

Design Guide: TIDA-010240

可伸缩多组智能电池充电器

参考设计



说明

此参考设计是一种智能高效充电器设计，适用于高达 100 瓦时 (Wh) 的双智能电池组 (实际为采用并联配置的 1 节至 5 节锂离子电池)。为了实现此设计，板载 MCU 管理充电系统所需的通信和安全功能，以连接根据智能电池数据规范修订版 1.1 (SBD 1.1) 设计的电池组。此通信使 MCU 能够将两个独立的电池充电器 IC 初始化为正确的充电参数，并在电池超出安全规格时禁止充电。此设计还展示了一款高效系统电源 MUX，用于在输入适配器与两节智能电池的高效放电之间进行选择。这些特性使此参考设计非常适用于氧气浓缩器等便携式医疗设备。

资源

TIDA-010240	设计文件夹
BQ25731	产品文件夹
LM7480-Q1、LM74700-Q1	产品文件夹
MSP430FR2475、PCA9546A	产品文件夹

特性

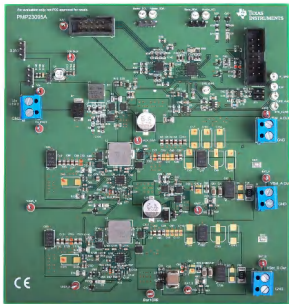
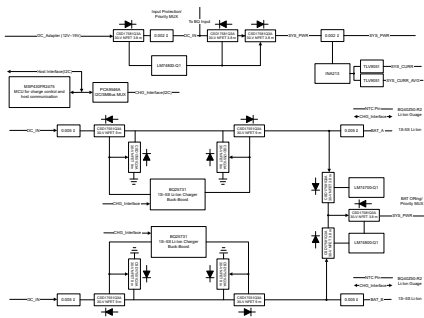
- 提供了一个完整的即用型电池充电系统，用于两节智能锂离子电池的充电和通信
- 支持 1 节至 5 节电池包，每个电池的充电电流高达 16A
- 板载 MCU，用于充电控制以及与系统主机的上游通信
- 板载 MCU 与智能电池电量计通信以读取充电信息并监控警报

应用

- 制氧机
- CPAP 呼吸机
- 多参数患者监护仪
- 透析器



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

可携带上飞机的所有便携式设备（包括便携式呼吸机、心电图设备 (ECG) 和持续气道正压通气 (CPAP) 机等生命攸关的医疗设备）均受美国运输安全管理局 (TSA) 制定的安全限制约束。超过 100 瓦时 (Wh) 的锂电池通常不允许放在随身行李中，除非航空公司自行规定并需要事先批准。对于因医疗需要而需要携带这些设备的乘客来说，这种干扰并不理想。凭借当今锂离子电池充电技术的能力，医疗器械制造商可以减轻这种患者负担。为了在满足旅行限制的同时使设备的备用时间翻倍，可以在系统设计中采用两节 100Wh 的电池。这种配置还可减少备用电池的数量，从而提升最终用户在差旅期间的便利性。本设计指南详细介绍了如何通过板载 MCU 管理的两个 BQ25731 充电器来满足航空旅行的这些要求。

2 系统概述

2.1 方框图

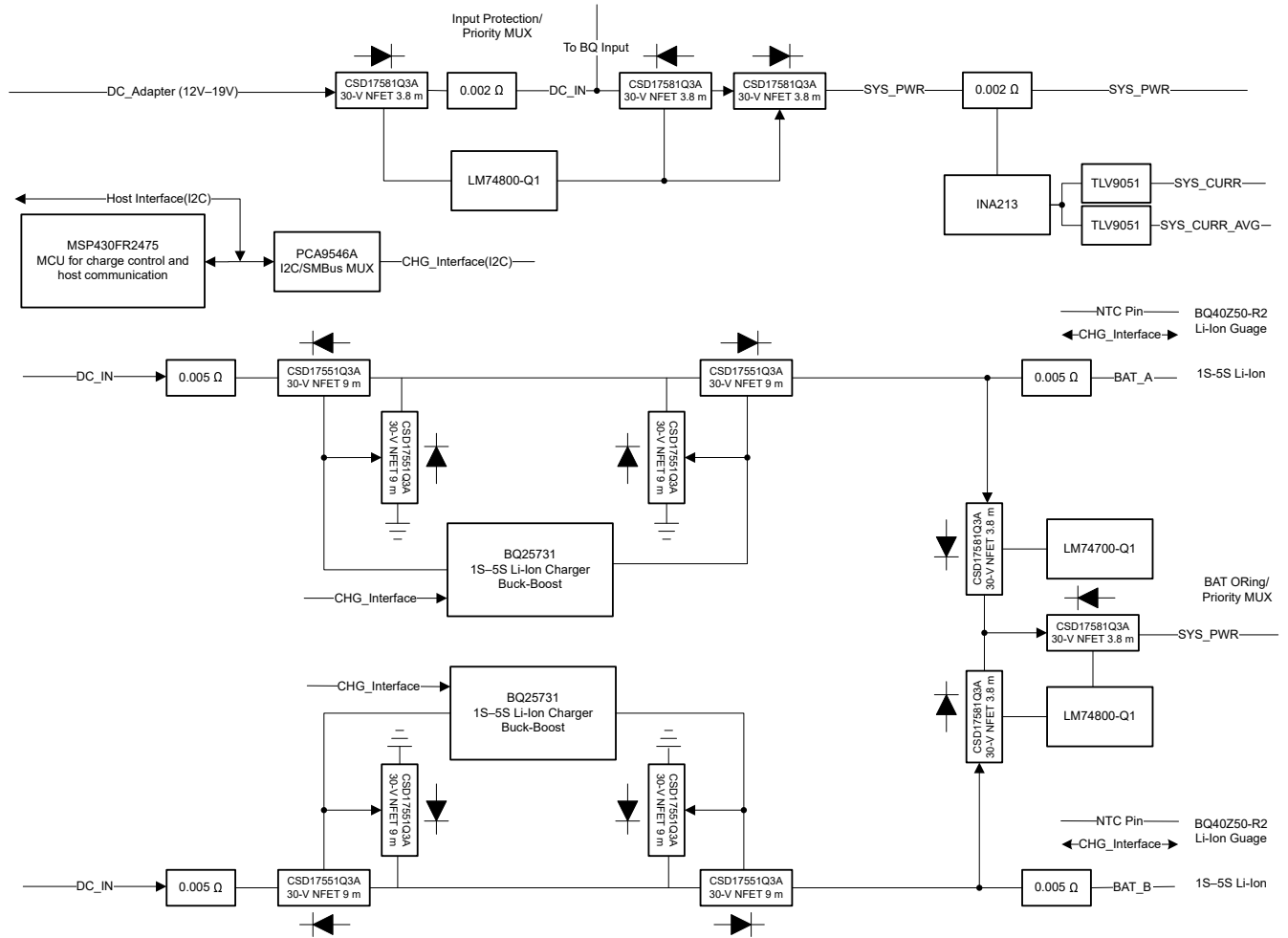
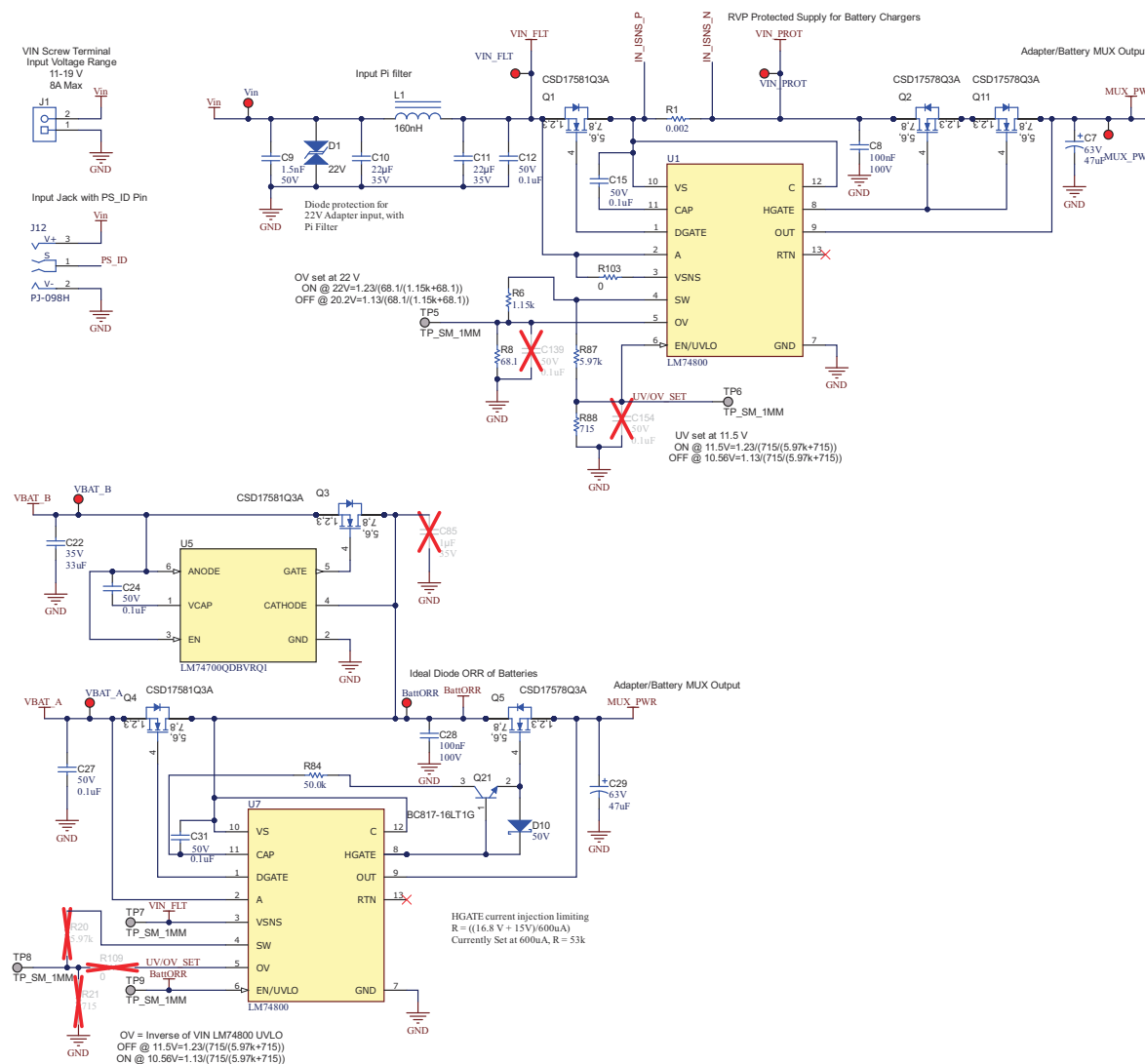


图 2-1. TIDA-010240 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 电源多路复用电路设计参数

图 2-2 所示为输入和电池 MUX 电路原理图。



2.2.2 输入连接和滤波器

该参考设计电路板包括一个螺纹接线端子 (J1)，用于电源的输入连接。此电路板已经过测试 12V 到 19V 电压范围的电源测试，但也可在 11V 到 22V 的输入电压范围内正常工作。该设计还包括一个桶形插孔连接器 (J12)，可轻松连接到现有适配器。此电路板的输入端还有一个用于 EMI 滤波的通用 PI 滤波器。

使用 [方程式 1](#) 可计算 PI 滤波器的转角频率。

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{LC}} \quad (1)$$

在本例中， $L1 = 160\text{nH}$ 且 $C10、C11 = 22\text{ }\mu\text{F}$ ，因此得出的转角频率约为 85kHz。

2.2.3 反极性保护

为实现反极性保护 (RVP)，LM74800 (U1) 监测 Q1 两端的电压。当 Q1 两端的反向电压 (使用 A 和 C 引脚进行监测) 超过 -4.5mV 时，该器件会使用 DGATE 引脚关闭 Q1。此电路可用作肖特基二极管的高效替代品。

2.2.4 电池充电器输入

在反极性保护之后，会添加一个 $2\text{m}\Omega$ 检测电阻来监测总系统输入电流。在此检测电阻之后，定义一个 VIN_PROT 电源轨。VIN_PROT 电源轨充当输入端的常开电源，具有反极性保护功能。此电源轨直接为 BQ25731 充电器器件供电。

2.2.5 电池理想二极管 OR

为了给设计中的两节独立电池放电，使用了理想的二极管 ORing 电路。在此电路中，Q3 和 Q4 由 U5 和 U7 驱动，用于将 FET 正向压降调节至 20mV 。这样可以实现两节电池同时高效放电，同时还可以防止电流从一节电池流向另一节电池。此电路还可以通过从具有较高电压的电池汲取更多电流，在系统中实现被动电池组电压平衡。[方程式 2](#) 显示基于电压和等效串联电阻 (ESR) 计算电池放电电流的示例。对于此示例，假设 BAT_A 为 16.8V 且 ESR 为 $50\text{m}\Omega$ ，BAT_B 为 16.6V 且 ESR 也为 $50\text{m}\Omega$ ，系统消耗的电流为 8A 。

$$\begin{aligned} I_{LOAD} &= I_{BATA} + I_{BATB} \\ V_{Load} &= V_{BATA} - V_{Af} - (I_{BATA} \times ESR_{BATA}) \\ V_{Load} &= V_{BATB} - V_{Bf} - (I_{BATB} \times ESR_{BATB}) \\ V_{BATA} - V_{Af} - (I_{BATA} \times ESR_{BATA}) &= V_{BATB} - V_{Bf} - (I_{BATB} \times ESR_{BATB}) \\ 16.8\text{V} - 20\text{mV} - (I_{BATA} \times 50\text{m}\Omega) &= 16.7\text{V} - 20\text{mV} - (I_{BATB} \times 50\text{m}\Omega) \\ I_{BATA} &= I_{BATB} + 2.0, \text{ where } I_{BATB} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

在此示例中，BAT_A 提供的电流比 BAT_B 多 2A，直到较高的电流放电导致两节电池之间的电压差减小。

2.2.6 输入和电池切换机械装置

此设计提供了一个输入和电池 MUX，在适配器电压超过 U1 的 UVLO 设置的所有情况下，优先使用输入适配器。当触发 UVLO 阈值时，输入适配器将与系统断开连接，并连接电池为系统负载供电。这样可以防止电池在连接输入适配器时放电。

此阈值通过 R87 和 R88 组成的电阻分压器设置。对于 U1 (输入适配器连接)，UVLO 阈值为 1.13V 下降沿关闭， 1.23V 上升沿导通。对于 U7 (电池连接)，OV 引脚连接到同一分压器，但阈值反向作用。这些阈值在 1.13V 下降沿导通， 1.23V 上升沿关闭。在原理图中，此电压连接到标有 UV/OV_SET 的网络。在当前原理图中，当 VIN 达到 10.56V 时，将触发从输入适配器到电池的切换，当 VIN 达到 11.5V 时，将触发从电池到输入适配器的切换。

[方程式 3](#) 显示电阻分压器计算示例：

$$\text{Battery to Input Adapter Transition} = \frac{\frac{1.23 V}{R88}}{R87 + R88}$$

$$\text{Input Adapter to Battery Transition} = \frac{\frac{1.13 V}{R88}}{R87 + R88}$$

$$R87 = 5.97 \text{ k}\Omega, R88 = 715 \Omega$$

$$\text{Battery to Input Adapter Transition} = \frac{\frac{1.23 V}{715 \Omega}}{5.97 \text{ k}\Omega + 715 \Omega} = 11.5 V$$

$$\text{Input Adapter to Battery Transition} = \frac{\frac{1.13 V}{715 \Omega}}{5.97 \text{ k}\Omega + 715 \Omega} = 10.56 V \quad (3)$$

2.2.7 LM74800 (U1) HGATE

U1 的 HGATE 设计包含两个背对背 NFET (Q2 和 Q11)。在该设计中添加 Q11 是为了防止在电池连接到系统时任何电流从电池流向 VIN_FLT 电源轨。仅放置 Q2 且 (V_SYS > VIN_PROT + 0.8V) 时, 电流会通过 Q2 的体二极管传导。这使得两个 BQ25731 器件的输出与 BQ25731 器件的输入之间形成一个电流环路。

2.2.8 电池 LM74800 HGATE

对 U7 的 HGATE 设计进行了调整, 以缩短 Q5 的导通时间。这种降低是通过将输送到 Q5 的栅极电流从 55 μA 增加到 600 μA 实现的。为了增加 U7 可提供的 HGATE 电流, 添加了一个包含 D10、Q21 和 R84 的电路。此电路通过驱动连接在电荷泵输出 (CAP, U7 引脚 11) 与 Q5 栅极之间的 NPN 晶体管 (Q21) 来放大 HGATE 引脚的拉电流。此路径中还添加了一个串联电阻 (R84) 以限制电流注入。还在 Q5 的栅极与和 HGATE (U7 引脚 8) 之间添加了二极管 (D10), 以允许 HGATE 引脚在 FET 关闭时灌入电流。方程式 4 提供了 HGATE 电流注入限值的计算示例。LM74800 的电荷泵提供 VS + 13.2V 的输出。在本例中, VS 连接到电池的输出端, 假设电压为 16.8V。电荷泵可提供 2.4mA 的最大电流。当前设计的注入电流设置为 600 μA , 但可以通过降低 R84 来增大此电流。

示例 1。

$$R84 = \frac{V_{VS} + V_{CHGPUMP}}{I_{gate}}$$

示例 2。

$$R84 = \frac{16.8 V + 13.2 V}{600 \mu A} = 50.0 \text{ k}\Omega$$

$$R84 = \frac{16.8 V + 13.2 V}{2.0 \text{ mA}} = 15.0 \text{ k}\Omega \quad (4)$$

2.2.9 BQ25731 设计注意事项

图 2-3 所示为 BQ25731 元件选择。

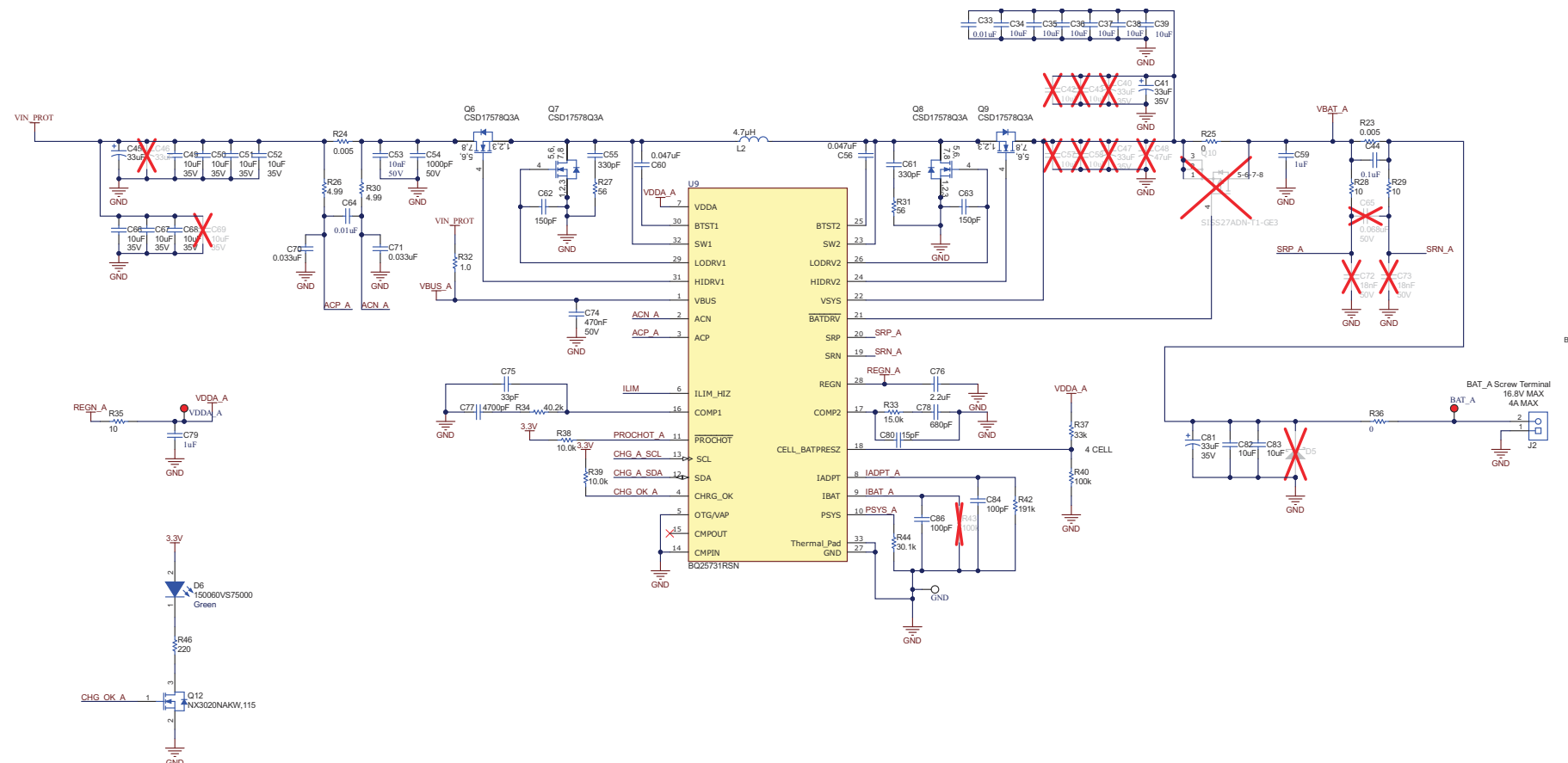


图 2-3. BQ25731 元件选型

2.2.10 BQ25731 元件选型

此参考设计选择尽可能灵活的 BQ25731 充电控制器元件。有关特定于设计的元件选择的更详细指导，请参阅 [BQ25731 具有 USB-C PD 3.0 OTG 输出的 I2C 1 节至 5 节降压/升压电池充电控制器](#) 数据表中的详细设计过程部分。

2.2.11 ILIM 电路

对于此设计，添加了一个电路将系统电流限制为 8A。当器件与 12V 车载适配器一起使用时此电路的影响最大，可将电池电压拉至低于系统的输入阈值。此电路包含 INA213B，用于放大流经 2mΩ 检测电阻器的电流。此 INA213B 的增益为 50V/V，因此 8A 的输入会产生 800mV 的输出。

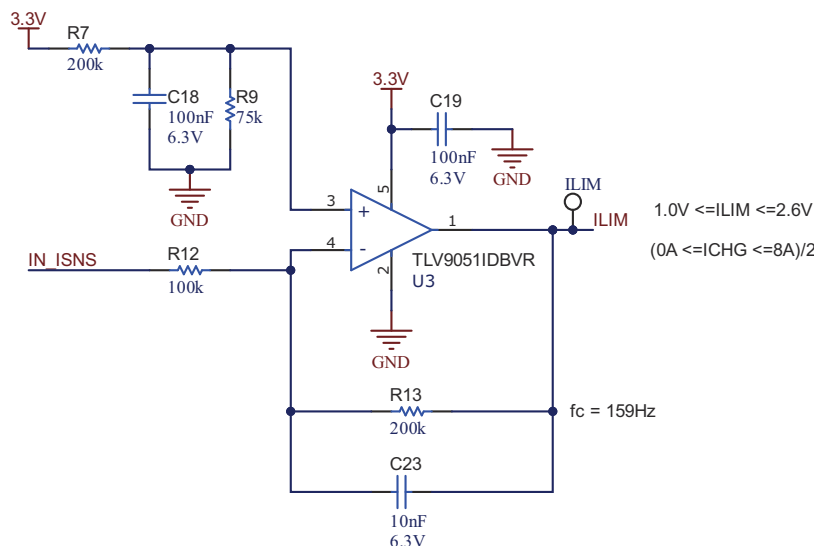


图 2-4. 限流电路

为将此信号转换为 BQ25731 器件 ILIM 引脚可用的电压，使用了配置为差分放大器的运算放大器。BQ25731 ILIM 引脚上的电压根据 [方程式 5](#) 转换为充电电流。

$$V(ILIM_HIZ) = 1V + 40 \times IDPM \times Rac \quad (5)$$

其中

- IDPM 是目标输入电流限制
- Rac 是为 BQ25731 选择的 5mΩ 或 10mΩ 电阻器

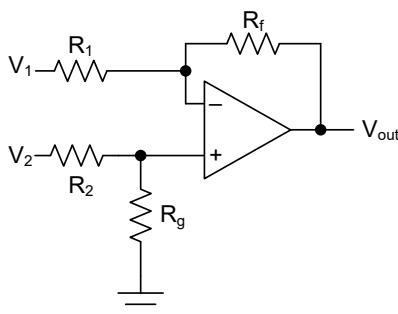


图 2-5. 差分放大器

对于差分放大器，当满足以下条件时：

$$V_{out} = V_2 - V_1 \quad (6)$$

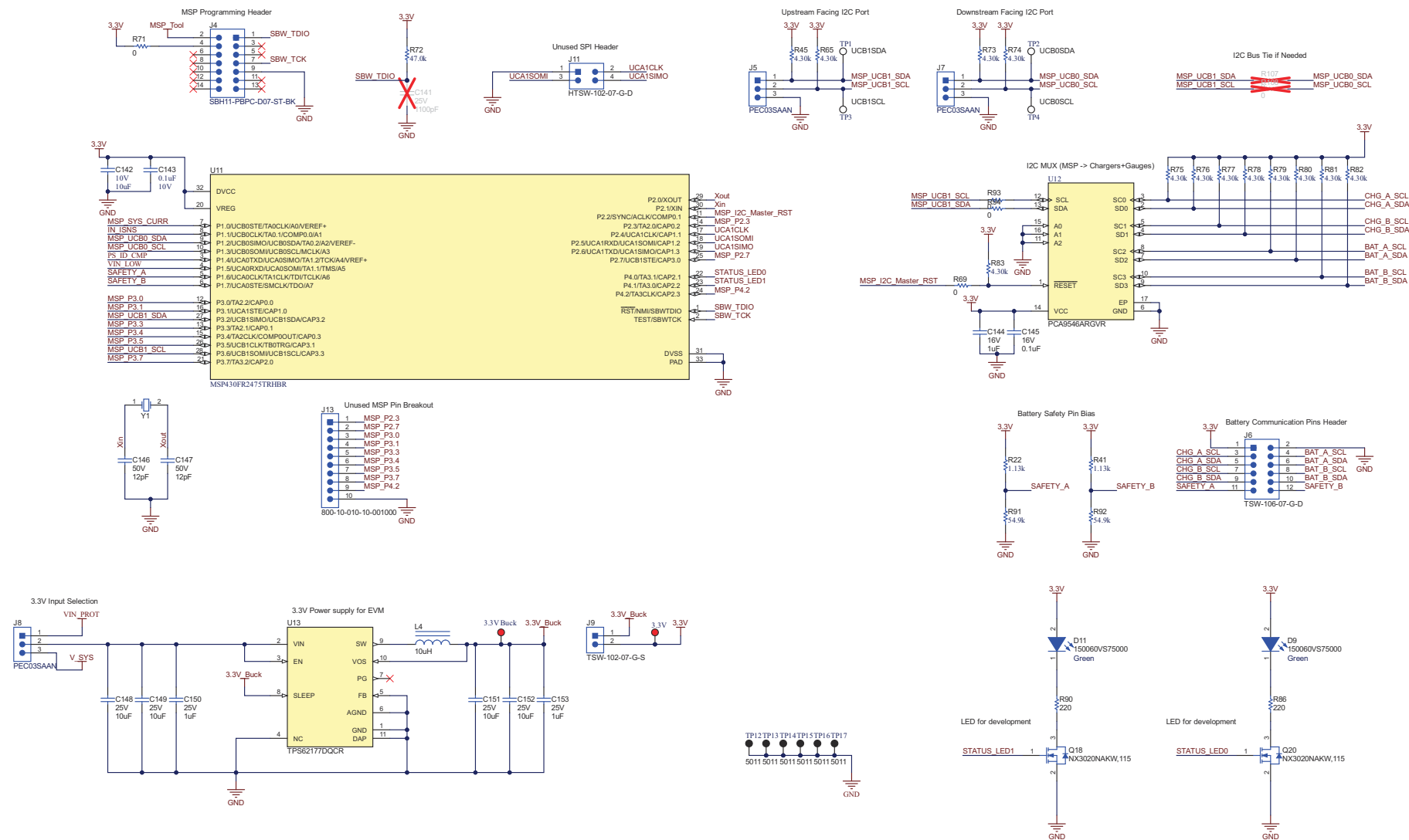
其中

- $R_1 = R_2 = R_f = R_g, V_{out} = V_2 - V_1$

要正确设置 BQ25731 充电电流，请在系统电流为 8A 时将 ILIM 引脚设置为 1.0V，在系统电流为 0A 时将其设置为 1.8V。将两个充电器器件的充电电流各自限制在 0A 到 4A 之间。

在本例中，将 V2 设置为 1.8V。V2 为 1.8V 时，放大器正输入端的电压等于 V2/2，即 0.9V。然后，此电压需要由系统 3.3V 电源轨和一个电阻分压器生成，以匹配计算得出的设定值。如上图所示，这是通过 R7 和 R9 实现的。

图 2-6 所示为 MSP430FR2475、TPS62177、PCA9546A MCU 和 I²C 总线原理图。

图 2-6. MSP430FR2475、TPS62177、PCA9546A MCU 和 I²C 总线原理图

2.2.13 MSP430FR2475

本应用选择 MSP430FR2475 是因其成本低廉，拥有两条支持 I²C 的 eUSCI_B 通道、八条 12 位 ADC 通道，并且占用空间小。这两条 eUSCI_B I²C 通道支持两个独立接口：一个接口连接 MCU 与主机控制器，另一个接口连接 MCU 与下游器件（例如智能电池组中包含的电池充电器和电量计）。

2.2.14 I²C 总线概述

此设计的 I²C 总线分为两条独立的通信通道。其中一条通道使用 UCB0 外设与上游主机通信。这允许在 MSP430 中保留数据和控制寄存器，以使系统主机可以读取或写入这些寄存器。此外还允许在固件中分配硬件 I²C 地址，从而提供一个可以配置为直接与使用现有硬件和固件的主机通信的系统。

使用 UCB1 的另一条 I²C 通道可用作面向下游的端口，用于控制此设计的充电系统。PCA9546A I²C MUX 用于直接或使用相同地址的多个下游器件连接。此设计使用 PCA9546A 的所有四条通道与地址为 0x6B 的两个 BQ25731 器件以及地址为 0x16 的两个电量计表进行通信，如 [智能电池数据规范 1.1](#) 中所述。

2.2.15 MSP430 连接器

此参考设计包含一个与 TI 的 MSPFET 器件兼容的 MSP 编程接头，该接头可用于编程和调试。UCA1(J11)、UCB0(J5) 和 UCB1(J7) 也包含这些接头，能够直接连接到此设计使用的通信接口。此外，还添加了接头 J6，以允许连接智能电池通信和安全信号引脚。

2.2.16 MSP430 电源

板载 MSP430 由 TPS62177 器件供电，是一款高效的同步直流/直流降压转换器。此转换器的输入由 J8 选择，可由 V_SYS 或 VIN_PROT 供电。此外，通过将其直接连接到 J8 的引脚 2，还可轻松由外部电源供电。此转换器的输出为 3.3V，用于在设计中为 MSP430、运算放大器和比较器供电。该器件还有一个睡眠引脚，当前未使用，但可在后续设计中启用。

2.2.17 检测电路

此参考设计包含多个检测电路，使 MCU 能够监控系统中的多个项目。这包括输入电流和电压、系统电流和电压、输入电压比较器，以及电源 ID (PS_ID) 比较器。

2.2.18 电流检测

此设计使用两个 INA213B 器件进行电流检测。INA213 是一款用于高侧和低侧电流测量的电流分流监测器设计。这两个器件均由以接地为基准的 3.3V 电源供电，并提供 50V/V 的增益。U2 测量通过 2mΩ 检测电阻器 R1 的电流，可测量系统电源轨和电池充电电流的输入电流。U4 测量通过 2mΩ 检测电阻器 R2 的电流，可测量系统输出电源轨上的电流。

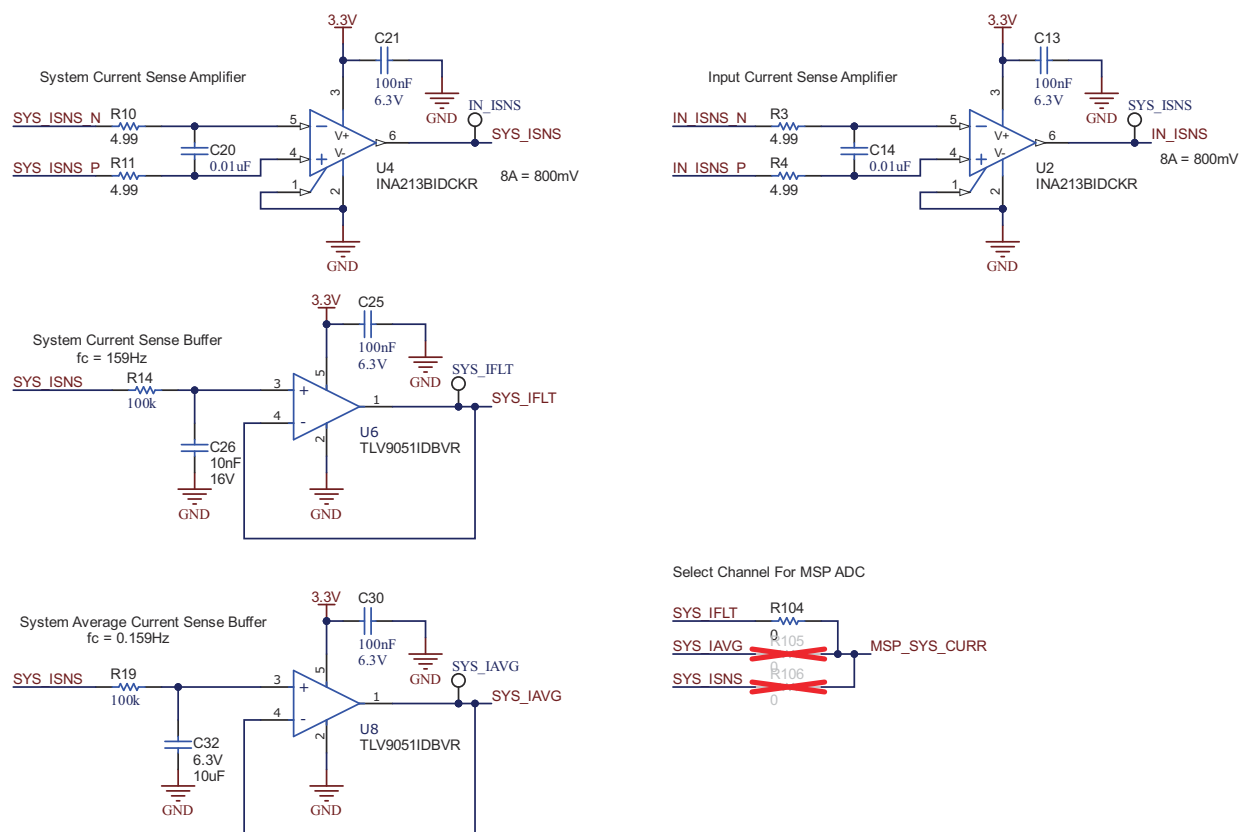


图 2-7. 电流检测原理图

还有两个电流检测缓冲器，用于对系统电流轨进行滤波。包含 U6 的缓冲器包括一个转角频率为 159Hz 的低通滤波器。这可以为 MCU 精确测量系统电流，同时降低高频噪声。包含 U8 的缓冲器包括一个转角频率为 0.159Hz 的低通滤波器。这将为 MCU 提供约 6 秒的平均电流信号。

MCU 只有一个可用于电流检测的 ADC 引脚，因此在每个输出端添加一个串联的 0Ω 电阻器，从而能够手动选择将哪个电流检测输出提供给 MCU。

2.2.19 电压感测

系统中有三个分压器，可让 MCU 监控 V_SYS、VIN_FLT 和 PS_ID。V_SYS 和 VIN_FLT 分压器根据分压器的输入输出按比例缩放的电压。图 2-8 显示按比例缩放的电压。此外，所有三个分压器都包括一个肖特基势垒二极管，用于为 MCU 提供过压保护。

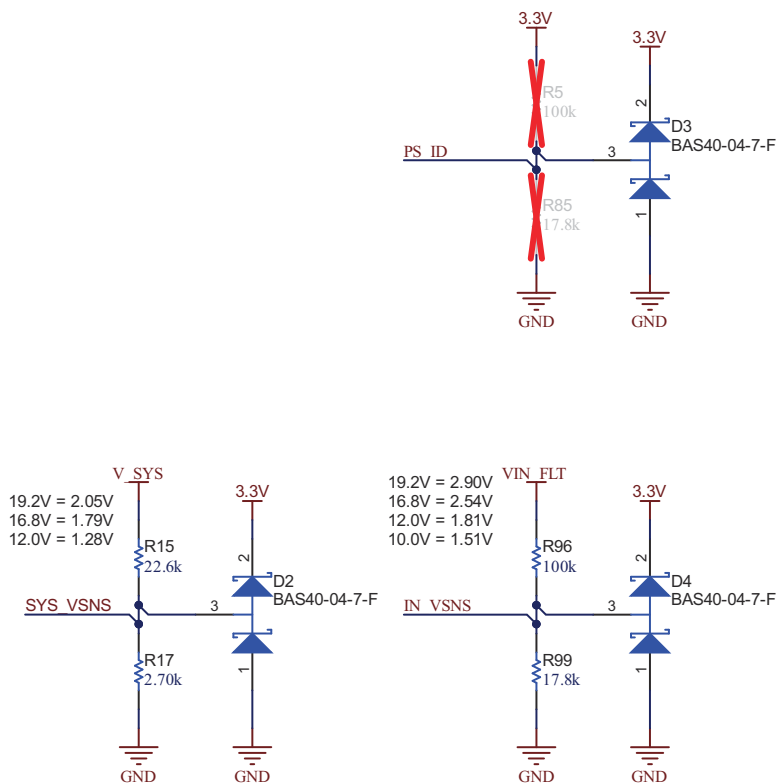


图 2-8. 电压检测原理图

此处还提供 PS_ID 引脚。此类引脚通常包含在桶形插孔输入适配器中，并根据适配器的电压和电流能力提供特定的电压。

2.2.20 输入比较器

包含两个比较器，用于监测 VIN_FLT 和 PS_ID。当插入特定类型的适配器或满足输入适配器电压阈值时，这些信号可用于为 MCU 生成中断。TLV7031 纳瓦级功耗、低电压比较器用于在等待输入事件的同时提供小尺寸和低功耗特性。由于这些器件在没有输入适配器时由电池供电，因此 315nA 的超低静态电流是一个关键的设计特性。

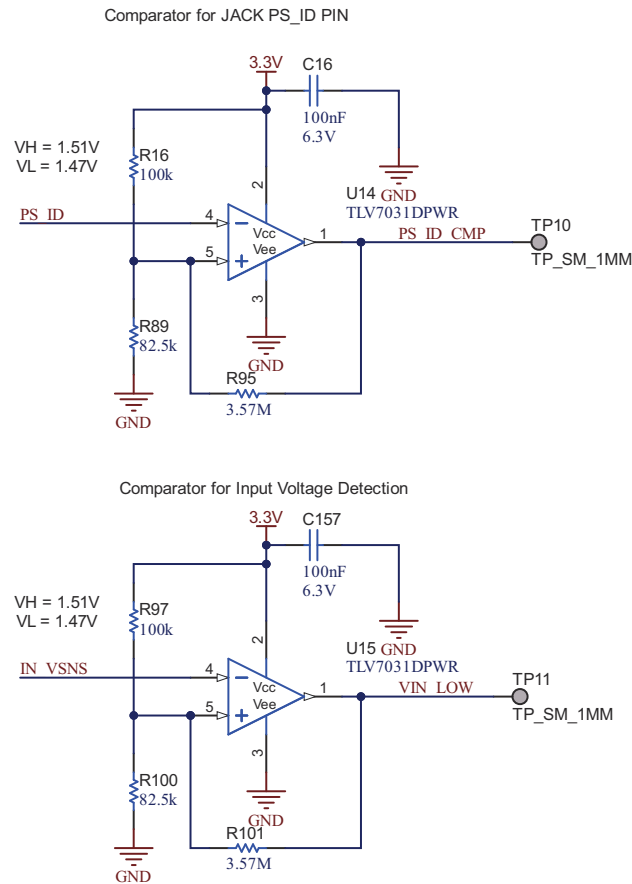


图 2-9. 输入电容器原理图

这些比较器的电压设置和迟滞可以根据方程式 7 进行计算和调整。

$$V_{TH} = V_{CC} \times \frac{R_{100}}{R_{97} \parallel R_{101} + R_{100}}$$

$$V_{TL} = V_{CC} \times \frac{R_{100} \parallel R_{101}}{R_{97} + R_{100} \parallel R_{101}}$$

$$V_{TH} = 3.3 \text{ V} \times \frac{82.5 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega \parallel 3.57 \text{ M}\Omega + 82.5 \text{ k}\Omega} = 1.51 \text{ V}$$

$$V_{TL} = 3.3 \text{ V} \times \frac{82.5 \text{ k}\Omega \parallel 3.57 \text{ M}\Omega}{100 \text{ k}\Omega + 82.5 \text{ k}\Omega \parallel 3.57 \text{ M}\Omega} = 1.47 \text{ V} \quad (7)$$

2.2.21 软件流程图

图 2-10 所示为软件流程图。

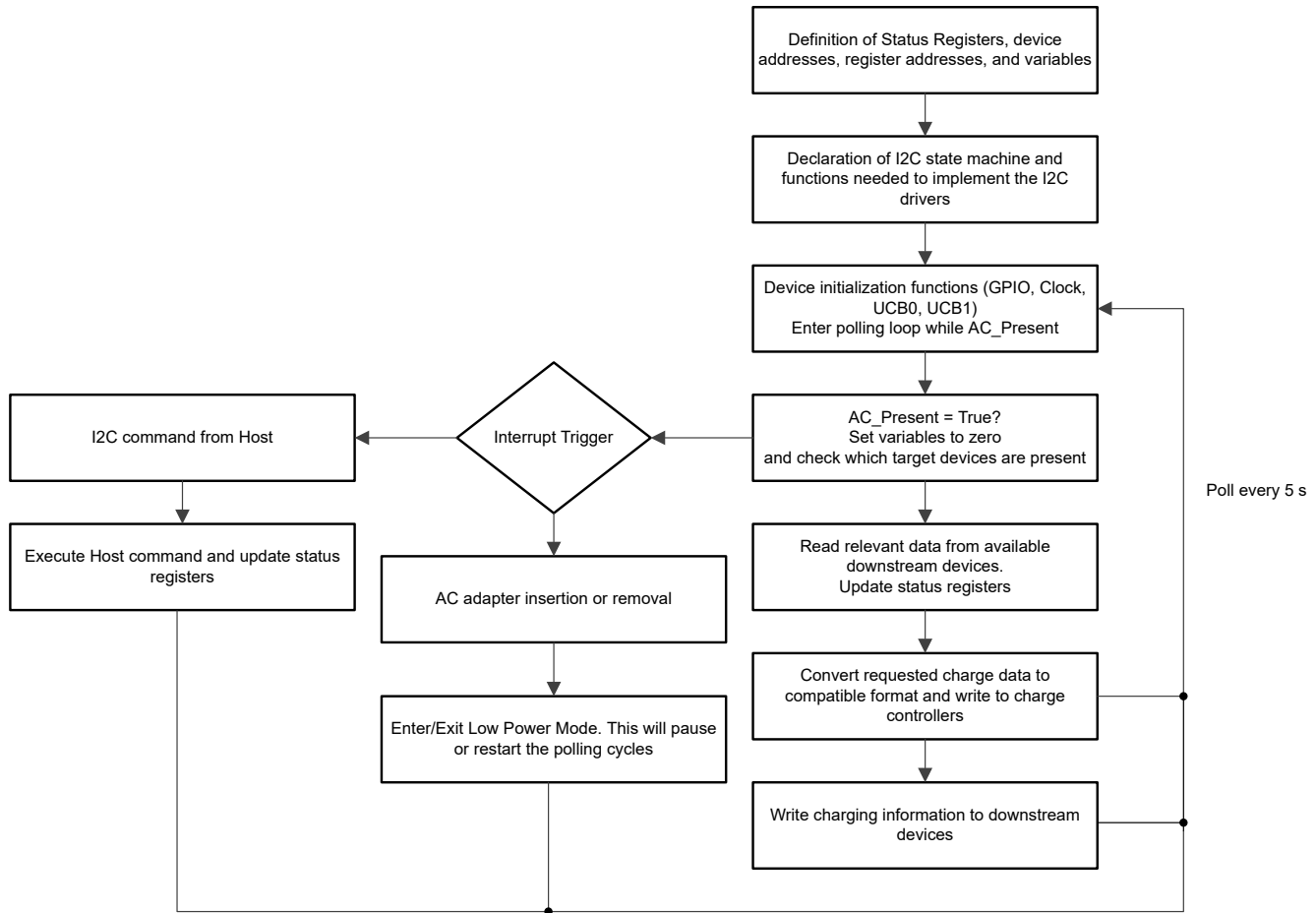


图 2-10. 软件流程图

2.3 重点产品

2.3.1 BQ25731

BQ25731 是一款同步降压/升压电池充电控制器，可通过 USB 适配器、高电压 USB-C 电力输送 (PD) 源和传统适配器等各种输入源为 1 至 5 节电池充电。它为空间受限的 1 至 5 节电池充电应用提供了一个元件数很少的高效解决方案。在上电期间，充电器基于输入源和电池状况，将转换器设置为降压、升压或降压/升压配置。充电器可在降压、升压、降压/升压工作模式间无缝转换，无需主机控制。

2.3.2 LM7480-Q1

LM7480-Q1 理想二极管控制器可驱动和控制外部背对背 N 沟道 MOSFET，从而模拟具有电源路径开/关控制和过压保护功能的理想二极管整流器。3V 至 65V 的宽输入电源电压可保护和控制 12V 和 24V 电源轨。集成的理想二极管控制器 (DGATE) 可驱动第一个 MOSFET 来代替肖特基二极管，以实现反向输入保护和输出电压保持功能。在电源路径中使用了第二个 MOSFET 的情况下，该器件允许负载断开 (开/关控制) 并使用 HGATE 控制提供过压保护。该器件具有可调节过压切断保护功能。

2.3.3 LM74700-Q1

LM74700-Q1 是一款符合汽车 AEC Q100 标准的理想二极管控制器，与外部 N 沟道 MOSFET 配合工作，可作为理想二极管整流器利用 20mV 正向压降实现低损耗反极性保护。3.2V 至 65V 的宽电源输入范围可实现对众多常用直流总线电压 (例如 12V 和 24V 电池系统) 的控制。该器件通过控制 MOSFET 的栅极将正向压降调节至

20mV。该调节方案可在反向电流事件中支持 MOSFET 平稳关断，并确保零直流反向电流。该器件能够快速响应 ($< 0.75\mu\text{s}$) 反向电流阻断，因此适用于在 ISO7637 脉冲测试以及电源故障和输入微短路条件下要求保持输出电压的系统。

2.3.4 MSP430FR2475

MSP430FR247x 微控制器 (MCU) 是 MSP430™ MCU 超值系列超低功耗低成本器件产品系列的一部分，该产品系列用于检测和测量应用。MSP430FR247x MCU 集成了一个 12 位 SAR ADC 和一个比较器。MSP430FR247x MCU 支持 -40°C 至 105°C 的工作温度范围，因此器件的 FRAM 数据记录功能对更高温度的工业应用来说意义重大。TI MSP430 系列低功耗微控制器包含多种器件，其中配备了不同的外设集以满足各类应用的需求。此架构与多种低功耗模式配合使用，是延长便携式测量应用电池寿命的最优选择。MCU 具有功能强大的 16 位 RISC CPU、16 位寄存器和常数发生器，有助于实现出色的编码效率。数控振荡器 (DCO) 可使 MCU 在不到 $10\mu\text{s}$ (典型值) 的时间内从低功耗模式唤醒至活动模式。

2.3.5 PCA9546A

PCA9546A 是一款由 I²C 总线控制的四路双向转换开关。SCL/SDA 上行对扩展到四个下行对，或者通道。根据可编程控制寄存器的内容，可选择任一单独 SCn/SDn 通道或者通道组合。一个低电平有效 (RESET) 输入使得 PCA9546A 能够在其中一个下游 I²C 总线长时间处于低电平状态时恢复。将 RESET 下拉为低电平会使 I²C 状态机复位，并且使所有通道取消选中，这一功能与内部上电复位功能的作用一样。由于开关上有导通栅极，因此 VCC 引脚可用于限制将由 PCA9546A 传递的最大电压。这可以在每个对上使用不同的总线电压，从而让 1.8V、2.5V 或 3.3V 器件能够在没有任何额外保护的情况下与 5V 器件通信。对于每个通道，外部上拉电阻器将总线电压上拉至所需的电压水平。所有 I/O 引脚均可耐受 5.5V 电压。

3 硬件、测试要求和测试结果

TIDA-010240 的关键性能在 TI 实验室进行了测试，本节说明了使用的设备、测试过程和结果。

表 3-1 列出了 TIDA-010240 电路板连接。

表 3-1. TIDA-010240 电路板连接

连接器	说明
J1	输入电源连接器 (V_{IN})
J2	电池 A 电源连接器
J3	电池 B 电源连接器
J4	MSPFET 编程接头
J5-1	MSP-MUX SCL
J5-2	MSP-MUX SDA
J5-3	GND 连接
J7-1	主机-MSP SDA
J7-2	主机-MSP SCL
J7-3	GND 连接
J6-1	BQ25731 器件 A SCL
J6-2	电池组 A SCL
J6-3	BQ25731 器件 A SDA
J6-4	电池组 A SDA
J6-5	BQ25731 器件 B SCL
J6-6	电池组 B SCL
J6-7	BQ25731 器件 B SDA
J6-8	电池组 B SDA
J6-9	3.3V 连接
J6-10	GND 连接
J8-1	VIN +
J8-2	3.3V 降压转换器电源
J8-3	VSYS +
J9-1	3.3V 降压转换器输出
J9-2	系统 3.3V 电源轨
J9-3	MSPFET 3.3V 引脚
J10	系统输出连接器 (VSYS)

3.1 硬件要求

表 3-2 显示用于测试的设备。

表 3-2. 用于测试的设备

设备	等级	说明
直流电源	12V 至 20V, 8A	表示 19V 壁式适配器输入的电源
电子负载 (E-Load)	160W	电子负载用于模拟高达 160W 的系统负载
智能电池	高达 4S, 2P 锂离子电池	用于充电、放电和通信测试的智能电池组
示波器		Tektronix DPO 2024B
万用表		Agilent 34401A
逻辑分析仪		用于通信监测的逻辑分析仪
USB2ANY		用于生成主机命令的 USB2ANY 器件

3.2 测试设置

表 3-3 所示为用于测试的 TIDA-010240 电路板连接。

表 3-3. TIDA-010240 用于测试的电路板连接

连接器	说明
J1	连接到直流电源 (12V 到 20V)
J2	电池 A + 和 - 连接
J3	电池 B + 和 - 连接
J10	连接到 > 160W 电子负载
J4	连接 MSPFET 以进行软件监测
J5-1	逻辑分析仪 SCL 监测下游
J5-2	逻辑分析仪 SDA 监测下游
J5-3	逻辑分析仪 GND 连接
J7-1	USB2ANY 的主机-MSP SDA 连接
J7-2	USB2ANY 的主机-MSP SCL 连接
J7-3	USB2ANY 的 GND 连接
J6-1	BQ25731 器件 A SCL
J6-2	电池组 A SCL
J6-3	BQ25731 器件 A SDA
J6-4	电池组 A SDA
J6-5	BQ25731 器件 B SCL
J6-6	电池组 B SCL
J6-7	BQ25731 器件 B SDA
J6-8	电池组 B SDA
J8	J8-2 跳线连接到 J8-3。将 VSYS 连接到 3.3V 降压输入
J9	J9-1 跳线连接到 J9-2。将 3.3V 降压转换器连接到 3.3V 系统电源轨

3.3 测试结果

本节介绍用于验证该设计功能的测试程序。此处显示充电电流限制、电池 ORRing 以及适配器或电池切换的测试结果，并介绍测试期间使用的程序。

除非另有说明，否则本节中运行的所有测试都按照表 3-3 进行连接。

3.3.1 自适应充电电流限制

该参考设计配备了一个 ILIM 电路，用于将系统的总输入电流限制在 8A (详见 节 2.2.11)。本节所述的测试验证了该自适应电流限制电路的功能。

在此测试中，DMM 与两个电池的正极终端端子串联，用于测量各自的充电电流。系统负载电流通过电子负载在 CC 模式下设定。在直流电源输入端监测输入电流。连接的电池组电压约为 14.5V。完成设置后，电路板由 19V 电源供电。

表 3-4. 自适应充电电流限制数据

输入电流 (A)	系统电流 (A)	电池 A 充电电流 (A)	电池 B 充电电流 (A)	ILIM 电压
5.38	0	3.00	2.99	1.54
5.79	1	2.60	2.78	1.46
6.11	2	2.24	2.40	1.34
6.75	4	1.52	1.63	1.26
7.39	6	0.75	0.80	1.13
8.09	8	0.00	0.00	0.99

3.3.2 电池 ORing 系统

此设计通过理想二极管对电池放电。这会产生与电池电压成正比的放电电流，直到两块电池放电至相同电压为止。测试开始时，电池 A 的测量值为 14.429V，而电池 B 的测量值为 13.858V。万用表与两块电池的正极端子串联以测量放电电流。电子负载设置为从系统电源轨拉取 5A 恒定电流 (用于测试的 DMM 每个额定值仅为 3A)。

表 3-5. 电池 ORing 数据

系统电流 (A)	电池 A 放电电流 (A)	电池 A 电压 (V)	电池 B 放电电流 (A)	电池 B 电压 (V)
5	3.11	12.425	1.91	12.407
2	1.33	13.34	0.68	13.28

3.3.3 电路从适配器切换到电池

此测试旨在演示设计的适配器到电池切换功能。测试在输入电源为 19V 的条件下运行。然后，电子负载连接到系统电源轨并消耗 8A 的恒定电流。随即移除输入电源，并在切换时序中监测 VIN、V_{SY}S 和 V_{BAT} 电源轨。接下来，重复该测试并将 19V 输入电源替换为 13V 电源，以模拟车载充电适配器。

在图 3-1 至图 3-4 中，通过 CH1 (蓝色) 测量 VIN，通过 CH2 (红色) 测量 V_{BAT}，通过 CH3 (绿色) 测量 V_{SY}S。为了更好地说明切换机制，所有通道均以 0V 为基准进行采集 (无偏移)。

图 3-1 显示时间分割为 200 μ s 时 19V 到电池的切换。V_{SY}S 的最低电压为 9.21V。切换时间约为 10 μ s；在发生切换事件后，V_{SY}S 电压轨在 20 μ s 内上升至 12.87V。

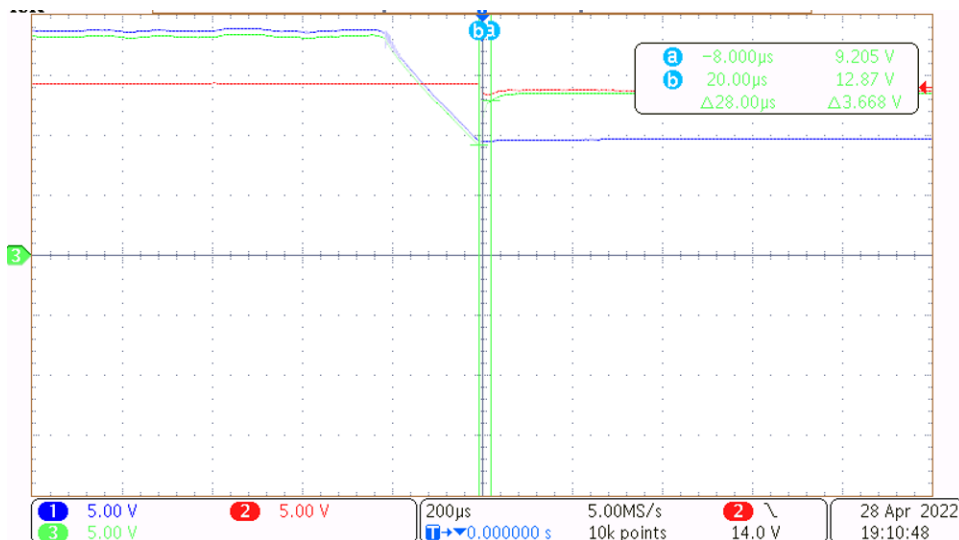


图 3-1. 19V 到电池的切换，200 μ s 时间分割

图 3-2 显示时间分割为 20 μ s 时 19V 到电池的切换。V_{SY}S 的最低电压为 9.28V。切换时间约为 10 μ s；在发生切换事件后，V_{SY}S 电压轨在 10 μ s 内上升至 11.82V。

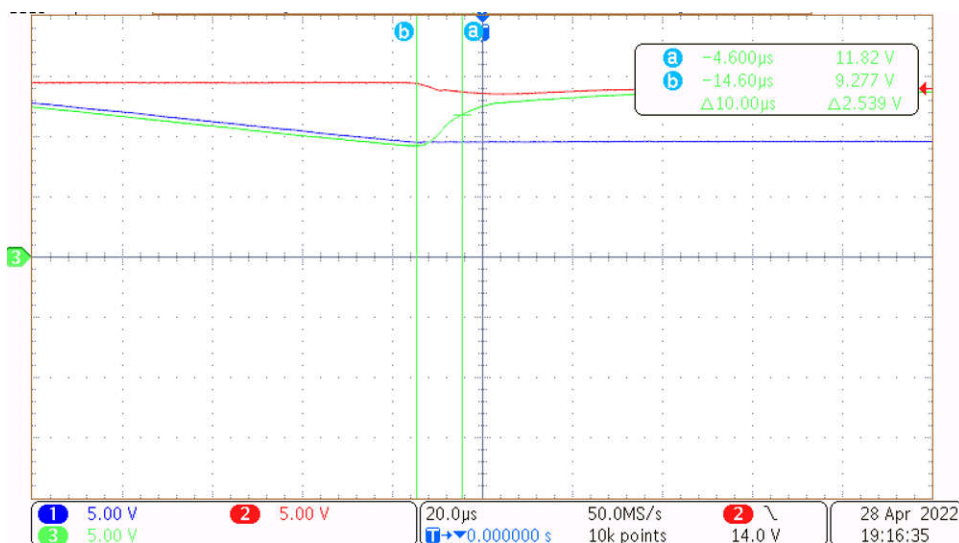


图 3-2. 19V 到电池的切换，20 μ s 时间分割

图 3-3 显示时间分割为 100 μ s 时 12V 到电池的切换。V_{SY}S 的最低电压为 9.12V。切换时间约为 10 μ s；在发生切换事件后，V_{SY}S 电压轨在 20 μ s 内上升至 12.73V。

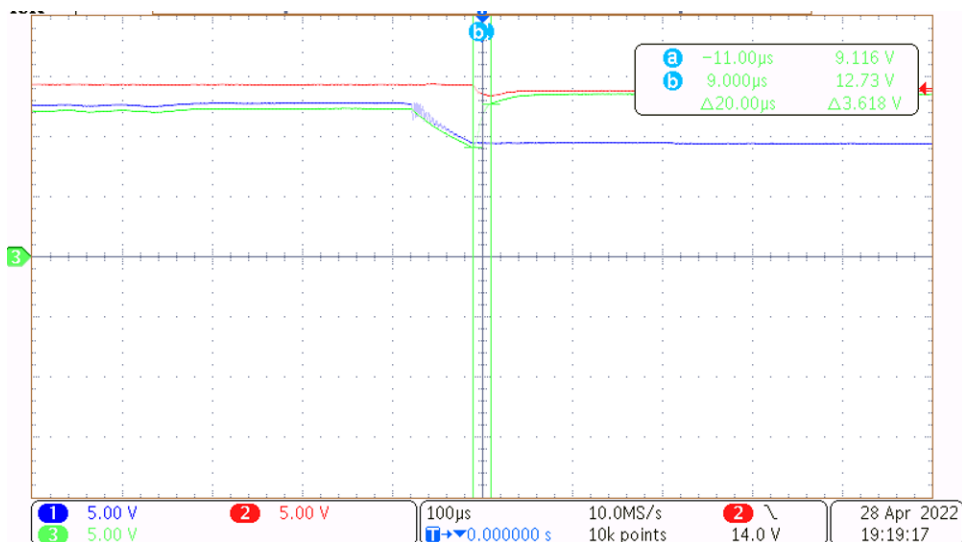


图 3-3. 12V 到电池的切换，10 μ s 时间分割

图 3-4 显示时间分割为 20 μ s 时 12V 到电池的切换。VSYS 的最低电压为 9.31V。切换时间约为 10 μ s；在发生切换事件后，VSYS 电压轨在 10 μ s 内上升至 10.63V。

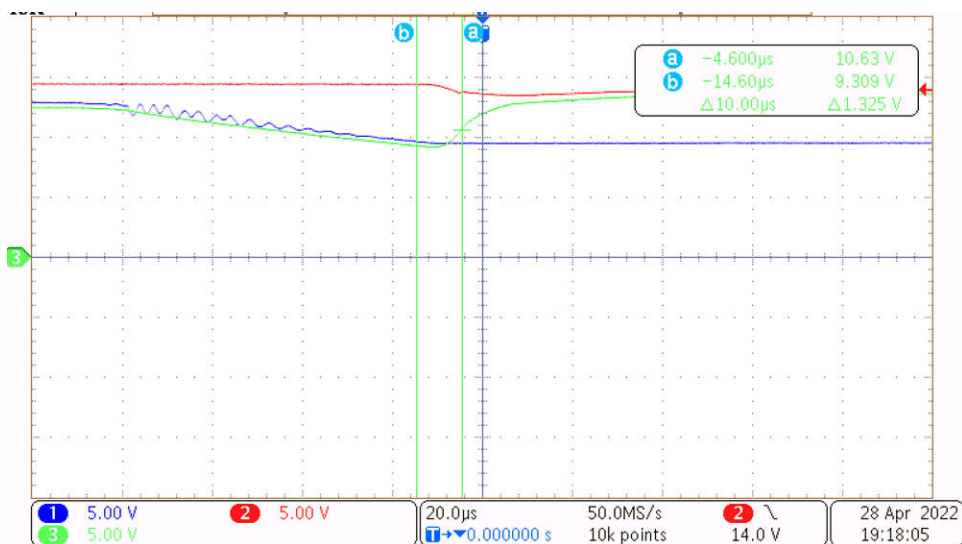


图 3-4. 12V 到电池的切换，20 μ s 时间分割

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-010240](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010240](#) 中的设计文件。

4.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[BQ25731 具有 USB-C PD 3.0 OTG 输出的 I2C 1 节至 5 节降压/升压电池充电控制器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[LM7480-Q1 具有负载突降保护功能的理想二极管控制器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI)，[LM74700-Q1 低 I_Q 电池反向保护理想二极管控制器](#) 数据表
4. 德州仪器 (TI)，[MSP430FR247x 混合信号微控制器](#) 数据表
5. 德州仪器 (TI)，[PCA9546A 具有复位功能的低压 4 通道 I²C 和 SMBus 开关](#) 数据表

4.3 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、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可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》。

4.4 商标

TI E2E™ and MSP430™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 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 * (June 2022) to Revision A (June 2022)	Page
• 删除了 系统概述部分的文本内容。.....	3

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司