

Application Note

使用 **MSP430F6736(A)** 实施单相电子电表

摘要

该应用报告介绍了如何使用德州仪器 (TI) MSP430F673x 计量处理器实现单相电子电表。它还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。

警告

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。

本应用报告所述 MSP430F6736(A) 源代码以及 EVM430-F6736 设计文件，可从[具有增强型 ESD 保护功能的单相计量参考设计](#)页面下载。

对于新设计，请考虑从 [MSP-EM-DESIGN-CENTER](#) 下载电能测量设计中心 (EMDC) 和软件库。

内容

1 简介.....	3
2 系统图.....	3
3 硬件实现.....	4
3.1 电源.....	4
3.2 模拟输入.....	5
4 软件实现.....	6
4.1 外设设置.....	6
4.2 前台进程.....	6
4.3 后台进程.....	8
5 能量计演示.....	12
5.1 EVM 概述.....	12
5.2 加载示例代码.....	15
6 结果和校准.....	17
6.1 查看结果.....	17
6.2 仪表校准.....	19
7 参考资料.....	21
8 原理图.....	22
9 修订历史记录.....	27

插图清单

图 2-1. 电子仪表内部典型接线.....	3
图 2-2. 基于 MSP430F6736(A) 的单相双线制星形连接.....	4
图 3-1. 适用于 MSP430 能量计的简单电容式电源.....	5
图 3-2. 电压输入的模拟前端.....	5
图 3-3. 电流输入的模拟前端.....	6
图 4-1. 前台进程.....	7
图 4-2. 后台进程.....	9
图 4-3. 使用 PRELOAD 寄存器进行相位补偿.....	10
图 4-4. 频率测量.....	10
图 4-5. 用于电能指示的脉冲生成.....	11
图 5-1. 单相能量计 EVM 的俯视图.....	12
图 5-2. 带有块和跳线的 EVM 的顶视图.....	13

图 5-3. 带有测试测试连接的 EVM 俯视图.....	14
图 5-4. Source 文件夹结构.....	16
图 5-5. 在 IAR 中编译工具套件.....	16
图 5-6. 在 IAR 中构建计量工程.....	16
图 6-1. 电表批量校准.....	17
图 6-2. 仪表状态.....	18
图 6-3. 仪表 1 功能.....	18
图 6-4. 仪表 1 错误 (用于手动校正)	19
图 6-5. 仪表校准系数.....	20
图 6-6. 全电流范围内的测量精度.....	21
图 8-1. 原理图 (1/5).....	22
图 8-2. 原理图 (2/5).....	23
图 8-3. 原理图 (3/5).....	24
图 8-4. 原理图 (4/5).....	25
图 8-5. 原理图 (5/5).....	26

表格清单

表 5-1. MSP430F6736(A) EVM 的接头名称与跳线设置.....	15
表 6-1. 电能测量精度及误差 (%) (在 230 V、15 A、50 Hz 条件下校准)	21

商标

MSP430™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

MSP430F6736(A) 器件是新一代计量片上系统 (SoC)，属于 MSP430F67xx 器件系列。该系列器件隶属于高性能 16 位 MSP430F6xxx 平台，新增多项功能，具备高灵活性，可实现稳定可靠的单相、两相及三相计量解决方案。不过，本应用报告仅阐述单相方案的实现方法。这些器件在能源测量中得以应用，并具有必要的架构来为之提供支持。

MSP430F6736(A) 搭载采用 MSP430CPUX 架构、主频 25MHz 的高性能 CPU。该模拟前端最多包含三路 24 位 $\Sigma \Delta$ 模数转换器 (ADC)，采用支持差分输入的二阶 $\Sigma \Delta$ 架构。 $\Sigma \Delta$ ADC ($\Sigma \Delta 24$) 可独立工作，能够输出 24 位测量结果。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。此外，这款 ADC 还具有集成增益级，支持高达 128 的增益，可对低输出传感器进行放大。此芯片上的 32 位 x 32 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。电能测量期间计算的关键参数包括：电流和电压有效值、有功和无功功率、有功和无功电能、功率因数以及频率。

本应用报告所述 MSP430F6736(A) 源代码以及 EVM430-F6736 设计文件，可从[具有增强型 ESD 保护功能的单相计量参考设计](#)页面下载。

2 系统图

图 2-1 展示了电子式电能表 (也称作电表) 在实际应用中的典型接线方式。支持的交流电压及对应电流规格为：230V 或 120V，50Hz 或 60Hz。LINE (火线) 与 NEUTRAL (零线) 标签代表电网提供的低压交流电。

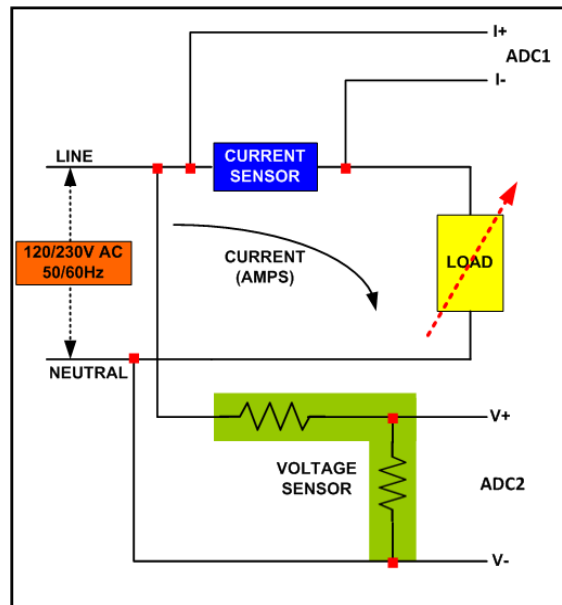


图 2-1. 电子仪表内部典型接线

后续章节将提供电流、电压传感器、ADC 及其他硬件的更多信息。

图 2-2 展示了基于 MSP430F6736(A) 实现单相电能表应用的高层接口框图。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。电流传感器连接到各路电流通道，并采用简易分压器来测量对应的电压。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 和负载电阻器的选型，需依据制造商和电能测量所需的电流范围确定。分流电阻的阻值由电流范围、SD24 增益设置以及传感器功耗共同决定。在选择电压通道的分压电阻器时，需要确保对市电电压进行分压后落在 MSP430™ SD24 有效的常规输入范围内。如需这些数值，请参见 [MSP430F5xx 和 MSP430F6xx 系列用户指南](#) 以及器件专属数据表 ([MSP430F673x](#)、[MSP430F672x 混合信号微控制器](#) 和 [MSP430F673xA](#)、[MSP430F672xA 混合信号微控制器](#)) 。

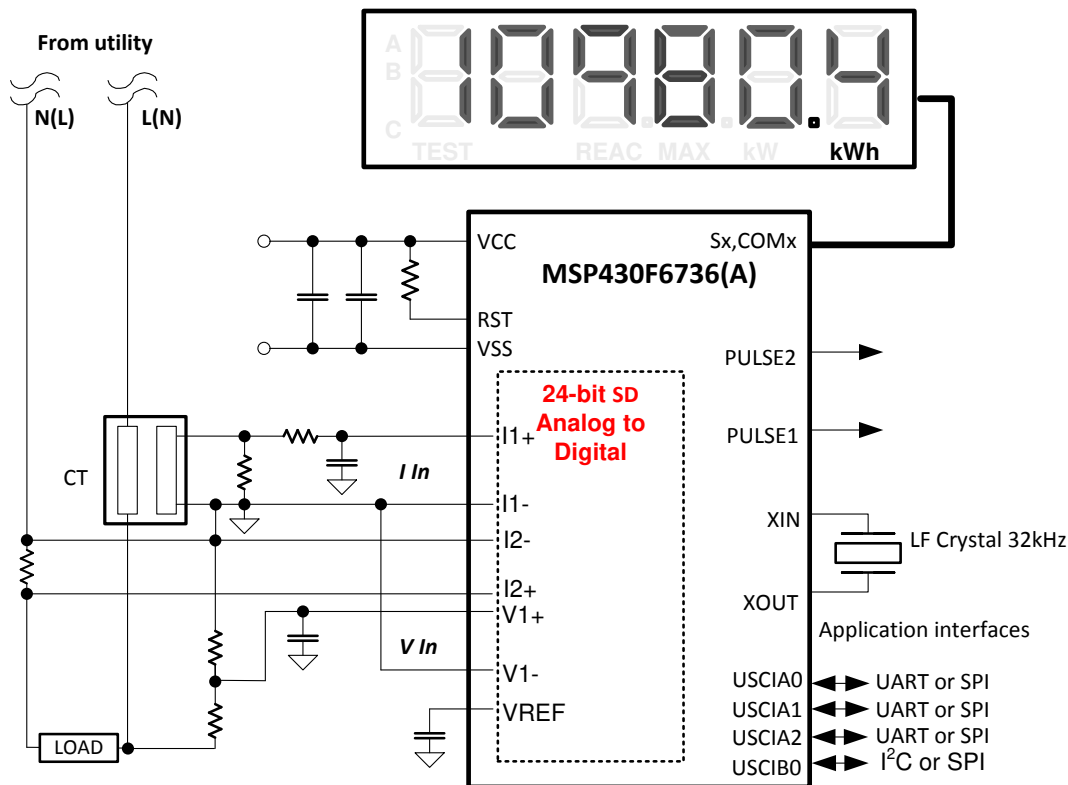


图 2-2. 基于 MSP430F6736(A) 的单相双线制星形连接

L 与 N 分别代表火线电压和零线电压；只要器件引脚不会同时接入两路电压，L 和 N 可以互换。其他需要关注的信号为 PULSE1 和 PULSE2。这两路信号用于输出有功和无功电能脉冲，供精度检测和校准使用。

3 硬件实现

本节介绍采用 MSP430F6736(A) 实现可正常工作的单相能量计的硬件设计。

3.1 电源

MSP430 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 和其他外设处于工作状态时，器件在活动模式下的功耗得到优化。此器件系列的低功耗特性可大幅简化电源设计，并降低设计成本。该电源方案支持能量计直接由市电供电。后续章节介绍可用于支撑设计的各类电源方案。

3.1.1 电阻电容 (RC) 电源

图 3-1 展示了一款简易电容电源，可直接由有效值 110V、220V，50Hz 和 60Hz 交流市电生成 3.3V 单路输出电压。

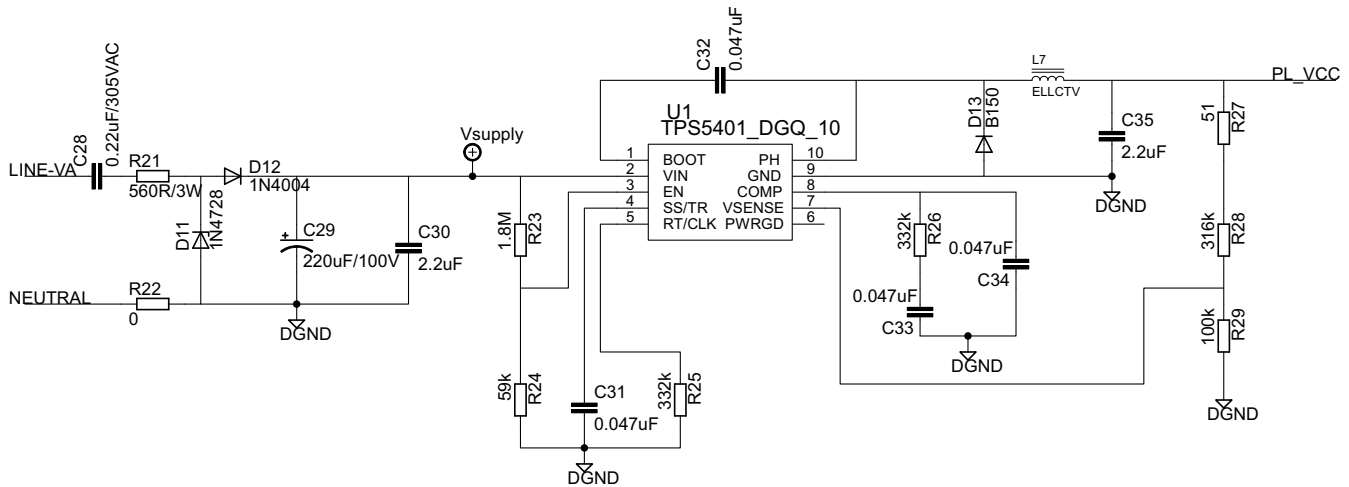


图 3-1. 适用于 MSP430 能量计的简单电容式电源

根据所需的电源输出电流驱动，选择合适的电阻器 R21 和电容器 C28 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 MCU 的运行提供直流电压。在 MSP430 MCU 全速运行时，这个直流电压被调节至 3.3V。对于图 3-1 中的电路，驱动提供了大约 12mA 的电流。该电源的设计公式在[能量计电容降压离线电源负载电流能力优化](#)应用报告中给出。如需小幅提高驱动电流（最高 20mA），可增大 C28 的电容值。如需大于 20mA 的驱动能力，特别是驱动射频器件时，可采用 NPN 输出缓冲器或变压器与开关型电源来提供额外驱动。

3.2 模拟输入

由 $\Sigma \Delta$ ADC 构成的模拟前端是差分前端，要求引脚上的输入电压不超过 $\pm 920\text{mV}$ （增益 = 1）。为了满足此规格，需要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。节 3.2.1 和 节 3.2.2 分别介绍用于电压和电流通道的模拟前端。

3.2.1 电压输入

市电电压通常为 230V 或 110V，需要降压至 1V 量级。电压模拟前端包含浪涌保护压敏电阻（本图未显示），后接简易分压器和 RC 低通滤波器，该滤波器用作抗混叠滤波器。

图 3-2 展示了 230V 市电电压输入对应的模拟前端电路。电压被降压至约 700 mV 有效值，峰值为 990 mV，并馈入正输入端，满足 $\Sigma \Delta$ 转换器的模拟输入限值。 $\Sigma \Delta$ 的负输入端可接入零共模电压。此外， $\Sigma \Delta$ 具有 1.2 V 的内部基准电压，该电压可对外输出，必要时也可用作共模电压。GND 端参考零线电压或火线电压，具体取决于电流传感器的安放位置。

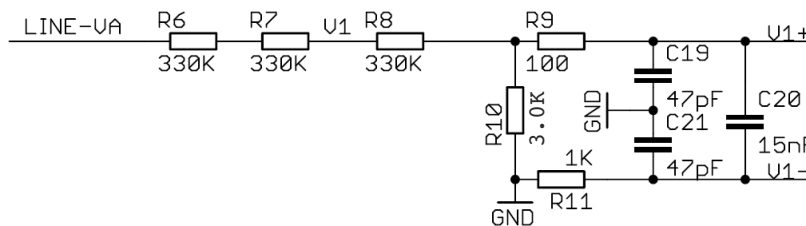


图 3-2. 电压输入的模拟前端

需要重点注意，正负两侧的抗混叠电阻取值不同。这是因为正端输入阻抗高得多，因此抗混叠滤波器选用阻值较小的电阻。若不遵循该设计，将产生数度的较大相移。

3.2.2 电流输入

用于电流输入模拟前端稍稍与用于电压输入的模拟前端略有差异。图 3-3 展示了用于电流通道 I1 和 I2 的模拟前端。

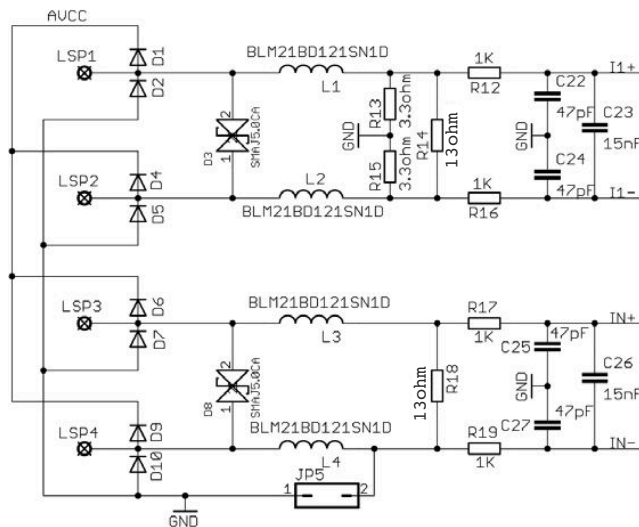


图 3-3. 电流输入的模拟前端

电阻器 R14 和 R18 是根据所用电流范围和 CT 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为 13Ω 左右。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 $\pm 920\text{mV}$, 转换器增益设置为 1。和电压通道类似, 连接至 LSP3 和 LSP4 的通道可将共模电压配置为模拟地 (GND) 或内部基准。

4 软件实现

本节介绍用于实现单相计量功能的软件。第一小节阐述 MSP430 MCU 各类外设的配置。随后, 整套计量软件分为两大进程进行说明: 前台进程与后台进程。

4.1 外设设置

本应用所使用的主要外设包括: 24 位 $\Sigma\Delta$ (SD24) 模数转换器 (ADC)、时钟系统、计时器、LCD 以及看门狗计时器 (WDT)。

4.1.1 SD24 设置

MSP430F673x(A) 系列器件最多集成三路独立的 $\Sigma\Delta$ 数据转换器。对于单相系统, 至少需要两路 $\Sigma\Delta$ 转换器, 才能独立测量一组电压与电流。本应用报告配套代码实现了单相系统的计量功能, 防篡改相关内容仅作简要说明; 但该代码支持零线电流测量。SD24 的时钟 (f_M) 由 16MHz 的 DCO 生成。采样频率定义如下: $f_s = \frac{f_M}{OSR}$; 过采样率 (OSR) 设定为 256, 调制频率 f_M 设定为 1MHz (1 048 576 Hz), 由此得到 4.096ksps 的采样频率。SD24 模块配置为在每个采样时刻生成常规中断。

$\Sigma\Delta$ 通道分配关系如下:

- SD0P0 和 SD0N0 → 电压 V1
- SD1P0 和 SD1N0 → 电流 I1
- SD2P0 和 SD2N0 → 电流输入 (零线)

4.2 前台进程

前台进程包含 MSP430 MCU 复位后即刻执行的软硬件初始化配置。图 4-1 展示了此过程的流程图。

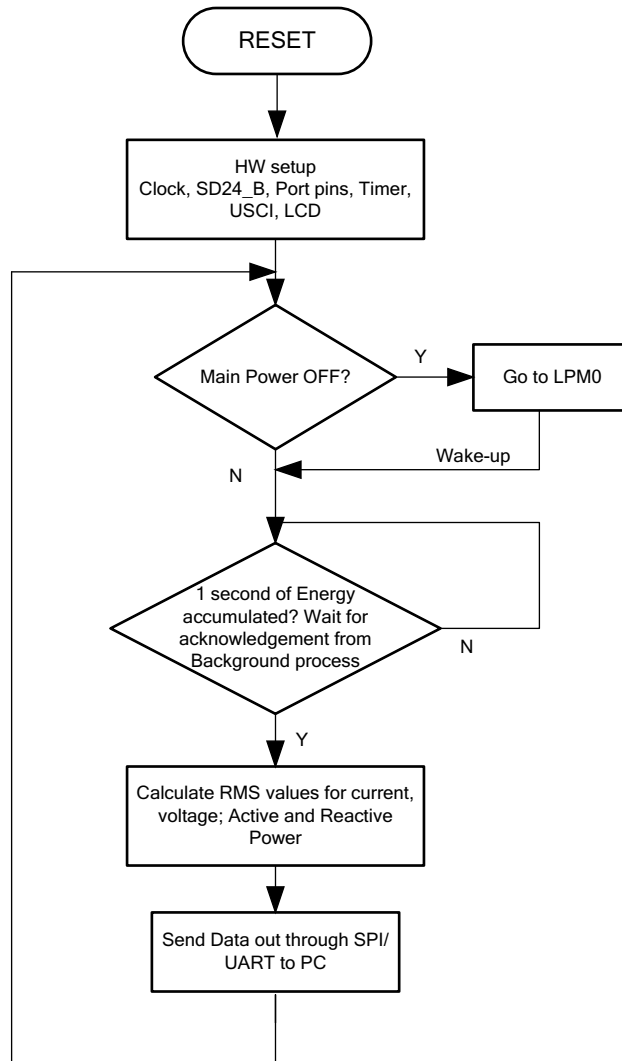


图 4-1. 前台进程

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、LCD 及 USCI_A1 的设置，以实现通用异步收发器 (UART) 功能。系统检测主电源是否断开；如果主电源关闭，则器件进入 LPM0。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。

4.2.1 公式

本节将简要介绍用于计算电压、电流和电能的公式。

4.2.1.1 电压和电流

如前几节所述，以 4096Hz 的采样率从三个独立的 $\Sigma \Delta$ 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。

$$V_{RMS} = K_V \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v^2(n)}{\text{Sample count}}} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = K_i \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} i^2(n)}{\text{Sample count}}} \quad (2)$$

其中，

- $v(n)$ = 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

4.2.1.2 功效和电能

功率和电能基于一帧内的有功和无功电能样本进行计算。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）通过下方列出的公式计算有功功率和无功率总和。

$$P_{ACT} = K_p \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v(n) \times i(n)}{\text{Sample count}}} \quad (3)$$

$$P_{REACT} = K_p \times \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\text{Sample count}} v_{90}(n) \times i(n)}{\text{Sample count}}} \quad (4)$$

其中，

- $v_{90}(n)$ = 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

随后，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：

$$E_{ACT} = P_{ACT} \times \text{Sample count} \quad (5)$$

对于无功电能，使用 90° 相移方法的原因有两个：

- 该方法在极小电流条件下仍能精确测量无功功率。
- 该方法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 4.3.3 中讨论了这一点。

该相移包含整数部分与分数部分：整数部分通过 N 个样本的延迟实现。分数部分由分数延迟滤波器实现（参见“相位补偿”）。

4.3 后台进程

后台进程使用 $\Sigma \Delta$ 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 4-2 展示了后台进程的流程图。

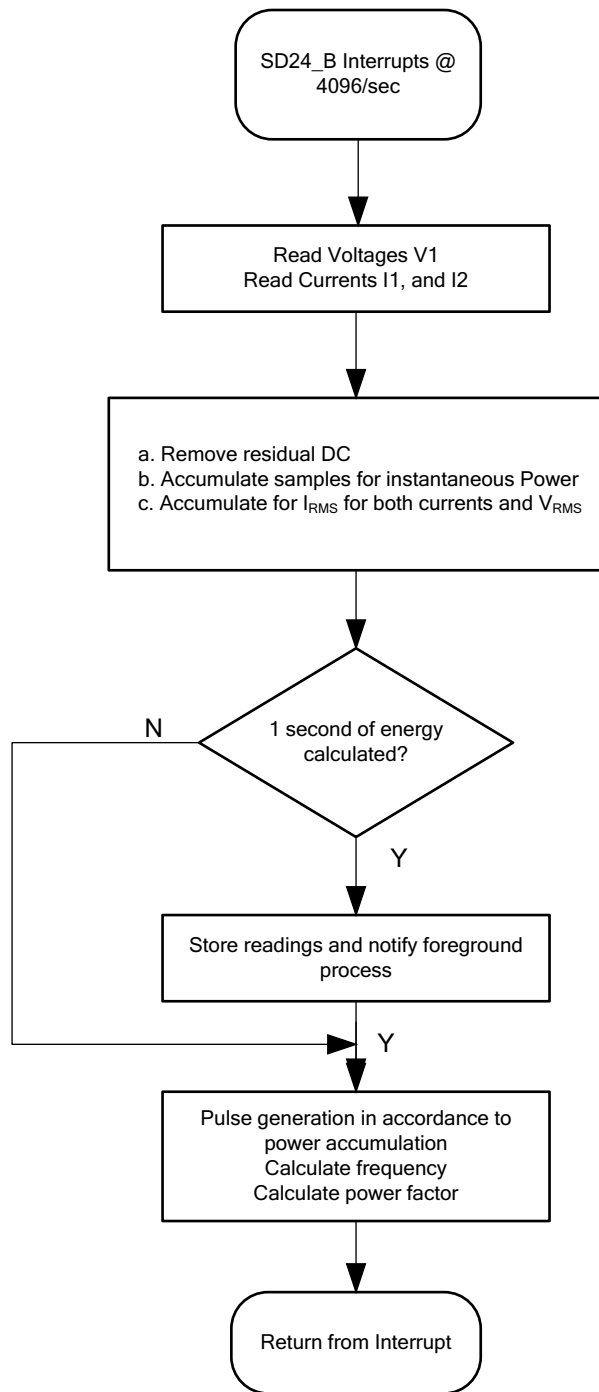


图 4-2. 后台进程

以下各节讨论后台进程中的各个电量测量元素。

4.3.1 电压和电流信号

$\Sigma \Delta$ 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。

$\Sigma \Delta$ 的输出是有符号整数。通过从每个 $\Sigma \Delta$ 样本中减去长期直流跟踪滤波器的输出，可独立删除电压和电流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，可产生高度稳定的输出。

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。

4.3.2 相位补偿

当电流互感器 (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。Σ Δ 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。这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 4-3 展示了 PRELOAD 寄存器 (SD24PREx) 的应用。

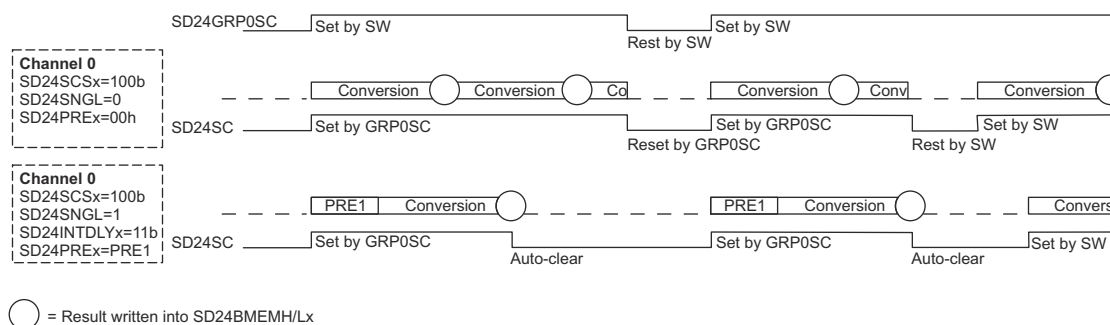


图 4-3. 使用 PRELOAD 寄存器进行相位补偿

分数延迟分辨率由输入电网频率 (f_{IN})、过采样率 (OSR) 以及采样频率 (f_S) 共同决定。

$$\text{Delay resolution}_{\text{Deg}} = \frac{360^\circ \times f_{IN}}{\text{OSR} \times f_S} = \frac{360^\circ \times f_{IN}}{f_M} \quad (6)$$

在此应用中，输入频率为 60Hz、OSR 为 256、采样频率为 4096，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，因此常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 ±2.62°。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。

4.3.3 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。当累积了大约一秒的样本后，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。周期边界用于触发前台求平均值进程，因为这一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创建直线插值。图 4-4 展示了过零点附近的样本以及线性插值的过程。

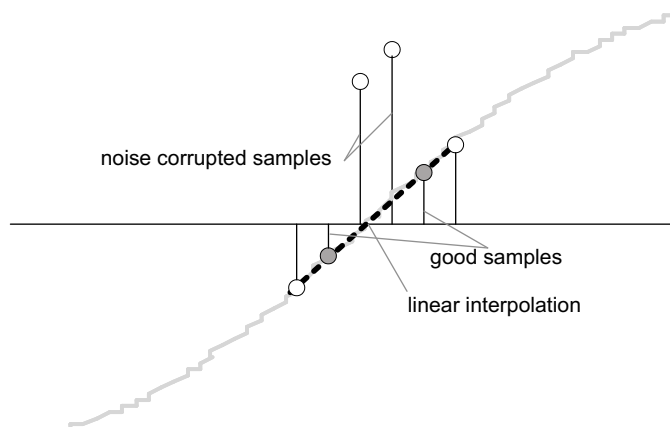


图 4-4. 频率测量

由于噪声尖峰同样会导致错误，因此采用变化率检查来滤除可能的错误信号，确保用于插值的两个点为真实的电压过零点。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、准确并抗噪声的频率测量值。

4.3.4 LED 脉冲生成

在电表中，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精度不佳，但只要将抖动平均化，就会让人对仪表的整体精度产生负面印象。

采用平均功率来生成电能脉冲。每次 $\Sigma \Delta$ 中断时，都会累积平均功耗（由前台进程计算）。此积累过程相当于将功率转化为电能。一旦累积的电能超过阈值，就会产生一个脉冲。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。

此阈值决定了电力公司规定的电能“刻度”，并且是一个常数。例如，该值以千瓦时 (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 6400。在这种情况下电能“刻度”为 1kWh 或 6400。将生成电能脉冲，也可以通过电路板上的 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 4-5 展示了脉冲生成流程图。

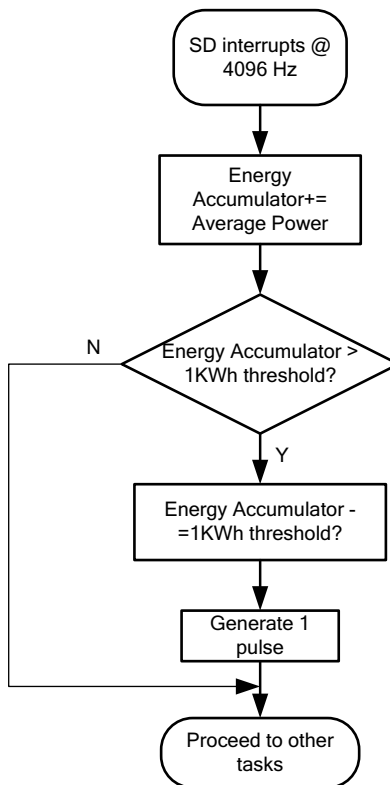


图 4-5. 用于电能指示的脉冲生成

平均功率以 0.01W 为单位，1kWh 阈值定义如下：

$$\begin{aligned}
 \text{1kWh 阈值} &= 1/0.01 * 1kW * (\text{每秒中断次数}) * (1 \text{ 小时包含的秒数}) \\
 &= 100000 * 4096 * 3600 = 0x15752A00000
 \end{aligned}$$

5 能量计演示

本应用报告配套的能量计评估模块 (EVM) 搭载 MSP430F6736(A)，用于演示电能计量功能。整套演示平台包含 EVM、计量软件以及 PC 端 GUI；该评估板可轻松接入任意测试系统，GUI 则可用于查看测量结果并执行校准操作。

5.1 EVM 概述

图 5-1 展示了能量计的俯视图。图 5-2 基于功能显示了 EVM 各部分的位置。

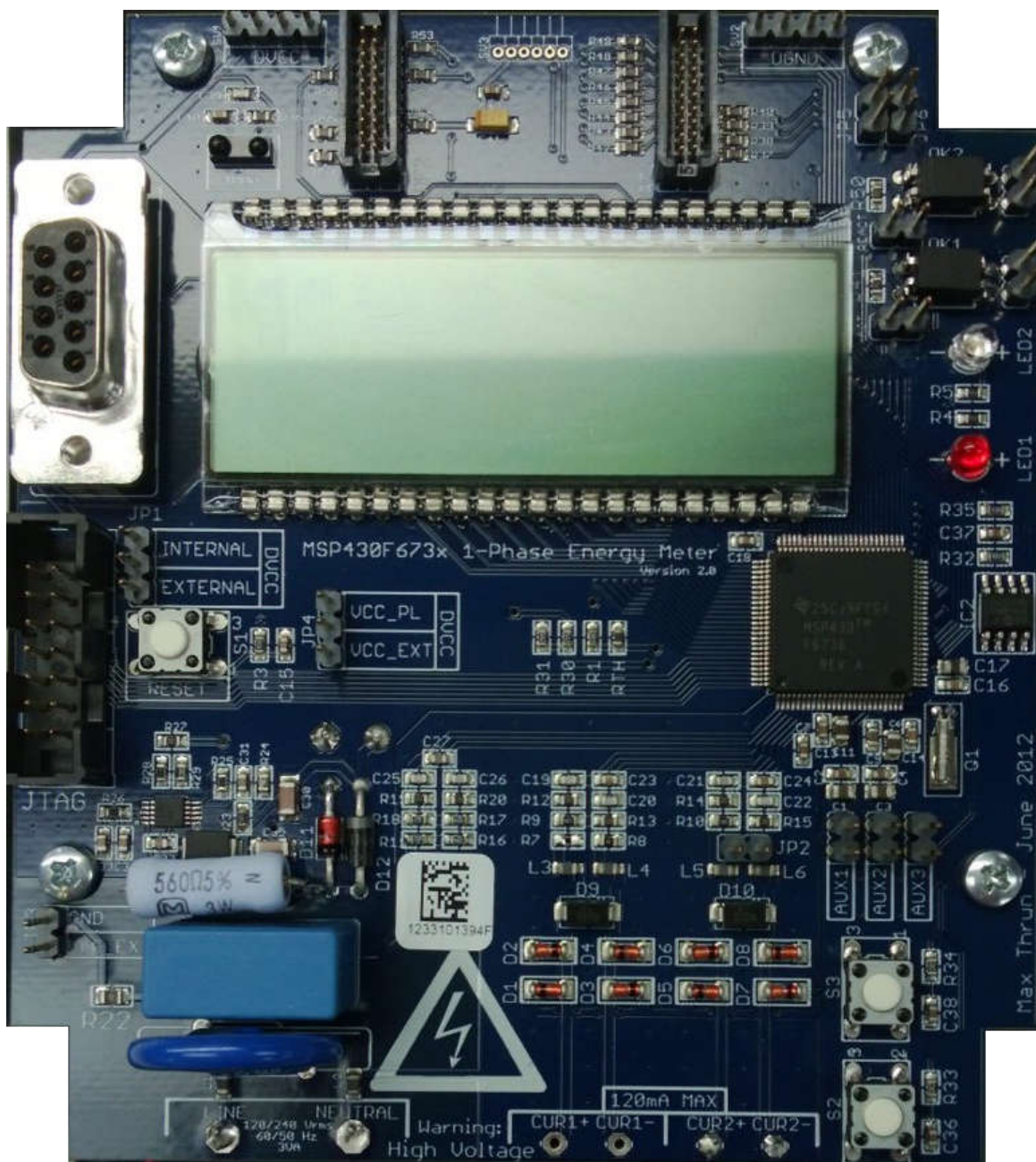


图 5-1. 单相能量计 EVM 的俯视图

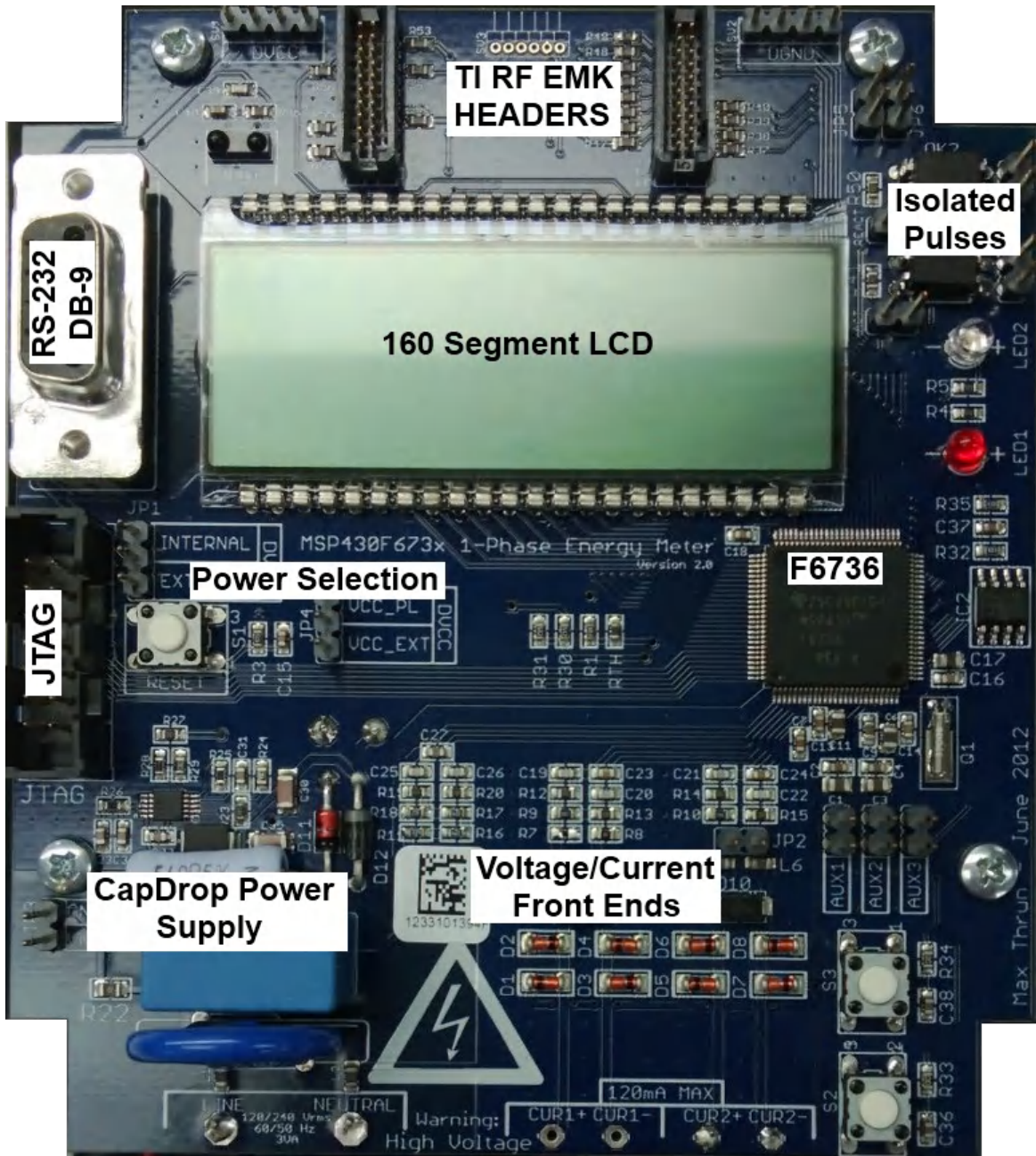


图 5-2. 带有块和跳线的 EVM 的顶视图

5.1.1 与交流电压测试设置的连接

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：

- 电压输入端的 LINE 与 NEUTRAL 分别接入火线电压与零线电压。输入最高可达 240V 交流，支持 50Hz 和 60Hz。相关测点设于端子块顶部，可直接使用。
- 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 920mV。评估板 (EVM) 上暂未使用。
- 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 920mV。当前连接至 CT。

若要读取有功电能脉冲以开展精度测试，板上提供多种可选方案。对应的脉冲速率默认为 6400 脉冲/千瓦时，可通过电能库进行配置。

- LED1 实现光输出。
- 通过 ACT 插座输出非隔离电脉冲。左侧引脚为信号端，右侧引脚则为接地端 (GND)。
- 通过 JP7 输出隔离脉冲。产生有功脉冲时，所用光耦会导通这两个引脚之间的回路。

图 5-3 展示了 EVM 正常工作所需接入测试设置的各项连接。

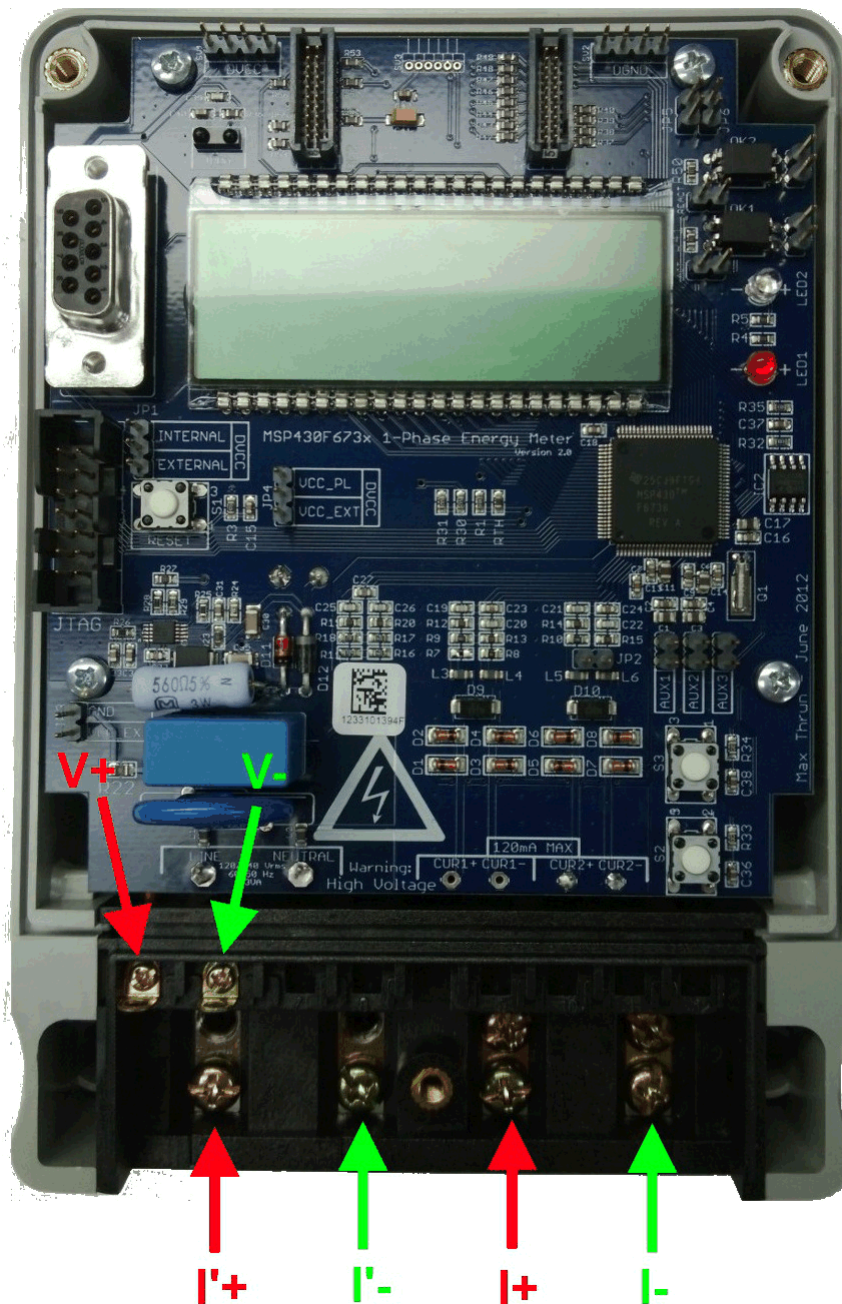


图 5-3. 带有测试测试连接的 EVM 俯视图

如需连接测试设置，接线必须按照 EVM 设计要求进行。图 5-3 展示了俯视图中的连接。L 和 N 对应来自测试设置的电压输入端。I+ 和 I- 对应于第一组电流输入端，I' + 和 I' - 对应于第二组电流输入端。尽管 EVM 软硬件支持第二路电流测量，但从德州仪器 (TI) 获取的 EVM 未配备第二路传感器，所有电流输入端仅可连接至 I+ 与 I-。如需加装额外传感器，请使用靠近 I' + 和 I' - 端子的左下角两个插槽。需要另行接线，将这些传感器的输出端连接至 PCB 上的 CUR1+ 和 CUR1-。

5.1.2 电源选项和跳线设置

整块评估板与 UART 通信由单路直流电压轨 (DVCC) 供电。DVCC 可通过 JTAG、外部电源或由交流市电经电容式电源获取。各种跳线接头和跳线设置可增加电路板的灵活性。接头 JP1 至 JP15 为上图所示 EVM 上全部的跳线接头。其中一些接头需要正确连接跳线，对应模块才能正常工作。表 5-1 列出了评估板上每根跳线的功能及其相关作用。

表 5-1. MSP430F6736(A) EVM 的接头名称与跳线设置

接头名称	主要功能	有效应用场景	注释
JP1	JTAG 电源选择	JTAG 烧录时需安装跳线	跳线置于“INTERNAL”侧，选择外接 USB FET 作为 JTAG 电压源。跳线置于“EXTERNAL”侧，选择外部电源作为 JTAG 电压源。
JP4	DVCC 电源选择	运行期间安装跳线	跳线置于“VCC_PL”侧，选择板载电容降压电源提供的电压；跳线置于“VCC_EXT”侧，选择来自 JP3 的外部输入。
JP3	外部电源输入	非跳线接头	使用外部源提供 DVCC 时，在此接入 VCC 和 GND。
JP2	电流传感器参考端	将电流传感器 $\Sigma \Delta$ 的负输入端连接至 AGND	使用电流互感器时，安装跳线。使用分流电阻时，不安装跳线。EVM 按出厂默认方式使用时，需在板上安装跳线
AUX1	AUXVCC1 选择	将 AUXVCC1 连接至 GND 以及 AUXVCC1 外部电源输入端。	不使用 AUXVCC1 时，必须安装跳线。取下跳线后，可通过该接口向 AUXVCC1 提供外部电压。
AUX2	AUXVCC2 选择	将 AUXVCC2 连接至 GND 以及 AUXVCC2 外部电源输入端。	不使用 AUXVCC2 时，必须安装跳线。取下跳线后，可通过该接口向 AUXVCC2 提供外部电压。
AUX3	AUXVCC3 选择	将 AUXVCC3 连接至 DVCC 以及 AUXVCC3 外部电源输入端。	如需使用 AUXVCC3，可安装跳线；取下跳线后，可通过该接口向 AUXVCC3 提供外部电压。
JP7	隔离式有功电能脉冲	非跳线接头	隔离式输出端，可使用外部设备探测有功电能输出脉冲。
JP8	隔离式无功电能脉冲	非跳线接头	隔离式输出端，可使用外部设备探测无功电能输出脉冲。
SV1	DVCC 电源抽头	非跳线接头	用于测量 DVCC，或向外部模块供电。
SV2	DGND 电源抽头	非跳线接头	用于测量 DGND，或向外部模块供电。
RF1 + RF2	TI EMK 接头	非跳线接头	用于连接标准 TI 无线评估模块套件 (EMK)，例如 CC2530 或 CC3000
ACT	非隔离式有功电能脉冲 + GND	非跳线接头	与交流电压之间无隔离。若无外部隔离，请勿连接外部设备。左侧引脚为信号端，右侧引脚则为接地端 (GND)。
REACT	非隔离式无功电能脉冲 + GND	非跳线接头	与交流电压之间无隔离。若无外部隔离，请勿连接外部设备。左侧引脚为信号端，右侧引脚则为接地端 (GND)。

5.2 加载示例代码

源代码在 IAR 开发环境下开发，所用 IAR 编译器的版本为 6.x。如果使用旧版 IAR，工程文件将无法打开。如果在高于 6.x 的版本中加载工程，软件会弹出创建备份的提示，点击 YES 即可继续。电能计量软件分为两部分：工具包（内含以数学运算例程为主的函数库），以及包含源文件与头文件的主代码。

软件提供两个版本选项：一个适配 MSP430F6736，另一个适配 MSP430F6736A。需根据实际使用的器件选择对应的软件版本。节 5.2.1 介绍如何编译 MSP430F6736 选项的工程。编译 MSP430F6736A 选项的工程可参照相同的操作步骤。

5.2.1 打开工程

“Source” 文件夹结构如图 5-4 所示。

\Source		
Name	Size	Type
emeter-ng		File Folder
emeter-toolkit		File Folder

图 5-4. Source 文件夹结构

文件夹“emeter-ng”内包含多个工程文件。本应用需使用工程文件 *emeter-6736.ewp*。文件夹“emeter-toolkit”内有对应的工程文件 *emeter-toolkit-6736.ewp*。本应用仅选用文件名后缀带有 6736 的工程。首次使用时，建议对两个工程均执行完全重新构建。

1. 打开 IAR Embedded Workbench。
2. 查找并加载工程 *emeter-toolkit-6736.ewp*。
3. 全部重新构建。
4. 关闭现有工作区，再打开主工程 *emeter-6736.ewp*。
5. 全部重新构建，并将其加载至 MSP430F6736，如图 5-5 所示。

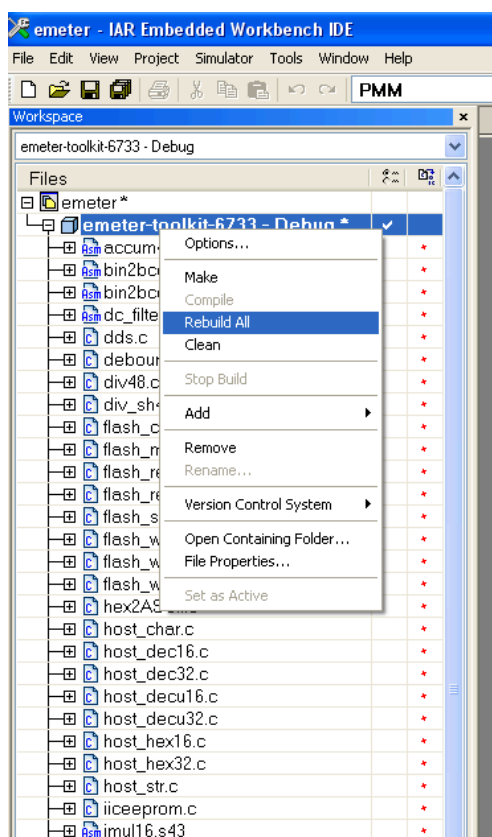


图 5-5. 在 IAR 中编译工具套件

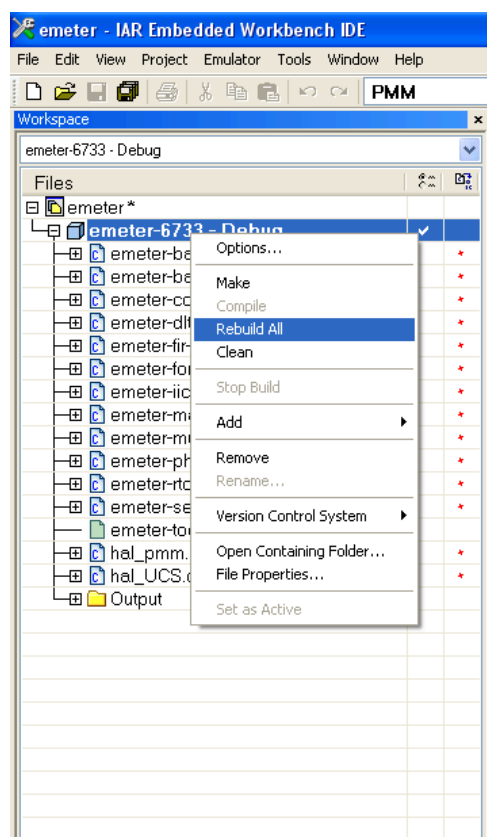


图 5-6. 在 IAR 中构建计量工程

6 结果和校准

如果前两节的操作步骤与配置工作均已完成，即可观测结果，并基于观测结果执行校准。校准是决定任何仪表性能的关键，每块仪表都必须进行校准才能发挥良好性能。受器件间差异、传感器精度和其他无源容差的影响，每块仪表的初始精度都会存在差异。为消除其影响，每块仪表均需进行校准。本节介绍完成该流程的简易操作步骤。若要精准执行校准，应配备高精度信号源。该信号源应能够输出任意所需的电压、电流、相移（电压与电流之间），或功率因数。除高精度信号源外，还需配置一块参考仪表，作为信号源与待校准仪表之间的判定基准。本节介绍针对这款单相 EVM 简单且高效的校准方法。

文件内附带 PC 端 GUI，可从[具有增强型 ESD 保护功能的单相计量参考设计](#)页面下载。

6.1 查看结果

仪表上电后，将 RS-232 接头连接至 PC，即可通过该 GUI 轻松查看测量结果。在 GUI 文件夹中运行 calibrator.exe。

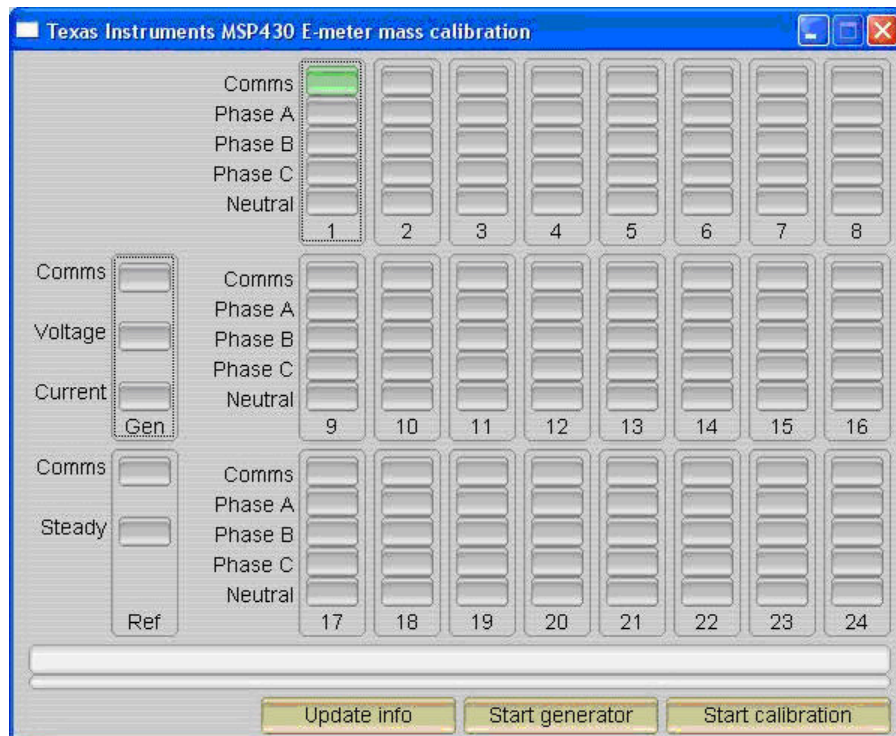


图 6-1. 电表批量校准

在正确连接后，“Comms”下应显示绿色填充按钮。如果连接存在问题或代码配置不正确，则此按钮将显示为红色。点击绿色按钮，即可在 GUI 上实时查看仪表测量结果。

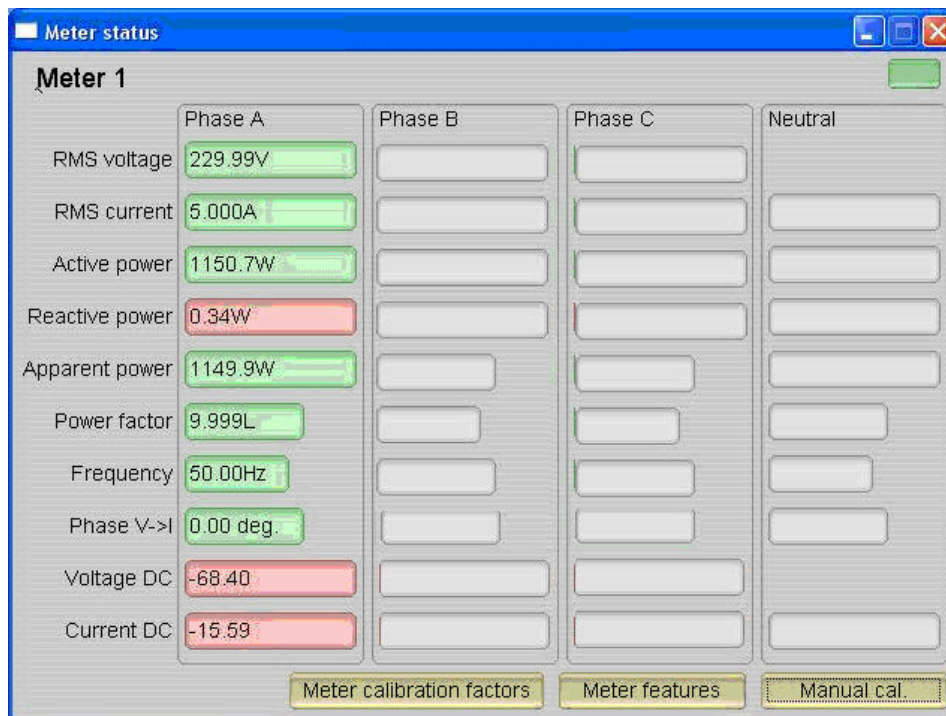


图 6-2. 仪表状态

点击“Meter features”（仅示例）可查看电能表配置，屏幕画面如图 6-3 所示。

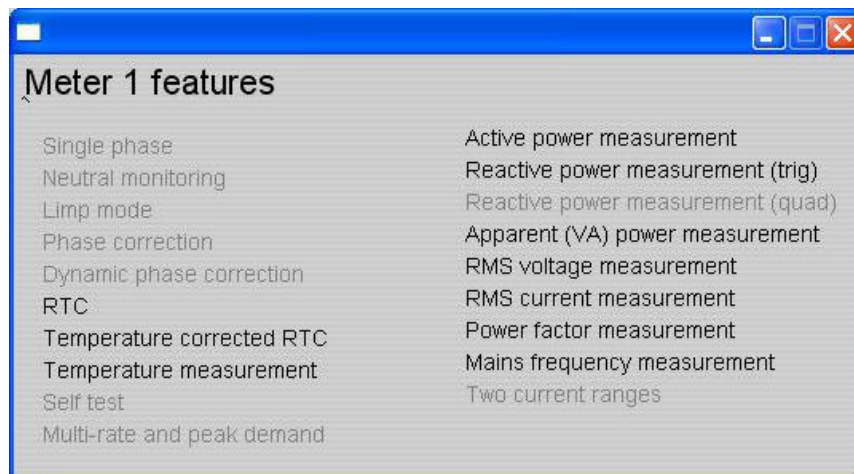


图 6-3. 仪表 1 功能

也可以通过反馈至任意能量计测试设置的脉冲信号查看测量结果。总有功电能脉冲在 JP9、JP12（有功）引脚输出，总无功电能脉冲在 JP14、JP13（无功）引脚输出。此外，脉冲信号经过板载光耦，可用于对接各类测试设备。参考表 5-1，选择适配电能脉冲输出的接头。

6.2 仪表校准

可借助配套的图形用户界面 (GUI) 轻松完成仪表校准。电压、电流及有功功率的增益校正可同步执行，而有功功率的相位校正需要单独作为一步操作。

6.2.1 增益校正

电压、电流及有功功率的增益校正可同步执行，操作步骤如下所述。

1. 将仪表连接至输出已知电压和电流的测试设置。
2. 连接 GUI，以查看电压、电流和有功功率等测量结果。
3. 点击图 6-2 中所示的“Manual cal”，即可显示此屏幕。

	Phase A	Phase B	Phase C	Neutral
Voltage	2.5 %	0 %	0 %	0 %
Current (low)	-0.567 %	0 %	0 %	0 %
Current (high)	0 %	0 %	0 %	0 %
Active (low)	2.35 %	0 %	0 %	0 %
Active (high)	0 %	0 %	0 %	0 %
Phase (low)	0	0	0	0
Phase (high)	0	0	0	0

Update meter

图 6-4. 仪表 1 错误 (用于手动校正)

4. 需要输入的数值单位为 %，这些数值由方程式 7 中的公式计算得出。对于任一特定电压值，计算公式如下：

$$\% VAL = \left(\frac{V_{Observed}}{V_{desired}} - 1 \right) \times 100 \quad (7)$$

5. 电压和电流字段支持输入负值；该操作流程同样适用于其他电压与电流。电压在“Voltage”字段填写，电流则在“Current (low)”字段填写。输入这些值后，点击“Update meter”。
6. 有功功率的增益校正方式有所不同；由仪表输出脉冲，再通过测试系统得到精度指标，该方式是精度最高的测量方法。
7. 利用测试系统的参考表开展精度测量。该方式能够获得仪表有功电能真实精度。
8. 将显示的“% 精度”原值输入至“Active (low)”字段。点击“Update meter”，完成 A 相的增益校正。

6.2.2 相位校正

相位校正需采用不同的方式，操作步骤如下。

1. 将电压和电流值设置为与增益校正时一致，并在电压与电流之间引入已知相移 +60°。
2. 读取测试设置上的 % 误差。如果误差超出可接受范围，则在“Phase (low)”字段中输入校正系数。该字段仅允许输入增量值与减量值；建议从 1 或 -1 开始输入，以此判断校正方向。点击“Update meter”。

3. 再次测量误差，观察误差是增大还是减小。如果误差减小，则继续增加所需增量，直至误差接近于零；反之则输入减量值。
4. 每次修改该字段后，均需点击“Update meter”。
5. 现在将相位更改为 -60° ，然后检查此误差是否仍可接受。否则，请再次微调“Phase (low)”的值。理想情况下，在滞后和超前条件下，相同相移的误差应当对称。

仪表校准完成后，可查看这些校准值作为参考。点击“Meter calibration factors”打开此屏幕（仅为示例数值）。

	Phase A	Phase B	Phase C	Neutral
Voltage	9883	0 %	0 %	
Current (low)	5931	0 %	0 %	0 %
Current (high)		0 %	0 %	0 %
Active (low)	7328	0 %	0 %	0 %
Active (high)		0 %	0 %	0 %
Phase (low)	16	0	0	0
Phase (high)		0	0	0

图 6-5. 仪表校准系数

如果校准流程出现异常，例如校准值出现负数或零，应停止仪表后续校准操作，然后代码重新加载至器件，并重新执行校准例程。

6.2.3 计量结果

本节展示了计量结果。本设计采用电流互感器，不过代码同样支持分流电阻采样。图 6-6 展示了电流在 50 mA 到 100 A 区间变化时的测试结果，动态范围达 2000:1。表 6-1 展示了室温条件下的误差数值。

表 6-1. 电能测量精度及误差 (%) (在 230 V、15 A、50 Hz 条件下校准)

电流 (安培)	0°	60°	-60°
0.05	-0.045	0.058	-0.07
0.1	-0.019	0.083	-0.07
0.25	-0.019	0.0575	-0.0575
0.5	0.006	0.083	-0.045
1	0.0147	0.0663	-0.0617
2	-0.007	0.058	-0.07
5	0.0043	0.022	-0.019
10	-0.007	-0.024	0.003
20	-0.015	-0.0533	0.0493
30	0.0003	-0.079	0.0747
40	-0.0067	-0.096	0.07
50	0.011	-0.106	0.1023
60	0.0006	-0.099	0.1203
70	0.0167	-0.096	0.1187
80	0.0263	-0.098	0.143
90	0.0367	-0.096	0.1563
100	0.0387	-0.0943	0.16

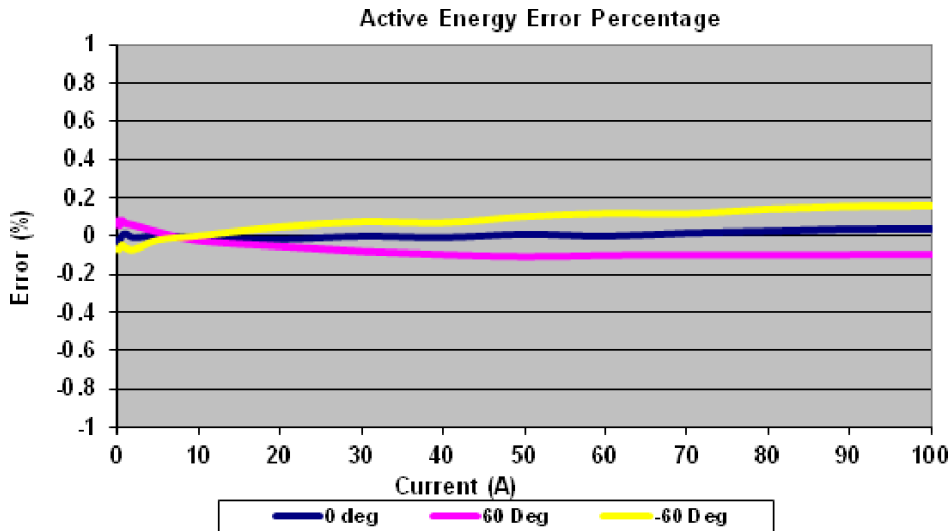


图 6-6. 全电流范围内的测量精度

7 参考资料

1. 能量计电容降压离线电源负载电流能力优化
2. MSP430F5xx 和 MSP430F6xx 系列用户指南
3. 具有增强型 ESD 保护功能的单相计量参考设计

8 原理图

后续页面展示了 EVM430-F6739 的原理图。

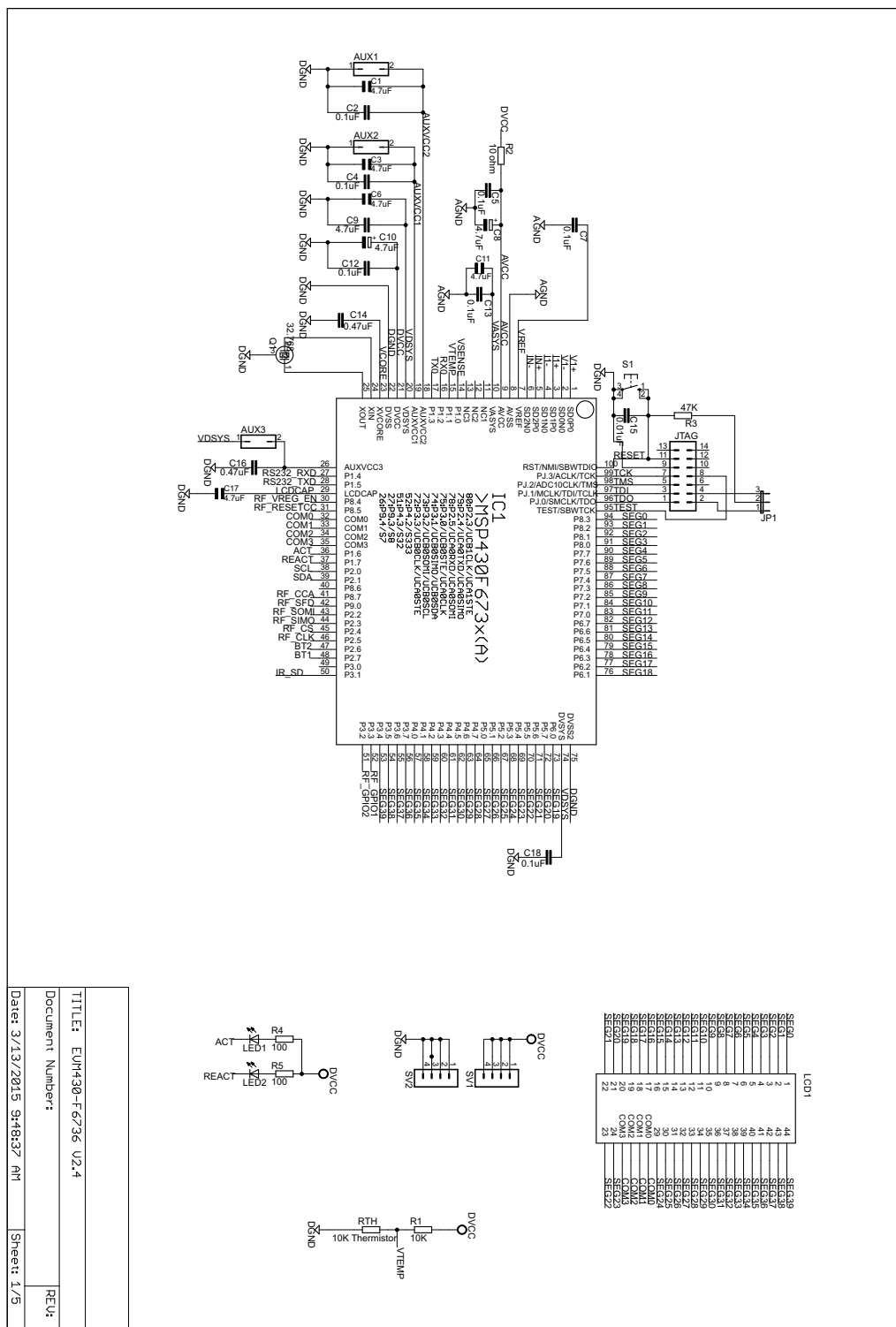


图 8-1. 原理图 (1/5)

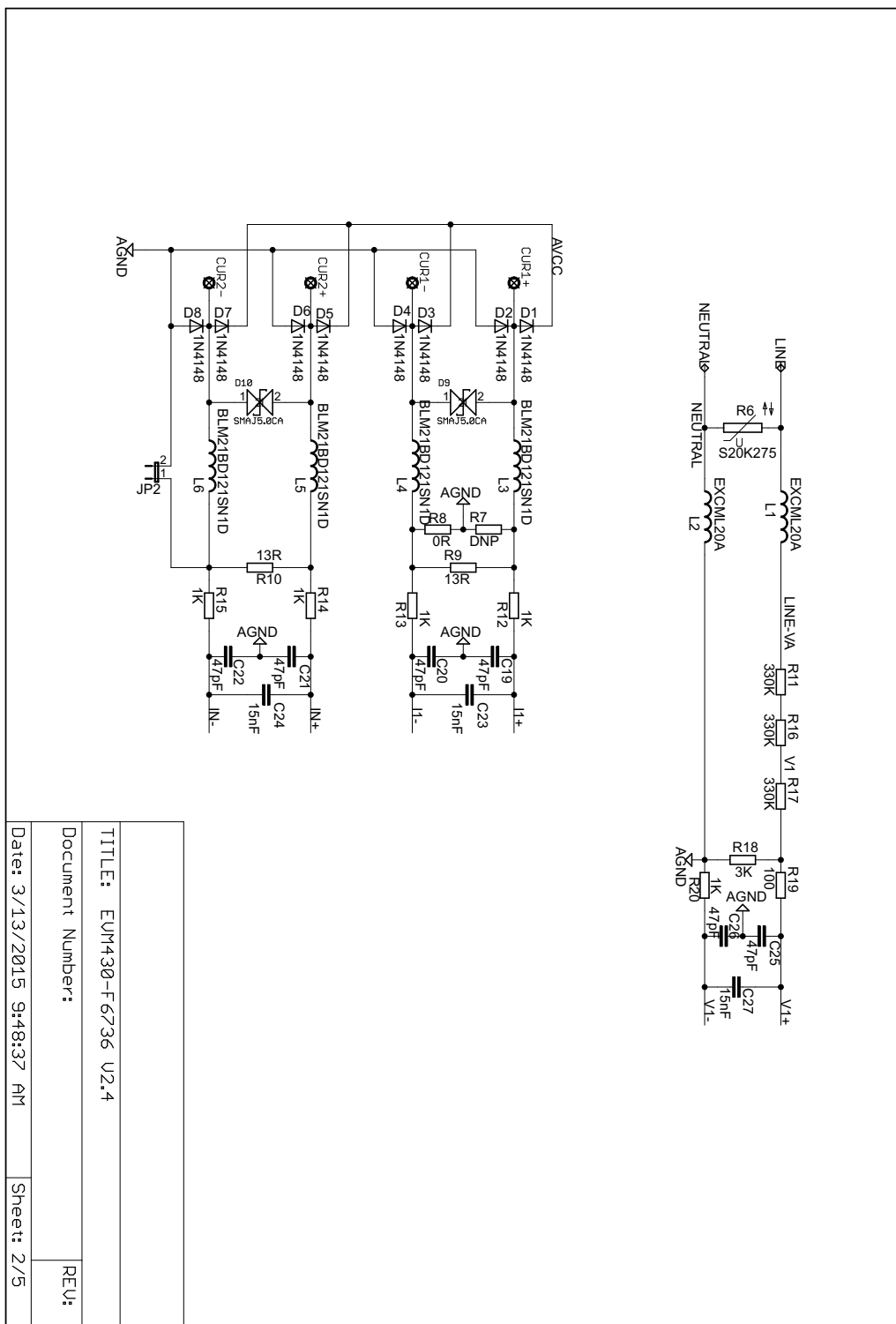


图 8-2. 原理图 (2/5)



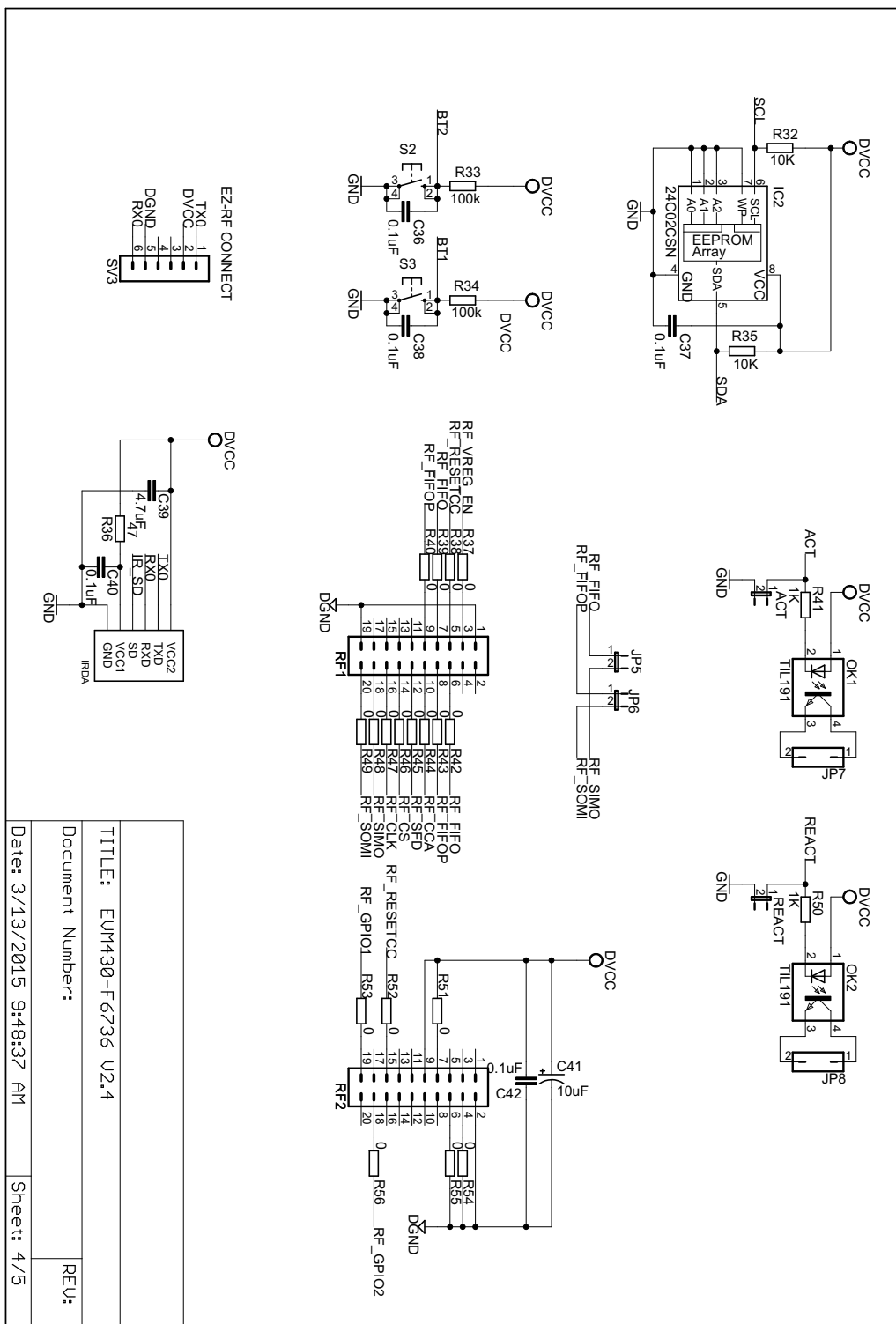
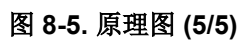


图 8-4. 原理图 (4/5)



9 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 E (August 2015) to Revision F (August 2021)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 更改了用于下载源代码和设计文件的链接.....	1
• 更新了 节 3.1.1 电阻电容 (RC) 电源.....	4
• 更新了 节 7 参考资料.....	21

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要通知和免责声明

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

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

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

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

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月