

Design Guide: TIDA-010999

直流 (DC) 电表参考设计



说明

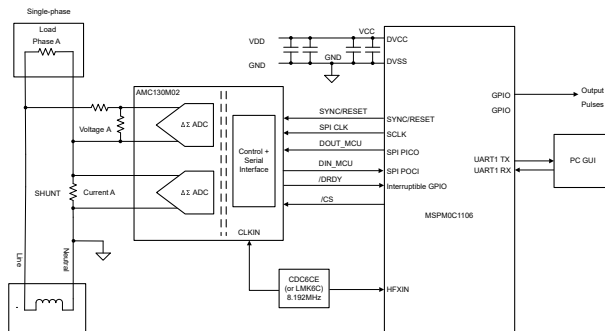
借助直流 (DC) 电表参考设计，终端用户可评估将隔离数据转换器 (ISO-ADC) 与基于增强型 Arm® Cortex®-M0+ 内核的超低功耗 32 位 MCU 相结合的设计。该设计可提供适用于计费应用的计量级精度。

资源

TIDA-010999	设计文件夹
AMC131M02	产品文件夹
MSPM0G1506	产品文件夹
MSPM0L2228	产品文件夹
ISO6731	产品文件夹
TRS3232	产品文件夹



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

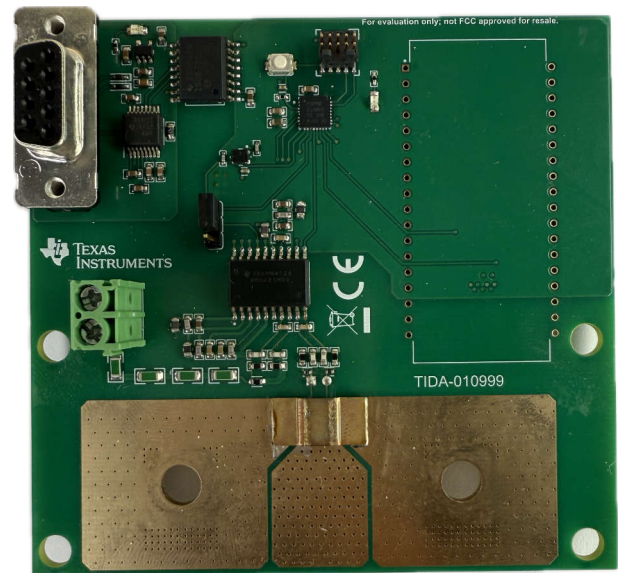


特性

- 计费级直流电表性能测试：符合 ANSI C12.32-2021：
 - B 类
- 宽电流范围：
 - 0.1A 至 1000A
- 板载 LCD 屏幕：
 - 实时更新能耗
- 适用于高电流应用的可连接式总线延伸件

应用

- [电表](#)
- [直流快速充电电源模块](#)
- [直流快速充电站](#)
- [ESS - 电池管理系统 \(BMS\)](#)



1 系统说明

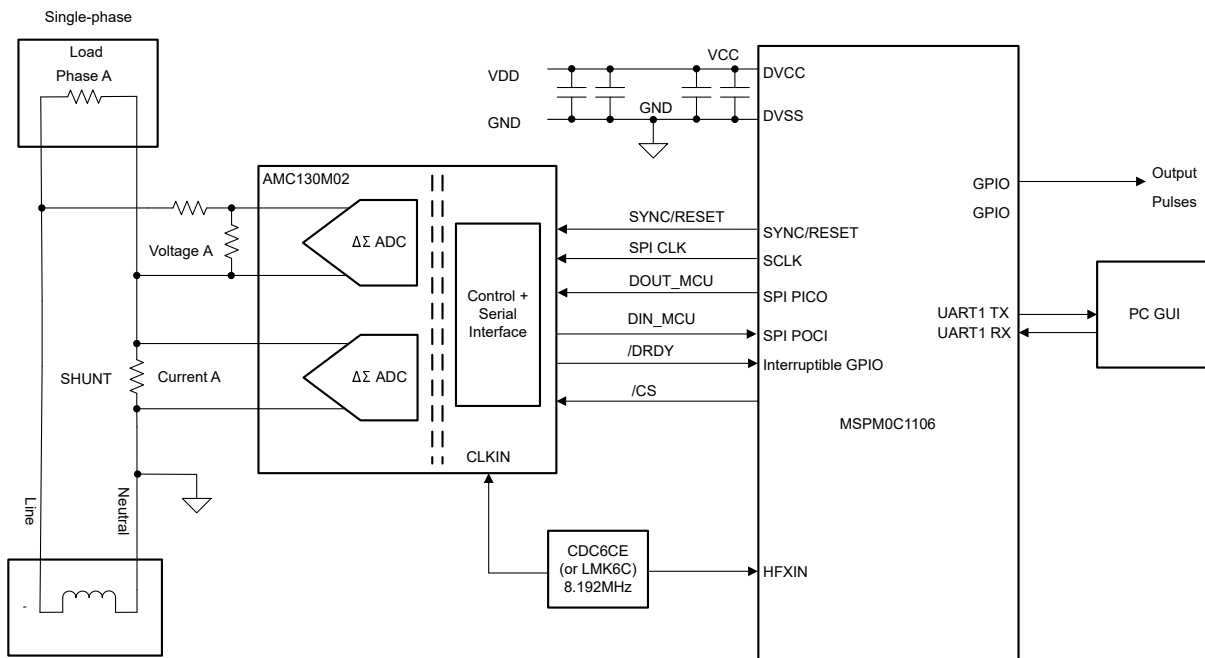
随着直流电 (DC) 日益融入现代电网基础设施，对精确可靠的直流电专用计量的需求也持续增长。直流快速充电、可再生能源装置 (太阳能光伏)、储能和数据中心等应用都需要精确测量高电压和电流，以确保安全运行、性能优化和公平的电费计费。

TIDA-010999 参考设计正是为满足这一需求而提出：它采用最新的数据转换与信号处理技术，以紧凑的外形实现对高直流电压和电流的电子化高精度测量。该设计面向计费级计量应用，使用户能够评估适用于各种新兴直流电力基础设施的计费和监控的直流计量参考设计。

2 系统概述

一个低欧姆值的高精度直列式电阻器 (通常称为分流电阻器) 用作电流检测元件。测量分流器上的电压降，并将该电压降送入隔离式模数转换器 (ADC) 进行数据采集。然后，系统微控制器 (MCU) 对数字化电流数据进行处理，以进行测量。一个简单的电阻分压网络将测得的电压压缩放到与 ADC 输入范围兼容的电平。

2.1 方框图



2.2 设计注意事项

在高电流应用中使用分流电阻器会面临诸多挑战，其中温升和漂移最为关键。在典型工作条件下，假设散热良好，分流电阻通常无法在超过额定电流约三分之二的情况下连续长期运行。散热有效性很大程度上取决于机械和热设计。在许多应用中，由于物理尺寸限制，无法使用散热片或强制风冷，从而降低了分流器具及焊盘的散热能力。其他冷却方法，例如增加 PCB 走线或主导体的铜面积、厚度或铜重，通常会增加 PCB 的整体重量、尺寸和成本。

由于分流电阻器直接与线路串联，不提供电气隔离，因此需要额外的隔离屏障来保护敏感电子元件免受线路浪涌和故障的影响。这就需要使用隔离放大器或隔离 ADC。

从直流计量的角度来看，还必须考虑其他设计注意事项。由于直流应用中误差会随时间直接累积，没有过零点来自然平均偏移，因此长期稳定性和校准漂移在直流应用中变得更加重要。分流器两端的温度梯度会引入偏移和增益误差，从而降低低电流和高电流下的测量精度。此外，PCB 走线和互连中的寄生电阻也会显著影响测量精度，因此需要精心布线和阻抗控制设计。最后，直流计量应用必须在不发生过度自发热的情况下，能够承受连续的满量程电流；同时还要在宽温度与宽电流范围内保持良好的测量精度。

2.3 重点产品

在该参考设计中，将隔离式模数转换器与 Arm® Cortex®-M0+ 核心微控制器结合，用于信号处理和控制在。包含一颗辅助微控制器，用于驱动板载 LCD 显示屏并管理用户界面。采用体声波 (BAW) 谐振器作为 ADC 的时钟源，为其提供稳定且低抖动的定时基准。

作为最佳设计实践，用户界面通过使用数字隔离与测量和处理电子电路保持电气隔离。

2.3.1 AMC131M03

AMC131M03 是一款精密的三通道数据和电源隔离式同步采样 24 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)。AMC131M03 具有宽动态范围、低功耗和特定于电能测量的功能，非常适合电能计量和功率计量应用。由于该器件具有高输入阻抗，因此 ADC 输入可直接连接到电阻分压器网络或分流传感器。AMC131M03 具有完全集成的隔离式直流/直流转换器，能实现器件低侧的单电源运行。增强型电容隔离栅已通过 VDE 0884-17 和 UL1577 认证。该隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件分开，并保护低压器件免受损坏，使 AMC131M03 成为使用分流传感器的多相电能计量应用的理想选择。

2.3.2 MSPM0G1506

MSPM0G150x 微控制器 (MCU) 属于 MSP 高度集成的超低功耗 32 位 MCU 系列，该 MCU 系列基于增强型 Arm® Cortex®-M0+ 32 位内核平台，工作频率最高可达 80MHz。这些低成本 MCU 提供高性能模拟外设集成，支持 -40°C 至 125°C 的工作温度范围，并在 1.62V 至 3.6V 的电源电压下运行。

2.3.3 MSPM0L2228

MSPM0L2228 是一款 Arm® Cortex®-M0+ 32 位微控制器，运行频率高达 32MHz，专为超低功耗和高性价比设计而打造。该器件提供高达 256KB 的嵌入式闪存存储器，支持 ECC 纠错和双存储体，方便现场固件更新；同时还配备高达 32KB 的 SRAM，支持 ECC 纠错和奇偶校验保护。此外，该器件还包含一个 VBAT 备用电路，具备实时时钟、低频时钟、防篡改检测、独立看门狗和备用存储器，可在主电源断电时提供电池供电支持。部分器件可选配超低功耗分段式 LCD 控制器，支持低成本显示应用。其全面的超低功耗架构可在整个工作温度范围内最大限度地提高性能，同时最大限度地降低能耗。

2.3.4 ISO6731DWR

ISO6731 器件是高性能三通道数字隔离器，可提供符合 UL 1577 的 5000V_{RMS} 隔离额定值，非常适合具有此类需求的成本敏感型应用。此器件还通过了 VDE、TUV、CSA 和 CQC 认证。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 的同时，ISO6731 器件还可提供高电磁抗扰度和低辐射，并具备低功耗特性。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由 TI 的双电容二氧化硅 (SiO₂) 绝缘栅相隔离。该器件配有使能引脚，可用于在多主机驱动应用中将各自的输出置于高阻抗状态。ISO6731 器件具有两个正向通道和一个反向通道。如果出现输入功率损耗或信号丢失，对于不带后缀 F 的器件，默认输出高电平；对于带后缀 F 的器件，默认输出低电平。此器件与隔离式电源结合使用，有助于防止 UART、SPI、RS 485、RS 232 和 CAN 等数据总线上的噪声电流损坏敏感电路。凭借芯片设计和布线技术，ISO6731 器件的电磁兼容性得到了显著增强，可缓解应用级 ESD、EFT 和浪涌问题并符合辐射标准。ISO6731 器件采用 16 引脚 SOIC 宽体 (DW) 封装，是对前几代器件的引脚到引脚的升级。

2.3.5 TRS3232EIDBR

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） $\pm 15\text{kV}$ IEC ESD 保护。该器件符合 TIA/EIA-232-F 的要求并在异步通信控制器与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单个 3V 至 5.5V 电源供电。这些器件以高达 250kbps 的数据信号传输速率和最高 $30\text{V}/\mu\text{s}$ 的驱动器输出压摆率运行。

2.3.6 TPS70933DBVR

TPS709 系列线性稳压器是针对功耗敏感型应用而设计的超低静态电流器件。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，是非常优秀的选择。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 EN 引脚拉低启动关断模式。该模式的关断电流低至 150nA （典型值）。TPS709 系列采用 WSON-6 和 SOT-23-5 封装。

2.3.7 CDC6C

德州仪器 (TI) 的高精度体声波 (BAW) 微谐振器技术集成于封装中，可实现低抖动时钟电路。与其他硅基制造工艺一样，BAW 完全由 TI 工厂设计和制造。CDC6Cx 器件是一个低抖动、低功耗的固定频率振荡器，采用 BAW 作为谐振器源。该器件在出厂时已根据特定的频率和功能引脚进行编程。借助频率控制逻辑和输出频率分频器，CDC6Cx 可在指定范围内生成任意频率，提供可满足所有频率需求的单个器件系列。该器件的高性能时钟、机械稳定性、低功耗、灵活性和小型封装选项专为工业、电信、数据和企业网络及个人电子产品终端设备中的基准时钟和核心时钟而设计。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

3.1.1 分流电阻器要求

在高电流直流计量设计中，选择合适的分流电阻器是最关键且最具挑战性的环节之一。分流器必须在耗散较大功率的同时，仍能提供准确的电流测量

对于高电流应用，例如最大电流为 200A 的应用，需要低电阻、大功率分流器。在本设计中，我们选用了 0.2mΩ 电阻器。[方程式 1](#) 显示了预期的功率损耗计算。

$$P = I^2R = (200)^2 \times 0.0002 = 8W \quad (1)$$

在实践中，不要连续在额定最大功率下运行分流电阻器。在冷却不充分的情况下，分流器的功率将限制在额定功率的三分之二左右。

为了改善热性能和电流承载能力，将两个 5931、15W 的分流电阻器并联连接。该配置将电阻降低到 100μΩ，使热量分布更均匀，并提高了用于测量的整体功率额定值。

此外，所选分流器还必须满足以下条件：

- 低电阻温度系数 (TCR)，以尽量减少阻值漂移
- 高长期稳定性
- 低电感，以便进行动态电流测量

3.1.2 PCB 布局要求

高电流直流计量会对 PCB 造成显著的热应力和电应力。大部分功率耗散发生在载流覆铜线迹和连接点上。

为了支持高电流电平，需要遵循以下布局准则：

- 高电流走线必须尽可能宽且短
- 覆铜厚度必须至少为 4oz
- 确保 PCB 厚度为 2mm 或以上
- 可以使用过孔并联多个铜层（建议使用四个或更多铜层）以增加电流容量
- 使电流路径对称以防止局部过热

避免在大电流焊盘上设置散热片，以最大限度地降低电阻和温升。

3.1.3 元件放置要求

主要放置指南包括：

- 敏感的模拟元件（ADC、放大器、基准电压源）必须放置在远离高电流和高温区域的位置。
- 保持足够的间距以防止热耦合

这种方法可降低热漂移并有助于保持长期测量精度。

3.1.4 热管理要求

有效的热管理对于高电流直流仪表至关重要。

建议的做法包括：

- 使用覆铜和散热平面
- 在大功率元件下方设置散热过孔
- (可选) 为分流器配置外部散热片
- 对封闭系统使用强制风冷
- 在外壳中设置通风开口

确保在最坏工况下，器件结温保持在规定的温度限值之内。

3.1.5 隔离要求

为了符合监管规定，必须考虑电气隔离和间距。

设计要求包括：

- 足够的爬电距离和间隙
- 高压域和低压域之间的增强型绝缘
- 隔离式放大器或隔离式 ADC
- 裸露导电器件的正确接地

3.1.6 EMI 和 EMC 注意事项

高电流开关和负载变化会引入电磁干扰。

设计措施包括：

- 对电源输入进行适当滤波
- 屏蔽敏感电路
- 控制返回路径
- 按需使用铁氧体磁珠
- 符合适用的电磁兼容性标准

这些措施可以降低噪声并提高测量稳定性。

3.2 软件要求

要使用 TIDA-010999 设计，必须在 PCB 上安装三个软件来评估直流计量。

1. 此参考设计使用 USB 转 RS-232 电缆与 GUI 通信。必须安装电缆的驱动程序。前往 [EATON 串行适配器电缆](#) 下载 U209-000-R 电缆的驱动程序。
2. 下载 [MSPM0-SDK](#)。该 SDK 包中包含 Energy Metrology GUI。

3.2.1 TIDA-010999 计量

计量软件已刷入参考设计中，开箱即用精度为 1%。

3.2.2 GUI 操作

按照以下步骤操作参考设计 GUI：

1. 将代码刷写到参考设计中后，TIDA-010999 就可以用于评估了。
 - a. 将 TIDA-010999 的 RS-232 电缆连接到 PC。
 - b. 打开设备管理器，查看连接 TIDA-010999 的 COM 端口。
 - c. 在文本编辑器中打开 calibration-config 以设置连接：
 - i. 按 **Ctrl + f** 并搜索 COM。找到 COM 端口后，将 COM 设置更改为步骤 b 中 TIDA-010999 连接的 COM 端口。确保波特率为 115200。
 - ii. 保存设置并关闭文本编辑器。
2. 找到 SDK 文件中的 GUI 文件夹，然后在 SDK 文件 C:\ti\mspm0_sdk_2_10_00_01\tools\metrology_gui 中打开 Metrology-GUI 的 *Calibrator*
 - 打开绿色单元格 (请参阅 图 3-1)

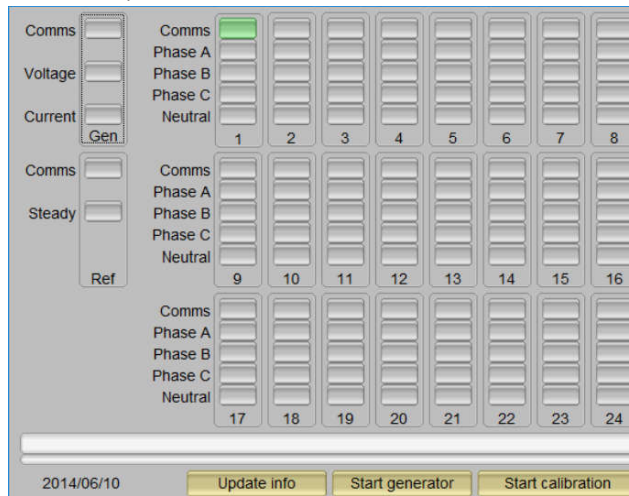


图 3-1. 绿色单元格选择

- 仪表已准备好进行校准 (请参阅 图 3-2)



图 3-2. 仪表状态 GUI

3.2.3 电压和电流测量

电压和电流测量值在 GUI 中存储为直流电压偏置和直流电流偏置。功率测量值以有功功率的形式进行计算和存储。

3.3 测试设置

针对该参考设计，采用 ANSI C12.32 标准测试来验证计量精度与可靠性。对于测试设置，使用一个电流源和一个独立的电压源，为电表分别提供电压和电流。

3.4 测试结果

3.4.1 测试编号 1：确定初始内在误差

目标：本测试的目的是验证参考条件下的仪表误差是否小于表 3-1 中给出的相关 BMPE。

误差测量：从最小电流到最大电流进行精度测量，然后让仪表以最大电流运行 10 分钟，再将电流降至最小电流。记录电流上升和下降的每个测试点的误差测量值。实际误差测量值是相同电流电平下每个测试点之间的平均值。

在每个测试电流下，每个单独的测试点结果与两个测试点结果的平均值之间的偏差不得超过基准最大允许误差 (BMPE) 的 $\pm 34\%$ 。

例如，B 类的目标为 $\pm 1\%$ ：

- $1\% \times 34\% = 0.34\%$
- 向上变化 = 0.55%
- 向下变化 = 0.45%
- 平均值 = $(0.55 + 0.45) / 2 = 0.50\%$
- $0.5\% \pm 0.34\% = 0.16\% - 0.84\%$

向上变化和向下变化的扫描结果必须在 0.16% 和 0.84% 以内，才能达到 B 类精度标准。

表 3-1. 确定初始固有误差测试结果

向上变化	误差 1	平均误差 %	向下变化	误差 1	平均误差 %	MEAN	精度等级
50	0.07925	0.0793	50	0.097661749	0.0977	0.0885	E 类
55	0.12459	0.1246	55	0.063479625	0.0635	0.0940	E 类
60	0.17664	0.1766	60	0.037994094	0.0380	0.1073	D 类
70	0.09946	0.0995	70	-0.10031581	-0.1003	-0.0004	C 类
80	0.08925	0.0893	80	-0.19100382	-0.1910	-0.0509	C 类
100	-0.01020	-0.0102	100	-0.43800876	-0.4380	-0.2241	B 类
150	-0.32369	-0.3237	150	-0.72834159	-0.7283	-0.5260	B 类
170	-0.52407	-0.5241	170	-0.8458809	-0.8459	-0.6850	C 类
185	-0.69228	-0.6923	185	-0.94364049	-0.9436	-0.8180	C 类
200	-0.79506	-0.7951	200	-1.03807256	-1.0381	-0.9166	C 类

总结：该仪表在配备板载分流器的情况下，在 200A 时达到 B 类精度等级。

3.4.2 测试编号 2：启动电流

目标：该测试的目的是验证仪表是否能够在两个脉冲之间的允许时间范围内生成适当数量的脉冲。
两次脉冲之间的期望时间 T 由 **方程式 2** 表示。

$$\frac{3.6 \times 10^6}{m \times k \times V_{\min} \times I_{st}} \quad (2)$$

其中

- m = 元件数量 = 1
- k = 脉冲数 = 10000
- V_{\min} = 最小电压 = 90V
- I_{st} = 启动电流 = 0.5、1、2

BMPE：在每个电流范围下， I_{st} 的每个测试脉冲之间的时间间隔必须小于 1.5T。

表 3-2. 启动电流测试结果

电流	TP1 的时间 (秒)	TP2 的时间 (秒)	TP3 的时间 (秒)
0.5	8.90	8.88	9.03
1	4.23	4.21	4.25
2	2.10	2.16	2.03

总结：该仪表通过了这项测试的 **E** 类标准。

3.4.3 测试编号 3：空载条件

目标：这项测试是为了确保当没有电流流过仪表时，仪表不会产生脉冲。

在 V_{\min} 下执行此测试。

$$\Delta t \geq \frac{3.6 \times 10^6}{b \times m \times k \times V_{\min} \times I_{\min}} \text{hours} \quad (3)$$

其中

- $B =$ 在 I_{\min} 范围内按所规定等级对应的精度 = 关注的精度等级 (0.2)
- $K =$ 测试脉冲 = 10000
- $M =$ 元件数量 = 1
- $I_{\min} =$ 最小电流 = 0.5
- $V_{\min} =$ 最小电压 = 90V

要求：在 [方程式 3](#) 规定的时间内，仪表不得产生多个测试脉冲。

表 3-3. 空载条件测试结果

分级	A 类	B 类	C 类	D 类	E 类
时间 (以小时为单位)	0.0800	0.1333	0.2000	0.5000	1.0000
计时器设置	04:48	08:00	12:00	30:00	01:00
寄存脉冲	0	0	0	0	0

总结：该仪表通过了这项测试的 **E 类** 标准。当没有电流流过仪表时，仪表不会累积任何脉冲。

3.4.4 测试编号 4：电压变化、电压测量端口

目标：验证在正常运行过程中，当输入电压发生变化时，电表能够准确工作。

测试点：当电流为 I_r 时，电压应在 $0.9 \times V_{\min}$ 到 $1.1V$ (最大值) 的范围内。

表 3-4. 电压变化、电压测量端口测试结果

电压	测试电流 = 100A	
	ERROR	分级
50	-0.208	C 类
100	-0.351	B 类
150	-0.378	B 类
300	-0.404	B 类
500	-0.434	B 类
8405.5	-0.456	B 类

总结：该仪表通过了这项测试的 **B 类** 标准。这是由于电流引起的温度漂移所导致的结果。分压器放置在靠近电流与电路板连接焊盘的位置。为了获得更好的性能，需要更合理的布局和散热补偿。

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010999](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010999](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议{可选部分}

4.1.3.1 布局打印{可选部分}

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010999](#) 中的设计文件。

5 工具与软件

工具

[LaunchPad 开发板](#) 用于将代码刷写到参考设计中

[J-Tag 调试程序](#) 硬件接口工具 (基于 IEEE 1149.1)，可将 PC 连接到嵌入式系统或 FPGA 的处理器，以调试代码、测试硬件并直接对闪存存储器进行编程。

软件

[Eaton 串行适配器电缆链路](#) USB-A 转 RS-232 (DB9) 串行适配器电缆 (M/M)、软件、固件和驱动程序

[MSPM0-SDK](#) MSPM0 软件开发套件 (SDK)

6 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[LMR436x0-Q1 在 150°C T_{JMAX} 下 I_Q < 2.5 μA 且采用 4mm²HotRod™ QFN 封装的 36V、1A/2A 汽车级降压转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS62850x-Q1 采用 SOT583 封装的 2.7V 至 6V、1A/2A/3A 汽车级降压转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TLIN1021A-Q1 具有抑制和唤醒功能的故障保护 LIN 收发器数据表](#)

7 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

8 商标

TI E2E™ and HotRod™ are trademarks of Texas Instruments.

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

所有商标均为其各自所有者的财产。

9 作者简介

DANIEL MAAYA 是德州仪器 (TI) 达拉斯总部的系统工程师，专注于开发适用于电力计量和电网基础设施应用的精密模拟前端设计。Daniel 就职时已拥有电气和电力电子领域的多学科背景，在信号调节、计量合规性 (ANSI/IEC)、电源转换器和基于罗氏线圈的传感系统方面具备深厚的专业知识。他拥有模拟硬件设计和系统级集成方面的一手经验，包括针对高精度测量的 EMC 测试和校准。

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