD24 模块配置为在每个采样时刻生成常规中断。

以下是 SD24 通道关联：

A0.0+ 和 A0.0-	→	电流 I1
A1.0+ 和 A1.0-	→	电流 I2 (中线)
A2.0+ 和 A2.0-	→	电压 V1

5.2 前台进程

前台进程包括器件复位后立即进行的 MSP430 硬件和软件的初始设置。图 5-1 展示了此过程的流程图。

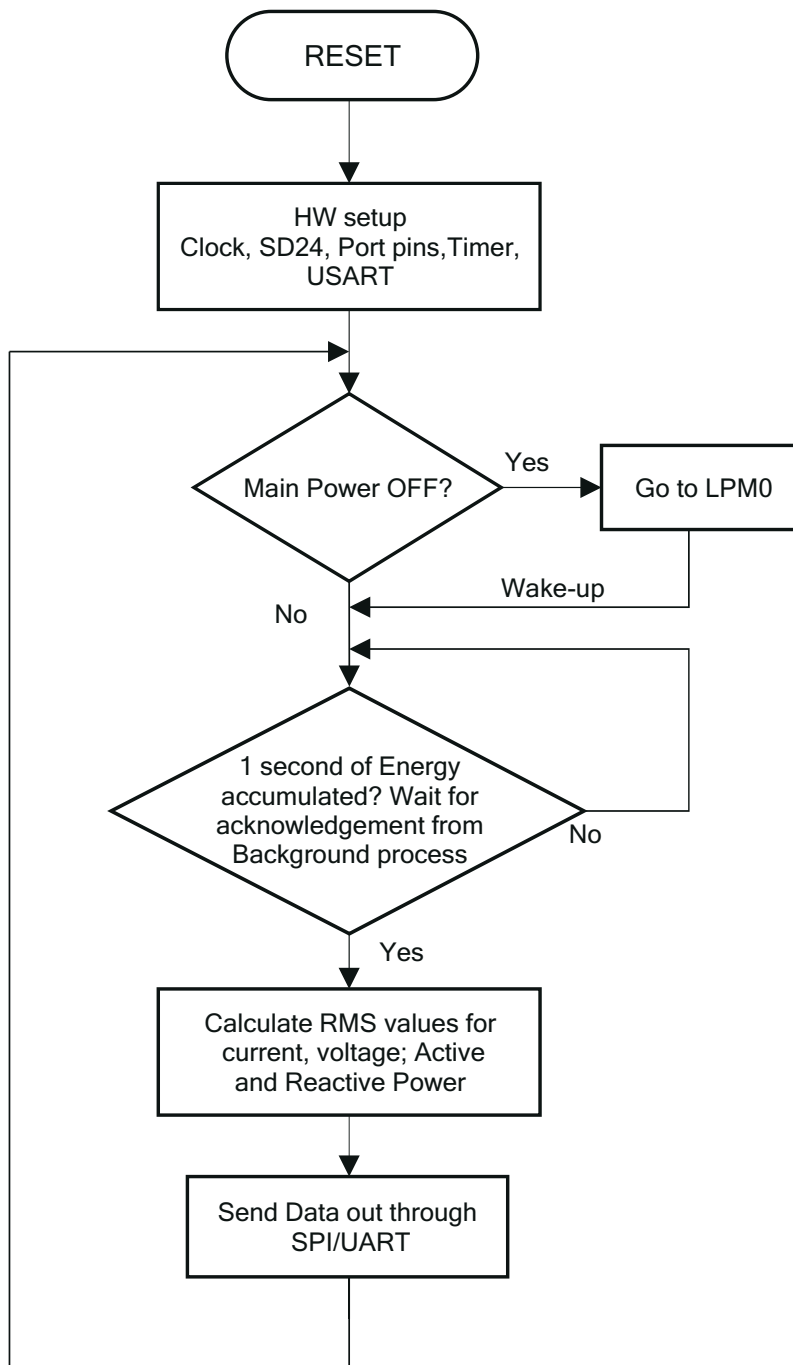


图 5-1. 前台进程

初始化例程涉及模数转换器、时钟系统、通用输入/输出 (GPIO) (端口) 引脚、计时器和用于 UART 功能的 USART 的设置。如果主电源关闭且器件进入 LPM0，则进行检查。在正常运行期间，后台进程在每次有数据帧可处理时通过状态标志通知前台进程。这个数据帧包含持续 1 秒的能量累积。这相当于累积了与输入电压信号同步的 50 或 60 个数据样本周期。此外，采样计数器会跟踪在帧周期内已累积的样本数。此计数会随着软件与传入的市电频率同步而变化。数据样本集包括经过处理的电流、电压、有功和无功电能。所有值都累积在单独的 48 位寄存器中，以便进一步处理并获得 RMS 和平均值。

5.2.1 公式

本节将介绍用于计算电压、电流和电能的公式。

5.2.1.1 电压和电流

如前几节所述，以 3906Hz 的采样率从三个独立的 Σ - Δ 转换器中同时获得电压和电流样本。在一秒中跟踪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。

$$V_{RMS} = K_v * \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v_{ph}^2(n)}{\text{Sample count}}}$$

$$I_{RMS} = K_i * \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} i_{ph}^2(n)}{\text{Sample count}}}$$

$v(n)$ = 在采样时刻 “n” 获取的电压样本

$i(n)$ = 在采样时刻 “n” 获取的电流样本

样本数 = 1 秒内的样本数

K_v = 电压的比例因数

K_i = 电流的比例因数

5.2.1.2 功率和能量

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) 通过下面列出的公式计算有功功率和无功功率总和。

$$P_{Act} = K_p \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v(n) \times i(n)}{\text{Sample count}}$$

$$P_{React} = K_p \frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v_{90}(n) \times i(n)}{\text{Sample count}}$$

$v_{90}(n)$ = 在采样时刻 “n” 获取的电压样本 (相移 90°)

K_p = 功率的比例因子

然后根据每个帧的有功功率值计算消耗的电能，与后台进程中产生电能脉冲的方式类似，但不同之处在于：

$E_{ACT} = P_{ACT} \times \text{样本数}$

对于无功电能，使用 90° 相移方法的原因有两个：

- 这种方法可以准确测量很小电流的无功功率。
- 它符合国际规定的测量方法。

由于市电频率会发生变化，必须首先准确测量市电频率，然后相应地对电压样本进行相移。节 5.3.3 中讨论了这一点。

相移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。小数部分由一个小数延迟滤波器实现（参阅节 5.3.2）。

5.3 后台进程

后台进程使用 SD24 中断作为触发器来收集电压和电流样本（共三个值）。这些样本会在专用的 48 位寄存器中进行进一步处理和累积。后台函数主要处理软件中的时序关键型事件。累积了足够的样本（大约 1 秒）后，将会触发前台函数以计算 V_{RMS} 、 I_{RMS} 、功率和电能的最终值。后台进程还全权负责每一相的电能比例脉冲以及频率和功率因数的计算。图 5-2 展示了后台进程的流程图。

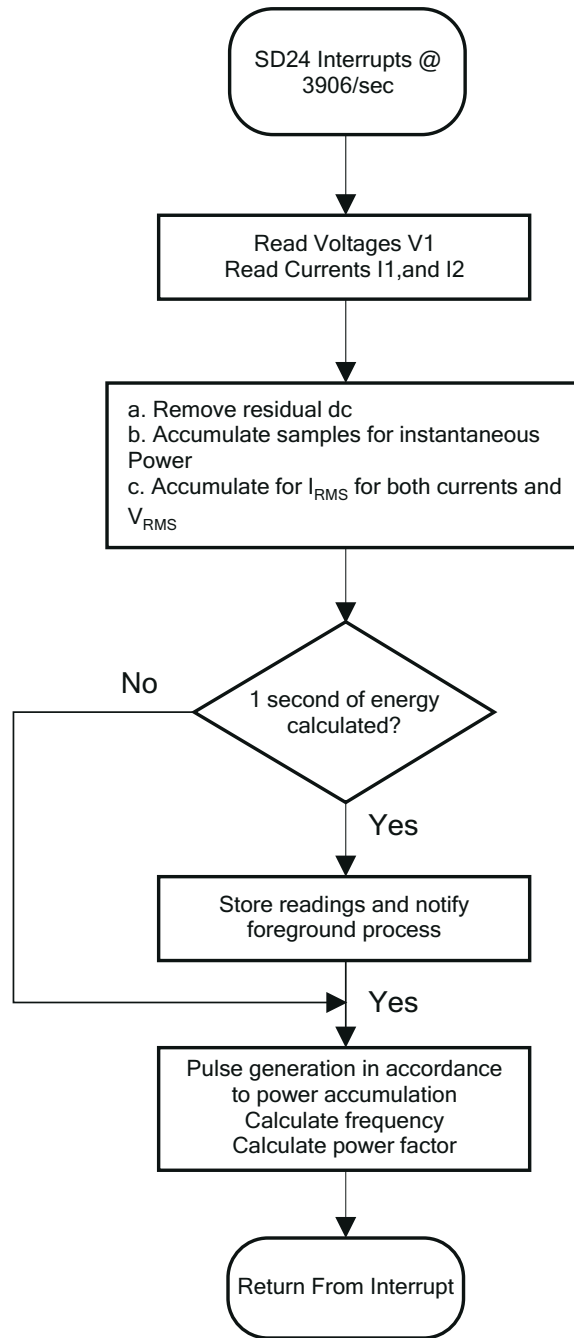


图 5-2. 后台进程

以下各节讨论后台进程中的各个电量测量元素。

5.3.1 电压和电流信号

SD24 转换器具有全差分输入，因此无需添加直流失调误差来预处理信号，大多数单端转换器都是如此。

SD24 的输出是有符号整数。通过从每个 SD24 样本中减去长期直流跟踪滤波器的输出，可独立删除 V 和 I 的任何杂散直流偏移值。此长期直流跟踪滤波器与市电周期同步，可产生稳定的输出。

得到的瞬时电压和电流样本用于生成以下信息：

- 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° 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。

5.3.2 相位补偿

当 CT 用作传感器时，它会和输入电路的无源器件一起在需要补偿的电流和电压信号之间引入额外的相移。SD24 转换器具有内置的硬件延迟，进行分组时可将该延迟应用于各个样本。该延迟可用于提供所需的相位补偿。这个值是在校准过程中获得并被载入到每个转换器各自的 PRELOAD 寄存器中。图 5-3 展示了应用 PRELOAD 的情形。

SD16OSRx = 32

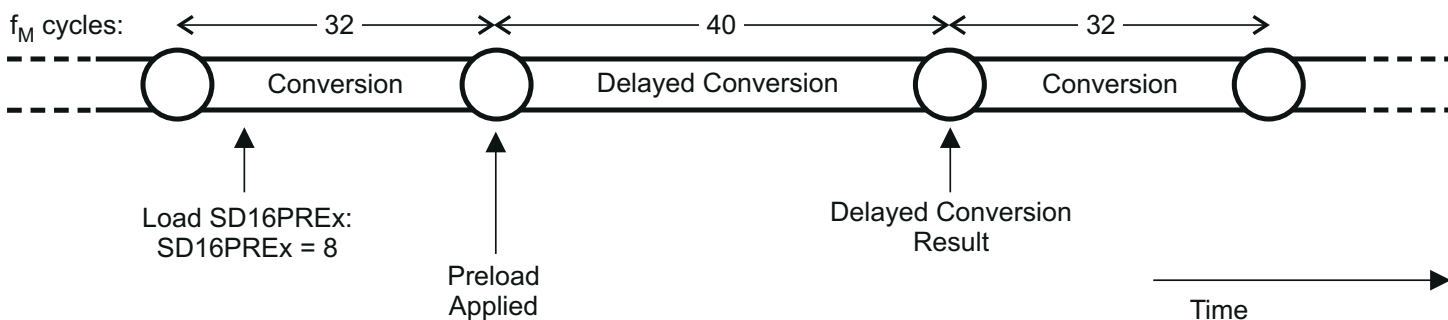


图 5-3. 使用 PRELOAD 寄存器进行相位补偿

小数延迟分辨率是输入频率 (f_{in})、OSR 和采样频率 (f_s) 的函数。

$$Delay\ resolution_{Deg} = \frac{360^\circ \times f_{in}}{OSR \times f_s} = \frac{360^\circ \times f_{in}}{f_m}$$

在此应用中，输入频率为 60Hz、OSR 为 256、采样频率为 3906，预加载寄存器中每一位的分辨率约为 0.02° ，最大为 5.25° （最多 255 步长）。由于三个通道的采样是组触发的，因此经常使用的方法是对所有通道施加 128 步长的延迟，然后从该基值增大或减小。这允许正负延迟时序来补偿相位超前或滞后。这使得当前设计的实际限制为 $\pm 2.62^\circ$ 。当所用 CT 的相移大于此最大值时，必须提供整个采样延迟以及小数延迟。还可以动态修改该相位补偿，以适应 CT 中的温漂。

5.3.3 频率测量和周期跟踪

每个相位的瞬时 I 和 V 信号累积在 48 位寄存器中。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 48 位寄存器，并通知前台进程生成平均结果，例如 RMS 和功率值。样本代码使用周期边界触发前台求平均值进程，因此此进程生成的结果非常稳定。

为了进行频率测量，样本代码需要在过零电压样本之间使用直线插值。图 5-4 展示了过零点附近的样本以及线性插值的过程。

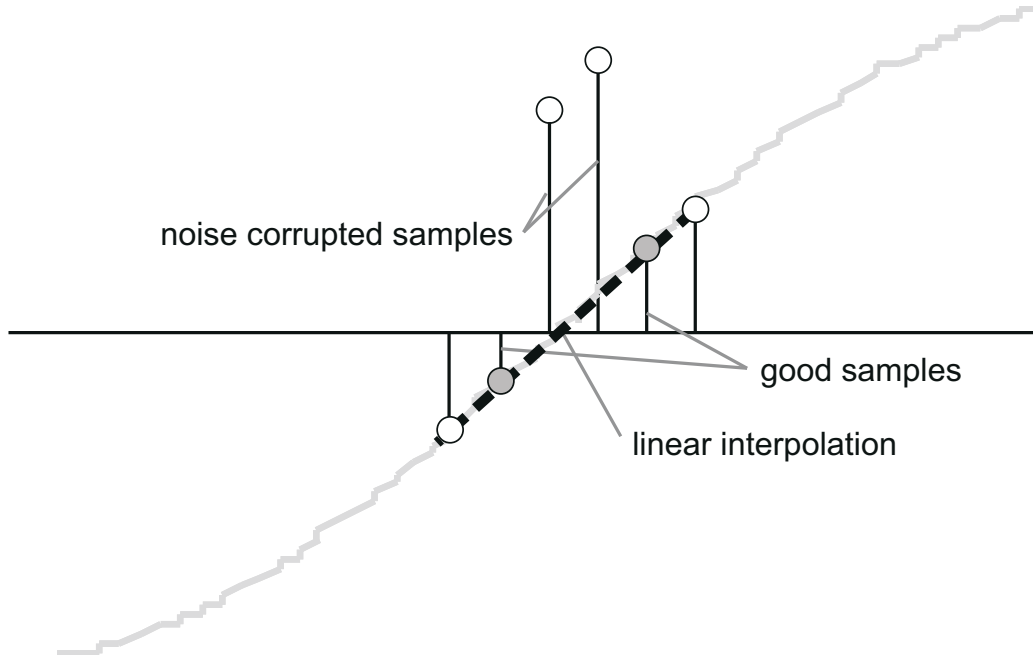


图 5-4. 频率测量

噪声尖峰也会导致错误，因此该代码通过变化率检查来滤除掉可能的错误信号，并确保这些点是从真正的过零点插入的。例如，如果有两个负样本，那么噪声尖峰可能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存在过零。

由此产生的周期间时序会通过一个弱低通滤波器，从而进一步消除周期间变化。这会产生稳定且准确的频率测量值，并可以容忍噪声。

5.3.4 LED 脉冲生成

在电表上，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仪表或在正常运行期间报告测量结果。为了有效地完成这两项任务，微控制器必须精确地生成和记录这些脉冲的数量。一般要求是生成这些抖动相对较小的脉冲。尽管时间抖动并不表示准确度不佳，但只要将抖动平均化，就会让人对仪表的整体准确度产生负面印象。

样本代码使用平均功耗来生成电能脉冲。每次 SD24 中断时，都会累积平均功耗（由前台进程计算）。此累积过程相当于将功率转化为电能。当累积的电能超过阈值后，便会产生一个脉冲。高于此阈值的电能值将保留下来，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。

该阈值决定了电力公司指定的电能刻度，并且是一个常数，例如，它可以以 kWh 为单位。在大多数仪表中，每千瓦时的脉冲决定了该能量刻度。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 1600。在这种情况下，电能刻度为 1kWh/1600。将生成电能脉冲，也可以通过板上的 LED 进行指示。端口引脚针对脉冲进行切换，并控制每个脉冲的脉冲宽度。

图 5-5 展示了脉冲生成流程图。

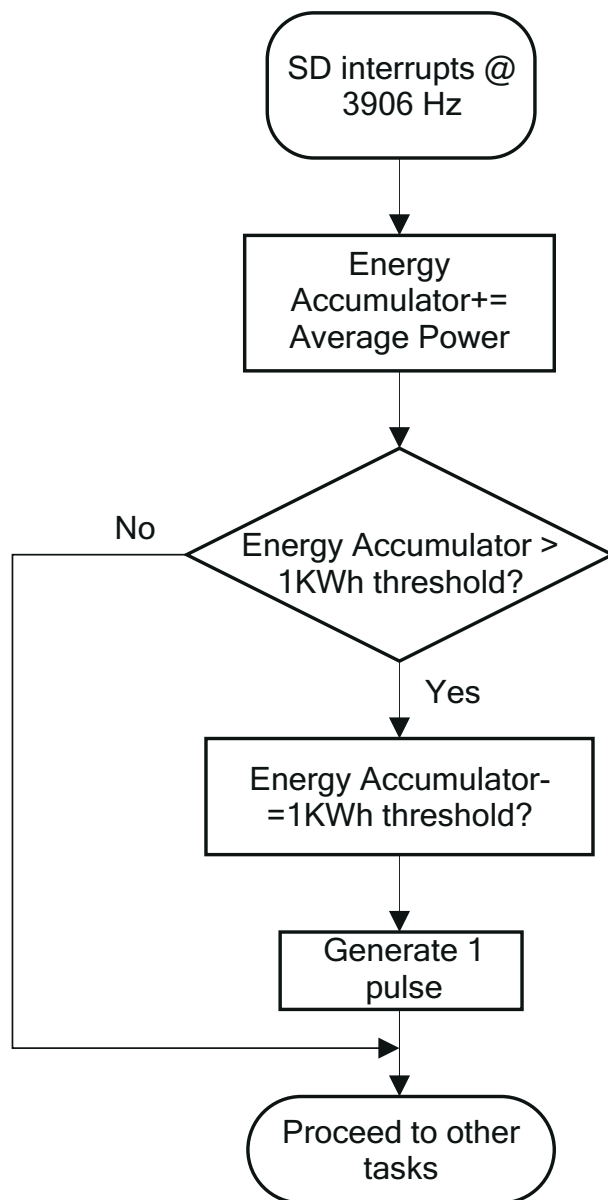


图 5-5. 用于电能指示的脉冲生成

平均功率以 0.01W 为单位，1kWh 阈值定义为：

$$1\text{kWh 阈值} = 1 / 0.01 \times 1\text{kW} \times (\text{每秒的中断数}) \times (\text{一小时的秒数}) = 100000 \times 3906 \times 3600 = 0x14765AAD400$$

5.4 能量计配置

头文件用于初始化和配置能量计以执行若干个计量功能。本节列出了一些可用的用户可配置选项。需要修改的文件是 `emeter-ng` 目录中的 `emeter-1ph-bare-bones-afe.h`。它包括在仪表正常运行期间使用的宏定义。

- `MAINS_FREQUENCY_SUPPORT`：宏可配置仪表，以测量市电的频率。
- `MAINS_NOMINAL_FREQUENCY`：该宏定义了默认市电频率，为相位随电流变化的非线性 CT 或其他传感器提供动态相位校正的起点。
- `TOTAL_ENERGY_PULSES_PER_KW_HOUR`：此宏定义每 1kWh 能量的脉冲总数。在此应用中，它被定义为 1600。请注意，该值不是标准值，但被许多仪表制造商广泛使用。由于参考表能够接受快速脉冲（由于大电流），因此该数字可能存在实际限制。

- **ENERGY_PULSE_DURATION**：此宏定义一个能量脉冲的 LED 开启时间的时长。该值以 ADC 样本为单位进行测量（即，每 1/3906 秒递增一次）。允许的最大值为 255，提供的脉冲约为 62.5ms，而 163 提供的脉冲为 40m。如果测量到非常高的电流，该时长可能过长，并且相邻脉冲会重叠。如果在脉冲输出端发现重叠，建议将该值更改为较小的数字，例如 80。
- **NEUTRAL_MONITOR_SUPPORT**：此宏可启用对中性线监控的支持。第三个 SD24 用于此目的。
- **VRMS_SUPPORT**：此宏对仪表进行配置，以根据电压样本计算 V_{RMS} 。
- **IRMS_SUPPORT**：此宏对仪表进行配置，以根据电流样本计算 I_{RMS} 。
- **REACTIVE_POWER_SUPPORT**：此宏对仪表进行配置，以根据电压和电流样本计算无功功率。
- **REACTIVE_POWER_BY_QUADRATURE_SUPPORT**：此宏将仪表配置为根据延迟 90° 的电压样本和电流样本计算无功功率，而不是使用功率三角法。
- **APPARENT_POWER_SUPPORT**：此宏对仪表进行配置，以计算视在功率。
- **POWER_FACTOR_SUPPORT**：此宏对仪表进行配置，以计算超前和滞后的功率因数。使用了一种基于标量点积比率的与频率无关的方法。
- **CURRENT_LIVE_GAIN**：此宏定义了 SD24 内部可编程增益放大器 (PGA) 的线路电流增益。在此应用中，它设置为 1。
- **CURRENT_NEUTRAL_GAIN**：此宏定义了 SD24 内部 PGA 的中性线电流监控增益。在此应用中，它设置为 16。
- **VOLTAGE_GAIN**：此宏定义了 SD24 内部 PGA 的电压增益。在此应用中，它设置为 1。
- **DEFAULT_V_RMS_SCALE_FACTOR_A**：此宏用于保存第 1 相电压的比例因子。可以将其设置为可接受范围内的值，并在校准期间进行微调。
- **DEFAULT_I_RMS_SCALE_FACTOR_A**：此宏用于保存第 1 相电流的比例因子。可以将其设置为可接受范围内的值，并在校准期间进行微调。
- **DEFAULT_P_SCALE_FACTOR_A_LOW**：此宏用于保存第 1 相有功功率的比例因子。可以将其设置为可接受范围内的值，并在校准期间进行微调。
- **DEFAULT_I_RMS_SCALE_FACTOR_NEUTRAL**：此宏用于保存中性线电流的比例因子。可以将其设置为可接受范围内的值，并在校准期间进行微调。

6 能量计演示

能量计评估模块 (EVM) 采用 MSP430AFE253，用于演示能量测量。完整的演示平台包含可轻松连接到测试系统的 EVM、计量软件以及用于查看结果和执行校准的 PC 图形用户界面 (GUI)。

6.1 EVM 概览

图 6-1 和图 6-2 展示了 EVM 硬件。图 6-1 是能量计的顶视图。图 6-2 基于功能显示了 EVM 各部分的位置。

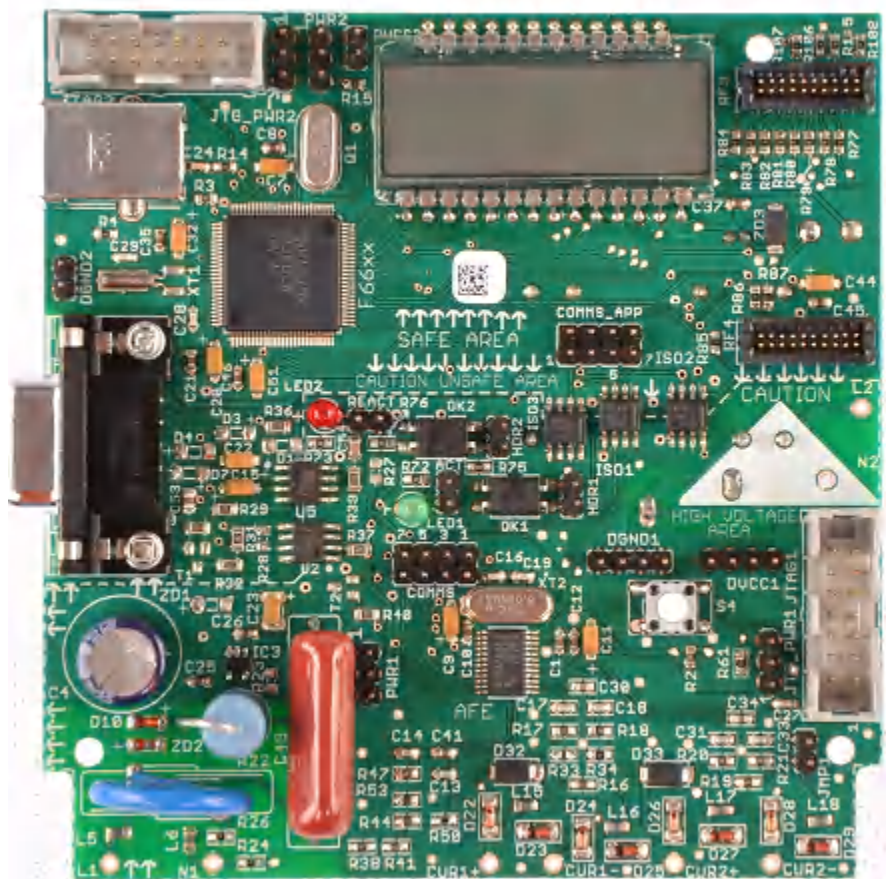


图 6-1. 单相能量计 EVM 的顶视图

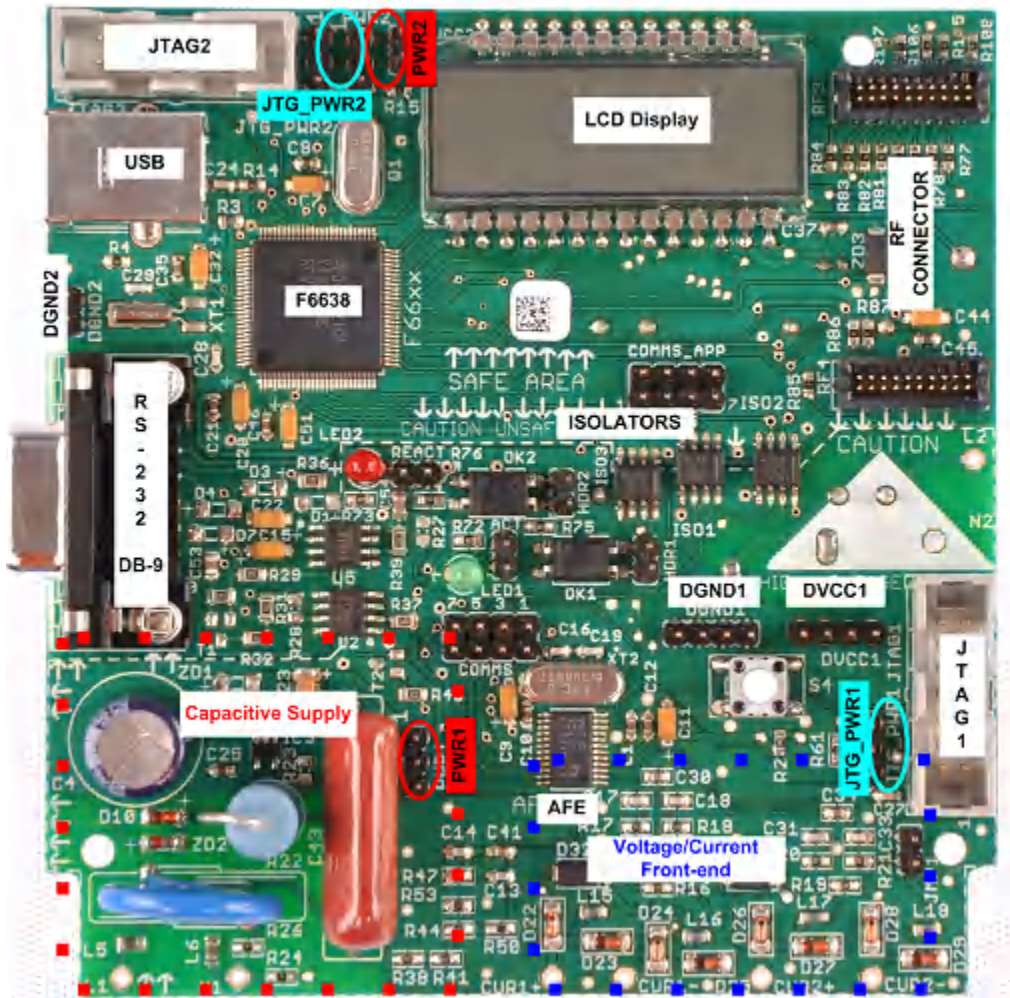


图 6-2. 带有块和跳线的 EVM 的顶视图

6.1.1 与测试设置或交流电压的连接

交流电压或电流可应用于电路板，以便在以下几点进行测试：

- L 和 N 表示电压输入。最高可达 240V 交流 50/60Hz。
- CUR1+ 和 CUR1- 是传感器后的电流输入。使用 CT 或分流器时，确保 CUR1+ 和 CUR1- 两端的电压不超过 500mV。
- CUR2+ 和 CUR2- 也可以用作传感器之后的电流输入。使用 CT 或分流器时，确保 CUR2+ 和 CUR2- 两端的电压不超过 500mV。

6.1.2 电源选项

此 EVM 可配置成在 MSP430AFE253 和 MSP430F6638 特有的电源下运行。MSP430 器件的各种供电来源为 JTAG、市电电压和外部电源。表 6-1 只列出了 MSP430AFE253 电源选项的接头设置。

表 6-1. MSP430AFE253 的电源选择

电源选项	JTG_PWR1	PWR1
JTAG	[1-2] 上的跳线	无跳线
市电电源	无跳线	[1-2] 上的跳线
外部电源	无跳线	[1-2] 上的跳线

如果需要在接通外部电源的情况下进行 JTAG 调试，那么除了在 PWR1 上放置跳线外，还必须在 JTG_PWR1 的 [2-3] 上放置跳线。可以在 DV_{CC1} 和 DGND1 接头之间直接提供外部电源。

当由市电电源供电时，也可以通过在 PWR1 接头两端放置一个电流表而将其视为电流消耗接头。此外，当通过 JTAG 供电时，电流消耗接头不再是 PWR1；相反，电流表可连接在接头 JTAG_PWR1 的 [1-2] 两端。

表 6-2 只列出了 MSP430F6638 电源选项的接头设置。

表 6-2. MSP430F6638 的电源选择

电源选项	JTG_PWR2	PWR2
JTAG	[1-2] 上的跳线	无跳线
市电电源	无跳线	[1-2] 上的跳线
外部电源	无跳线	[2-3] 上的跳线

需要在接通外部电源的情况下进行 JTAG 调试。此外，要将跳线置于 PWR1 上，必须将 [2-3] 上的跳线置于 JTG_PWR1 上。可以在 DV_{CC2} 和 DGND2 接头之间直接提供外部电源。除了整个板具有 USB 电源选项外，还必须组装 R15，并将跳线置于 PWR2 的 [2-3] 位置。

当由市电电源供电时，也可以通过在 PWR2 接头两端放置一个电流表而将其视为电流消耗接头。此外，当通过 JTAG 供电时，电流消耗接头将不再是 PWR2；相反，电流表可连接在接头 JTAG_PWR2 的 [1-2] 两端。

6.2 加载示例代码

此源代码是使用 IAR 编译器版本 6.x 在 IAR™ IDE 中开发的。在 IAR 的早期版本中无法打开工程文件。如果工程是在高于 6.x 的版本中加载的，则会显示创建备份的提示，您可以点击“YES”继续。能量计量软件有两个部分：

- 工具套件，其中包含一个大部分是数学例程的库。
- 具有源文件和头文件的主代码。

6.2.1 打开工程

Source 文件夹结构如图 6-3 所示。

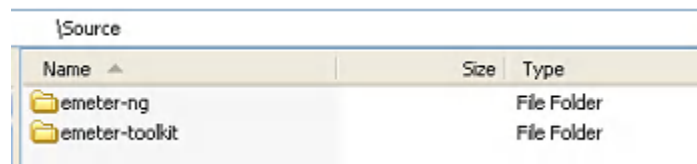


图 6-3. Source 文件夹内容

emeter-ng 文件夹包含工程文件；对于此应用，使用 *EVM_AFE253.ewp* 工程文件。emeter-toolkit 文件夹具有名为 *emeter-toolkit-afe2xx.ewp* 的相应工程文件。首次使用时，建议您完成这两个工程的重建：

1. 打开 IAR Embedded Workbench®，找到并加载工程 *emeter-toolkit-afe2xx.ewp*，然后全部重建（参阅图 6-4）。

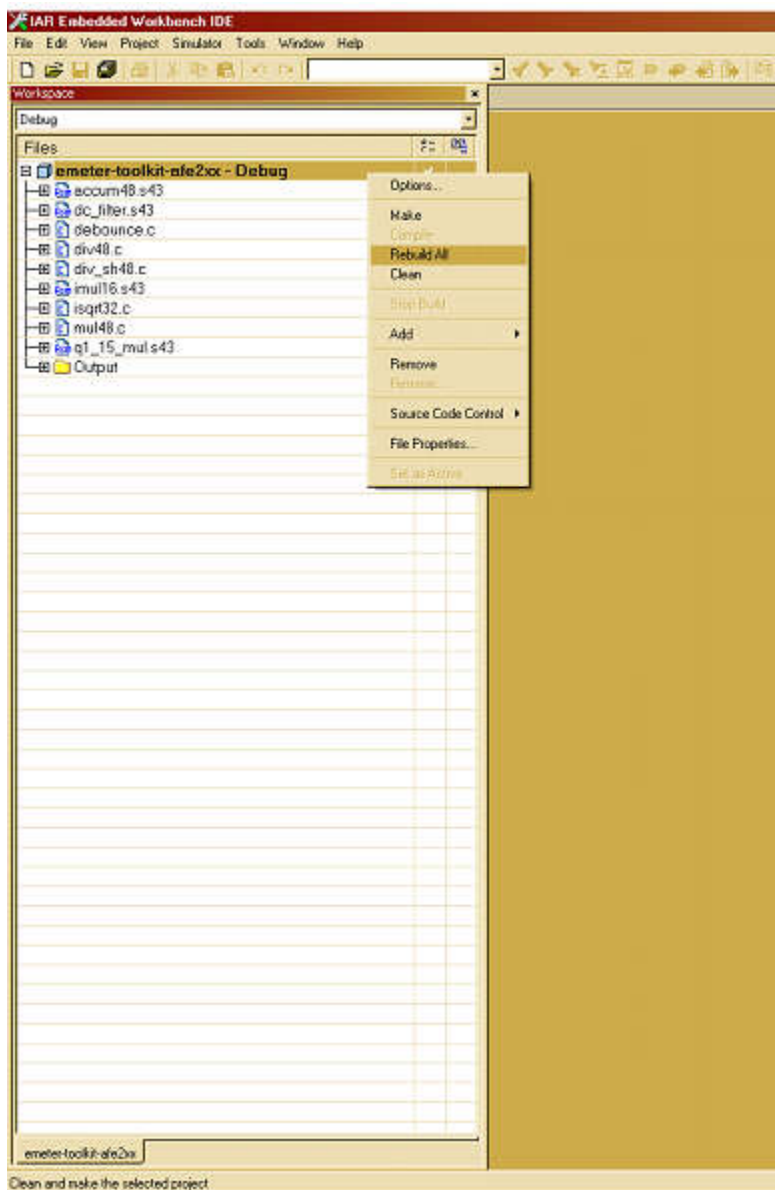


图 6-4. 在 IAR 中编译工具套件

2. 关闭现有的工作区并打开主工程 *EVM_AFE253.ewp*，全部重建并将其加载到 MSP430AFE253 中 (参阅图 6-5)。

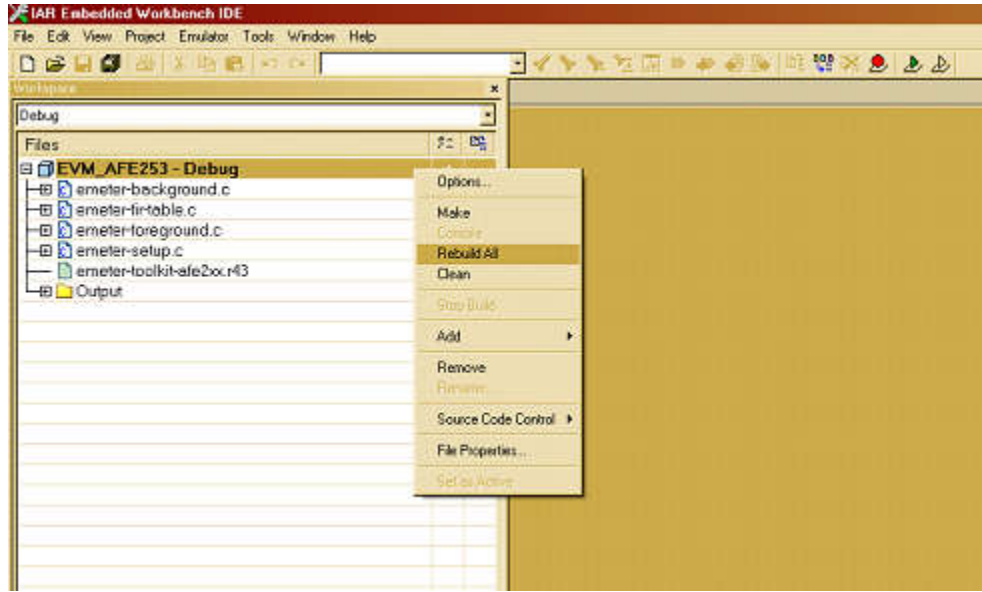


图 6-5. 在 IAR 中构建计量工程

3. 主工程重建完毕后，将其加载到 EVM 中，然后点击“Debug”菜单中的“GO”。

7 结果

如果完成了节 5 和节 6 中所述的过程和配置，则可以观察到结果。

7.1 在 PC 上查看结果

仪表打开后，可以使用提供的 GUI 查看结果。使用 DB-9 RS-232 串行电缆将 EVM 上的 RS-232 接头连接到 PC。打开终端程序以查看类似于图 7-1 的报告。UART 的波特率设置可由用户配置，默认设置为 115kbps。

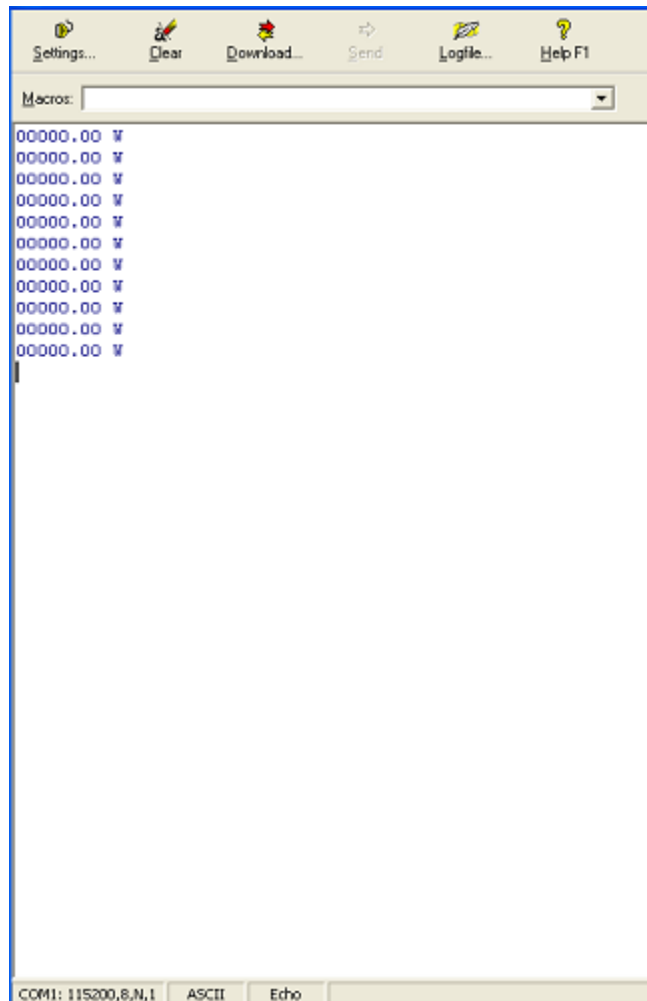


图 7-1. 通过 UART 与 PC 的通信得出结果

这是工作功耗，大约每秒显示一次。连接测试信号时，报告非零值。

7.2 在调试期间查看结果

在调试期间，如果一个断点被放置在代码中的适当位置上，则可在“Watch”窗口中查看结果。为此，定义了一个名为 phase 的结构。

图 7-2 展示了结构详细信息。

Expression	Value	Location	Type
phase	chan1 (0x22A)		struct pha
active_power	<array>	Memory:0x22A	long[2]
[0]	-1	Memory:0x22A	long
[1]	5	Memory:0x22E	long
reactive_power	<array>	Memory:0x232	long[2]
[0]	0	Memory:0x232	long
[1]	4	Memory:0x236	long
apparent_power	<array>	Memory:0x23A	long[2]
[0]	1	Memory:0x23A	long
[1]	6	Memory:0x23E	long
V_rms	9	Memory:0x242	uint16_t
frequency	4999	Memory:0x244	uint16_t
I_rms	<array>	Memory:0x246	uint16_t[2]
[0]	19	Memory:0x246	uint16_t
[1]	246	Memory:0x248	uint16_t
power_factor	<array>	Memory:0x24A	int[2]
[0]	10000	Memory:0x24A	int
[1]	8333	Memory:0x24C	int
V_dc_estimate	-1535510	Memory:0x24E	long
V_history	<array>	Memory:0x252	int[32]
V_sq_accum	<array>	Memory:0x292	int[3]
V_sq_accum_log	<array>	Memory:0x298	int[3]
current	<array>	Memory:0x29E	struct curr
[0]	<struct>	Memory:0x29E	struct curr
I_dc_estimate	<array>	Memory:0x29E	long[1]
P_accum	<array>	Memory:0x2A2	int[1][3]
P_accum_log	<array>	Memory:0x2A8	int[1][3]
P_reactive...	<array>	Memory:0x2AE	int[1][3]
P_reactive...	<array>	Memory:0x2B4	int[1][3]
I_sq_accum	<array>	Memory:0x2BA	int[1][3]
I_sq_accum...	<array>	Memory:0x2C0	int[1][3]
in_phase_co	<array>	Memory:0x2C6	struct pha
quadrature...	<array>	Memory:0x2CA	struct pha
I_history	<array>	Memory:0x2D0	int[1][1]
I_endstops	'i' (0x14)	Memory:0x2D2	int8_t
leading	'r' (0x00)	Memory:0x2D3	int8_t
[1]	<struct>	Memory:0x2D4	struct curr
sample_count	0	Memory:0x30A	int
sample_count_lo	4106	Memory:0x30C	int
cycle_sample_c	15360	Memory:0x30E	int
main_period	1310782976	Memory:0x310	long
since_last	1	Memory:0x314	int
last_V_sample	-7	Memory:0x316	int
status	66	Memory:0x318	uint16_t
int_enable	'r' (0x01)	Memory:0x31A	uint8_t
int_flag	'r' (0x01)	Memory:0x31B	uint8_t
V_endstops	'i' (0x14)	Memory:0x31C	int8_t
V_history_index	'(0x1C)	Memory:0x31D	int8_t
energy	<struct>	Memory:0x31E	struct pha
total_active_po	28739	Memory:0x31E	long
total_reactive...	32846	Memory:0x322	long
extra_total_act...	'r' (0x00)	Memory:0x326	int8_t
extra_total_rea...	'r' (0x00)	Memory:0x327	int8_t
total_active_en	'r' (0x00)	Memory:0x328	uint6_t
total_reactive...	'r' (0x00)	Memory:0x329	uint8_t
total_consume...	0	Memory:0x32A	uint32_t
total_consume...	0	Memory:0x32E	uint32_t

图 7-2. 调试期间的结果结构

8 重要注意事项

- 本文档为初稿，在下一个电路板版本发布后，本文档可能会发生变更。
- 除非使用隔离式 FET USB FET，否则切勿在调试时使用市电。
- MSP430AFE 和 MSP430F6638 具有两个不同的 GND 平面，如果通过 USB 实现 PC 通信，则需要保持这一状态。
- 该软件的第一个版本不包含 MSP430F6638 上的任何项目，但日后会添加这些项目。
- 板上的两个 LED 分别指示有功和无功，用于通过生成脉冲来测试仪表的精度。
- 接头 ACT_PUL 和 REACT_PUL 上也提供了相同脉冲。但是，接头上的这些脉冲未进行隔离。对于隔离式脉冲，请改用接头 HDR1 和 HDR2。
- 电路板不随电流传感器一起提供。在连接到 EVM 下侧的 CUR1 和 CUR2 点之前，必须确保已连接传感器。

WARNING

不遵守这些步骤和/或不遵守每个步骤的安全要求可能会导致电击、伤害和硬件损坏。对于因疏忽或未听从建议而造成的电击、伤害或损坏，德州仪器 (TI) 概不负责，也不承担任何责任。

9 原理图

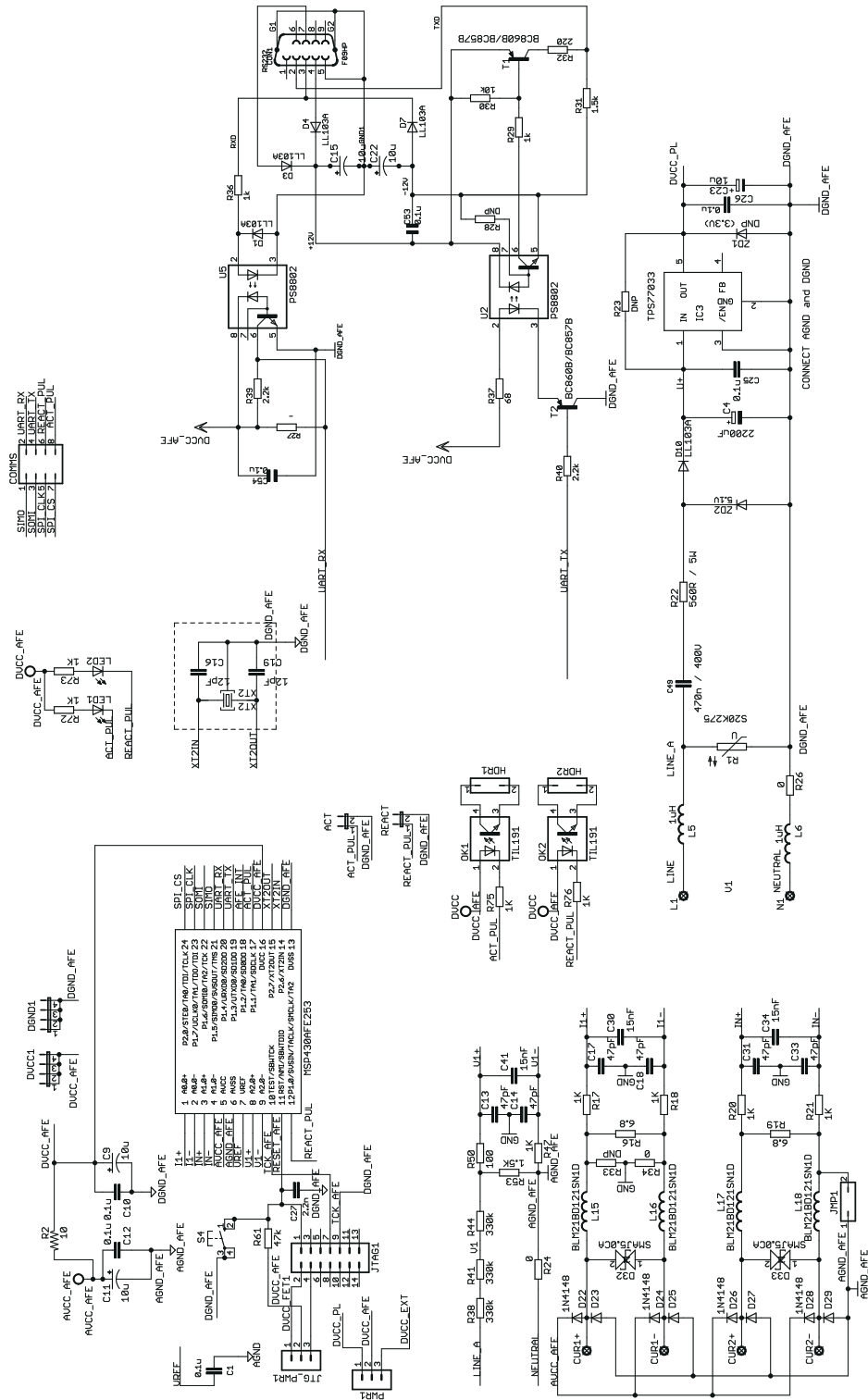
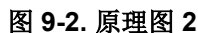


图 9-1. 原理图 1



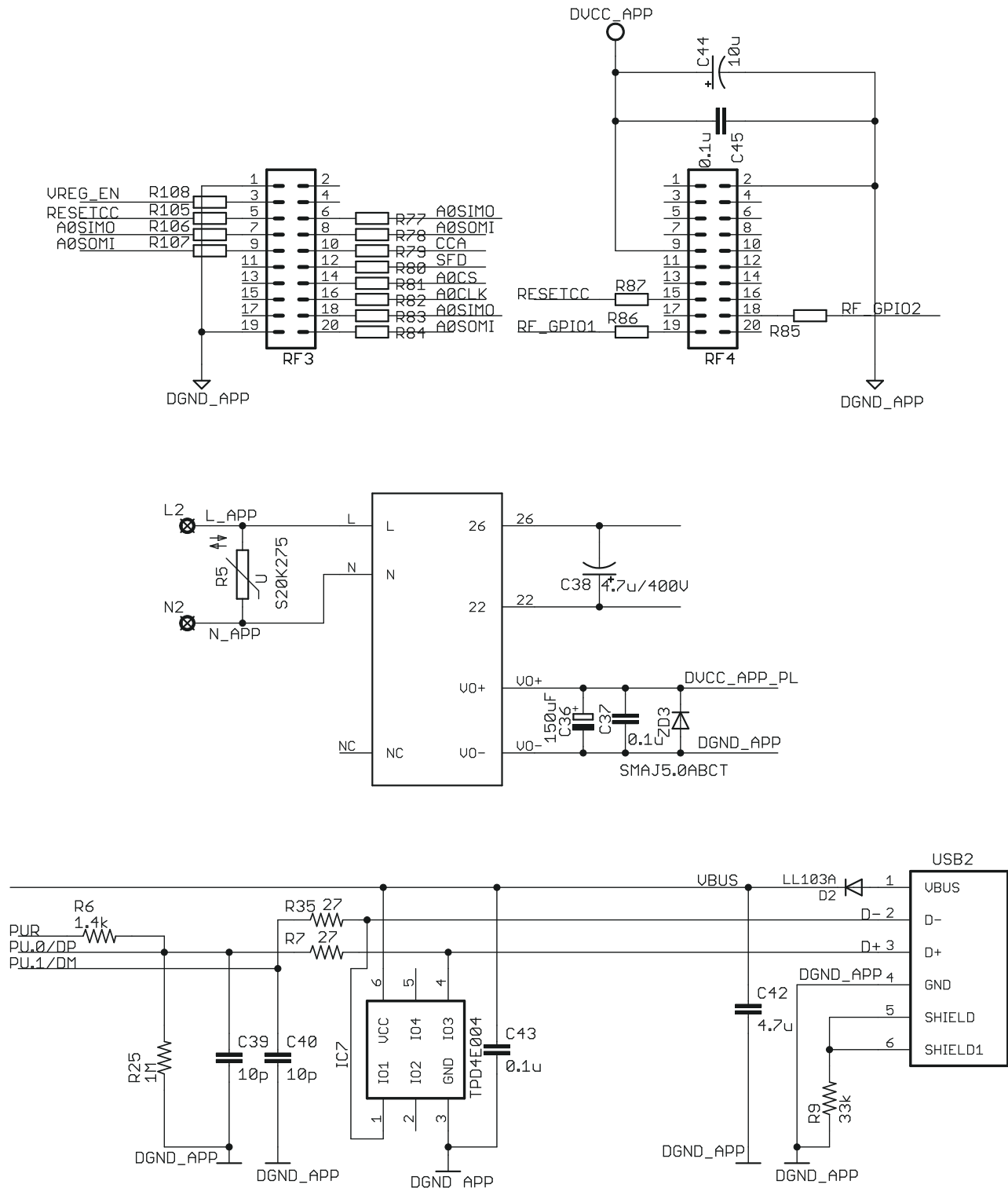


图 9-3. 原理图 3

10 参考文献

- 德州仪器 (TI) , [MSP430x2xx 系列用户指南](#)

11 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 (May 2013) to Revision B (September 2023)	Page
• 添加了 zip 文件链接和设计中心链接.....	3
• 添加了指向系列用户指南的超链接.....	4
• 删除了关于设计公式的句子。查看 PDF 标记以了解删除的句子.....	6

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