Design Guide: TIDA-010042

基于 GaN 的 400W MPPT 充电控制器和电源优化器参考设计

说明

该参考设计是一款适用于 12V 和 24V 电池的最大功率点跟踪 (MPPT) 太阳能充电控制器，未来可用作电源优化器。该参考设计布局紧凑，适用于中小型太阳能充电器设计，可使用 15V 至 60V 太阳能电池板模块、12V 或 24V 电池供电运行，提供高达 16A 的输出电流。该设计利用降压转换器将太阳能电池板电压降低至电池电压。具有内部集成驱动器的半桥功率级由微控制器单元 (MCU) 控制，该微控制器单元使用扰动观测法计算最大功率点。该太阳能 MPPT 充电控制器在设计时便将各种实际设计注意事项考虑在内，其中包括电池反向保护、软件可编程警报和指示以及浪涌和 ESD 保护等。

资源

TIDA-010042	设计文件夹
LMG2100R044、CSD18540Q5B	产品文件夹
MSPM0G1506、TPSM365R6V5	产品文件夹
INA241、TPS7A2033、OPT3004、TMP303	产品文件夹

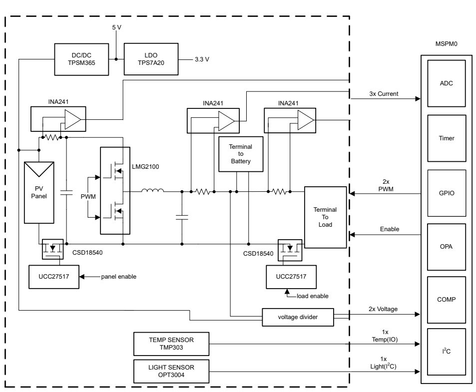
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

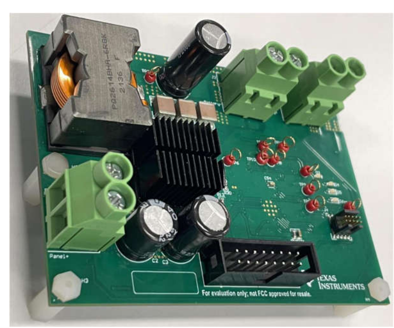
特性

- 在 12V 系统中效率为 98.3%，在 24V 系统中效率为 98.5%
- 宽输入电压范围：15V 至 60V
- 设计灵活，支持 12V 和 24V 电池电压
- 高额定输出电流：16A
- 电池反极性保护、过度充电保护和过度放电保护
- 系统过热和环境光探测能力
- 电路板尺寸小：95mm × 68.2mm × 25mm

应用

- 太阳能充电控制器
- 太阳能电源优化器





1 系统说明

此参考设计基于具有集成栅极驱动器的 TI 氮化镓 (GaN) FET 和 MSPM0G1506 MCU 而开发，适用于中小型功率太阳能充电器控制器设计，能够使用 15V 至 60V 太阳能电池板模块和 12V 或 24V 电池供电运行，输出电流高达 16A。

English Document: TIDUEJ8

该设计采用扰动观测算法进行 MPPT，运行效率大于 98%。由于设计中采用的半桥 GaN FET 模块具有低 $R_{DS(on)}$、低 P_{switch} 和零反向恢复电荷等特性，因此可以实现高效率。降压转换器的高开关频率（高达 250kHz）使采用小尺寸元件成为可能。

1.1 关键系统规格

表 1-1. 关键系统规格

参数	规格	单位
输入电池板电压范围	15 – 60	V
电池标称电池	12、24	V
额定最大电流	16	A
MPPT 效率	> 98	%
交错降压工作频率	250	kHz

2 系统概述

2.1 方框图

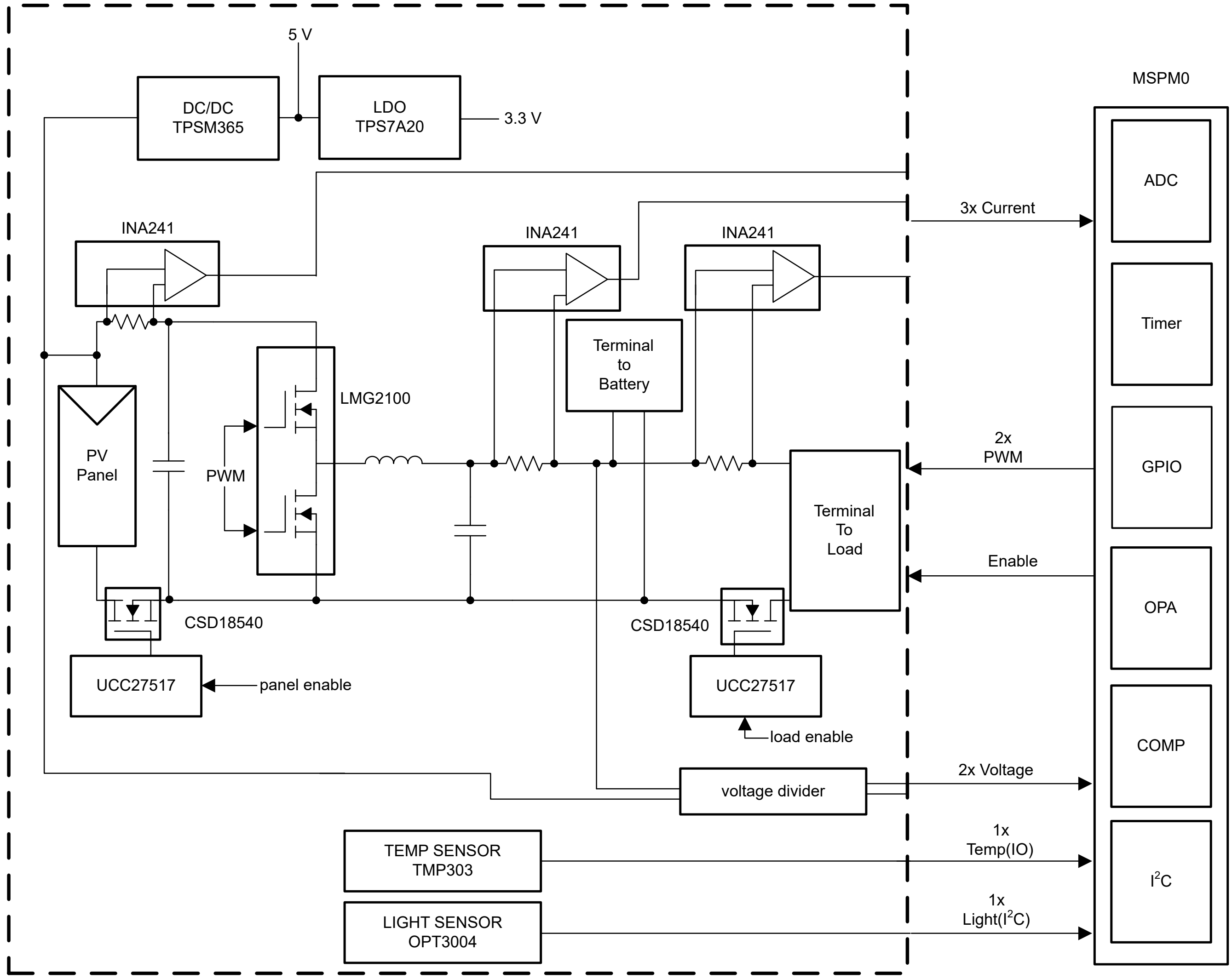


图 2-1. TIDA-010042 方框图

2.2 设计注意事项

TIDA-010042 电路板由一个 MCU (MSPM0G1506) 组成，该 MCU 收集有关电池板和电池电压以及电池板、电池和负载电流的数据，并使用这些信息来跟踪最大功率点。然后，MCU 生成可直接驱动半桥 GaN 模块 (LMG2100R044) 的 PWM 信号。降压转换器可以调节电池板的输出电压以更大限度地提高传输功率，也可以调节输出电流以防止电池过度充电，从而延长电池寿命。还配备了负载使能门 (CSD18540Q5B)，以防电池过度放电，这是另一种延长电池寿命的方法。

为了给系统供电，使用开关稳压器 (TPSM365R6V5) 将 GaN 模块和栅极驱动器的电池板电压降至 5V。在 5V 以下，使用低压降 (LDO) 稳压器 (TPS7A2033) 为其余元件提供 3.3V 稳压线路。

2.3 重点产品

2.3.1 MSPM0G1506

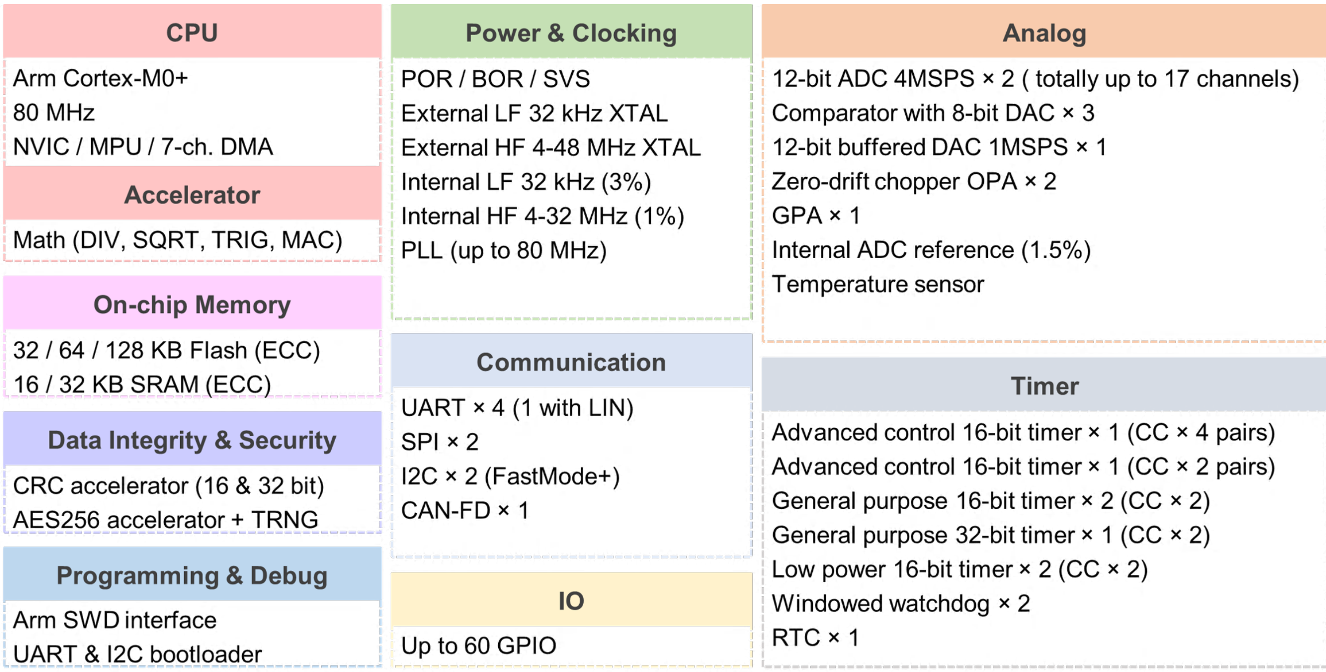


图 2-2. MSPM0G1506 方框图

MSPM0G1506 是一款 80MHz MCU，具有七个计时器（支持多达 22 个 PWM 通道）、64KB 闪存、32KB RAM、两个 12 位 4MSPS ADC、两个零漂移零交叉斩波运算放大器、三个具有 8 位基准 DAC 的高速比较器和一个具有集成输出缓冲器的 12 位 1MSPS DAC。

- 宽电源电压范围：1.62V 至 3.6V
- 经优化的低功耗模式
  - 运行：96μA/MHz (CoreMark)
  - 睡眠：458μA（4MHz 时）
  - 停止：47μA（32kHz 时）
  - 待机：1.5μA，具有 RTC 和 SRAM 保留
  - 关断：78nA，具有 IO 唤醒能力
- 具有整体超低功耗系统架构的 32 位 Cortex-M0+ 平台
- 灵活的电源管理系统
  - 内部稳压内核电源
  - 电源电压监控、监视和降压
- 时钟系统
  - 精度高达 ±1.2% 的内部 4MHz 至 32MHz 振荡器 (SYSOSC)
  - 高达 80MHz 的锁相环 (PLL)
  - 精度为 ±3% 的内部 32kHz 低频振荡器 (LFOSC)
  - 外部 4MHz 至 48MHz 晶体振荡器 (HFXT)
  - 外部 32kHz 晶振 (LFXT)
  - 外部时钟输入
- 数学加速器支持 DIV、SQRT、MAC 和 TRIG 计算
- 7 通道 DMA 控制器
- 多达 60 个 GPIO、两个驱动强度为 20mA 的高驱动 IO、两个 5V 容限 IO
- 计时器
  - 两个具有死区支持和多达 12 个 PWM 通道的 16 位高级计时器
  - 一个 32 位高分辨率通用计时器

  - 两个 16 位通用计时器支持待机模式下的低功耗运行
  - 一个 16 位通用计时器支持 QEI
  - 一个 16 位通用计时器
- 四个 UART 接口；一个支持 LIN、IrDA、DALI、Smart Card、Manchester，三个支持待机模式下的低功耗运行
- 两个 I2C 接口支持高达 FM+ (1Mbit/s)、SMBus/PMBus 和从停止模式唤醒
- 两个 SPI，一个 SPI 支持高达 32Mbit/s
- 两个同步采样 12 位 4Msps ADC
  - 硬件均值计算可在 250ksps 下实现 14 位有效分辨率
  - 12 位输出分辨率，速率高达 4MSPS 且 ENOB 大于 11 位
  - 总共多达 17 个具有独立结果存储寄存器的外部输入通道
  - 内部通道用于温度检测、电源监测和模拟信号链（与 OPA、DAC 等的互连）
  - 软件可选基准
  - 提供运行、睡眠和停止模式
- 三个具有 8 位基准 DAC 的高速比较器 (COMP)
  - 可编程迟滞
  - 可编程基准电压
  - 可配置工作模式
  - 可编程输出干扰滤波器延迟
  - 支持 6 个消隐源
  - 输出连接到高级计时器故障处理机制
- 支持 TI 系统配置工具

电池板和电池线路的电压和电流用于计算和跟踪 MPP，而 MSPM0G1506 支持使用内部模数转换器 (ADC) 从各种模拟信号中快速采集数据。在 40MHz 下运行可实现快速转换和计算，从而高效执行 MPPT 并相应地调整降压转换器的占空比。

在电池充电模式期间，MSPM0G1506 向降压转换器生成脉宽调制 (PWM) 信号，其中占空比与降压级的电流输出或电池充电电流成正比。MCU 还负责通过防止电池过度充电来管理电池电压。MCU 通过在达到阈值电压后将转换器切换到恒压模式来实现此目的。此外，一旦负载电流达到阈值或电池电压降至低于另一个阈值，MCU 就会断开负载，从而防止电池过度放电。通过有效地管理电池，该参考设计可更大限度地延长使用寿命并优化性能水平。

设计中还包括由 MCU 控制的状态指示器和警报，用于向用户提供反馈；然而，有些未初始化。

2.3.2 LMG2100R044

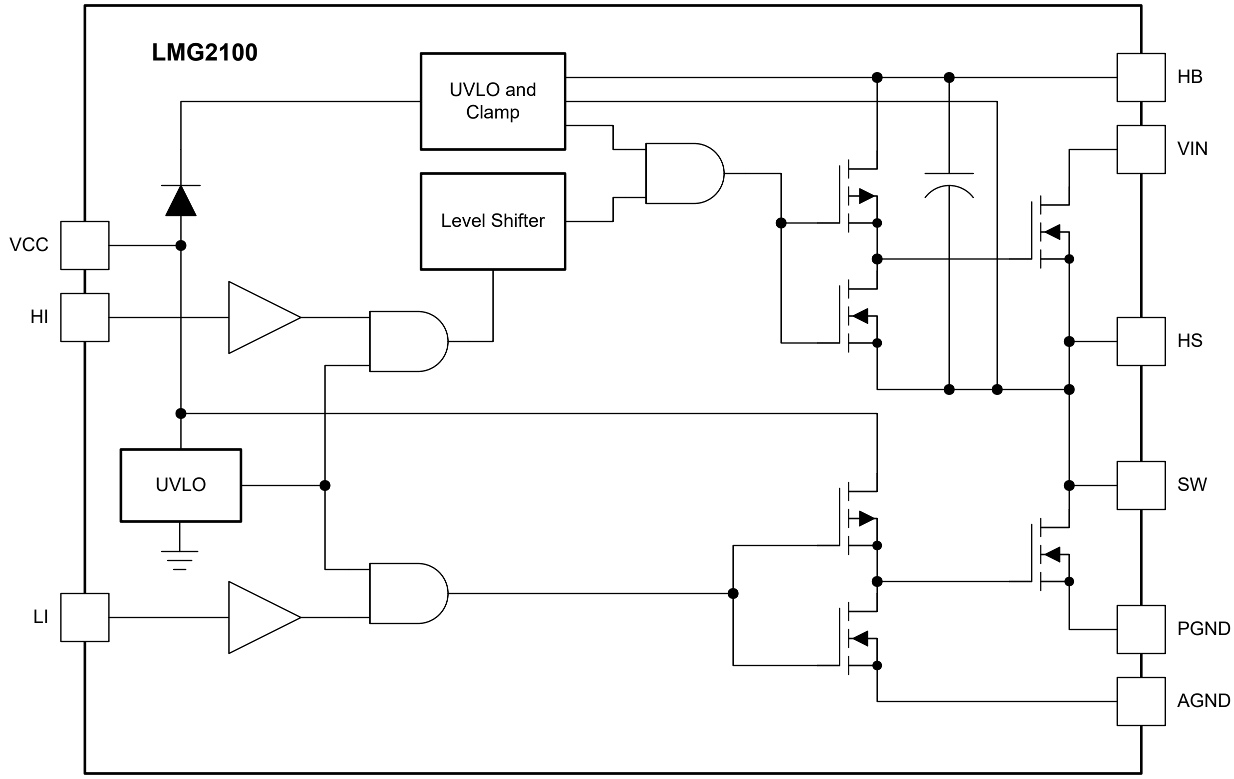


图 2-3. LMG2100 功能方框图

LMG2100R044 器件是一款 80V 连续 100V 脉冲式 35A 半桥功率级，具有集成栅极驱动器和增强模式氮化镓 (GaN) FET（$R_{DS(on)}$ 为 4.4mΩ）。

- 5V 外部辅助电源
- 近零反向恢复
- 非常小的输入电容 C_{ISS} 和输出电容 C_{OSS}
- 高压摆率开关，低振铃
- 内部自举电源电压钳位，可防止 GaN FET 过驱动
- 出色的传播延迟（典型值 29.5ns）和匹配（典型值 2ns）
- 低功耗
- 外露式顶部 QFN 封装实现顶面散热
- 封装经过优化，便于 PCB 布局
- 5.5mm × 4.5mm × 0.89mm 无铅封装

该器件配有用户友好型接口且更为出色，进一步提升了分立式 GaN FET 的优势。对于需要小尺寸、高频、高效运行的应用，该器件是理想之选。

LMG2100R044 是一款半桥 GaN 功率级，具有高度集成的高侧和低侧栅极驱动器，包括内置 UVLO 保护电路和过压钳位电路。钳位电路可限制自举刷新操作，以确保高侧栅极驱动器过驱动不超过 5.4V。该器件在半桥配置中集成了两个 4.4mΩ GaN FET。该器件可用于许多隔离和非隔离拓扑，从而实现非常简单的集成。为了最大限度地减少硬开关式降压转换器低侧 FET 的第三象限导通，可以独立控制 HI 和 LI。采用的封装旨在最大限度减小环路电感，同时保持 PCB 设计简单。为最大限度缩短与引脚之间的布线长度，TI 建议使用 0402 尺寸。为最大限度减少寄生电感，应将旁路电容器和自举电容器尽可能靠近器件放置。导通和关断的驱动强度经过了优化，可提供高压转换率，而不会在栅极或电源环路上造成任何过多的振铃。

2.3.3 INA241

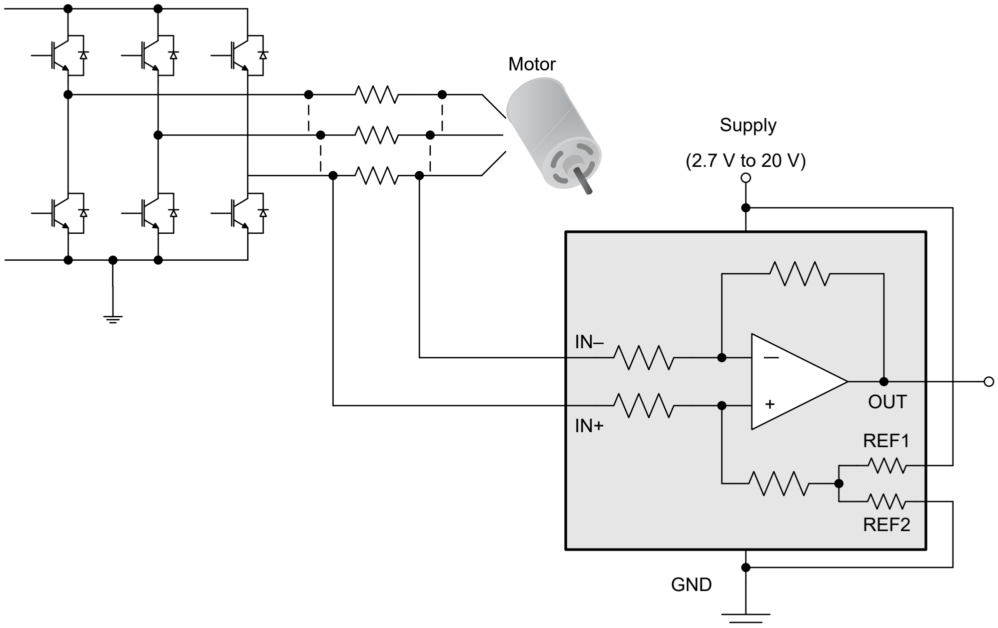


图 2-4. INA241 示例应用

INA241 是一款具有增强型 PWM 抑制功能的 110V、零漂移电流检测放大器。

- 增强型 PWM 抑制
- 出色的共模抑制比 (CMRR)：
  - 166dB DC CMRR
  - 104dB AC CMRR（100 kHz 时）
- 宽共模范围：-5 V 至 110 V
- 精度：
  - 增益：
    - 版本 A：±0.01%，±1ppm/°C 漂移（最大值）
    - 版本 B：±0.1%，±5ppm/°C 漂移（最大值）
  - 失调：
    - 版本 A：±10μV，±0.1μV/°C 漂移（最大值）
    - 版本 B：±150μV，±0.5μV/°C 漂移（最大值）
- 可用的增益：
  - INA241A1、INA241B1：10 V/V
  - INA241A2、INA241B2：20 V/V
  - INA241A3、INA241B3：50 V/V
  - INA241A4、INA241B4：100 V/V
  - INA241A5、INA241B5：200 V/V
- 静态电流：3.2 mA（最大值）

高共模电压 (110V) 可在不影响精度的情况下支持各种电池系统，而负共模电压 (–5V) 允许器件在低于接地电压的情况下运行以适应反激。

为 INA241 器件提供了 5 个预设增益值：10V/V、20V/V、50V/V、100V/V 和 200V/V，最大增益误差为 0.1%。该设计支持 16A 的最大系统电流，因此采用 A3（50V/V 增益）变体，以更大限度地提高电流读取分辨率，并尽可能地降低分流电阻器的功率耗散。

2.3.4 TPSM365

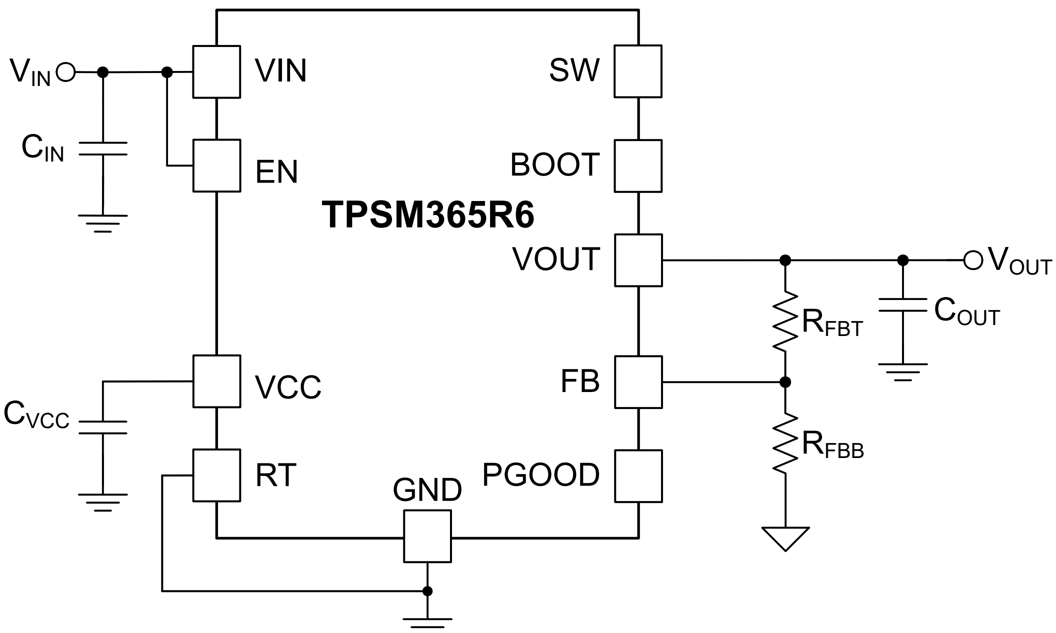


图 2-5. TPSM365 示例电路

TPSM365 器件是一款 65V、600mA 或 300mA 峰值同步降压转换器电源模块。

- 集成 MOSFET、电感器和控制器
- 宽输入电压范围：3V 至 65V，输入瞬态电压高达 70V
- 4.5mm × 3.5mm × 2mm 超模压封装
- 使用 RT 引脚或外部 SYNC 信号可在 200kHz 至 2.2MHz 范围内调节频率
- 在 $24V_{IN}$、$5V_{OUT}$ 下效率高于 85%
- 空载时工作静态电流很低：V_{IN} = 24V 至 3.3V V_{OUT} 下为 4μA
- 针对超低 EMI 要求进行了优化
  - 假随机展频可降低峰值发射
  - 轻负载下可通过 MODE/SYNC 引脚使用引脚可选 FPWM 模式提供恒定频率
  - FSW 与 MODE/SYNC 引脚同步
  - 符合 CISPR11 B 类要求
- 固有保护特性，可实现稳健的设计
  - 精密使能输入和漏极开路 PGOOD 指示器（用于时序、控制和 VIN UVLO）
  - 过流和热关断保护

2.3.5 TMP303

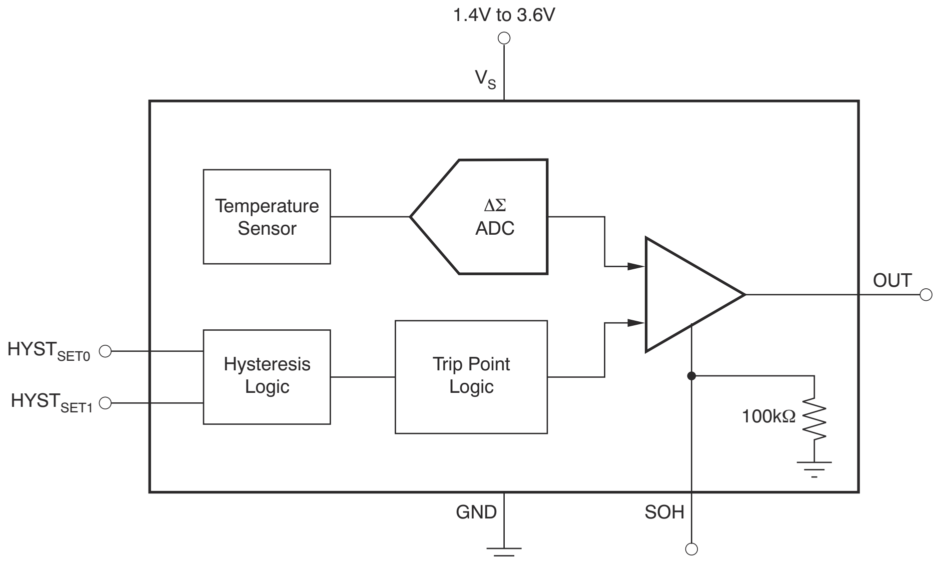


图 2-6. TMP303 方框图

TMP303 器件是一款出厂时经过编程的温度窗口比较器。

- 低功耗：5μA（最大值）
- SOT-563 封装：1.60 mm × 1.60 mm × 0.6 mm
- 跳闸点精度：
  - –40°C 至 125°C 范围内为 ±0.2°C（典型值）
- 推挽式输出
- 可选迟滞：1°C、2°C、5°C、10°C
- 电源电压范围：1.4V 至 3.6V

2.3.6 OPT3004

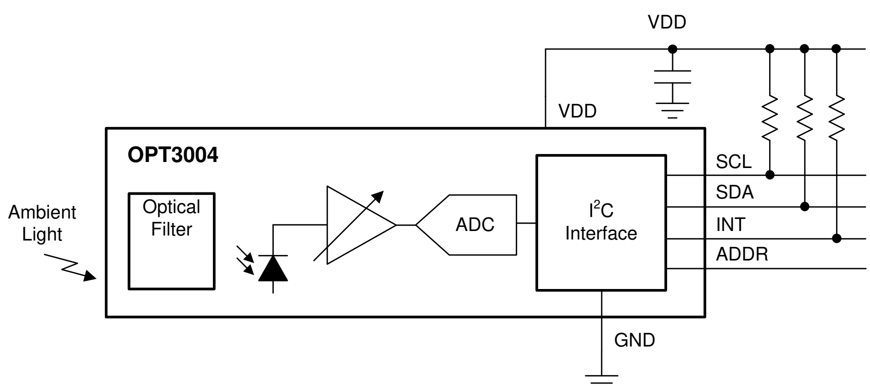


图 2-7. OPT3004 方框图

OPT3004 是一款具有高精度人眼响应功能的数字环境光传感器 (ALS)。

- 采用精密光学滤波以匹配人眼：
  - 可阻隔 99%（典型值）以上的红外线 (IR)
- 自动满量程设置功能可简化软件并提供适当的配置
- 测量范围：0.01lux 至 83,000Lux
- 23 位有效动态范围，支持自动设置增益范围
- 12 种二进制加权满标量程设置：范围之间的匹配度 < 0.2%（典型值）

- 低工作电流：1.8 μA（典型值）
- 工作温度范围：–40°C 至 +85°C
- 宽电源电压范围：1.6V 至 3.6V
- 可耐受 5.5V 电压的 I/O
- 灵活的中断系统
- 小巧的外形：
  - 2mm × 2mm × 0.65mm USON 封装
  - 2.1mm × 1.9mm × 0.6mm SOT-5X3 封装

2.4 系统设计原理

2.4.1 MPPT 运行

PV 电池板的功率输出取决于若干参数，例如电池板电压接收的辐照、电池板温度等。因此，在影响参数值发生变化的条件下，功率输出也在一天之中不断变化。

图 2-8 展示了太阳能电池板的 I-V 曲线和 P-V 曲线。I-V 曲线表示电池板输出电流与输出电压之间的关系。如图中的 I-V 曲线所示，当端子短接时，电池板电流最大；当端子开路且空载时，电池板电流最小。

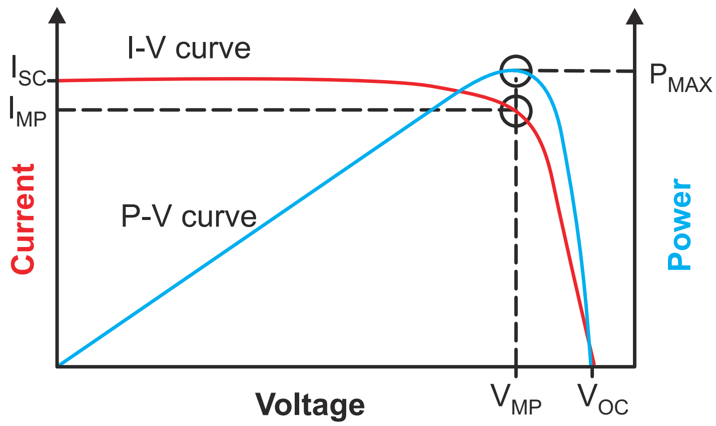


图 2-8. 太阳能电池板特性 I-V 和 P-V 曲线

如图 2-8 所示，当电池板电压和电池板电流的乘积达到最大值时，电池板具有最大功率输出，表示为 P_{MAX}。该点指定为最大功率点 (MPP)。

图 2-9 和图 2-10 中的图形提供了各项参数影响太阳能电池板输出功率的示例曲线。这些图形还显示了太阳能电池板的功率输出随辐照度的变化。在这些图中可观察到，太阳能电池板的功率输出随辐照度的增加而增加，随辐照度的减少而减少的情况。还要注意的是，发生 MPP 时的电池板电压也随着辐照度的变化而变化。

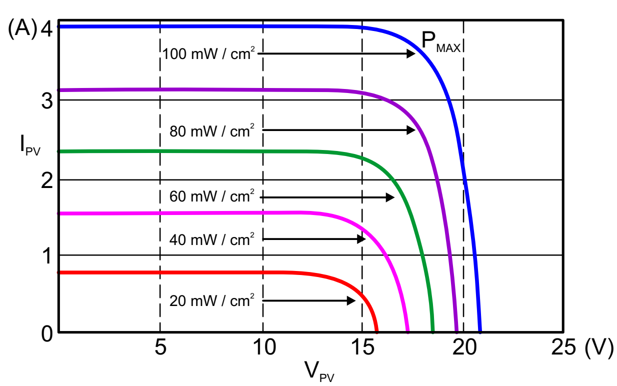


图 2-9. 不同辐照条件下太阳能电池板的输出功率变化 - 图 A

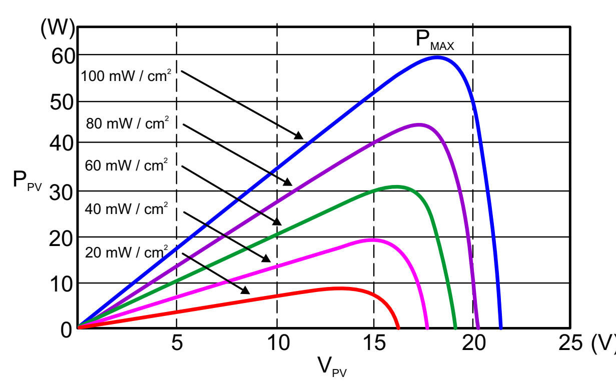


图 2-10. 不同辐照条件下太阳能电池板的输出功率变化 - 图 B

图 2-11 展示了光伏电池板的功率输出随温度变化而变化的典型图。观察电池板电流（以及电池板功率）如何随温度升高而降低。MPP 电压随温度变化而继续大幅变化。

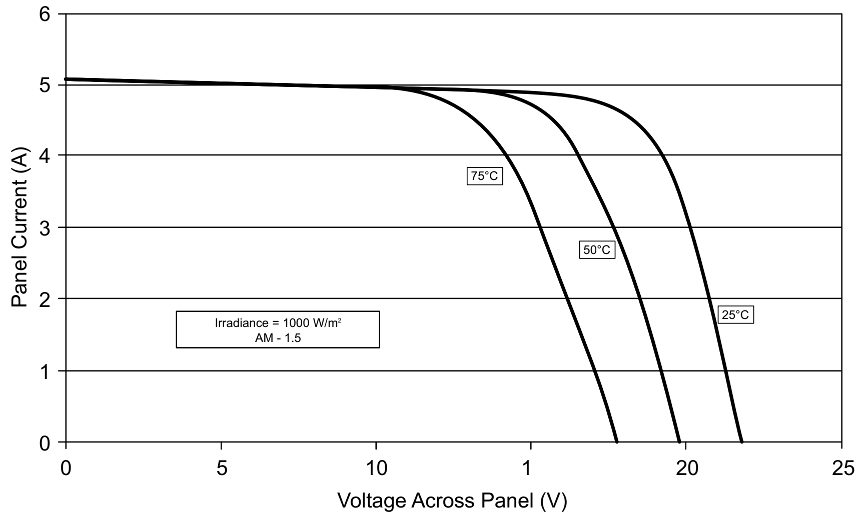


图 2-11. 太阳能电池板 I-V 曲线在恒定辐照条件下随温度的变化

通过在靠近 MPP 点的位置运行电池板，可从太阳能电池板获取最大功率；然而，这样做会带来两个挑战：

1. 如何使用与电池板 MPP 不同的工作电压连接电池或负载
2. 如何自动识别 MPP（因为 MPP 随环境条件变化，不是一个常量）

将 V_{MPP} 接近 17V 的太阳能电池板直接连接至 12V 铅酸电池，可以强制电池板以 12V 的电压运行，但这会减少可从电池板获取的电量。从这种情况可以推断出，直流/直流转换器能够从太阳能电池板获取更多功率，因为该转换器会强制太阳能电池板在接近 V_{MPP} 的位置运行，并将功率传输到 12V 铅酸电池（阻抗匹配）。

上一段解释了为什么用户实施同步降压转换器从太阳能电池板为铅酸电池充电，并解决了第一个挑战。

有关自动识别电池板 MPP 的第二个挑战通常通过在系统中采用 MPPT 算法来完成。MPPT 算法尝试在最大功率点运行光伏电池板，并使用开关功率级来为负载提供从电池板中汲取的功率。

扰动观测法是更为常用的 MPPT 算法之一。该算法的基本原理简单，而且易于在基于微控制器的系统中实现。该过程会稍微提高或降低（扰动）电池板的工作电压。可通过改变转换器的占空比来扰动电池板电压。假定电池板电压已稍微增加，而这会导致电池板功率增加，那么沿同一方向执行另一个扰动。如果电池板电压的增加减少了电池板功率，则沿负方向执行扰动以稍微降低电池板电压。

通过执行扰动并观察功率输出，系统开始在电池板 MPP 附近运行，并在 MPP 周围产生轻微振荡。扰动的大小决定了系统运行与 MPP 的接近程度。有时，该算法可能卡在局部最大值而不是全局最大值，但可以通过对算法进行细微调整来解决此问题。

P&O 算法易于实现且有效，因此此设计选用了这一算法。

2.4.2 降压转换器

表 2-1. 降压转换器设计标准

参数	规格
最大输入电压	60V
最大输出电压	24V
最大电流	16A

此参考设计实现了降压拓扑，可将电池板电压降低至电池电压，因此适用于电池板电压必须高于电池电压的应用。

本参考设计选用了 LMG2100R044 半桥功率级，在栅极电压为 5V 时，其最大 V_{DS} 可高达 80V（连续），脉冲额定值为 100V，Q_g 和 $R_{DS(on)}$ 分别为 7.2nC 和 4.4mΩ。此外，该器件采用 5.5mm × 4.5mm × 0.89mm 无铅封装，具有集成栅极驱动器，可节省大量 PCB 面积，因此适合设计具有中等额定功率、高功率密度和高效率的紧凑型降压转换器。

2.4.2.1 输出电感

为了保持高效率，同时提供电池充电所需的恒定电流，需要使用连续导通模式 (CCM)。在定义输入电压范围、输出电压和负载电流时，此模式将电感值保留为设计参数以保持 CCM。

所以，定义了所需的纹波电流。典型值为输出电流的 0.2 至 0.4 倍。首先，PV 系统中的环路速度不是很快，因此电感值可以较高。其次，降低输出电容器的纹波电压非常重要。最后，电感器的尺寸不能过大。因此，选择 0.3 作为纹波电流系数。

考虑 16A 最大输出电流，并忽略 FET 上的压降和电感器的电阻，可得出：

$$L \times \frac{\Delta I}{T_{OFF}} = V_O \quad (1)$$

对于固定输出电压转换器，CCM 的最坏情况是当 T_{off} 为最大值时，此外，电感值越大，转换器就越容易保持 CCM，则上面的公式可转化为：

$$L \geq \frac{V_O \times \left(1 - \frac{V_O}{V_{in\_max}}\right)}{\Delta I \times f_{SW}} \quad (2)$$

在此应用中，V_{in_max} 为 60V，f_{sw} 为开关频率 250kHz。当输出电压为 24V 时，电感需要高于 12µH。当输出电压为 12V 时，电感需要高于 8µH。在尺寸相同的情况下，电感值较小的电感器可能具有较大的饱和电流。最后，选择 10µH 作为电感值。

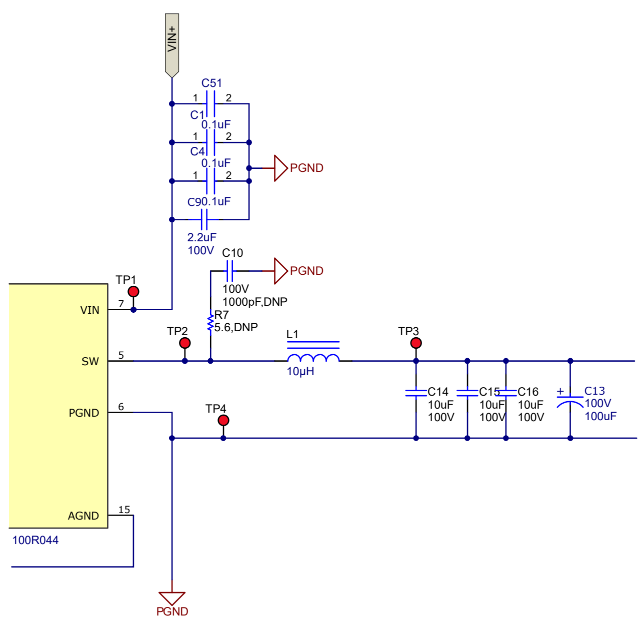


图 **2-12.** 功率级原理图

2.4.2.2 输入电容

仔细选择输入电容，既要减小尺寸，又要满足大纹波电流能力要求（更多信息，请参阅*如何选择降压转换器的输入电容器* 模拟应用期刊）。

为了获得满意的 MPPT 效果，例如 99.5% 的最大功率跟踪，请确保输入纹波电压较小。对于许多电池板来说，当 V_{panel} 在 V_{mpp} 的 97.5%-102.5% 范围内时，电池板的输出功率高于最大功率的 99.5%。在 12V 电池系统中，确保电池板的 V_{mpp} 高于 12V，这样，输入纹波电压可以在 0.3V 以内。在 24V 电池系统中，确保电池板的 V_{mpp} 高于 24V，这样，输入纹波电压可以在 0.6V 以内。因此，取 0.3V 作为最大输入纹波电压 (ΔV_{in})。

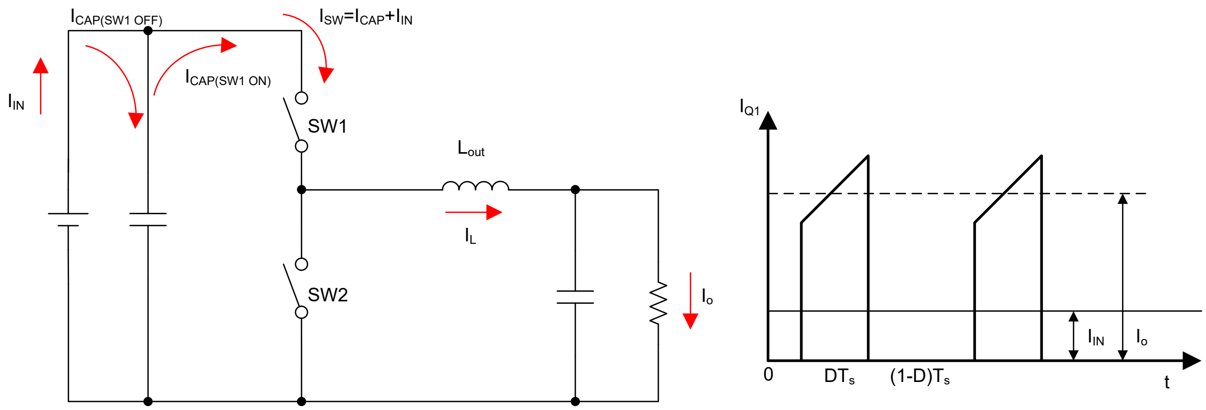


图 2-13. 输入电流波形

流经输入电容器的交流电流会产生输入电压纹波。即使大部分纹波电流会流经 MLCC，但由于等效串联电阻 (ESR) 较低，由此产生的纹波电压也可以忽略不计。剩余的纹波电流会流经电解电容器（如果系统中有的话）。尽管电解电容器的 ESR 要大得多，但交流电流相对较小。因此，对输入电压纹波的总体影响可以忽略不计。

使用方程式 3 来估算满足纹波电压要求所需的有效电容。当占空比为 50% 时，C_{IN} 最大。

$$C_{IN} \geq \frac{D \times (1-D) \times I_O}{\Delta V_{in} \times f_{SW}} \tag{3}$$

其中 I_o 为 16A，f_{sw} 为 250kHz，C_{IN} 需要大于 53μF。考虑到 MLCC 的电容随着电压增加而衰减，根据实际情况，所取的实际值需要更大。

此外，输入电容器还需要满足纹波电流引起的热应力、更大的占用空间以及更低的温升。使用方程式 4 可以计算输入纹波电流的均方根 (RMS) 电流。

$$I_{in\_rms} = I_O \times \sqrt{D \times (1-D) + \frac{1}{12} \times \left(\frac{V_O}{L \times f_{SW} \times I_O}\right)^2 \times (1-D)^2 \times D} \tag{4}$$

占空比对输入 RMS 纹波电流有着显著影响。图 2-14 是方程式 4 的曲线图，从中可以观察到最大的纹波电流 RMS。当占空比为 0.5 时，产生的纹波电流最大。Iin_rms 的最大值为 8.2A。为了降低 MLCC 的温升，选择了 1210 尺寸。同时，与只使用一个容量较大的电容器相比，并联多个小容量电容器的效果更好。

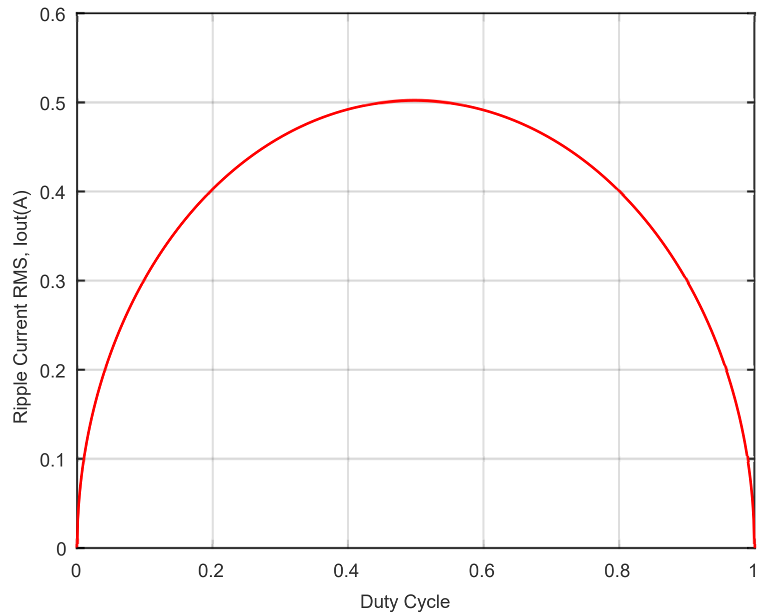


图 2-14. 输入 RMS、负载电流比与占空比间的关系

尽可能靠近 FET 的输入侧放置等效串联电感 (ESL) 较低且 ESR 较低的额外小型 MLCC，尤其是使用 di/dt 和 dv/dt 斜率较高的 GaN 器件。这些 MLCC 可以在不牺牲效率的情况下大幅减轻开关节点波形的过冲。

如果系统的响应速度很重要，还可以添加铝电解电容器等大容量电容器，以满足瞬态响应要求。由于电解电容器的 ESR 较高，因此可以通过将输入纹波电压除以 ESR 来近似计算纹波电流。此外，波形是三角形的，因此可以使用方程式 5 估算 RMS 值。

$$I_{bulk\_rms} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \times \frac{\Delta V_{in}}{ESR} \tag{5}$$

请注意选择大容量电容器以实现低 RMS 电流容差。

2.4.3 电流检测放大器

表 2-2. 电流检测放大器设计标准

参数	规格
最大共模电压	60V
最大输入电流	16A
最大输出电压	3.3V

此参考设计要求准确测量电池板电流和电池电流，以计算和跟踪最大功率点。该设计支持将高达 60V 的电池板用于 24V 电池系统，因此需要至少 60V 的最大共模电压。该设计还需要负共模电压以在反激期间提供功能。

此参考设计选用 INA241。必须选择更佳的增益变化，因为较高增益放大器通常会增大误差和噪声参数，并与可提供高分辨率和低功率耗散的分流电阻器配对。由于具有 ±0.01% 增益误差（最大值）和 ±1ppm/°C 漂移，因此电流采样误差非常小。以下公式用于对照表 2-2 中给出的参数计算电流检测放大器的分辨率和分流电阻器的功率耗散，示例如下。

2.4.3.1 分流电阻器选型

50V/V 增益放大器的最小分流电阻值由以下公式给出：

$$V_{OUT} = 3.3V > R_{SHUNT} \times (I_{MAX} \times Gain) = R_{SHUNT} \times (16A \times 50V/V) \tag{6}$$

因此，$R_{SHUNT} \leqslant 4.125m\Omega$；由于较低的功率耗散具有更高的优先级，因此本设计选用 $R_{SHUNT} = 2m\Omega$。

2.4.3.2 电流测量分辨率

放大器到 12 位 ADC 的电流分辨率由下面的公式给出：

$$I_{RES} = (V_{OUT}/(ADCMAX \times R_{SHUNT} \times Gain)) = (3.3V/(4095 \times 2m\Omega \times 50V/V)) \quad (7)$$

因此，I_{RES} = 8.06mA/位。

2.4.3.3 分流电阻器功率耗散

最大功率耗散由以下公式给出：

$$P_{DISS} = I_{MAX2} \times R_{SHUNT} = (16A)^2 \times 2m\Omega \quad (8)$$

因此，P_{DISS} = 0.512W。

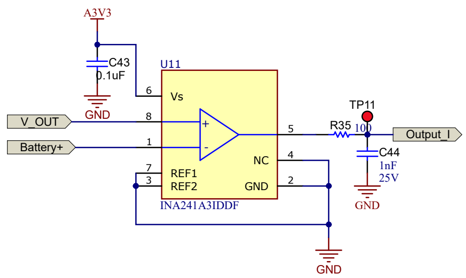


图 2-15. 分流放大器原理图

2.4.4 开关稳压器

表 2-3. 开关稳压器设计标准

参数	规格
输入电压范围	10 V 至 60 V
输出电压	5V
负载电流	600mA

该参考设计需要 5V 电压以供栅极驱动器（UCC27517 器件）和 GaN 器件 (LMG2100R044) 运行，随后降压至 3.3V 以供 MSPM0G1506 器件和其它元件运行。要从电源线（电池板）生成 5V 线路，需要一个宽 V_{IN} 降压开关稳压器来支持最高 60V 的电池板电压。

TPSM365R6V5 器件是一款 5V 固定输出、宽 V_{IN}、带集成电感器和启动电容器的频率可调降压稳压器，可提供具有成本效益、紧凑且高效率的电源转换设计。请参阅 *TPSM365R6、TPSM365R3 采用 HotRod™ QFN 封装的 3V 至 65V 输入、600mA/300mA、4 μA 空载 IQ 同步降压转换器电源模块* 的*应用和实施*部分作为本设计的起点；然而，在测试期间不支持低于 12V 的输入。

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 硬件

3.1.1.1 TIDA-010042

图 3-1 和图 3-2 显示了完整的设计电路板，裸 PCB 尺寸为 95mm × 68.2mm。

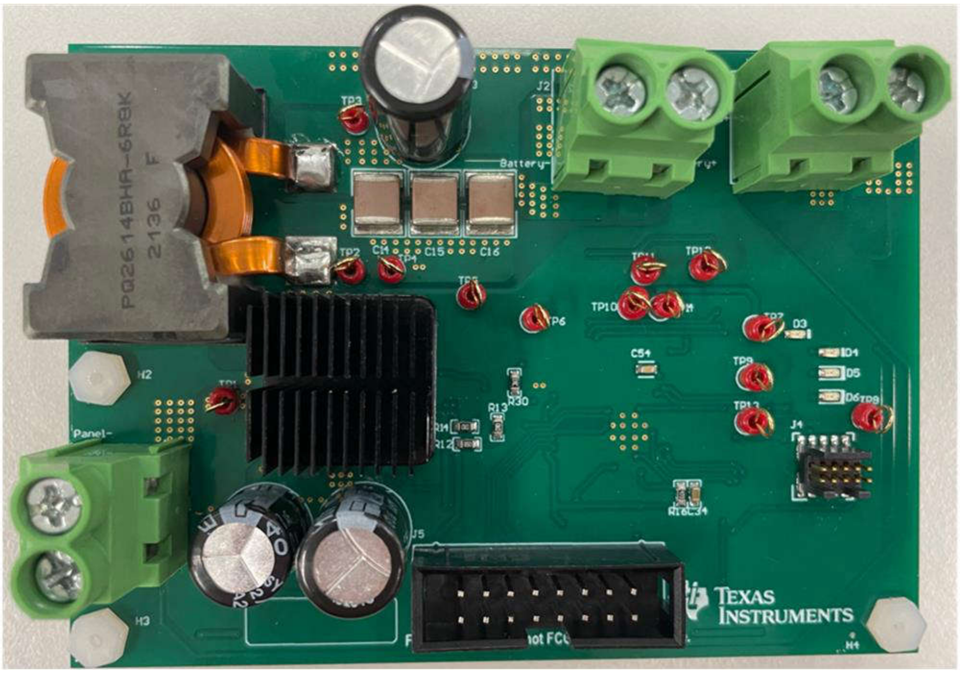


图 3-1. TIDA-010042 顶视图

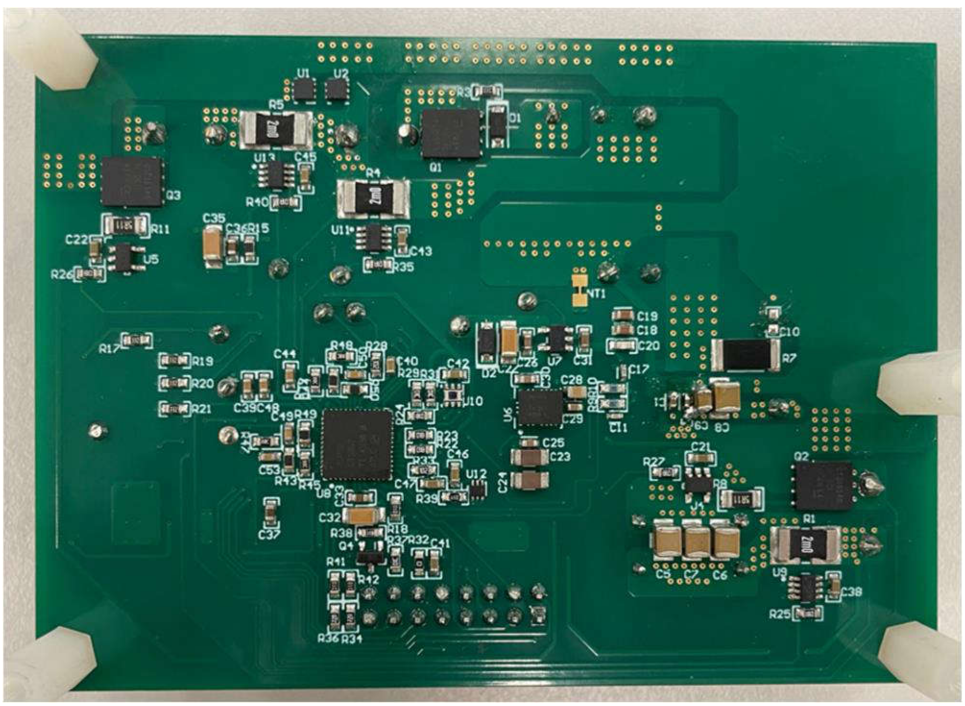


图 3-2. TIDA-010042 底视图

English Document: TIDUEJ8

表 3-1 介绍了各种接头及其关联的引脚连接。

J1、J2 和 J3 分别为 PV 电池板、电池和负载连接。

J4 用于 XDS110 调试程序。

J5 将来可配置为与电力线通信 (PLC) 电路板通信。

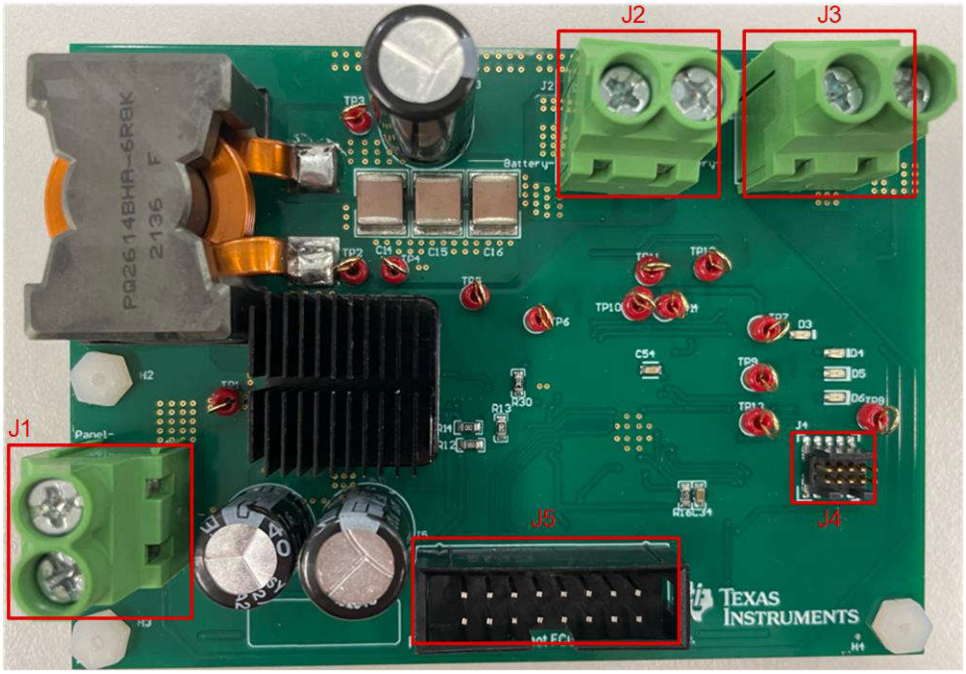


图 3-3. TIDA-010042 电路板接头

表 3-1. 接头连接

名称	引脚编号	信号
J1 – PV 电池板连接	1	负极电池板 (P-) 端子
	2	正极电池板 (P+) 端子
J2 – 电池连接	1	正极电池 (B+) 端子
	2	负极电池 (B –) 端子
J3 – 负载连接	1	负极负载 (L-) 端子
	2	正极负载 (L+) 端子
J4 – 编程接头	1	XDS110 编程器电压
	2	XDS110 SWDIO
	3	接地
	4	XDS110 SWCLK
	5	接地
	6	FLOAT
	7	接地
	8	FLOAT
	9	接地
	10	XDS110 RST

表 **3-1.** 接头连接（续）

名称	引脚编号	信号
J5 – PLC 连接	1	PLC1
	2	PLC2
	3	PLC3
	4	PLC4
	5	PLC5
	6	PLC6
	7	PLC7
	8	PLC8
	9	PLC9
	10	PLC10
	11	UART_TX
	12	电源 3.3V
	13	UART_RX
	14	蜂鸣器输出
	15	接地
	16	接地

3.1.1.2 ITECH-IT6724H

ITECH 自动范围直流电源 1500W 直流可编程电源系列可提供足够的输出功率来测试电路板，因为该电源提供高达 300V 的输出电压或 10A 的输出电流。更多信息，请参阅宽范围高压可编程直流电源 – 欢迎了解 ITECH (itechate.com)。

3.1.1.3 Chroma，63107A

Chroma 63107A 系列用于以下测量，以从系统获取电源。单输入电子负载的额定功率高达 250W。有关更多信息，请参阅模块化直流电子负载 LED 模拟器 > Chroma (chromausa.com)。

3.1.2 软件

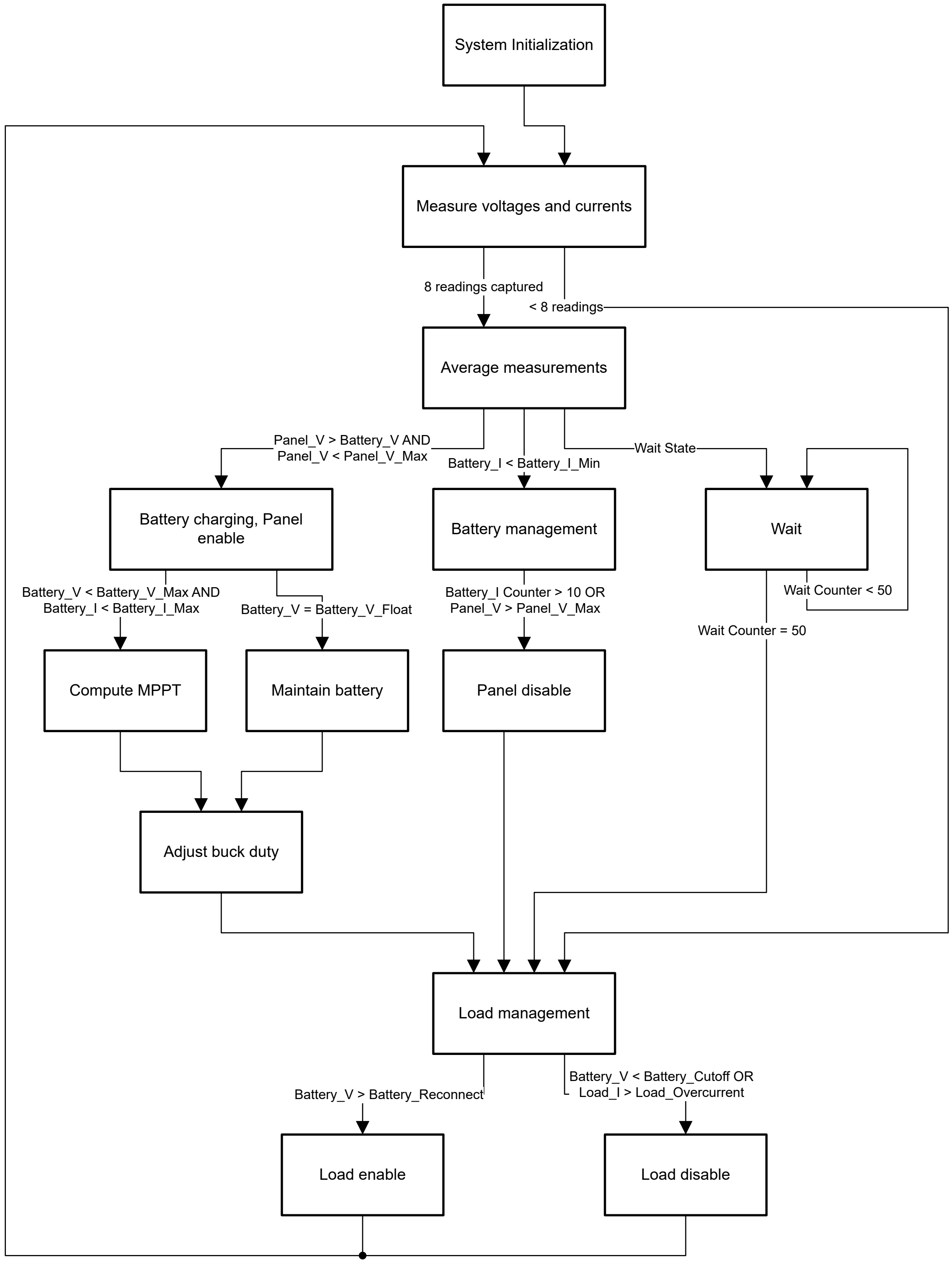


图 3-4. TIDA-010042 软件流程

初始化 ADC、GPIO、OPA、比较器和计时器等外设后，只要读取次数少于 8 次，就会读取电压和电流测量值。否则，软件跳转到负载管理功能。

此外，这些值会取平均值，并取决于电池充电功能、电池管理功能或等待状态启动的输入值。电池充电功能启用电池板、降压转换器，并计算 MPP 和设置降压转换器的占空比。电池管理器件禁用电池板、降压转换器并以等待状态继续。等待状态持续 4 秒，此时正在检查输入参数。

为了防止过度放电，前面的三个功能都后跟负载管理功能，用于控制负载连接。

3.2 测试和结果

3.2.1 测试设置

将直流电压源连接到电池板接头 (J1)。对于 12V 系统，将输入电压范围设置为 15V 至 22V；对于 24V 系统，将输入电压范围设置为 30V 至 44V。

将电池或电子负载连接到电池接头 (J2)。此参考设计支持 12V 和 24V 电池。如果使用电子负载来模拟电池，请将负载设置为恒压模式 (CV)，并由相应的电压系统自行调节电压。使用 1W（5V、0.2A）风扇来冷却散热器和 PCB。

3.2.2 测试结果

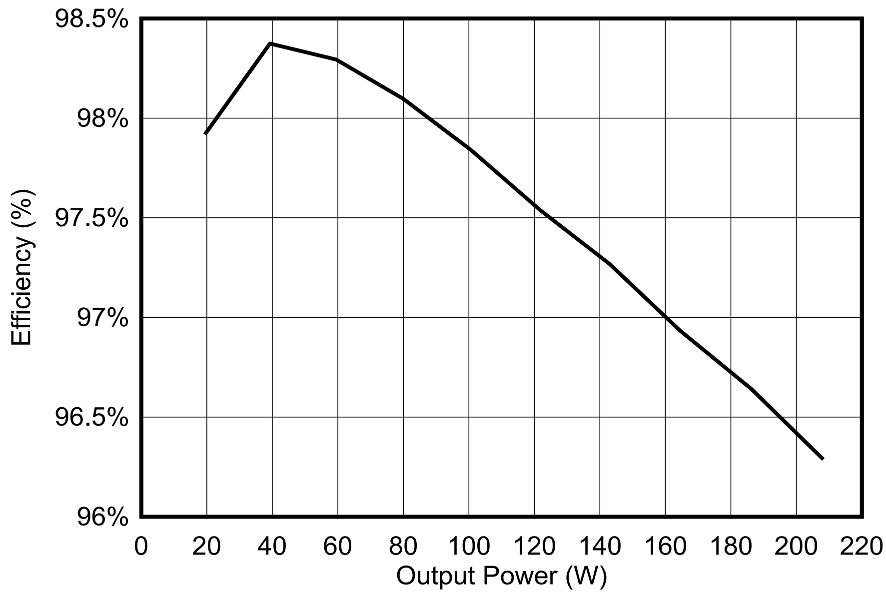


图 3-5. 12V 系统的输出功率与效率曲线

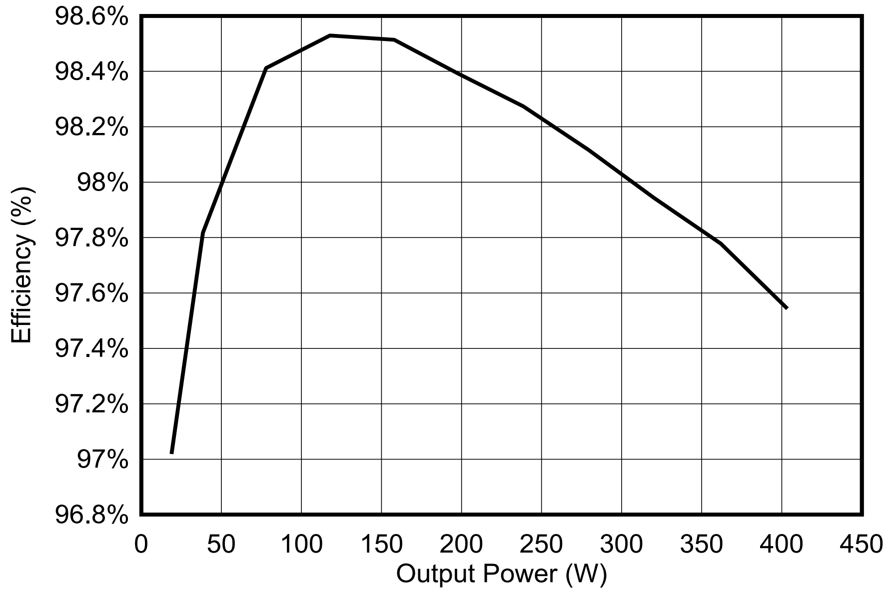


图 **3-6. 24V** 系统的输出功率与效率曲线

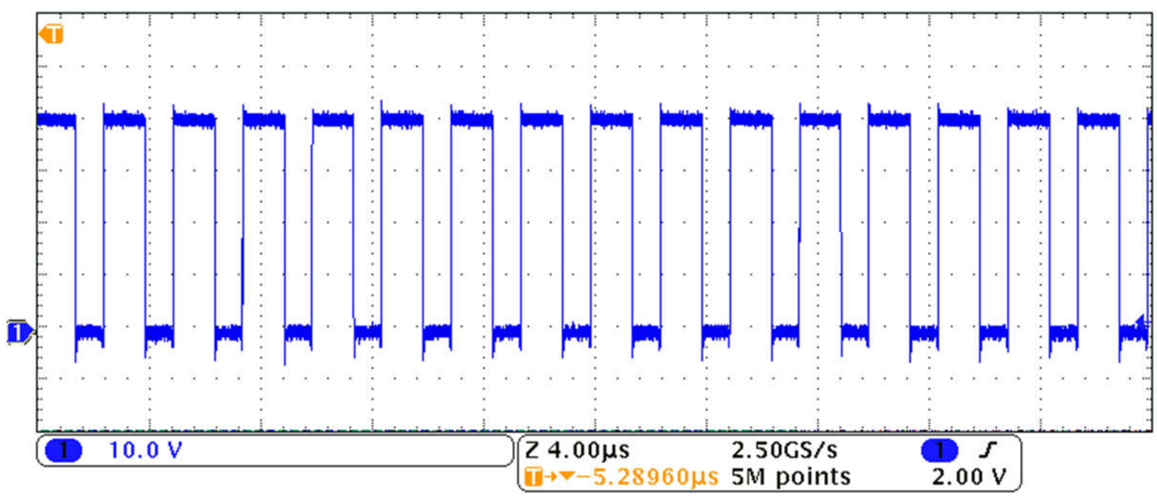


图 **3-7. 40V** 输入时的开关节点；**24V**、**5A** 输出

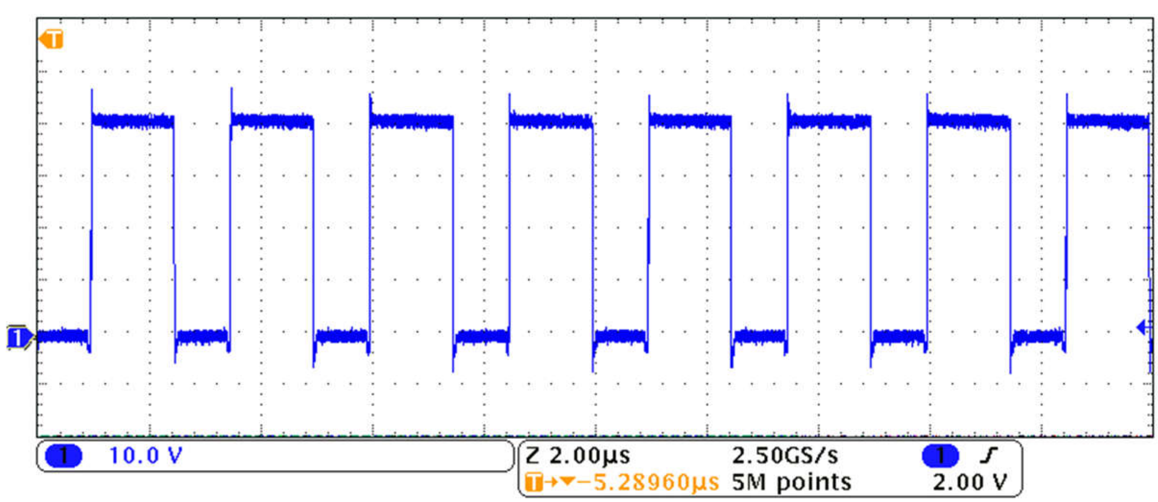


图 **3-8. 40V** 输入时的开关节点；**24V**、**10A** 输出

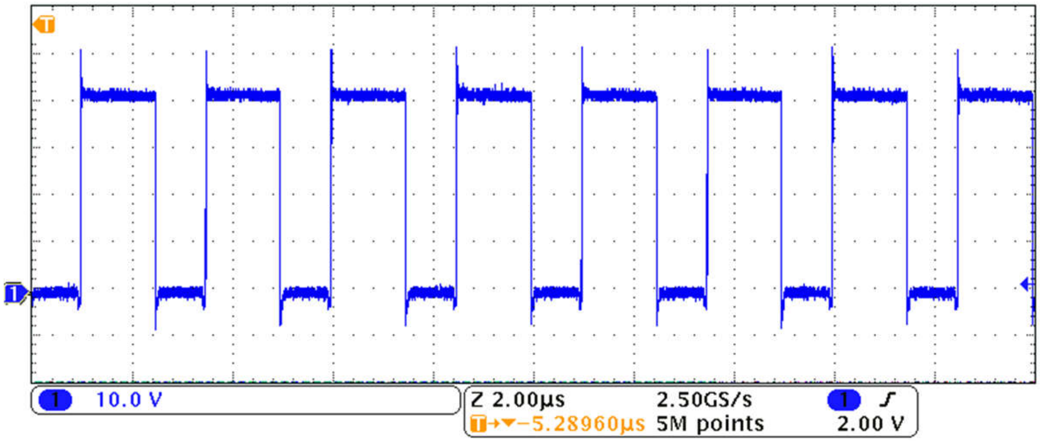


图 **3-9. 40V** 输入时的开关节点；**24V**、**16A** 输出

图 3-10 显示了 400W 输出功率时的电池电流、电池电压、电池板电流和电池板电压。

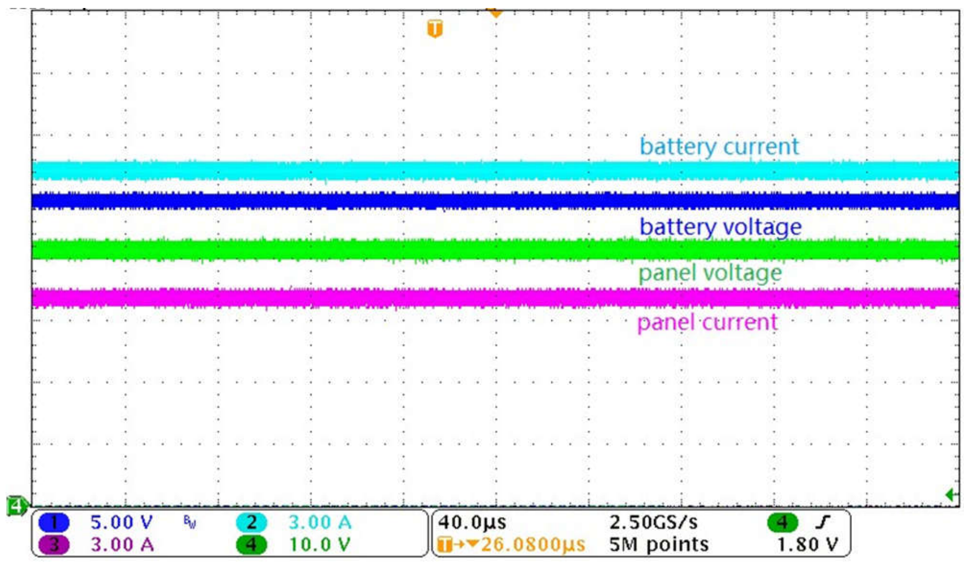


图 **3-10.** 电池电流、电池电压、电池板电流和电池板电压

图 3-11 显示当电池电流低于限制值时（在电子负载关闭的情况下进行测试），系统会周期性地进入等待状态。

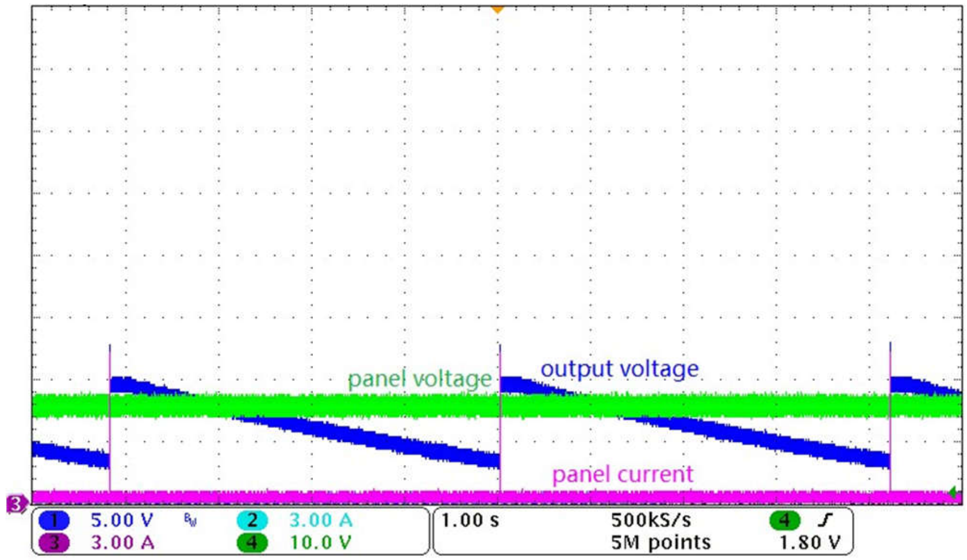


图 3-11. 处于等待模式时的系统电流和电压

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 环路电感

使用高频开关波形时，需要尽可能地降低环路电感，以将振铃保持在极低限度。元件放置和布线可能会产生环路电感。沿元件之间的最短距离放置布线，并将旁路电容器集成到设计中以保持信号完整性。

走线时需要考虑布线长度和放置。短而直的布线可为信号提供阻抗更低的路径，并更大限度地减小电流环路面积，从而减少存在的环路电感。

在使用信号前，旁路电容器对信号进行过滤和调节，并且旁路电容器尽可能靠近相应元件放置。电容器和元件之间任何无关的布线都会降低旁路电容器的有效性。

4.3.2 电流检测放大器

电流检测电阻器布线不良通常会导致在放大器的输入引脚之间存在额外的电阻。任何额外的高载流阻抗都可能导致严重的测量误差，因为电流电阻器的欧姆值非常低。使用开尔文或 4 线制连接法连接到器件输入引脚。这种连接技术可确保在输入引脚之间仅检测电流检测电阻的阻抗。

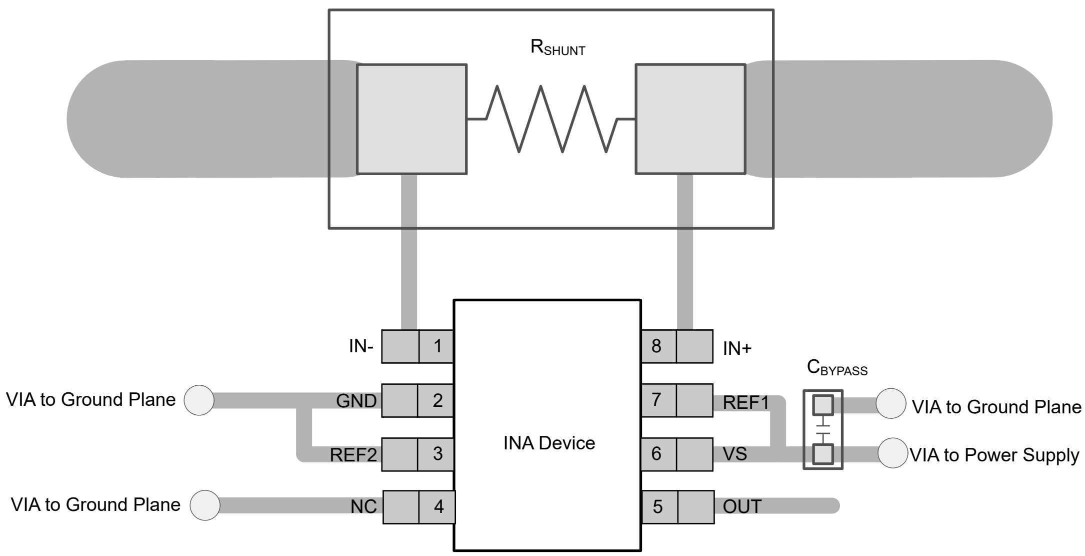


图 4-1. INA241 建议布局

4.3.3 布线宽度

在选择走线的布线宽度时，需要考虑布线的电流容量或载流量以及布线之间的允许空间。对于给定的布线，它在发生故障之前有一个可以处理的最大电流。注入大于额定电流的电流会导致过量散热，并可能导致布线损坏。

该设计可处理高达 16A 的电流。如果设计用于电流更高的系统，则需要相应调整布线宽度。

4.3.4 布局图

要下载板层图，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

4.7 软件文件

要下载软件文件，请参阅 TIDA-010042 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI)，*了解开关模式电源中的降压功率级* 应用手册
2. 德州仪器 (TI)，*适用于储能和直流家用解决方案的高效通用型双向电源转换器* 设计指南

5.1 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.
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。

5.2 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。

6 作者简介

Bowen Ling 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责电网基础设施团队太阳能领域的工作。Bowen 于 2023 年获得了中国南京市南京航空航天大学的电力电子硕士学位。

Andreas Lechner 是德州仪器 (TI) 电网基础设施系统工程师。Andreas 负责为全球电网基础设施领域的客户提供支持。Andreas 拥有德国兰茨胡特应用技术大学的硕士学位。

Vsevolod Elantsev 是德州仪器 (TI) 德国分公司的电网基础设施系统工程师。Vsevolod 专注于电源转换系统。Vsevolod 于 2011 年毕业于俄罗斯新切尔卡斯克的南俄罗斯国立技术大学。

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 (January 2019) to Revision B (October 2023) **Page**

重要声明和免责声明

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