

## Application Note

## 基于低成本 MSPM0 的单相交流分流式功率监测



Chao Gao, Joe Wang, and Eason Zhou

## 摘要

本应用手册使用低成本 MCU MSPM0C1104 和外部 OPA TLV9062 实现单相交流电能测量子系统。(或仅使用包含两个内部 OPA 的 MSPM0L1304, 但未在本文档中进行测试)。它使用分流传感器进行电流检测并使用电阻分压器进行电压检测。该设计在 4kHz 采样率、340mA~3.44A 电流输入范围内, 测量精度 <2%, 并且采用 TI Arm® Cortex®-M0+ 低成本微控制器计算计量参数。

本设计支持的主要特性:

- 低成本解决方案
- 适用于功率监测的单相双线 (1P2W) <2% 分流计量子系统
- 均方根 (RMS) 电流和电压、有功、无功和视在功率以及功率因数计算
- 能量计量软件, 脉冲输出连接到参考测试系统, 并在 Microsoft® Windows® PC GUI 上显示结果

可在此处下载软件和评估板设计资源【[下载链接](#)】

## 内容

摘要.....	1
1 系统简介 .....	2
2 硬件实现 .....	3
2.1 电源 .....	3
2.2 电压检测 .....	3
2.3 电流输入 .....	3
3 软件简介 .....	5
3.1 外设设置 .....	5
3.2 计量计算引擎 .....	5
3.3 前台进程 .....	6
3.4 后台进程 .....	6
3.5 PC GUI 简介 .....	7
4 演示板快速入门和校准 .....	9
4.1 评估板简介 .....	9
4.2 比例系数校准 .....	10
5 测试结果 .....	11
6 参考资料 .....	12

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 系统简介

本文介绍一种基于德州仪器 (TI) 简易型低成本 MCU MSPM0C1104 的单相交流功率监测应用方案。MSPM0C1104 是一款混合信号微控制器，集成了用于电压和电流检测的 12 位 SAR ADC，并通过 UART 通信接口与 PC 端运行的 GUI 进行数据交互。TLV9062 也是一种低成本双通道 OPA，用于电流和电压差分信号检测。(也可选用内置两个 OPA 的 MSPM0L1304)

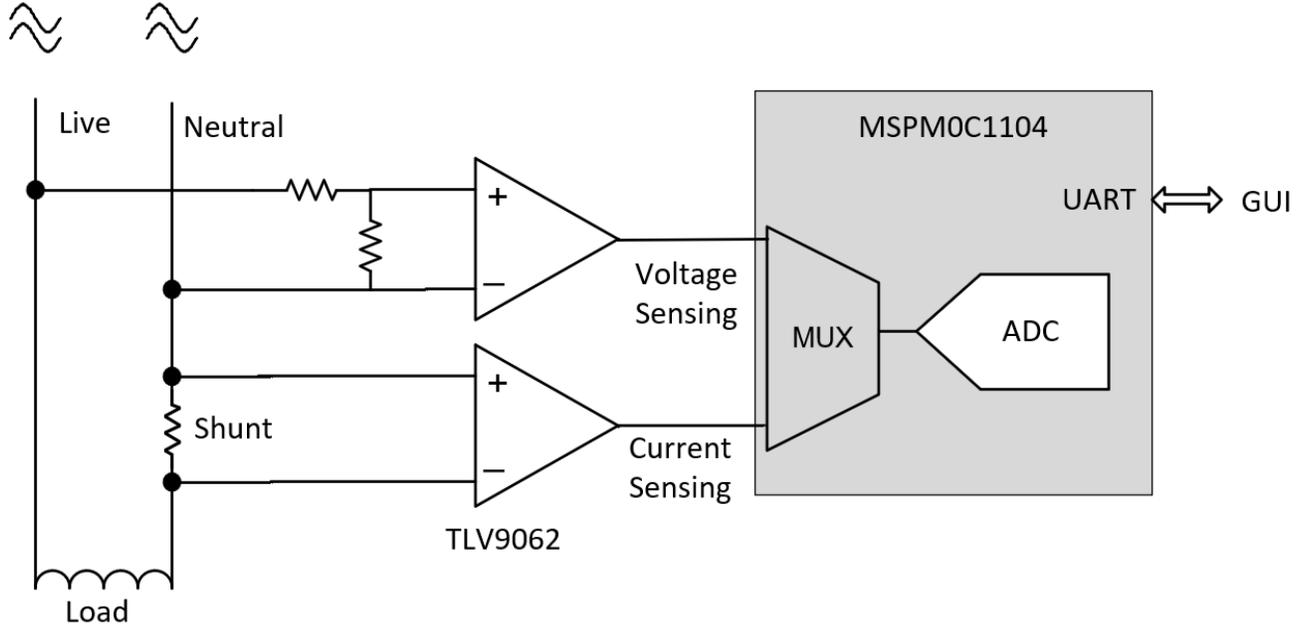


图 1-1. 采用 MSPM0C1104 的功率监测图

## 2 硬件实现

### 2.1 电源

在此演示中，MSPM0C1104 和 TLV9062 均由 LDO TLV76133 供电，该器件的输入范围为 3.3V 至 18V，输出 3.3V。

### 2.2 电压检测

市电电压通常为 230V，需降压至 3.3V (ADC 参考电压) 范围内。用于电压的模拟前端由一个简单的分压器和一个 OPA 组成，用于增加电压信号的偏置，使其能够被单端 ADC 检测。建议在 R8 两端并联保护二极管，将输入电压信号限制在安全范围内 (本演示未实现该设计)。

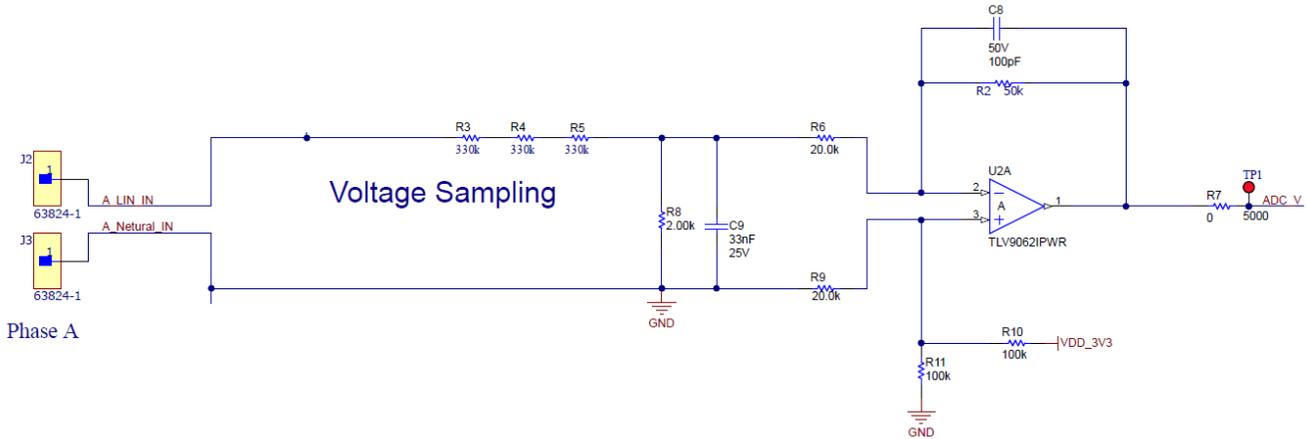


图 2-1. 电压输入的模拟前端

建议将偏置电压设置为  $\frac{1}{2}$  ADC 基准电压，本演示中 ADC 基准采用 VDD 作为参考电压。因此，需选择合适的 R10 和 R11 阻值，使偏置电压约为 1.65V。

### 2.3 电流输入

在电流传感器接口电路中，R12 是分流传感器，OPA 将差分信号转换为单端信号。建议在 R12 两端并联保护二极管，将输入电压信号限制在安全范围内 (本演示未实现该设计)。偏置电路与电压检测电路一致。

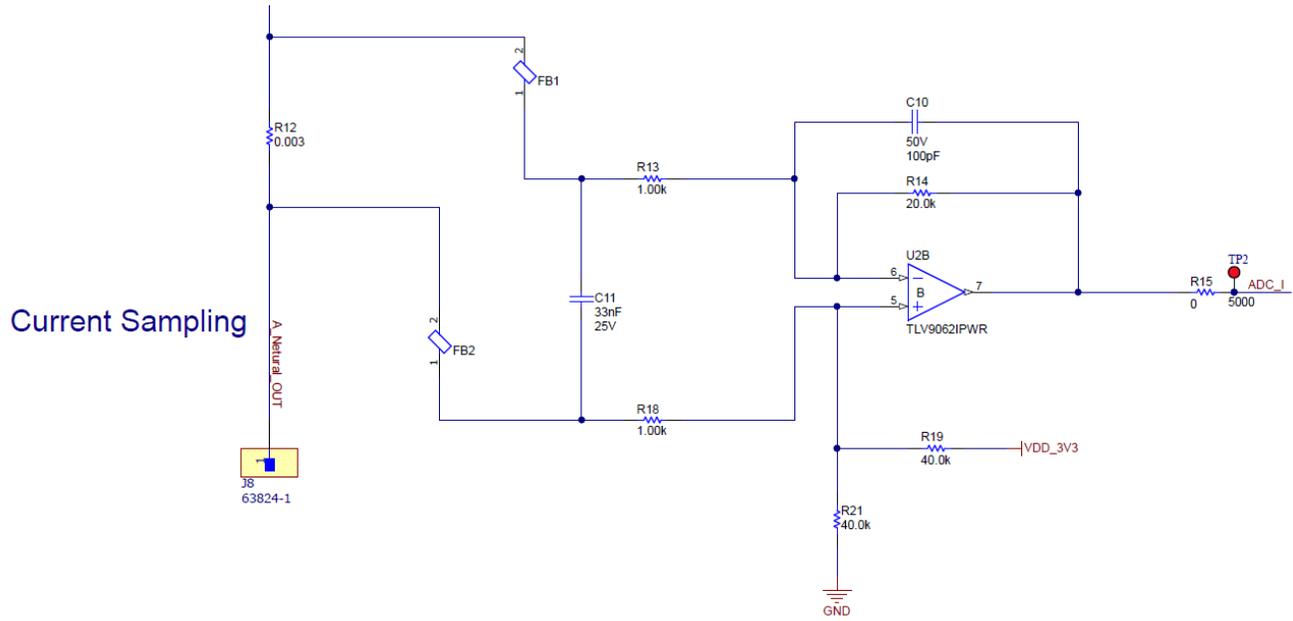


图 2-2. 电流输入的模拟前端

## 3 软件简介

### 3.1 外设设置

本应用主要使用的外设包括 12 位 ADC、内部 REF ( 可选 )、计时器和 UART。

ADC 配置为序列转换模式，采样保持时间为 1us。本演示中的 ADC 基准采用 VDD。计时器用于以 4Ksps 采样率触发 ADC。UART 用于与 GUI 通信，波特率为 115200，无奇偶校验位，1 位停止位。

### 3.2 计量计算引擎

计量计算引擎基于电压和电流 ADC 通道采集的数据执行实际采样与计算。该引擎在时间要求严格的后台进程和时间要求较低的前台进程中发挥作用。

后台进程由 ADC 按采样速率触发。该进程在 ADC 的中断服务例程中运行并自动处理。

前台进程由后台进程完成触发，触发频率与报告更新率一致。后台进程会设置 HAL\_ADC\_PHASE\_A\_DATA\_READY 标志位

在 phaseDataReady 变量中设置该标志，以指示数据已准备好由前台处理。然后，应用程序需要通过调用 EM\_processForegroundData() 来监视此标志以触发前台进程。在实际计算中，计量计算采用以下公式

$$V_{\text{RMS}} = \text{VGAIN} \times \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp}(i)} \times V_{\text{samp}(i)}} \quad (1)$$

$$I_{\text{RMS}} = \text{IGAIN} \times \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N I_{\text{samp}(i)} \times I_{\text{samp}(i)}} \quad (2)$$

$$P_{\text{active}} = \text{PGAIN} \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp}(i)} \times I_{\text{samp}(i)} \quad (3)$$

$$P_{\text{reactive}} = \text{PGAIN} \times \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N V_{\text{samp},90(i)} \times I_{\text{samp}(i)} \quad (4)$$

$$P_{\text{apparent}} = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \quad (5)$$

$$\text{PF} = \cos\varphi = \frac{P_{\text{active}}}{P_{\text{apparent}}} \quad (6)$$

### 3.3 前台进程

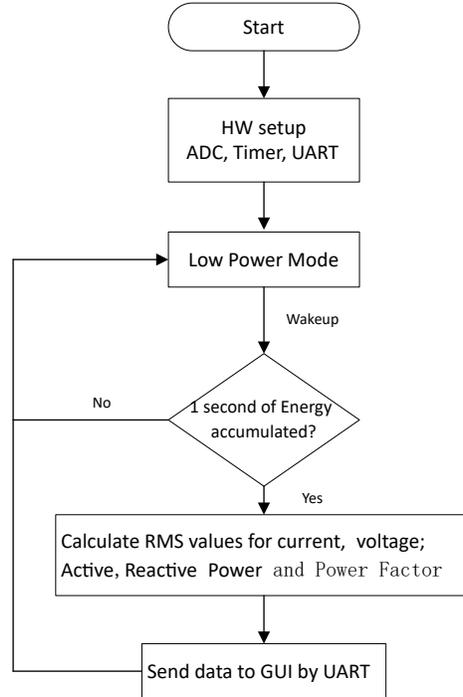


图 3-1. 前台进程图

初始化例程涉及 ADC、计时器、通用输入/输出 (GPIO) 端口引脚和 UART 的设置。器件将在 while (1) 环路中进入低功耗模式。在正常运行期间，ADC 每 256us/4KHz 触发一次中断唤醒 CPU 执行后台进程，前台进程将检查 1 秒电能累积标志。这相当于累积了与输入电压和电流信号同步的 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。所有值在 ADC 中断中累积存储至独立变量，以便在前台进程中对其进行进一步处理并获得 RMS 和平均值。

### 3.4 后台进程

后台进程为 4KHz 频率的 ADC 中断服务程序。在中断过程中，它将读取电压和电流的 ADC 结果，随后去除直流残余分量，并对采样值进行累加，用以计算电流有效值、电压有效值、有功功率及无功功率。它还会计算频率，然后检查是否达到累积的 1 秒电能。

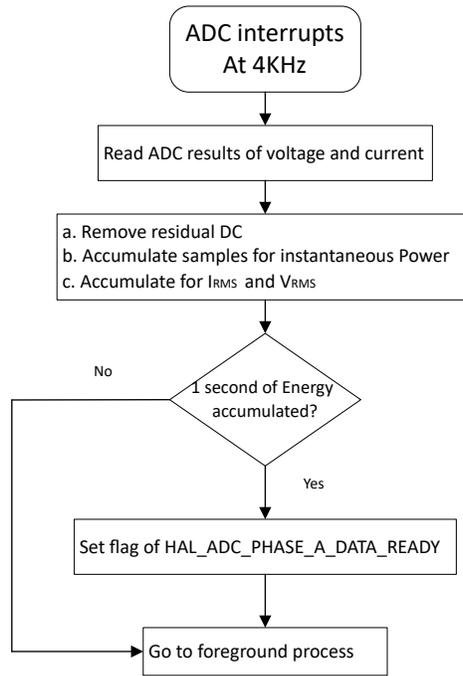


图 3-2. 后台进程图

### 3.5 PC GUI 简介

本方案提供一款基于 Python QT5 开发的 GUI 界面，可直观展示测试结果。该 GUI 支持按需将测试结果自动保存至 Excel 文件。

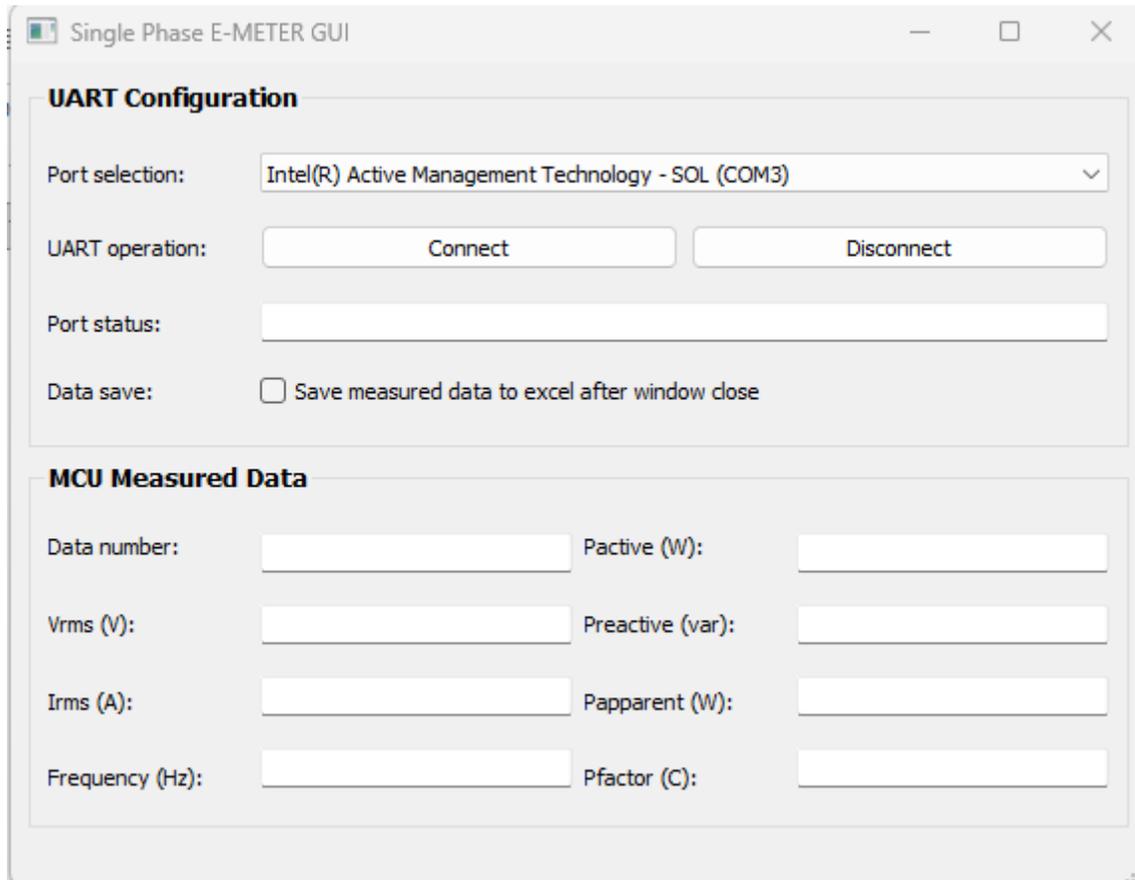


图 3-3. PC GUI

使用该 GUI 前，需通过 USB 转 UART 工具连接 MSPM0C1104，本演示中采用开发板的 XDS110 UART 回传通道。打开 GUI 并选择 USB 转 UART 工具使用的正确 COM 端口，然后点击“Connect”。点击连接后，GUI 将发送一个字节“0x22”，以通知 MSPM0C 开始每秒发送一次仪表结果数据。数据格式如下所示

帧头 (0x80) + 数据 ( 38 字节 )

表 3-1. 数据段详情

条目	长度 ( LSB 字节优先 )	format
均方根电压 (VRMS)	4 字节	IQ14
IRMS	4 字节	IQ14
频率	2 字节	实际频率*100
有功功率	8 字节	IQ8
无功功率	8 字节	IQ8
视在功率	8 字节	IQ8
功率因数	4 字节	实际 PF*10000

对于 IQ14 或 IQ8，要获得实际数据，只需除以  $2^{14}$  或  $2^8$ 。

## 4 演示板快速入门和校准

### 4.1 评估板简介

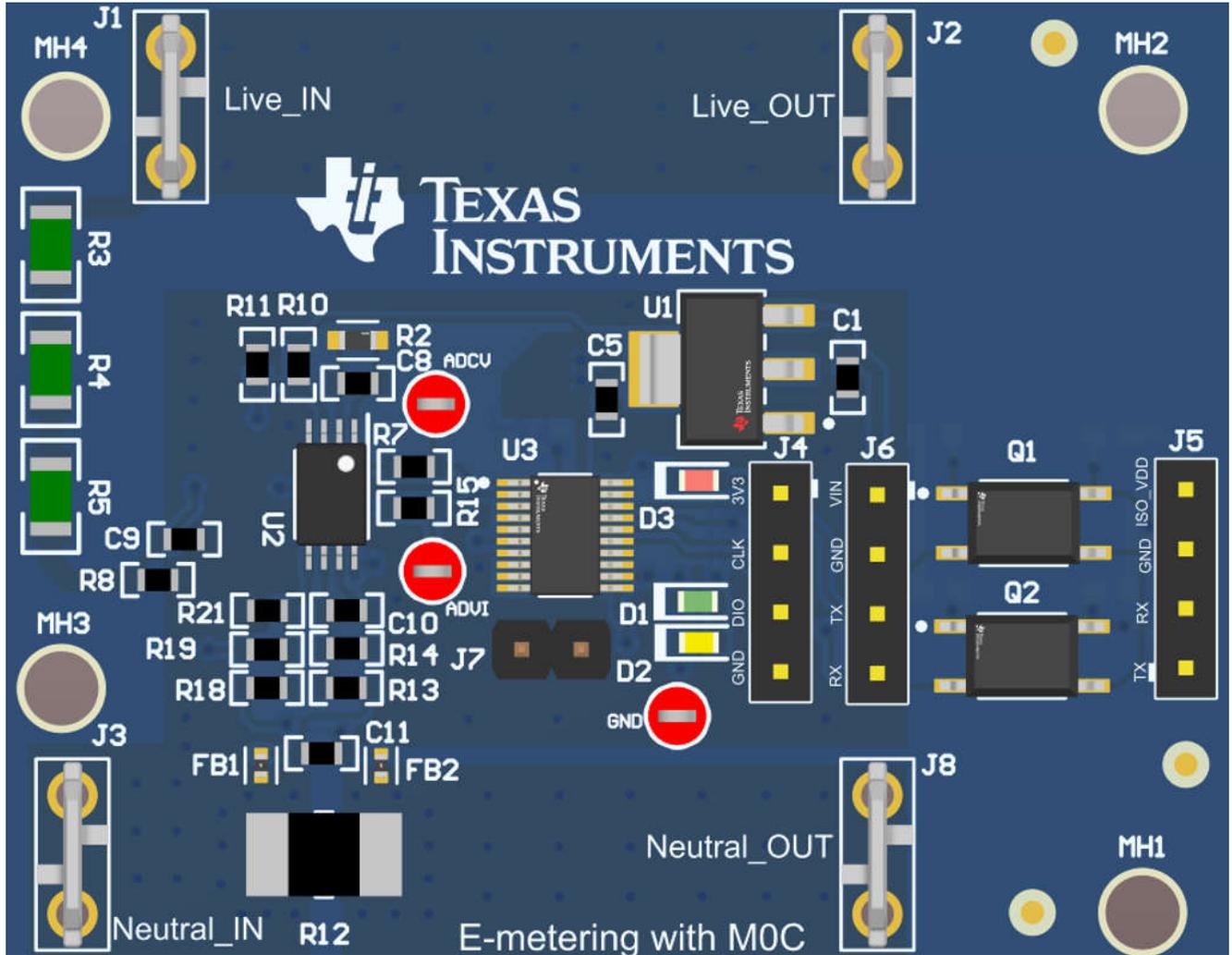


图 4-1. 评估板

表 4-1. 评估板连接器

接头名称	主函数	注释
J1	火线输入	
J2	火线输出	
J3	中性线输入	
J8	中性线输出	
J4	SWD 程序端口	可直接提供 3.3V 电压
J6	直流电源和通信端口	直流电源和 UART 端口，直流输入电压范围为 3.3V~18V
J5	隔离通信端口	此处需要隔离 VDD

## 4.2 比例系数校准

为了使该解决方案可与不同的 AFE 配合使用，可以定义比例系数来修正系统中的增益误差。MSPM0C1104 的源代码中提供了四个比例系数，分别用于电压有效值、电流有效值、有功功率和无功功率。比例系数在 user\_config.h 文件中定义。

## 5 测试结果

本解决方案基于以下硬件进行测试

- 交流电源：Chroma 可编程交流电源 61503 (精度 0.2%)
- 电阻器负载：LINGO 干式负载箱
- 温度测试室：Votsch VT4002
- EVM 板上电阻器的精度为 1%

表 5-1. 不同电流负载精度测试 — 电流和电压

电流基准 (A)	测量电流 (A)	电流误差 (A)	电流误差 %	电压基准 (V)	测量电压 (V)	电压误差 (V)	电压误差 %
0.34	0.344	0.004	1.18 (最大值)	220.1	220.42	0.32	0.15
0.69	0.698	0.008	1.16	220.1	220.29	0.19	0.09
1.04	1.0412	0.0012	0.12	220.2	220.26	0.06	0.03
1.39	1.387	-0.003	-0.22	220.1	220.04	-0.06	-0.03
1.72	1.726	0.006	0.35	220.1	219.91	-0.19	-0.09
2.07	2.073	0.003	0.14	220	219.83	-0.17	-0.08
2.42	2.422	0.002	0.08	220	219.67	-0.33	-0.15
2.76	2.759	-0.001	-0.04	220	219.56	-0.44	-0.2
3.1	3.106	0.006	0.19	220	219.53	-0.47	-0.21
3.44	3.444	0.004	0.12	220	219.39	-0.61	-0.28 (最大值)

表 5-2. 不同电流负载精度测试 - 有功功率

功率基准 (W)	测量功率 (W)	功率误差 (W)	功率误差 %
76.2	75.64	-0.56	-0.73 (最大值)
153	153.46	0.46	0.3
229	228.96	-0.04	-0.02
305.2	304.57	-0.63	-0.21
379.5	379.06	-0.44	-0.12
455.9	455.07	-0.83	-0.18
532.7	531.07	-1.63	-0.31
607	604.75	-2.25	-0.37
683.2	680.68	-2.52	-0.37
757.5	754.33	-3.17	-0.42

表 5-3. 典型精度与温度间的关系

温度 (°C)	电压 (V)			电流 (A)			有功功率 (W)		
	Vmeasure	Vref	误差 (%)	Imeasure	Iref	误差 (%)	Pmeasure	Pref	误差 (%)
0	219.21	220	-0.36	2.066	2.07	-0.19	452.17	456	-0.84
10	219.55	220	-0.2	2.071	2.07	0.05	453.97	456.6	-0.58
20	219.79	220	-0.1	2.075	2.07	0.24	455.3	456.5	-0.26
25	219.89	220	-0.05	2.076	2.07	0.29	455.79	456.5	-0.16
35	220.18	220	0.08	2.08	2.07	0.48	457.34	456.5	0.18
45	220.45	220	0.2	2.084	2.07	0.68	458.69	456.5	0.48
55	220.72	220	0.33	2.087	2.07	0.82	460.04	456.6	0.75
65	220.96	220	0.44	2.091	2.07	1.01	461.41	456.6	1.05
75	221.21	220	0.55	2.095	2.07	1.21	462.7	456.6	1.34
85	221.44	220	0.65 (最大值)	2.098	2.07	1.35 (最大值)	463.91	456.6	1.6 (最大值)

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI) : [MSPM0C1104 数据表](#)
- 德州仪器 (TI) : 《[具有线电阻和 EMI 电容器补偿功能的单相交流和直流电源监控器](#)》

## 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