

Design Guide: TIDA-010247

面向 48V 至 1500V 储能系统的高精度电池管理单元参考设计



说明

此参考设计是一款采用堆叠式 BQ769x2 电池监测器系列的高侧 N 沟道 MOSFET 控制 (多达 32 节串联) 电池管理单元 (BMU)。此设计还集成了一个 CAN 接口, 用于堆叠高压 (高达 1500V) 储能站应用的 BMU。高侧 N 沟道 MOSFET 架构和优化的驱动电路可提供轻松的开关控制。此参考设计可实现低待机和运输模式功耗, 并减小两组之间的电流差。此参考设计适用于 48V 至 1500V 储能系统。

资源

| | |
|---|-------|
| TIDA-010247 | 设计文件夹 |
| BQ76972 、 LM5168 、 TPS62932 | 产品文件夹 |
| MSPM0G3519 | 产品文件夹 |
| UCC33410 、 UCC33421-Q1 | 产品文件夹 |
| ISO1640 、 ISO1042 | 产品文件夹 |
| TPS7A24 、 TMP61 、 TPD2E007 | 产品文件夹 |

特性

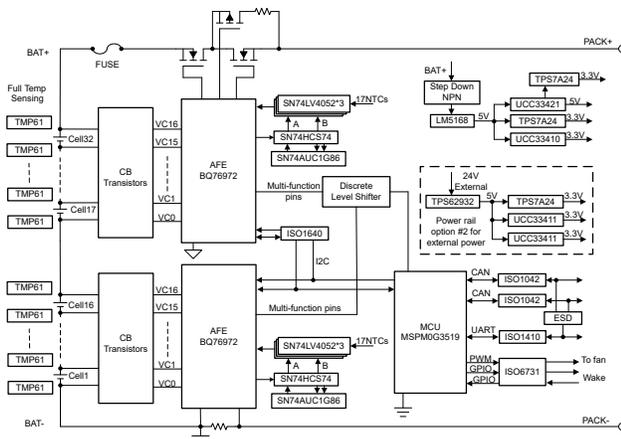
- 25°C 下具有 $\pm 1.8\text{mV}$ 磷酸铁锂电池电压测量精度, 且具有固定失调电压调节
- 运输模式下的流耗为 $7\mu\text{A}$
- 强大的可编程电池电芯和系统保护
- 反向充电器和电池包侧高电压保护
- 高侧 N 沟道 MOSFET 和强大的驱动能力
- 通过 CAN 支持堆叠式架构, 最高达到 1500V

应用

- ESS - 电池管理系统 (BMS)
- 混合动力汽车/电动汽车电池管理系统 (BMS)
- 其他工业电池包 (10 节及以上)
- 移动式发电站



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

储能系统 (ESS) 在可再生能源应用中发挥着重要作用。根据系统电压、容量和使用情况, ESS 可以分为三个不同类别: 住宅 ESS、商业和工业 ESS 以及电网 ESS。商业和工业以及电网 ESS 包含多个机架, 每个机架都包含多个堆叠的电池包。住宅 ESS 仅包含电池包。

由串联和并联方式连接的电池电芯组成的电池包是 ESS 的基本模块。由于重量限制和更长的寿命需求, 电池化学成分正在从铅酸转变为锂离子、锂聚合物或锂离子磷酸盐 (磷酸铁锂) 类型, 而且电池组电压从 24V 或 48V 变为 96V 或 192V, 甚至更高。这些电池化学物质的体积能量密度和重量能量密度都非常不错。虽然这些电池化学物质可提供高能量密度, 并因而具备体积更小、重量更轻的优势, 但这些电池产品也会涉及到安全问题, 需要更准确和更复杂的监测和保护。上述安全问题包括电芯欠压 (CUV) 和过压 (COV)、过热 (OT)、充电过流 (OCC) 和放电过流 (OCD) 以及短路放电 (SCD), 所有这些都加速电芯退化, 并可能导致热失控和爆炸。因此, 必须及时监测电池包电流、电芯温度和电芯电压, 以防出现一些异常情况。必须防止电池包出现所有这些情况。各个参数始终需要良好的测量精度, 尤其是电芯电压、电池包电流和电芯温度。为了实现准确的保护和电池包荷电状态 (SoC) 的计算, 必须保持良好的精度。因为磷酸铁锂电池包应用具有稳定的电压, 所以对它来说尤其必须保持良好的精度。电池供电应用的另一个重要特性是电流消耗, 特别是在运输模式或待机模式下。更低的电流消耗可节省更多电能, 并提供更长的储电时间, 而不会使电池过度放电。

对于 BMU 之间的通信接口, 传统上广泛使用控制器局域网 (CAN) 来确保通信的稳健性。CAN 结构控制器需要一个微控制器单元 (MCU)、一个数字隔离器和一个隔离式电源模块来运行 CAN 通信功能。另一种方法是菊花链, 它只需比 CAN 接口更少的元件即可正常工作, 但该方法需要电池管理 IC 支持菊花链通信, 这意味着这是 IC 供应商定义的专用协议。

该设计具有两个堆叠式 BQ769x2 电池监测器, 可覆盖多达 32 节串联电池电芯; 该设计主要面向 48V 和家用电池包应用, 并集成了 CAN 接口堆叠功能, 以实现与商业和工业 ESS 等高压应用的兼容性。该设计包含全套保护功能, 可在各种异常状况下保护电池包, 异常状况包括: 电芯过压、电芯欠压、过热和充放电过流以及短路放电。借助高侧 MOSFET 控制, 即使在故障期间和 MOSFET 处于关断状态时, 也可实现外部正常通信。此设计经过精心构建了两种辅助电源架构, 一种用于住宅 ESS, 另一种用于商业和工业 ESS。此设计以有限的元件数量和简单的控制策略实现超低的运输模式 (10 μ A) 和待机模式 (300 μ A) 电流消耗。该设计还包含一个热敏电阻多路复用器电路, 以支持 32 芯串联电芯温度测量。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了系统方框图。

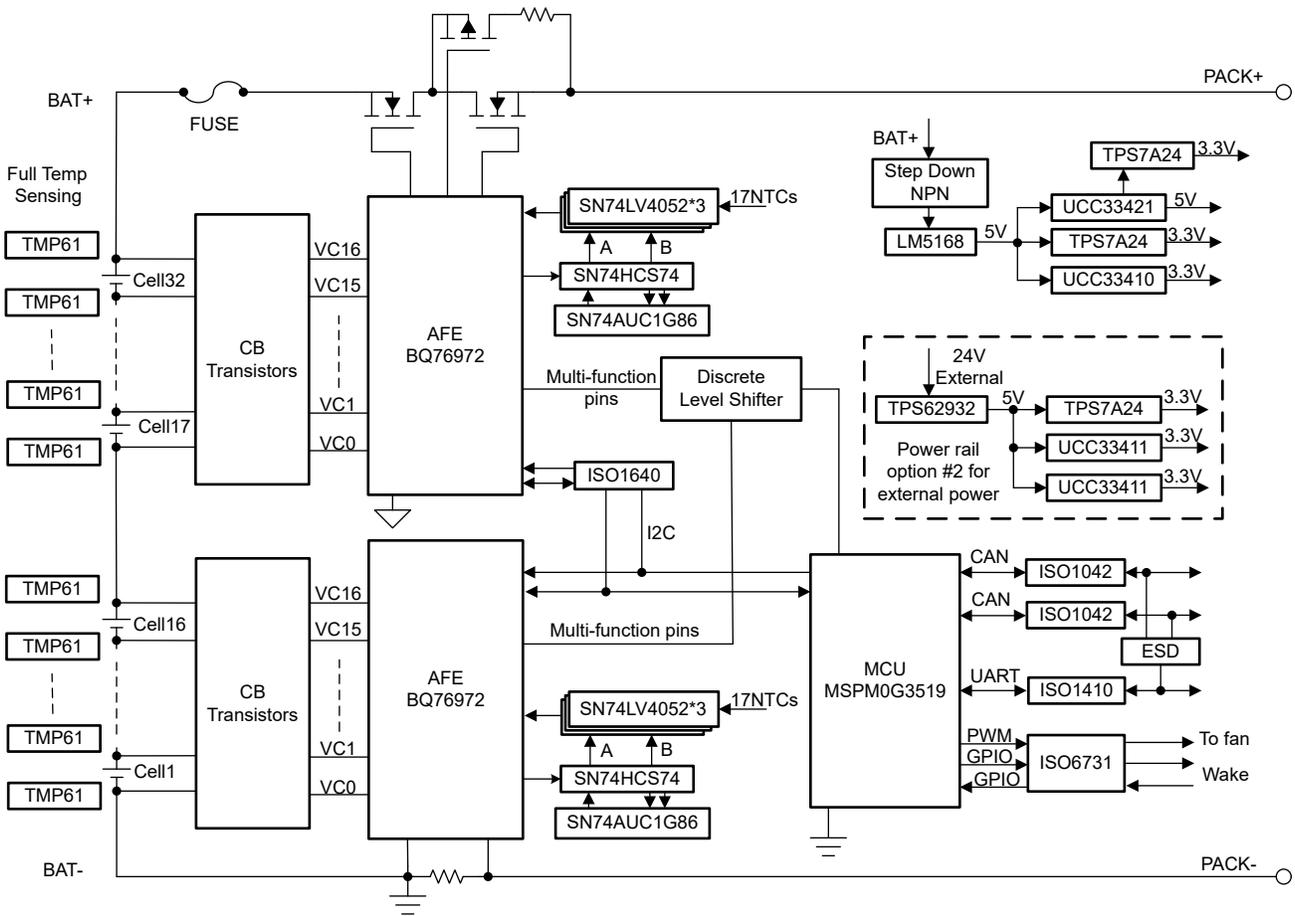


图 2-1. TIDA-010247 方框图

该设计使用 TI 的两个堆叠式高精度电池监测器和保护器 BQ769x2 来监测多达 32 个串联电池电芯的电压、电池包电流和温度数据，并保护电池包免受各种异常状况的影响，包括：COV、CUV、OT、OCD、OCC 和 SCD。此 BQ769x2 系列具有三个器件：BQ76942 可覆盖 3 至 10 节串联电池应用，BQ769142 可覆盖最多 14 节串联电池的应用，BQ76952 可覆盖最多 16 节串联电池的应用，BQ76972 可实现更高的电池电压测量精度，也可覆盖最多 16 节串联电池。这些是引脚对引脚器件，因此通过有限的元件变动，即可轻松更新设计以匹配不同的电池电芯应用。此设计使用 BQ76972 进行测试。

设计中有一个低功耗 MSPM0 MCU MSPM0G3519，它会与两个 BQ76972 器件通信，处理所有系统控制策略，并向系统端上传所有请求的信息。由于顶部 BQ76972 器件将顶部电池组作为地（与 MCU 不是同一个地），因此 MCU 和顶部 BQ76972 器件之间的通信需要隔离。ISO164x 是一种热插拔、低功耗、双向隔离式 I2C 接口，支持稳定的隔离式 I2C 通信。

此设计采用了一个隔离式 RS-485 收发器和两个隔离式 CAN 收发器。隔离式 CAN 收发器 (ISO1042) 可由 1 侧的 1.8V、2.5V、3.3V 和 5V 电源以及 2 侧的 5V 电源供电。ISO1042 器件的隔离耐受电压为 5000V_{RMS}，提供基础型和增强型隔离，浪涌测试电压分别为 6kV_{PK} 和 10kV_{PK}。ISO1410 是一款隔离式半双工 RS-485 收发器，支持连接 1.8V、2.5V、3.3V 和 5V 控制逻辑。

为了给这些隔离器件供电，此设计使用一个具有低 I_Q 的 120V 输入、0.3A、超低 I_Q 同步降压直流/直流转换器 LM5168 作为前置稳压器。UCC334xx(-Q1) 系列集成了高效、低辐射隔离式直流/直流转换器。UCC334x0 只需极

少的无源元件就能构成一个完全正常工作的直流/直流电源模块，在 3kV_{RMS} 基本隔离栅上的最大功率可达 1.5W ，工作温度范围宽，采用薄型封装；而 UCC334x1-Q1 具有 5kV_{RMS} 增强型隔离，提供相同的功率。

具有正温度系数的 $\pm 1\%$ 、 $10\text{k}\Omega$ 线性热敏电阻 TMP61 可用于监测电芯温度，并通过 BQ76972 器件进行测量。

2.2 设计注意事项

2.2.1 针对不同的用例配置此设计

本产品专为 ESS 的各种场景而设计。该设计可配置为具有 FET 控制功能的 BMU (对于低电压 ESS) 或具有 CAN 堆叠功能的可堆叠 BMU (对于高电压 ESS)。图 2-2 展示了低电压 ESS 的配置示例。

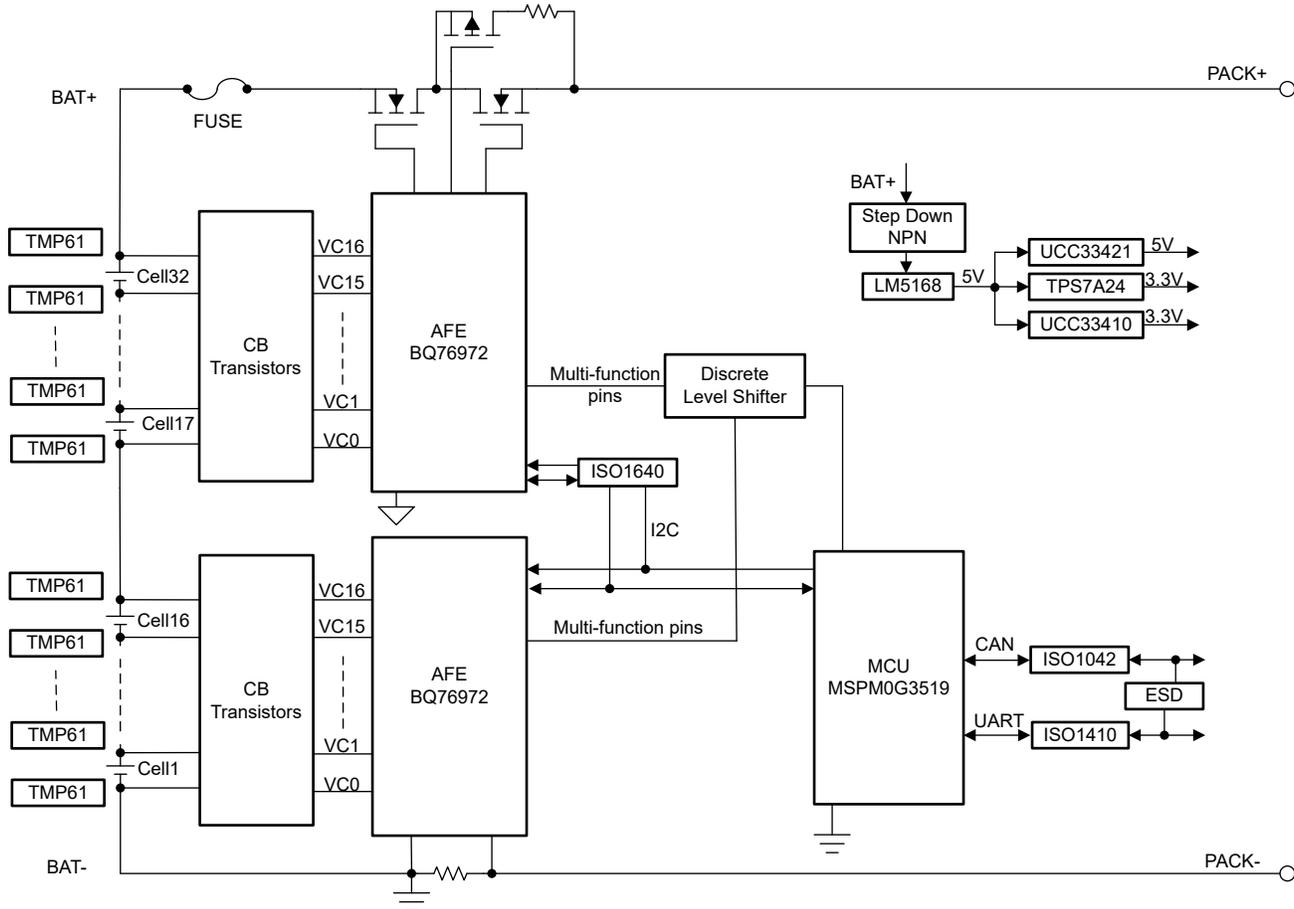


图 2-2. 低压 ESS 配置

此配置移除了电源轨 2 并使用电池电压作为辅助电源输入。热敏电阻多路复用器电路被移除，因为低电压 ESS 通常不需要测量每个电芯的温度，而需要一些多功能引脚来进行 FET 控制或警报输出。热敏电阻的数量可根据具体情况改变。由于单个封装应用中不需要 CAN 堆叠，因此移除了 ISO6731。堆叠两个 BQ76972 器件可支持多达 32 个电池包，通过移除一个 BQ76972，该设计还可用于 16 个电池包。图 2-3 展示了高电压 ESS 的配置示例。

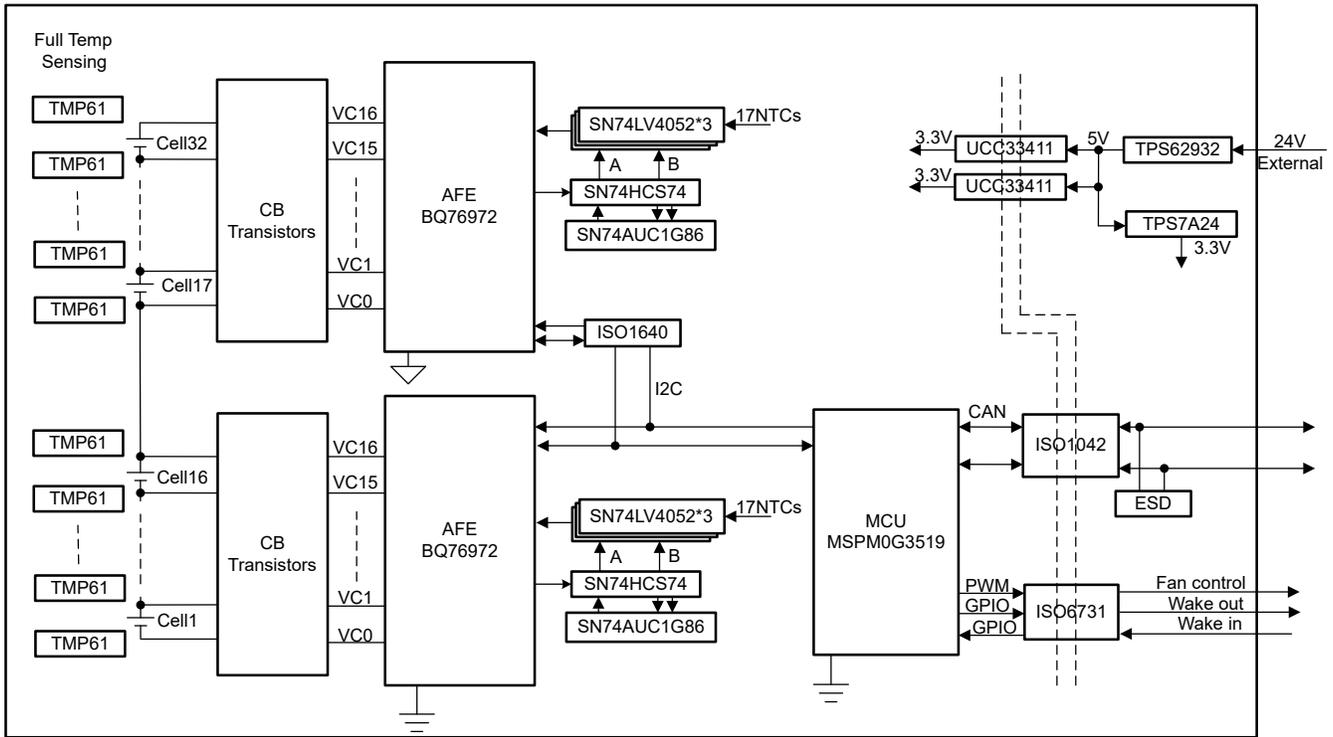


图 2-3. 高电压 ESS 配置

对于高压 ESS，每个 BMU 都由外部辅助电源供电，而保护 FET 由电池控制单元 (BCU) 控制。该配置展示了一个适用于高压 ESS 的典型 32 芯串联可堆叠 BMU。该设计可以与 CAN 接口堆叠，还可以为风冷式 ESS 应用提供风扇控制信号。

2.2.2 辅助电源策略

根据正常模式和运输模式下低电流消耗和良好热性能的要求，此设计为高压和低压 ESS 使用两种辅助电源策略。图 2-4 所示为适用于低压 ESS 的策略。

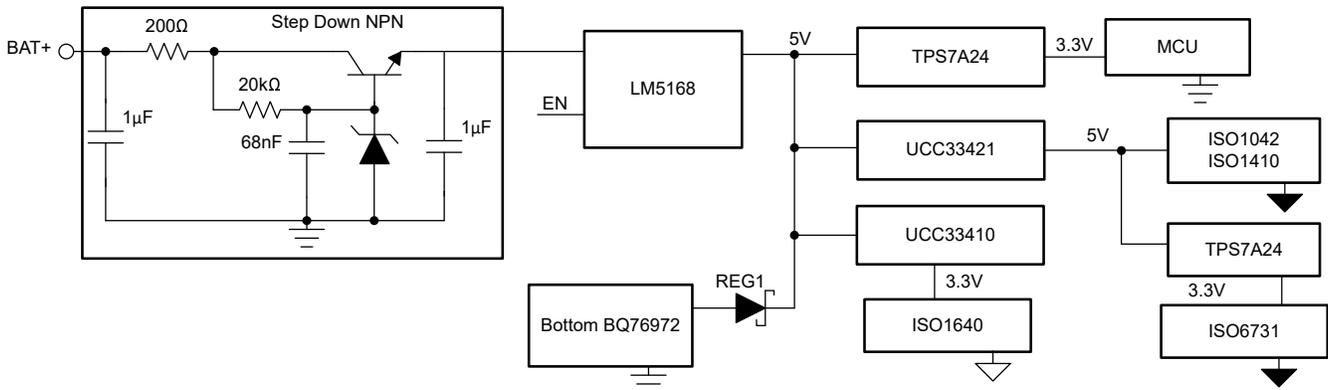


图 2-4. 适用于低压 ESS 的辅助电源策略

由于系统在正常模式工作时，需要数百毫安的电流来与系统侧进行正常的 CAN 或 RS-485 通信，因此低电压 ESS 电源策略采用 120V 输入、0.3A、超低 I_Q 同步直流/直流降压转换器 LM5168P 和低 I_Q 0.3A LDO TPS7A25 作为主电源，与仅使用 LDO 相比，这样可提高系统效率和热性能。由于 32 节串联电池包电压可能超过 120V，因此在直流/直流转换器之前添加了一个分立式降压电路。

当系统遇到严重的电芯欠压情况且必须进入运输模式时，MCU 将两个 BQ76972 器件配置为通过 I2C 命令或 RST_SHUT 引脚进入关断模式，并通过 EN 引脚关闭 LM5168P 输出，从而将系统配置为非常低的电流消耗模

式。此设计支持充电器连接唤醒功能和系统自带的唤醒功能。这两种方法均可唤醒底部 BQ76972 器件并启用正常的 3.3V 稳压器 REG1，然后 MCU 会通电并通过 EN 引脚启用 LM5168P。

为了覆盖 32 节串联电池系统，使用了两个堆叠的 BQ76972 器件来监测电芯电压和温度。避免两个堆叠组之间出现不平衡对于延长电池寿命而言非常重要。尽管电芯均衡有助于使所有电池电芯的电压相同，但最好避免两组之间的负载差异过大。在此设计中，隔离式 I2C 接口 ISO1640 用于实现 MCU 和顶部 BQ76972 器件之间的通信。ISO1640 的 VCC1 和 VCC2 之间的低电源电流差会使系统受益。

对于低压 ESS，该设计使用成本优化型基本隔离式电源模块 UCC33410 为 ISO1640 供电，以避免两个堆叠组之间的不平衡。图 2-5 展示了高压 ESS 的电源轨。

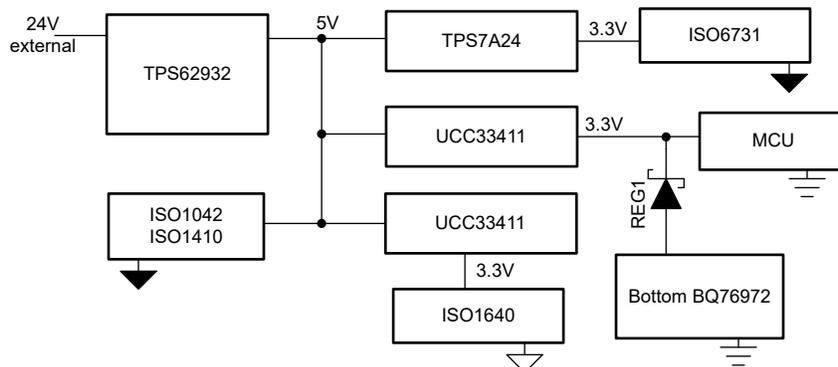


图 2-5. 适用于高压 ESS 的辅助电源策略

不同于低压 ESS，该设计通常有一个外部前置稳压器来将电网电压转换为 24V 直流电压，从而为所有子系统供电。此外，出于安全考虑，隔离设计比低压 ESS 更严格。该设计考虑了 8mm 爬电增强型隔离设计，使该设计可用于高达 1500V 的系统，并且具有适当的保护性接地。

2.2.3 高侧 N 沟道 MOSFET

此设计支持高侧 N 沟道 MOSFET 架构，并使用顶部的 BQ76972 电荷泵来驱动 MOSFET。由于顶部 BQ76972 以底部电池组的顶部为基准进行电芯电压测量，因此当顶部 BQ76972 关断 DSG MOSFET 时，顶部 BQ76972 器件的 DSG 引脚电压是底部电池组电压，该电压太高而无法完全关断 DSG MOSFET。此参考设计添加了一些分立式元件，用于确保 DSG MOSFET 完全快速地关断。

当 DSG MOSFET 需要关断时，MCU 或底部 BQ76972 器件会导通 Q65。P 沟道 MOSFET Q54 导通后，可使 DSG MOSFET 的 V_{GS} 放电。顶部 BQ76972 将 TOP_DSG 驱动至 TOP_LD 以关断 Q64，从而使 Dri_Test 接地并完全关断 DSG MOSFET。当 DSG MOSFET 关断时，Q65 也能关断以减小功耗。当系统需要导通 DSG MOSFET 时，系统首先确保 Q65 关断，然后使用电荷泵电压驱动 TOP_DSG，则 Q64 导通并为 DSG MOSFET 的 V_{GS} 充电。

2.2.4 堆叠式 AFE 通信

为了覆盖 16 节或更多节电池电芯串联的系统，可以级联两个 BQ769x2 器件来监测多达 32 节串联的电池电芯。该设计测试两个 BQ76972 器件来监测多达 32 个电池电芯。底部 BQ76972 监测下面的 16 节串联电池电芯，顶部 BQ76972 监测上面的 16 节串联电池电芯，因此底部的 BQ76972 与 BAT - 和 MCU 共地，顶部的 BQ76972 以 16 节串联电池组电压为基准。与顶部 BQ76972 器件通信时需要添加隔离，也可以在这里使用分立式电平转换器。此设计使用 I2C 隔离器 ISO164x，可实现高达 400kHz 的 I2C 通信波特率和低功耗。对于 ALERT、RST_SHUT、DFETOFF、CFETOFF 等其他信号，可以使用分立式电平转换器，因为这些信号出现的频率不高。MCU 发出命令并直接从底部 BQ76972 读取电压、电流和温度数据，而在与顶部 BQ76972 通信时则通过 ISO164x 读取。

上面的 16 节串联电池电芯出现故障时，顶部 BQ76972 会检测到故障并直接驱动 MOSFET 关断。MCU 可通过 ALERT 或读取状态寄存器了解上述故障，然后导通 Q65，从而确保 DSG MOSFET 完全关断。下面的 16 节串联电池电芯出现故障以及出现电流故障时，底部 BQ76972 会检测到，并通知顶部 BQ76972 驱动 MOSFET 关断。对于 COV、CUV、OT、UT、OCD1、OCD2 等慢速保护，可以在故障触发时向 MCU 发出警报，然后 MCU 会发送命令来关断 MOSFET。然而短路保护通常具有微秒级延时时间，如果利用 MCU 固件来提供保护，此过程不够快。此设计添加了分立式电路，允许底部 BQ76972 器件与顶部 BQ76972 器件直接控制 MOSFET，从而避免 MCU 固件导致进一步的保护延迟。

2.2.5 热敏电阻多路复用器

每个 BQ76972 都提供九个支持外部热敏电阻的引脚。这些引脚中的大多数还可以支持系统中可能需要的其他功能，例如主机处理器的警报中断或用于 FET 关断的硬件引脚控制。如果应用需要的热敏电阻数量超过 BQ76972 本身能够支持的数量，则可以包含额外的多路复用器电路来实现这一点，如图 2-6 所示。

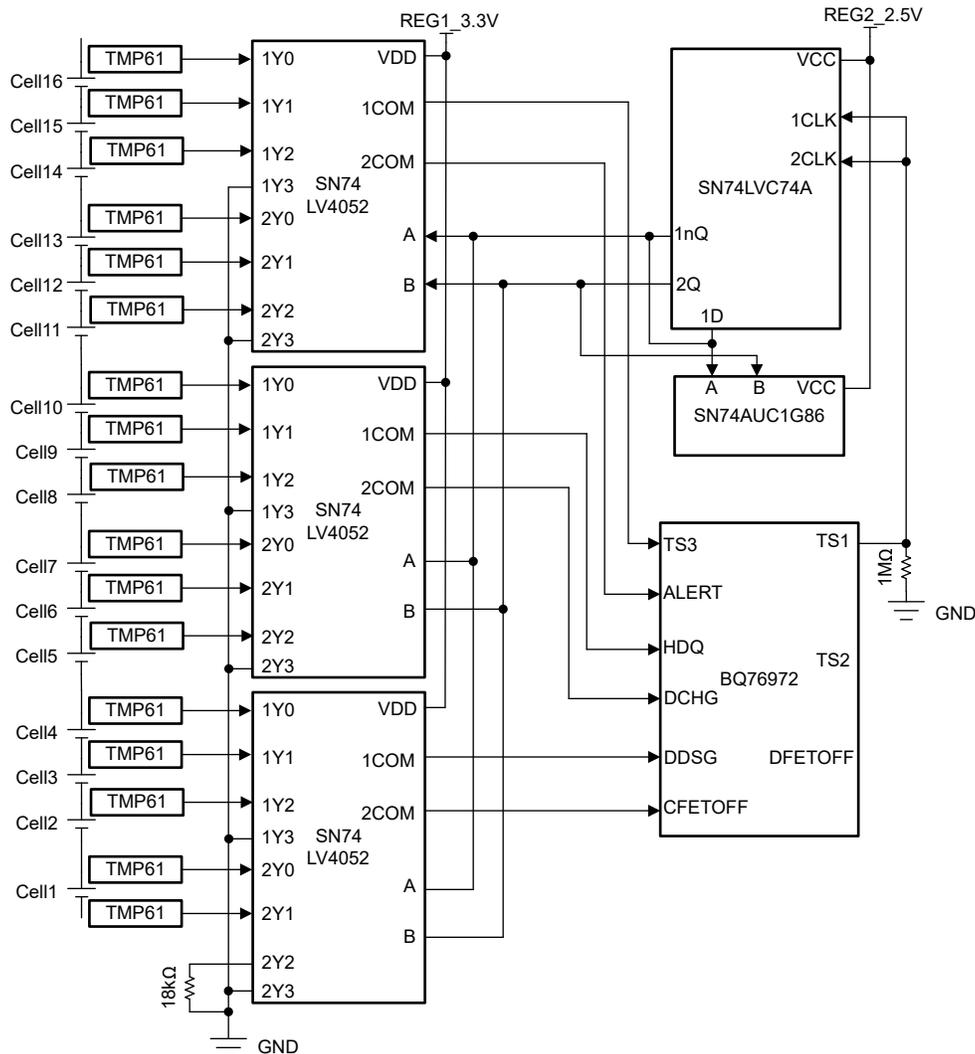


图 2-6. 热敏电阻多路复用器方框图

通常，只有高压 ESS 需要对一个 BQ76972 测量超过 9 个热敏电阻，不需要将这些引脚配置用于其他功能，因此该设计仅显示在所有 9 个引脚均配置为热敏电阻输入时热敏电阻多路复用器的实现情况。在该设计中，一个 BQ76972 共测量了 17 个热敏电阻。如果设计人员希望保留某些引脚用于其他目的，也有许多型号可供选择。可以根据本节其余部分中演示的基本原理来修改这些电路。

图 2-7 说明了如何在正常模式下使用连续重复循环执行 BQ76972 ADC 测量，这样当器件完成每组测量后，器件会立即启动一组新的测量。每个测量环路 (ADCSCAN) 包含多达 21 个测量时隙。t_{meas} 时隙时间默认为 3ms，不过可以通过设置 [FASTADC] 位将该时间缩短为 1.5ms，但转换分辨率会降低。一个 ADCSCAN 需要 31.5ms (FASTADC = 1) 或 63ms (FASTADC = 0)。

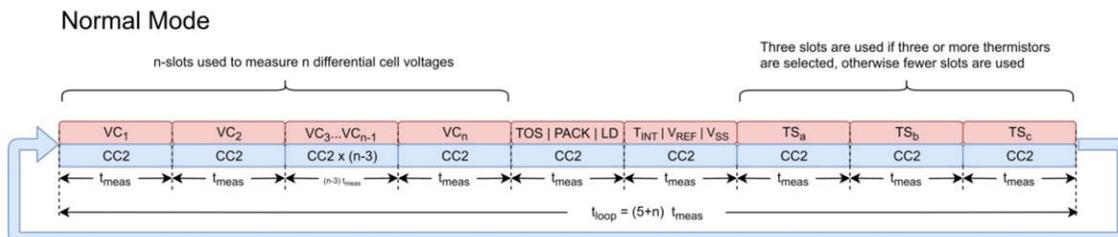


图 2-7. BQ76972 正常模式测量环路

由于该设计将 9 个引脚配置为热敏电阻输入，因此该设计需要 3 个 ADCSCAN 来测量 9 个引脚，称为 FULLSCAN。一个 FULLSCAN 周期持续时间为 94.5ms (FASTADC = 1) 或 189ms (FASTADC = 0)。该设计使用 4:1 多路复用器来测量 17 个热敏电阻，因此一个完整的温度检测周期 (FULLTEMP) 需要 378ms (FASTADC = 1) 或 756ms (FASTADC = 1)。另请参阅 [提高电池监测系统电压测量精度](#) 技术文章。

多路复用器更改的时间需要与 BQ76972 的常规测量环路进行一些协调，以避免在测量过程中因更改多路复用器而导致测量中断。此设计使用一种方法来自动控制更改多路复用器的时间，如图 2-6 所示。TS1 引脚与虚拟 1MΩ 电阻器一起用于为计数为 0 至 3 的外部二进制计数器生成时钟信号。计数控制一个多路复用器，该多路复用器将每个多路复用器上的 3 个热敏电阻和 1 个接地端切换到 6 个引脚之一，因此最多支持 18 个总热敏电阻。接地通道用于多路复用器电路诊断，这意味着如果您可以在一个引脚上看到每四次测量一次接地检测，则多路复用器会正常工作。18 个通道中的一个连接到高精度固定电阻器，用于温度测量校准。

按照 CFETOFF、DFETOFF、ALERT、TS1、TS2、TS3、HDQ、DCHG 和 DDSG 的顺序测量 9 个引脚，但 BQ76972 仅测量配置为热敏电阻输入的引脚。由于 TS1 用作时钟输入，TS2 不用作实际的热敏电阻，以避免任何可能影响测量的多路复用器稳定瞬变，因为 TS2 是在 TS1 引脚之后立即测量。

通过主机微控制器实现与热敏电阻相关的温度保护，因为 BQ76972 的引脚温度在 3 个热敏电阻和 1 个接地端之间变化。

硅线性热敏电阻具有线性正温度系数 (PTC)，本设计中使用 TMP61，以提高温度测量精度。与纯阻性器件 NTC 不同，TMP61 电阻受器件中电流的影响，并且电阻会随温度变化而变化。TMP61 在整个温度范围内都具有良好的线性行为。该范围支持采用一种更简单的电阻-温度转换方法，可减少查找表的存储需求。该器件不需要与传统 NTC 相关的线性化电路或中点校准。整个温度范围内的线性电阻允许器件能够在较高的工作温度下保持灵敏度。[如何使用低成本 TMP6x 线性热敏电阻在整个温度范围内实现 ±1°C 精度或更高精度](#) 展示了如何通过 TMP61 实现出色精度。

2.2.6 CAN 堆叠

CAN 接口可用于 BMU 之间的通信，以便为高电芯数系统堆叠电池包，但 CAN 接口可采用不同的 ID，因为默认的 BMU CAN 节点 ID 是相同的。图 2-8 展示了使用硬接线唤醒 CAN 自动寻址的设计。

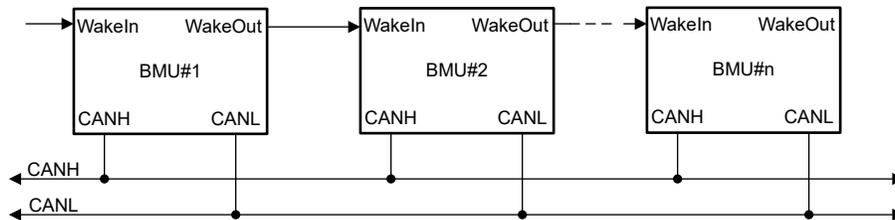


图 2-8. CAN 总线堆叠方框图

BMU 级联在一起，逐个唤醒。每个 BMU 都有一个用于唤醒的 WAKE 输入信号和一个用于唤醒下一个 BMU 的 WAKE 输出信号。初始 CAN 节点 ID 由主机微控制器定义。BMU 会持续监控 CAN 帧何时被唤醒，并将数据字段中的 ID 用作 ID，然后将 ID+1 CAN 帧发送到 CAN 总线并通过 GPIO 唤醒信号。图 2-9 展示了唤醒信号模式满足时序要求的方法，以实现更稳健的设计。

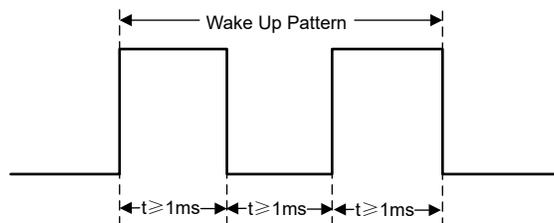


图 2-9. 唤醒模式

2.3 主要产品

2.3.1 BQ76972

TI BQ76972 是一款高度集成的高精度电池监测器和保护器，适用于 3 至 16 节串联锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包。该器件包括一个高精度监控系统和一个高度可配置的保护子系统，并支持自主式或主机控制型电芯均衡。它集成了高侧电荷泵 NFET 驱动器、供外部系统使用的双路可编程 LDO 以及一个支持 400kHz I2C、SPI 和 HDQ 单线标准的主机通信外设。BQ76972 可采用 48 引脚 TQFP 封装。

2.3.2 MSPM0G3519

MSPM0G351x 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 MCU 为需要 256KB 至 512KB 闪存的应用提供了成本优化和设计灵活性双重优势。这些器件包括双 CAN-FD 控制器、网络安全机制和高性能集成模拟，并在整个工作温度范围内提供出色的低功耗性能。TI MSPM0 系列低功耗 MCU 包含具有不同模拟和数字集成度的器件，可让客户找到满足工程需求的 MCU。MSPM0 MCU 平台将 Arm Cortex-M0+ 平台与超低功耗整体系统架构相结合，使系统设计人员能够在降低能耗的同时提高性能。MSPM0G351x MCU 由广泛的硬件和软件生态系统提供支持，随附参考设计和代码示例，便于您快速开始设计。

2.3.3 UCC334xx

UCC334xx(-Q1) 系列集成了高效、低辐射隔离式直流/直流转换器。UCC334x0 只需极少的无源元件就能构成一个完全正常工作的直流/直流电源模块，在 3kV_{RMS} 基本隔离栅上的最大功率可达 1.5W ，工作温度范围宽，采用薄型封装；而 UCC334x1-Q1 具有 5kV_{RMS} 增强型隔离，提供相同的功率。该器件具有使用方便、外形小巧、功率密度高等特点，适用于尺寸受限的成本敏感型系统，只需极少的设计工作，可取代笨重、昂贵的变压器设计。集成式直流/直流转换器采用开关模式操作和专有的电路技术来降低所有负载条件下的功率损耗并提高效率。专用控制机制、时钟方案和片上变压器带来了高效率 and 低辐射。

2.3.4 LM5168

LM5169 和 LM5168 同步降压转换器用于在宽输入电压范围内进行稳压，从而更大地减少对外部浪涌抑制元件的需求。 50ns 的最短可控导通时间有助于实现较大的降压比，支持从 48V 标称输入到低电压轨的直接降压转换，从而降低系统的复杂性并减少解决方案成本。LM516x 在输入电压突降至 6V 时能够根据需要以接近 100% 的占空比工作，因而是宽输入电源电压范围工业应用和高电芯数电池包应用的理想之选。凭借集成式高侧和低侧功率 MOSFET，LM5169 可提供高达 0.65A 的输出电流，LM5168 可提供高达 0.3A 的输出电流。恒定导通时间 (COT) 控制架构可提供几乎恒定的开关频率，具有出色的负载和线路瞬态响应。LM516x 能够以 FPWM 或自动模式运行。FPWM 模式在整个负载范围内实现强制 CCM 运行，支持隔离式 Fly-Buck 转换器应用。自动模式可实现超低 I_Q 和二极管仿真模式运行，从而在轻负载下实现高效率。

2.3.5 ISO1640

ISO1640、ISO1641、ISO1642、ISO1643 和 ISO1644 (ISO164x) 器件是与 I2C 接口兼容的热插拔、低功耗、双向隔离器。ISO164x 符合 UL 1577 标准，采用 16-DW 封装时支持 $5000\text{V}_{\text{RMS}}$ 隔离等级，而采用 8-D 封装时支持 $3000\text{V}_{\text{RMS}}$ 隔离等级。该低发射器件的每条 I2C 隔离通道都具有通过双电容二氧化硅 (SiO_2) 绝缘栅实现隔离的逻辑输入和开漏输出。ISO1642 和 ISO1643 集成了两个单向 CMOS 隔离通道，而 ISO1644 集成了三个单向 CMOS 隔离通道，可实现静态 GPIO 隔离或用于隔离串行外设接口 (SPI) 总线。该系列包括通过 VDE、UL、CSA、TUV 和 CQC 认证的基本和增强型绝缘器件。ISO1640、ISO1642、ISO1643 和 ISO1644 具有两条隔离式双向通道，分别应用于时钟和数据线，而 ISO1641 具有一条双向数据通道和一条单向时钟通道。ISO164x 系列集成了支持双向通道所需的逻辑，与基于光耦合器的设计相比，设计更加简化且尺寸更小。

2.3.6 ISO1042

ISO1042 器件是一款符合 ISO11898-2 (2016) 标准规格的电隔离控制器局域网 (CAN) 收发器。ISO1042 器件提供 $\pm 70\text{V}_{\text{DC}}$ 总线故障保护功能和 $\pm 30\text{V}$ 共模电压范围。该器件在 CAN FD 模式下最高支持 5Mbps 数据速率，与经典 CAN 相比可实现更快的负载传输。该器件采用二氧化硅 (SiO_2) 绝缘隔栅，可承受 $5000\text{V}_{\text{RMS}}$ 的电压和 $1060\text{V}_{\text{RMS}}$ 的工作电压。电磁兼容性得到了显著增强，可实现系统级 ESD、EFT 和浪涌并符合辐射标准。与隔离式电源一起使用，此器件可抵御高电压冲击，并防止总线的噪声电流进入本地接地。ISO1042 器件可用于基础型和增强型隔离。

2.3.7 ISO1410

ISO14xx 器件是适用于 TIA、EIA RS-485 和 RS-422 应用的电隔离式差分线路收发器。这些抗噪声收发器设计用于恶劣的工业环境。这些器件的总线引脚可承受高级别的 IEC 静电放电 (ESD) 和 IEC 电子快速瞬变 (EFT) 事件，无需在总线上使用额外元件进行系统级保护。这些器件提供有基础型和增强型隔离可供选择。

2.3.8 TPS7A24

TPS7A24 低压降 (LDO) 线性稳压器集 2.4V 至 18V 输入电压范围和超低静态电流 (I_Q) 特性于一体。这些特性能帮助现代电器满足日益严苛的能源要求，并有助于延长便携式电源设计的电池寿命。TPS7A24 有固定电压和可调节电压两种版本可供选用。为获得更大的灵活性或更高的输出电压，可调节电压版本使用反馈电阻器将输出电压设置为 1.24V 到 17.64V 之间。两种版本都具有 1% 的输出调节精度，可对大多数微控制器 (MCU) 基准电压进行精密调节。在电流为 200mA 时，TPS7A24 LDO 的最大压降小于 340mV，因此它比标准线性稳压器的工作效率更高。此最大压降使得在 5.4V 输入电压 (V_{IN}) 至 5.0V 输出电压 (V_{OUT}) 范围内的效率达到了 92.5%。电源正常状态 (PG) 指示灯可以用来将 MCU 保持在复位状态，直到电源正常，或用于电源定序。PG 引脚为开漏输出；因此，该引脚很容易进行电平位移，以便通过 V_{OUT} 以外的导轨进行监控。内置电流限制和热关断有助于在发生负载短路或故障时保护稳压器。如需更高的输出电流选项，请考虑 TPS7A25 或 TPS7A26。

2.3.9 TMP61

热敏电阻设计工具提供了电阻与温度关系表 (RT 表) 的完整计算，以及用于产生温度和示例 C 代码的其他有用方法。TMP61 线性热敏电阻可在整个温度范围内提供线性度和始终如一的灵敏度，支持使用简单而准确的方法进行温度转换。该器件的低功耗和较小的热质量可充分减小自发热的影​​响。这些器件具有内置的高温失效防护性能以及对环境变化的强大抵抗力，设计用于长寿命的高性能应用。TMP6 系列器件外型小巧，可靠近热源放置，并具有快速响应时间。与 NTC 热敏电阻相比，它具有以下优点：无需额外的线性化电路、更大程度减少校准工作量、电阻容差变化更小、高温下灵敏度更高以及可节省处理器时间和内存的简化转换方法。TMP61 目前采用与 0402 封装兼容的 X1SON 封装、与 0603 封装兼容的 SOT-5X3 封装，以及 2 引脚穿孔式 TO-92S 封装。

2.3.10 TPD2E007

此器件是一款基于瞬态电压抑制器 (TVS) 的静电放电 (ESD) 保护器件，旨在为各种便携式和工业应用提供系统级 ESD 保护。背对背二极管阵列可在不影响信号完整性的情况下实现交流耦合或负向数据传输 (音频接口、LVDS、RS-485、RS-232 等)。该器件超出了 IEC 61000-4-2 (4 级) ESD 保护，旨在当靠近连接器时为内部 IC 提供系统级 ESD 保护。TPD2E007 采用 4 凸点 PicoStar 和 3 引脚 SOT (DGK) 封装。建议将封装高度仅为 0.15mm (最大值) 的 PicoStar 封装 (YFM) 用于关注封装高度的超节约空间型应用。PicoStar 封装可用于嵌入式 PCB 板应用或表面贴装应用。业界通用的 SOT 封装可在传统设计中提供简单的电路板布局布线选项。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

TIDA-010247 的关键性能在 TI 实验室进行了测试，本节说明了使用的终端设备以及测试过程和结果。

表 3-1 介绍了 TIDA-010247 电路板的连接。

表 3-1. 电路板连接

| 连接器和引脚分配 | 功能或原理图网 | 注释 |
|----------|-------------|---|
| BAT+ | BAT+ | 电池组正极 |
| BAT - | BAT - | 电池组负极；这为电子元件和电芯高电流路径提供了基准 |
| PACK+ | PACK+ | 充电器正极或负载正极 |
| PACK- | PACK - | 充电器负极或负载负极 |
| P1-1 | RS-485-A | RS-485 总线 I/O 端口，A |
| P1-2 | RS-485-B | RS-485 总线 I/O 端口，B |
| P2-1 | CAN1-H | 高电平 CAN1 总线 |
| P2-2 | CAN1-L | 低电平 CAN1 总线 |
| P3-1 | CAN0-H | 高电平 CAN0 总线 |
| P3-2 | CAN0-L | 低电平 CAN0 总线 |
| J1 | Cn | (n = 0 至 16) 电芯监测、平衡和电子设备电源连接。顶部 16 个串联电芯 |
| J2 | Cn | (n = 0 至 16) 电芯监测、平衡和电子设备电源连接。底部 16 节串联电芯 |
| J3-1 | SCL MCU | 来自 MCU 的 I2C 通信 SCL |
| J3-2 | SDA MCU | 来自 MCU 的 I2C 通信 SDA |
| J4-1 | Fan_Control | 风扇控制 PWM 信号 |
| J4-3 | WakeOut | 用于寻址的 CAN 唤醒输出信号 |
| J4-5 | Wakeln | 用于寻址的 CAN 唤醒输入信号 |
| J5-1 | 24V_EXT | 24V 外部电源输入端口 |
| J12 | 调试 | MSPM0 编程连接器 |

3.1 硬件要求

表 3-2 汇总了用于测试的设备。

表 3-2. 测试设备汇总

| 设备 | 型号或说明 |
|-----------|---------------------------|
| 示波器 | Tektronix DPO 2024B |
| 直流电源 | Chroma 62050P-100-100 |
| 电子负载 | Chroma 63106 |
| 万用表 | Agilent 34401A |
| 直流电源 | GW INSTRON GPS-3303C |
| 通信适配器 | 德州仪器 (TI) EV2300 或 EV2400 |
| MSPM0 编程器 | XDS110 |
| ESD 仿真器 | NoiseKen ESS-S3011 |

首次调试电路板时，建议使用 [Battery Management Studio \(bqStudio\)](#) 软件。

3.2 软件要求

3.2.1 MSPM0 软件入门

使用此 TI 参考设计需要 MSPM0 开发环境。本节包含将 Code Composer Studio™ 与 MSPM0 SDK 配合使用的步骤。使用 Arm® Keil® 微控制器开发套件 (MDK) 或 IAR 软件开发 MSPM0 软件也需要安装系统配置工具。

使用以下下载链接访问该软件：

- CCS : [Code Composer Studio 集成开发环境 \(IDE\)](#)。
- MSPM0 SDK : [MSPM0 软件开发套件 \(SDK\)](#)。
- SysConfig : [系统配置工具](#)。

有关详细的环境设置指南，另请参阅 [MSPM0 设计流程指南](#) 应用报告。

安装 MSPM0 SDK 和 CCS 后，请在以下位置找到 MSPM0 SDK 的源代码：

```
<install_location>\ti\mspm0_sdk_2_03_00_02\examples\nortos\LP_MSPM0G3519\demos\bq769x2_TIDA010247
```

3.2.1.1 下载并安装电路板测试所需的软件

1. 通过 TI 提供的链接下载 [MSPM0-SDK](#) msp0_sdk_2_03_00_02 或更高版本的软件，并进行安装。
2. 下载并安装 [CCS](#) (对于 CCSTheia 版本 1.5.1 或更高版本) 和 CCS 版本: 12.8.1 或更高版本。
3. 下载并安装版本为 1.21.2 或更高版本的 [SYSCONFIG](#)，此步骤是可选操作，如果在 Keil MDK 或 IAR 中开发 MSPM0，则必须通过 TI 提供的链接安装 SYSCONFIG 的独立版本。如果在 CCS 中开发 MSPM0，请在 CCS 安装期间点击 MSPM0 支持选项，SYSCONFIG 会随 CCS 安装自动安装。

安装完成后，打开 CCS 并创建一个新的工作区以导入工程。

3.2.1.2 将工程导入 CCS

打开 CCS 并选择 *Project* → *Import CCS Project*，浏览到 MSPM0 SDK 中的 *bq769x2_TIDA010247* 文件夹。图 3-1 展示了 CCS 的“Import CCS Projects”窗口。选择该工程并点击 *Finish* 按钮以导入该工程。

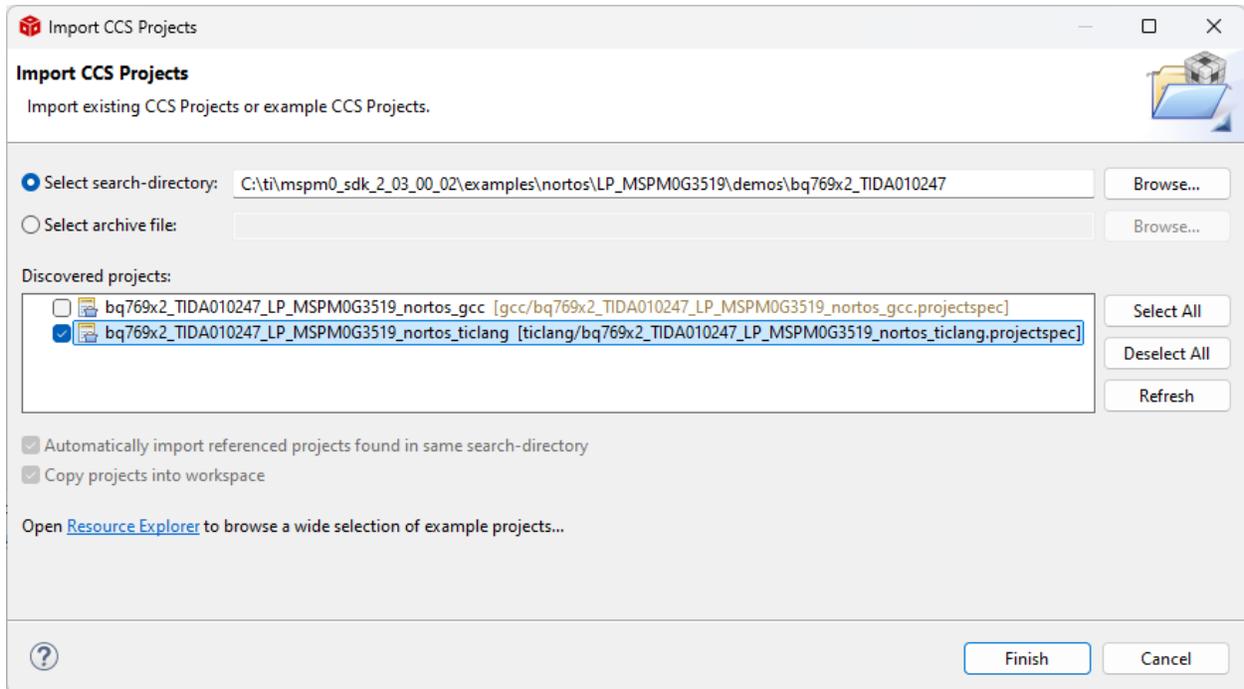


图 3-1. 导入工程

3.2.1.3 编译工程

点击工程名称或打开工程 *main.c* 文件以激活该工程。点击 *Build* 按钮或选择 *Project* → *Build Project* 菜单。编译完成后生成 *.out* 文件，该文件显示在 CCS 的 *Console* 窗口中。图 3-2 展示了生成的工程构建结果。

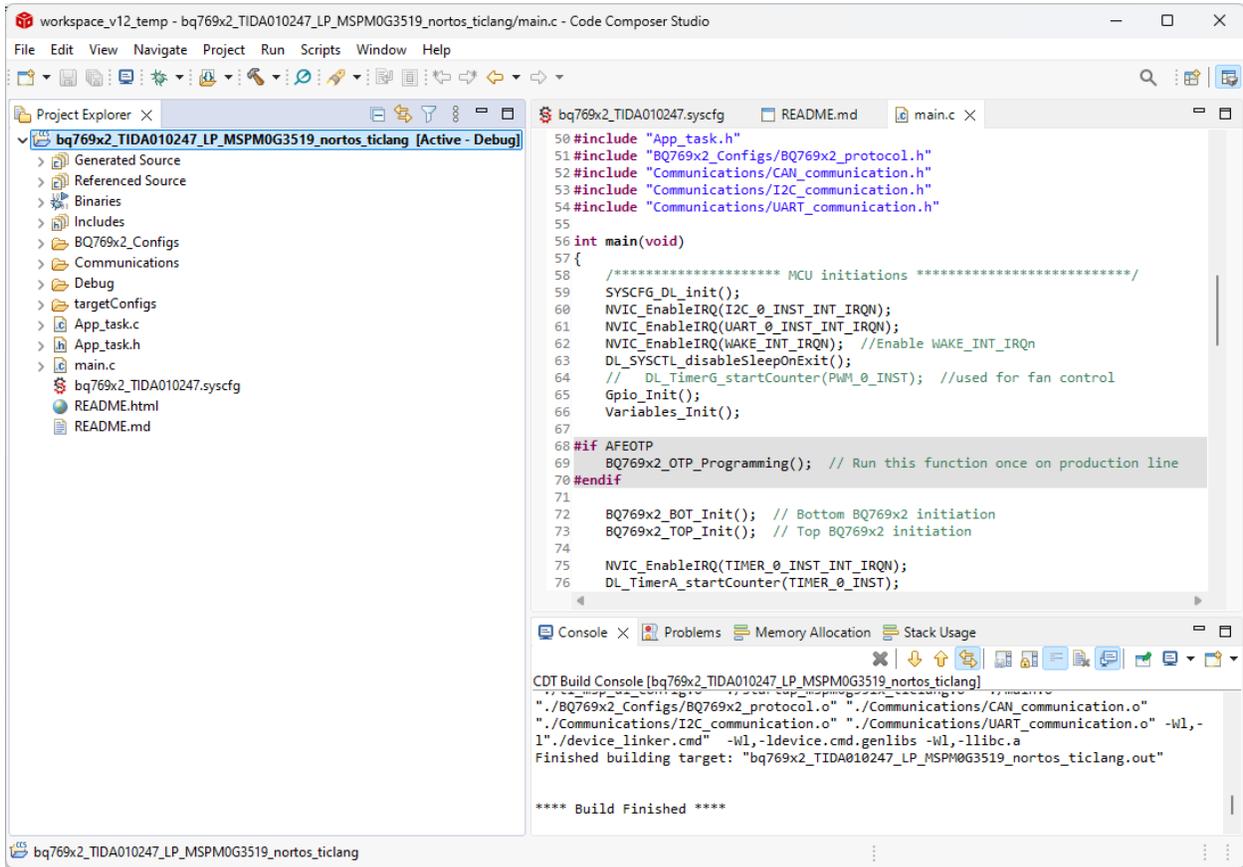


图 3-2. 构建工程

3.2.1.4 下载映像并运行

点击 *Run* → *Debug* 菜单选项来下载并调试 CCS 中的软件。图 3-3 展示了“Debug”窗口。点击 *Run* 按钮以开始运行该软件。基本函数在 `BMU_Normal_Mode()` 函数中实现。

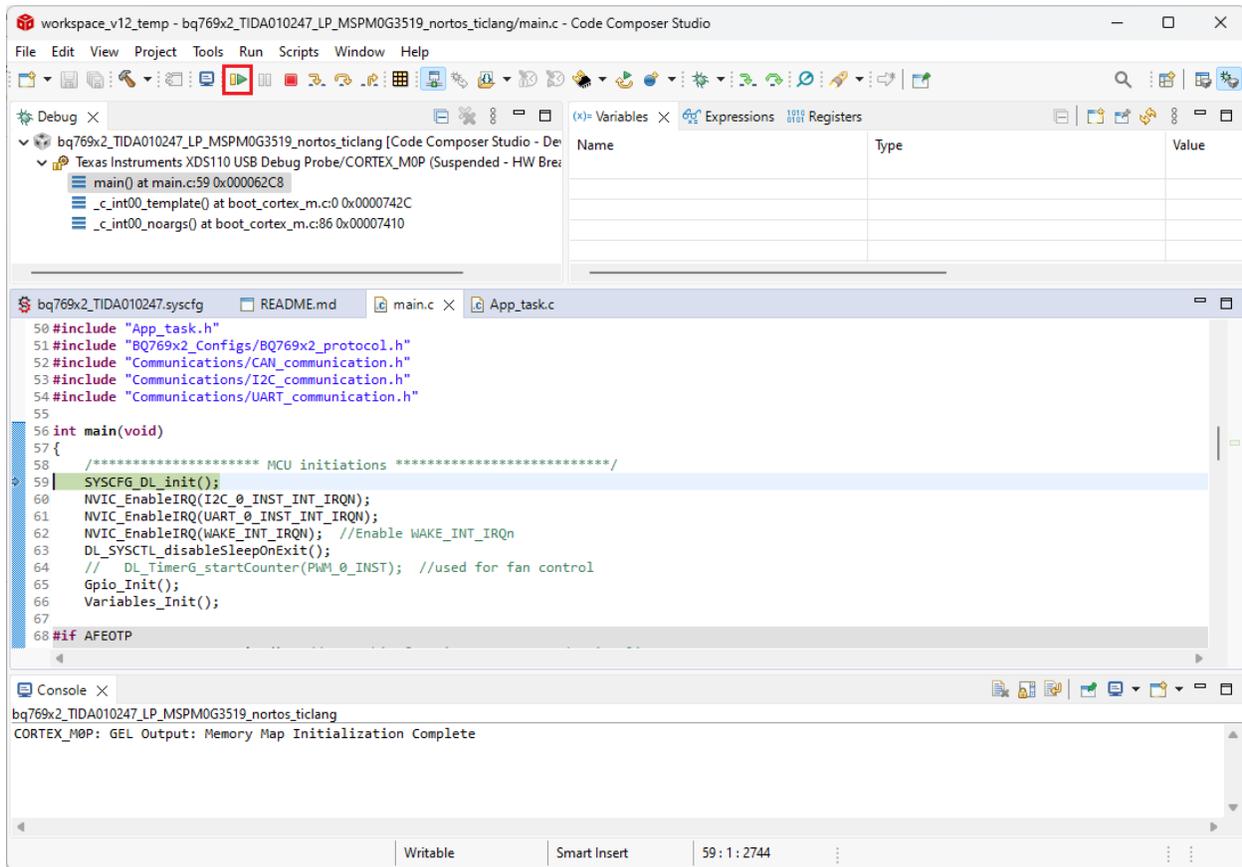


图 3-3. 调试工程

3.2.2 软件函数列表

本节介绍了软件界面的两个部分，即 [Driverlib 函数列表](#) 和 [应用函数列表](#)。

3.2.2.1 Driverlib 函数列表

Driverlib 函数是基于 TI driverlib 的低级外设驱动程序。

CAN_ID_Init_on_Startup

在系统上电后自动初始化 CAN ID。

语法

```
void CAN_ID_Init_on_Startup(void);
```

参数

Void。

返回值

Void。

说明

当系统上电且外设初始化时，CAN 外设无法直接工作。

以下是自动 CAN ID 初始化的步骤：

1. 主机 (BCU) 将唤醒模式发送到节点 #1 wake_in 引脚。
2. 节点 1 接收 wake_in IO 高电平，并在 CAN 总线消息上设置 ID 命令和数据，然后设置属于节点 1 的 CANID。

CAN_ID_Init_on_Startup (续)

在系统上电后自动初始化 CAN ID。

3. 节点 1 从 wake_out IO 发送唤醒模式以唤醒节点 2，并向节点 2 发送设置 ID 命令与 CANID+1 CAN 消息。
4. 节点 2 接收唤醒模式，设置 ID 命令、CAN 总线消息上的数据，然后设置属于节点 2 的 CANID+1。
5. 其他节点按照相同的步骤来完成自动 CAN ID 设置。

CAN_Write

根据参数将 BQ 器件数据发送到 CAN 总线。

语法

```
void CAN_Write(uint32_t CANid, uint8_t BQid, uint8_t cmd, uint32_t length, uint16_t *data);
```

参数

| | |
|--------|-----------------|
| CANid | CAN 消息 ID |
| BQid | BQ 器件 ID |
| cmd | CAN 消息指令 |
| length | 数据长度 |
| 指令 | 要通过 CAN 发送的数据地址 |

返回值

Void。

说明

该函数将 BQ 器件数据发送到 CAN 总线。

按顺序打包函数参数并将其传递给 *CANTxMsgSendPoll* 函数。发送函数 *CANTxMsgSendPoll* 的 driverlib 级别 CAN 使用 CPU 轮询来发送数据。

CANprocessCANRxMsg

根据 CAN 消息 ID 和命令处理接收到的 CAN 消息。

语法

```
void CANprocessCANRxMsg(void);
```

参数

Void。

返回值

Void。

说明

1. 首先，该 API 检查 CAN 接收消息 FIFO 0 新消息标志：MCAN_IR_RF0N_MASK。
2. 如果 CAN 接收 FIFO 中有新消息，则将该消息读取到 RAM 中，并将 RxFIFOAck 写入 CAN。
3. 将 CAN id 转换为 uint32_t id 格式。
4. 使用 switch-case 函数，根据 ID 和命令处理 CAN 消息。

此演示代码在上电初始化阶段执行 CAN id 自动设置函数。

I2C_WriteReg

根据 I2C 外设器件的寄存器地址和数据发送 I2C 数据。

语法

```
void I2C_WriteReg(uint8_t reg_addr, uint8_t *reg_data, uint8_t count);
```

参数

| | |
|-----------|--------------------|
| reg_addr | 器件的 I2C 外设寄存器地址 |
| *reg_data | 指向要通过 I2C 发送的数据的指针 |
| count | reg_data 的长度 |

返回值

Void。

说明

1. 将 reg_addr 复制到 I2Ctxbuff[0]。
2. 将 *reg_data 的计数复制到 &I2Ctxbuff[1]。
3. 使用 I2Ctxbuff 填充 I2C FIFO。
4. 等待 I2C 传输完成并在 I2C 中断处理程序中再次填充 FIFO。
5. 退出前刷写 I2C TXFIFO。

用户可以通过修改全局变量 `I2C_TARGET_ADDRESS` 来更改 I2C 外围设备地址。

I2C_ReadReg

读取 I2C 外设器件的寄存器地址。

语法

```
void I2C_ReadReg(uint8_t reg_addr, uint8_t *reg_data, uint8_t count);
```

参数

| | |
|-----------|-------------------|
| reg_addr | 器件的 I2C 外设寄存器地址 |
| *reg_data | 指向要从 I2C 读取的数据的指针 |
| count | reg_data 的长度 |

返回值

Void。

说明

此 API 首先启动 I2C 写入以发送要读取的 I2C 外设器件寄存器地址，然后启动 I2C 读取操作。

1. 使用 reg_addre 填充到 TXFIFO 且长度设置为 1，开始 I2C 控制器传输。
2. I2C 写入操作后刷写 TXFIFO。
3. 开始 I2C 控制器传输以从 I2C 目标读取数据，长度设置为 count。
4. 等待 RXFIFO 数据就绪并将信息读取到 reg_data，读取数据计数时退出。

用户可以通过修改全局变量 `I2C_TARGET_ADDRESS` 来更改 I2C 外围设备地址。

RS485_Send

将 BQ 器件数据发送到 UART、RS-485 接口

语法

```
void RS485_Send(uint8_t BQid, uint8_t cmd, uint16_t *data, uint32_t length);
```

参数

| | |
|------|----------------------|
| BQid | BQ 器件 ID，指示顶部或底部 AFE |
|------|----------------------|

RS485_Send (续)

将 BQ 器件数据发送到 UART、RS-485 接口

| | |
|--------|----------------------------|
| cmd | 消息命令，指示发送的数据类型 |
| 指令 | 指向要通过 UART、RS-485 发送的数据的指针 |
| length | 数据长度 |

返回值

Void。

说明

1. 启用 RS485 收发器 TX 模式。
2. 将 BQid、cmd 和数据复制到 RS485_data 缓冲区。
3. 设置 RS485 结构变量 *RS485_STATUS_TX_STARTED*。
4. 使用 *gRS485.txPacket* 填充 UART TXFIFO。
5. 启用 UART、RS-485 TX 中断。
6. 在中断中填充 UART、RS-485 TXFIFO。
7. 等待传输完成。
8. 将 *gRS485.status* 设为 *RS485_STATUS_IDLE*。

RS485_Receive

从 UART、RS-485 接口读取数据

语法

```
void RS485_Receive(uint8_t *RS485_data, uint32_t RS485_count);
```

参数

| | |
|-------------|---------------------|
| RS485_data | 用于保存 RS485 数据的数据缓冲区 |
| RS485_count | 要接收的数据长度 |

返回值

Void。

说明

1. 将 *gRS485.status* 设为 *RS485_STATUS_RX_STARTED*。
2. 启用 UART、RS-485 RX 中断。
3. 等待中断中完成接收。
4. 禁用 TX 中断并将 *gRS485.status* 复位为 *RS485_STATUS_IDLE*。
5. 将 RS485 数据复制到 RS485_data。

3.2.2.2 应用函数列表

应用函数由该设计的测试要求定义。

Temp_Mux_Polling

更新温度测量值。

语法

```
void Temp_Mux_Polling(void);
```

参数

Void。

返回值

Void。

说明

该函数是为热敏电阻多路复用器电路创建的。在使用该函数之前必须设置 **TMP_MUX_Enabled** 符号。该函数需要在读取温度测量数据之前更新每个 AFE 的 **FULLSCAN** 标志。**FULLSCAN** 标志由函数 **BQ769x2_ReadFULLSCAN()** 更新，并且必须在短时间间隔（如 1ms）内运行。例如，此设计在 **main while()** 中读取 **FULLSCAN** 标志。当设置 **FULLSCAN** 标志时，将读取温度测量数据，然后通过写入警报状态寄存器来清除该标志。数据以 mV 为单位读取，因此需要使用热敏电阻查询表或多项式计算将电压转换为温度。

BatteryDataUpdate_32s

更新了电芯电压、电池包电流、电池状态和保护状态。

语法

```
void BatteryDataUpdate_32s(void);
```

参数

Void。

返回值

Void。

说明

此函数每 100ms 更新一次 32 节串联电池的电压和电池包电流。电池状态、保护状态和 FET 状态每 500ms 更新一次。直接命令依次读取 32 节串联电池电压。更改计时器周期会改变数据更新周期。

备注

该设计使用相同的 I2C 外设，因此不能同时读取底部 AFE 和顶部 AFE 的数据。

BQ769x2_OTP_Programming

OTP 底部 AFE I2C 地址设置为 0x20，REG1 设置为 3.3V。

语法

```
void BQ769x2_OTP_Programming();
```

参数

Void。

BQ769x2_OTP_Programming (续)

OTP 底部 AFE I2C 地址设置为 0x20，REG1 设置为 3.3V。

返回值

Void。

说明

此函数展示如何针对特定配置对 BQ76972 进行 OTP 设置。在发生 OTP 之前，必须向 BQ76972 BAT 引脚施加 10V 至 12V 电压。此函数在成功写入 OTP 后设置 OTP_write_success_flag。另外，蓝色 LED 闪烁表示写入成功。

Check_Signal_Pattern

检查 WAKEIN 信号模式。

语法

```
bool check_signal_pattern();
```

参数

Void。

返回值

在接收到正确的唤醒信号时，gWAKEINMCU 返回 true，如图 2-9 所示。
在接收到错误的唤醒信号时，gWAKEINMCU 返回 false。

说明

该函数会检查高电平和低电平电压持续时间并为 CAN 寻址函数返回一个标志。

BMU_FET_Test

测试保护 FET 的导通和关断。

语法

```
void BMU_FET_Test(void);
```

参数

Void。

返回值

Void。

说明

该函数在 GPIO 中断时运行，仅用于测试目的。在测试此函数之前，启用 AFE_MOS_TEST。外部控制信号可用于触发 GPIO 中断，以测试主机控制的 MOSFET 的开关操作。PB.23 用作示例，上升沿是触发源。

3.2.3 软件工作流程

提供的软件示例展示了如何在 ESS 应用中使用该设计。图 3-4 展示了软件流程图。在使用该软件之前，必须将底部 AFE 编程为不同的 I2C 地址，与此流程图中的 OTP 示例相同。

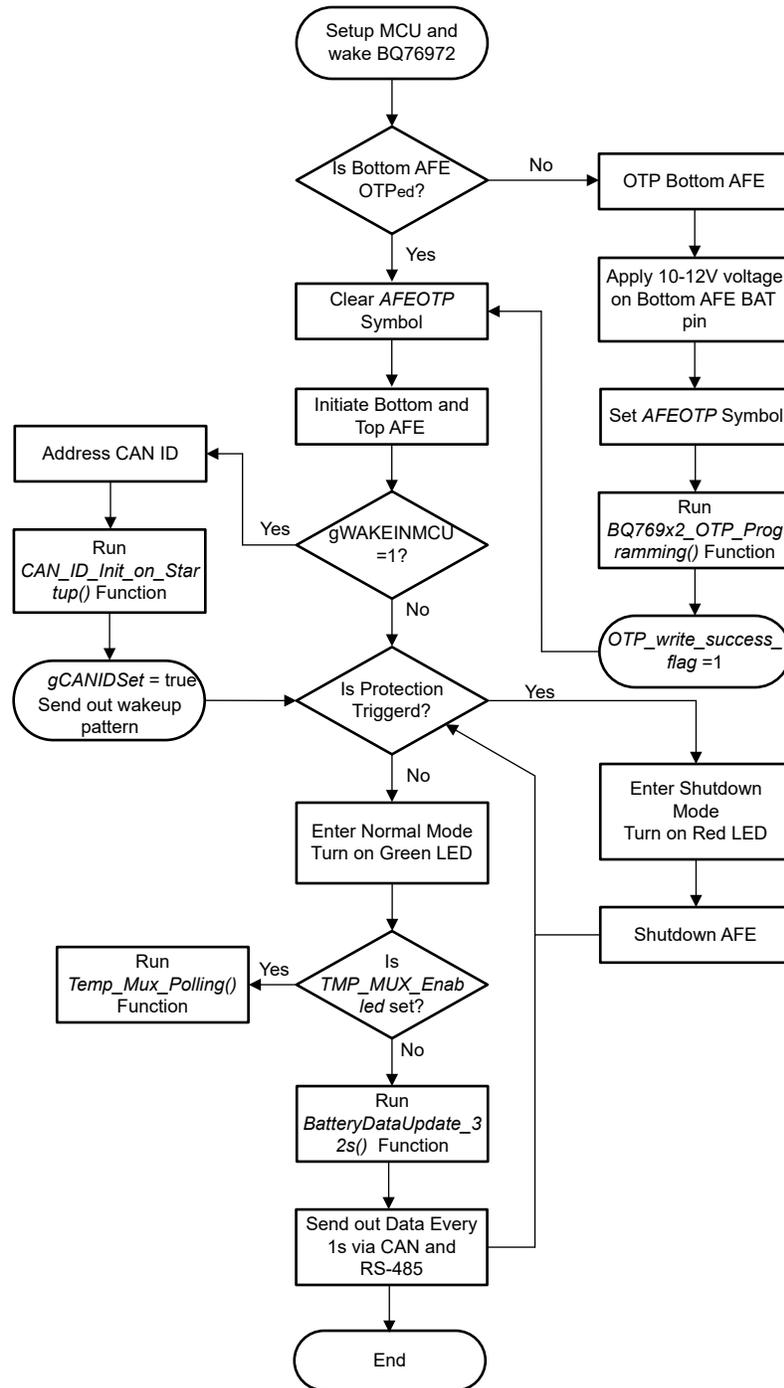


图 3-4. 软件流程图

3.3 测试设置

运行此设计板之前，请执行以下程序。该设计采用 32 芯串联电池包配置。该电路板使用并联的直流电源和 2700 μ F 电解电容进行测试，从而仿真整个电池组。使用 20 个串联的 200 Ω 电阻器对电池包电压进行分压，并仿真 32 个串联的电池电芯。

- 直流电源 1 配置：96V，3A
- 直流电源 2 配置：双通道 48V、0.5A
- 电子负载配置：80V 恒压 (CV) 模式

图 3-5 展示了充电过程设置示例。

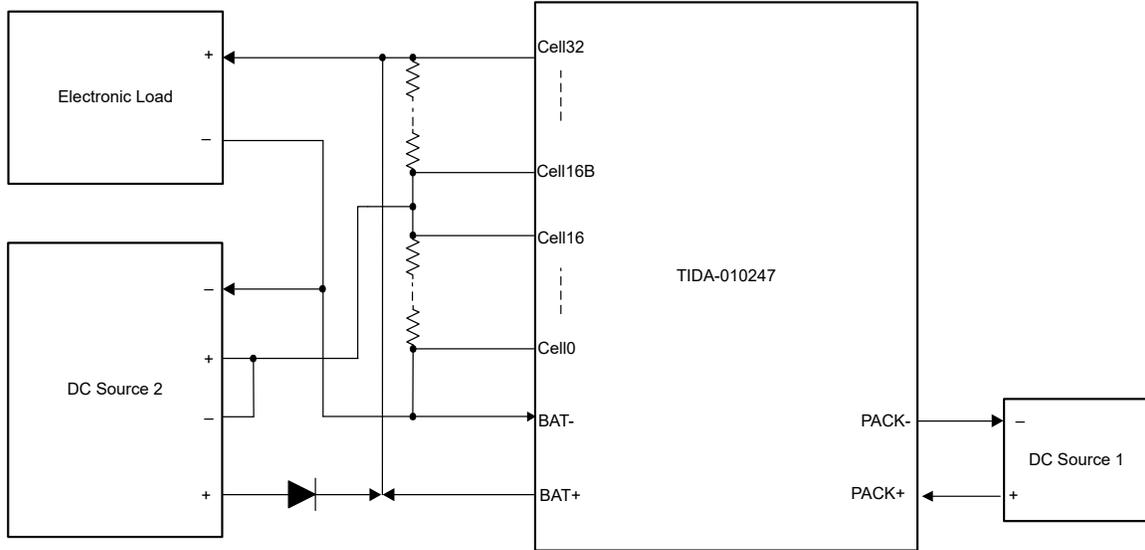


图 3-5. 充电设置

图 3-6 展示了使用下列条件时的放电过程设置示例。

- 直流电源配置：96V，100A
- 电子负载配置：恒流 (CC) 模式

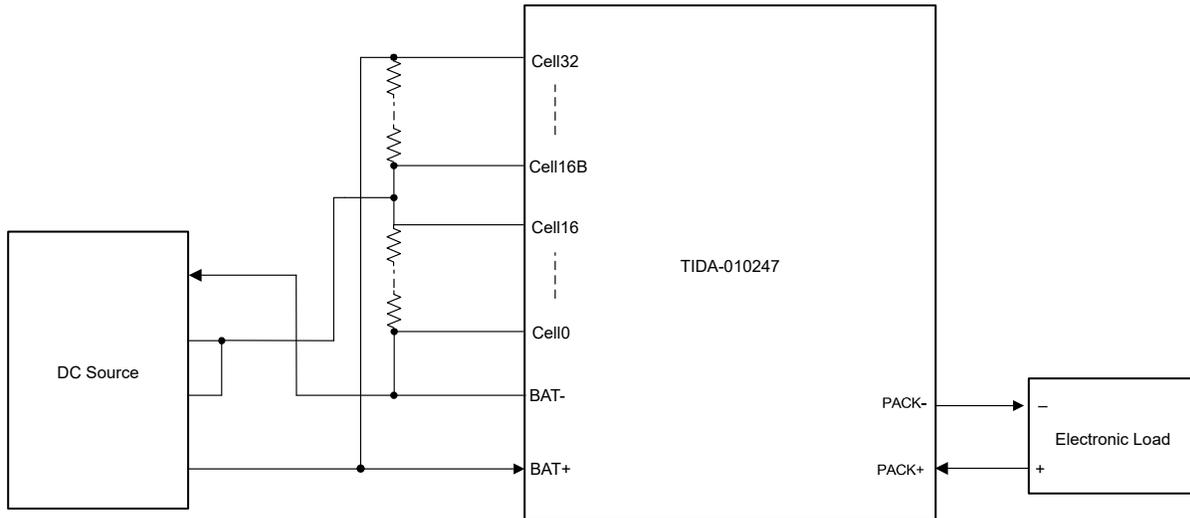


图 3-6. 放电设置

3.4 测试结果

3.4.1 电芯电压精度

该设计仅通过从报告的电芯测量结果中减去固定的每电芯偏移值来调整固定偏移。由于在使用 LFP 电池电芯时，BQ76972 在 25°C 下已实现 $\pm 1.8\text{mV}$ 的精度，在 -40°C 至 85°C 下已实现 $\pm 4.5\text{mV}$ 的精度，因此该设计不进行电芯偏移校准来进一步提高电芯电压精度。电芯电压精度与 BQ76972 完全相同。另请参阅 [BQ76972 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 3 至 16 节串联高精度电池监测器和保护器](#) 数据表。

3.4.2 电池包电流精度

此设计使用一个 $0.3\text{m}\Omega$ 、15W、25PPM 分流电阻器来测量电池包电流。按照 [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#) 中校准部分的指南，校准电路板偏移量。然后，使用 6A 放电电流并遵照本应用手册的指南，校准电流增益。使用一次性可编程 (OTP) 将电路板偏移量和电流增益值写入底部 BQ76972；否则 MCU 必须在每次底部 BQ76972 从关断模式唤醒时将上述数据存储并写入该器件。图 3-7 展示了室温下的电池包电流精度数据。当放电电流低于 5A 时，最大电流误差低于 20mA；当放电电流高于 5A 时，最大电流误差为 0.2%。

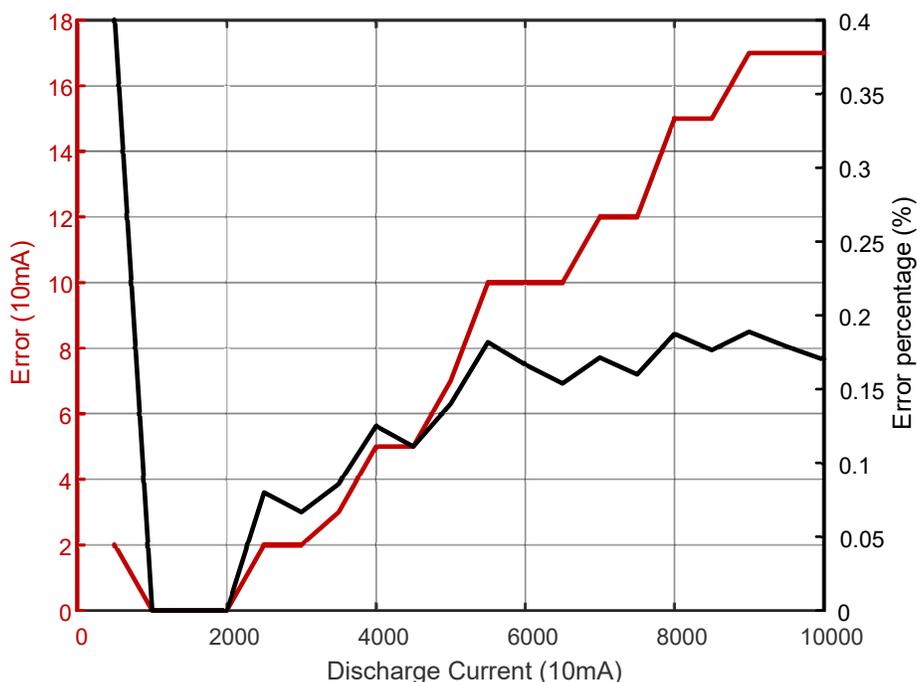


图 3-7. 电池包电流精度

3.4.3 辅助电源和系统电流消耗

凭借辅助电源策略，此设计在关断模式下具有非常低的电流消耗。由于采用堆叠式架构，系统总功耗是从电池组顶部流出的电流和返回电池负端口的电流的最大值。电流值可以通过 10Ω 电阻器两端的电压来测量。

此外，该设计减小了两个堆叠组之间的电流消耗差，避免在电池组之间进一步进行电芯均衡。从 $I_{\text{cell}32}$ 减去 I_{GND} 可计算出电流消耗差。图 3-8 展示了测试电流消耗的设置，表 3-3 展示了系统平均电流消耗的测试结果和电池组间平均电流差。

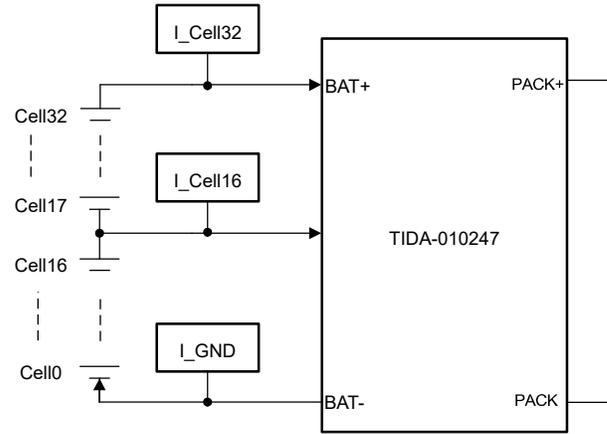


图 3-8. 电流消耗测试设置

表 3-3. 电流消耗

| 说明 | | I_{cell32} | I_{cell16} | I_{GND} | 电流差 (μA) | 总电流 (μA) |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 正常模式 (MOSFET 关断) | 电流 (μA) | 4550 | 550 | 4565 | 15 | 4565 |
| 正常模式 (MOSFET 导通) | 电流 (μA) | 4504 | 550 | 4484 | 20 | 4504 |
| 运输模式 | 电流 (μA) | 7 | 0 | 7 | 0 | 7 |

这些数据在低电压 ESS 的电源轨配置下进行测试，因为另一种配置是由外部 24V（而不是电池）供电。[INA229_239EVM](#) 和一个 10Ω 电阻器用于测试电流。无论充电和放电 MOSFET 是导通还是关断，正常模式下的总电流消耗均小于 $4.6mA$ 。组间电流差少于 $20\mu A$ 。运输模式的电流消耗小于 $10\mu A$ 。

图 3-9 展示了辅助电源启动的测试结果。

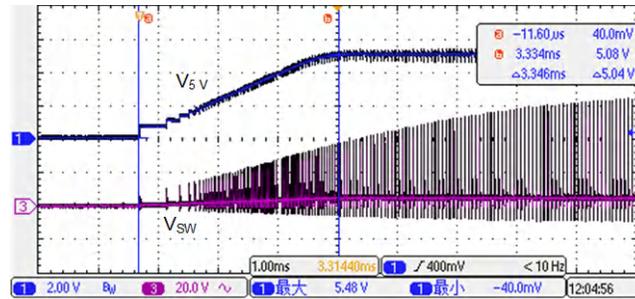


图 3-9. 直流/直流转换器启动

此设计还考虑了直流/直流转换器输出短路的情况。图 3-10 展示了直流/直流转换器短路的测试结果。当输出短路时，MCU 会禁用直流/直流转换器，防止出现过热。

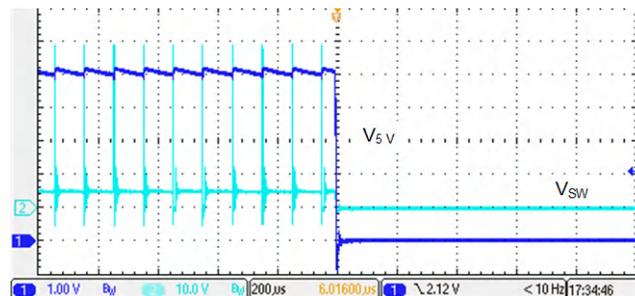


图 3-10. 直流/直流转换器输出短路

3.4.4 保护

该设计集成了全套电池电芯保护功能，包括：电芯过压、电芯欠压、两级过流放电、过流充电、放电短路、过热和欠温保护。此外，该设计还可监测多种系统级故障，包括：电芯开路、主机看门狗、充电和放电 MOSFET 故障、MOSFET 过热等。在 TI 实验室针对其中一些保护进行了测试。

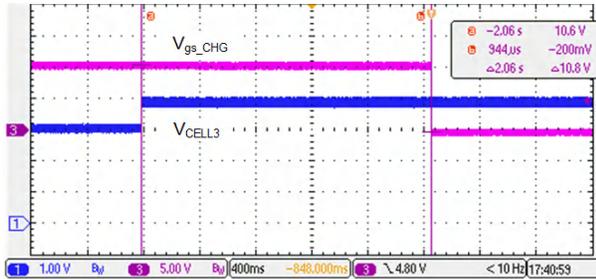


图 3-11. 电芯过压保护

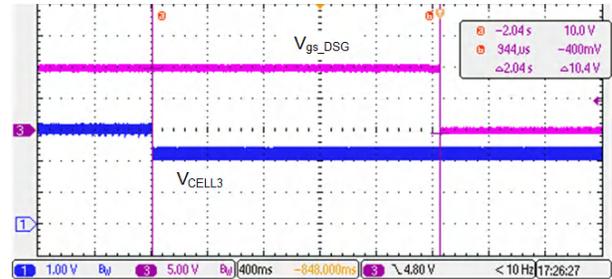


图 3-12. 电芯欠压保护

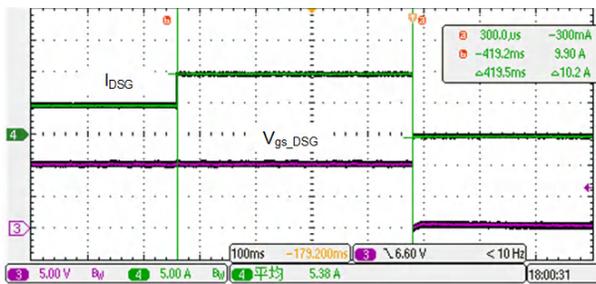


图 3-13. 放电过流保护

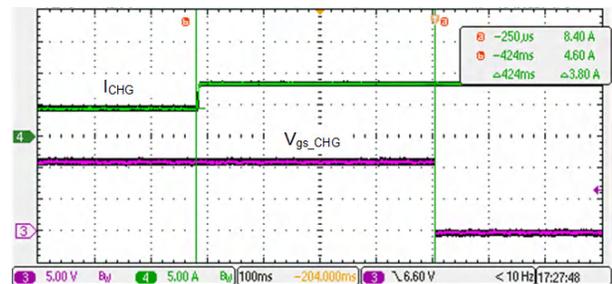


图 3-14. 过流充电保护

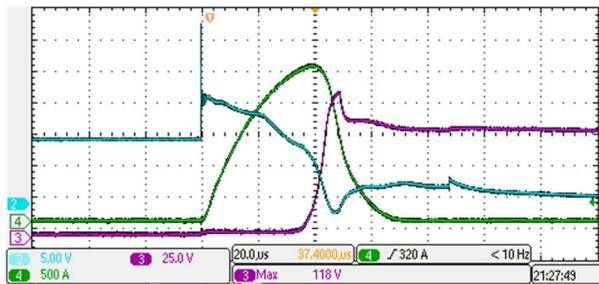


图 3-15. 短路放电保护

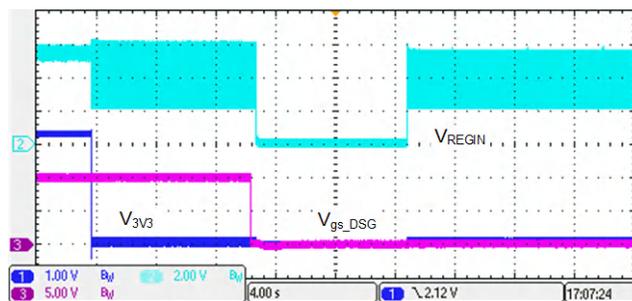


图 3-16. 3.3V 短路和 HWD 保护

当 3.3V 短路时，MCU 断电，并且两个 BQ76972 器件会在延迟一段时间后检测到主机看门狗 (HWD) 保护。由于 TIDA-010247 将 MCU 配置为进入低功耗模式（不与 BQ76972 通信以节省功率）后每 5s 唤醒一次，因此在 10s HWD 延迟配置下，会有 5s 至 10s 的延迟。

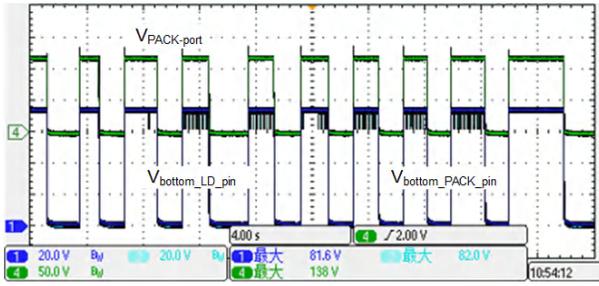


图 3-17. 120V On-PACK 端口 - 底部 AFE 最大电压

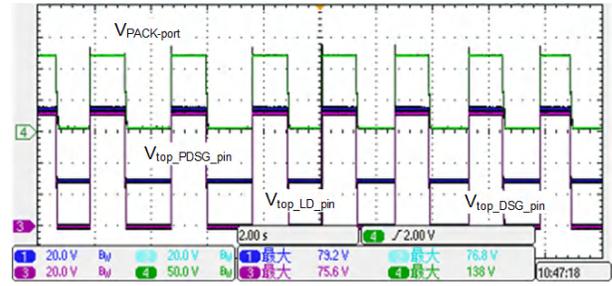


图 3-18. 120V On-PACK 端口 - 顶部 AFE 最大电压

120V On-PACK 端口测试在 CHG 和 DSG MOSFET 均关断的情况下执行。

3.4.5 工作模式转换

此设计具有 3 种工作模式：正常模式、待机模式和运输模式。当电池包充电或放电时，则处于正常模式。在既不充电也不放电时，电池包处于待机模式，等待连接充电器或负载。关断模式是一种电流消耗超低的模式，可以节省电能并有助于在电池组或电芯电压很低时，避免电池过放电。图 3-19 展示了不同工作模式的转换。

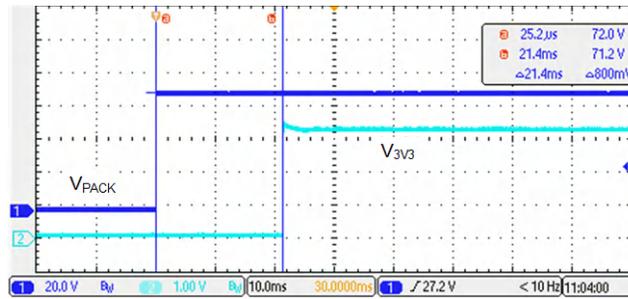


图 3-19. 运输模式至正常模式

当 TIDA-010247 处于运输模式并且两个 BQ76972 器件都处于关断模式时，底部 BQ76972 会检测到 PACK 侧连接的充电器并唤醒至正常模式，从而使 REG1 或 REG2 为 MCU 供电。

3.4.6 热敏电阻多路复用器

图 3-20 展示了热敏电阻多路复用器控制信号 A 和 B 自动按顺序 00-10-01-11 重复。此设计需要 320ms 来测量所有 17 个热敏电阻的温度。

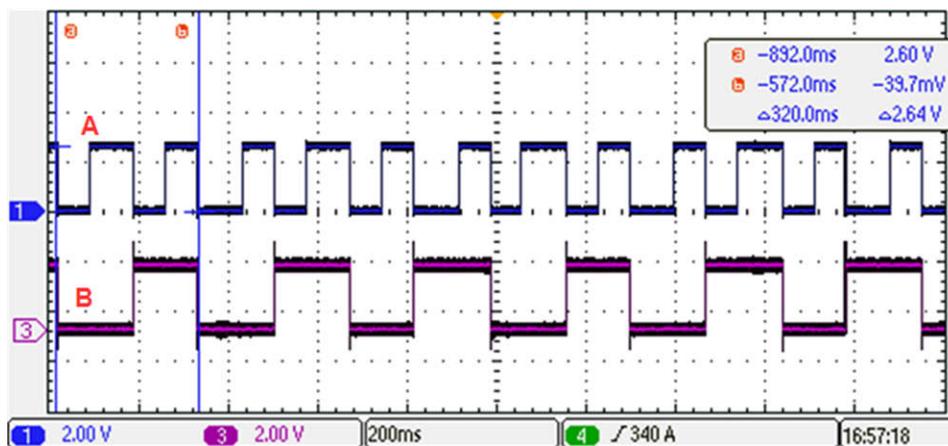


图 3-20. 热敏电阻多路复用器控制信号

按照 [如何使用低成本 TMP6x 线性热敏电阻在整个温度范围内实现 \$\pm 1^\circ\text{C}\$ 精度或更高精度](#) 应用手册中概述的步骤，可以通过 TMP6x 线性热敏电阻以低成本轻松实现高精度和精密温度测量。

图 3-21 展示了 20°C 至 125°C 范围内的温度测量精度。测试方法是热敏电阻浸泡在油浴中并使 BMU 达到室温。当温度高于 -20°C 时，温度测量误差低于 1°C ；当温度低于 -20°C 时，温度测量误差低于 2.5°C 。

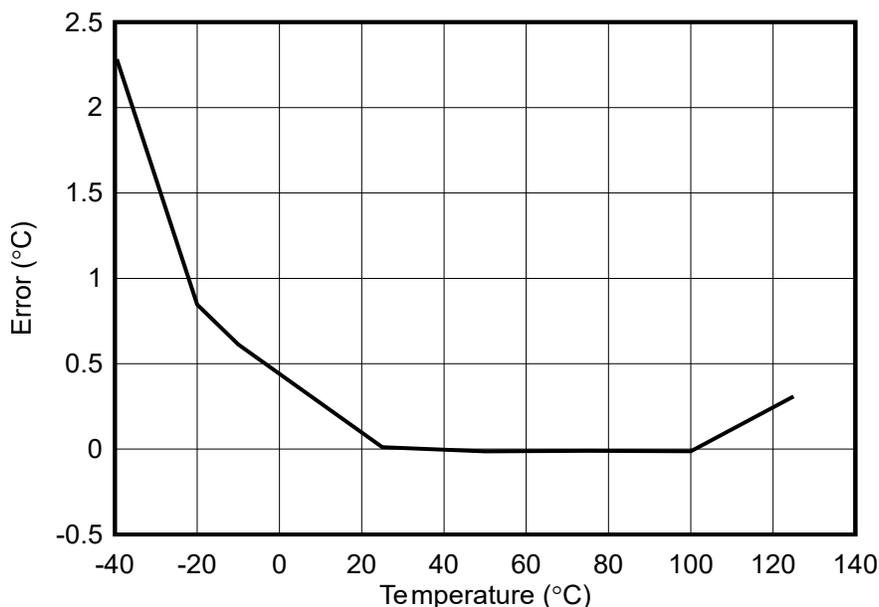


图 3-21. 温度精度

3.4.7 ESD 性能

在第三方认证实验室中根据 IEC 61000-4-2 标准对该设计的 ESD 性能进行了测试，并连接了真实的 32 节串联电池包。表 3-4 列出了 ESD 接触放电测试的测试结果。

表 3-4. ESD - 接触放电

| 电压 | 测试的端子 | | | | | | | | | | |
|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|------|
| | PACK+ | PACK - | CAN0H | CAN0L | CAN1H | CAN1L | RS-485A | RS-485B | WakeIn | WakeOut | 风扇控制 |
| 2kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| -2kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| 4kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| -4kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| 8kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| -8kV | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |

3.4.8 浪涌抗扰度

该设计按照 IEC61000-4-5 中规定的测试程序展示了对浪涌的抗扰性。这些测试是使用以下指定测试级别在直流电源端口和通信端口上进行的：

- 对于直流电源端口 - PACK+ 和 PACK - ：测试级别 4、±2kV 线对线以及 ±4kV 线对地
- 对于通信端口 - CAN 和 RS-485：测试级别 3、±1kV 线对线和 ±2kV 线对地

该器件已在第三方认证实验室中通过测试，连接了真实的 32 节串联电池包。表 3-5 列出了测试结果。

表 3-5. 浪涌性能

| 开路测试电压 | | 测试的端子 | | | | | | | |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| | | PACK+ | PACK - | CAN0H | CAN0L | CAN1H | CAN1L | RS-485A | RS-485B |
| 线对线 | 1kv | 不适用 | | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| | - 1kv | 不适用 | | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| | 2kV | 通过 | 通过 | 不适用 | | | | | |
| | -2kV | 通过 | 通过 | 不适用 | | | | | |
| 线对地 | 2kV | 不适用 | | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| | - 2kv | 不适用 | | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 | 通过 |
| | 4kV | 通过 | 通过 | 不适用 | | | | | |
| | -4kV | 通过 | 通过 | 不适用 | | | | | |

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-010247](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010247](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

[EV2400](#)

基于 USB 的电池电量监测计 PC 接口板评估模块

[LM5169 快速入门计算器](#)

LM5163 和 LM5164 转换器快速入门设计工具

[BQ769X2-THERMISTOR-COEFF-CALCULATOR](#)

BQ76952、BQ76942 热敏电阻温度优化器 - 计算 T 范围的热敏电阻系数

[INA229_239EVM](#)

INA229 和 INA239 评估模块

软件

[BQSTUDIO](#)

Battery Management Studio (bqStudio) 软件

[CCSTUDIO](#)

Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE)

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI), [BQ76972 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 3 至 16 节串联高精度电池监测器和保护器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#)
- 德州仪器 (TI), [如何为高电芯数工业应用堆叠电池监测器 E2E™ 论坛](#)
- 德州仪器 (TI), [将具有超低静态电流的直流/直流降压转换器用于工业电池包应用应用简报](#)
- 德州仪器 (TI), [如何使用低成本 TMP6x 线性热敏电阻在整个温度范围内实现 ±1°C 精度或更高精度应用手册](#)

4.4 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](#)。

4.5 商标

TI E2E™, Code Composer Studio™, and E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

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

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

KIAN LIN 是 SEM 工业能源基础设施团队的系统工程师，专注于电池包和储能系统应用，旨在应对工业电池包设计挑战。

6 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 (December 2024) to Revision B (July 2025) Page

- 将图 3-7 中的 x 轴标签从 mA 更改为 10mA。 24
-

Changes from Revision * (December 2022) to Revision A (December 2024) Page

- 该参考设计使用新款电池监控器器件 BQ76972 和微控制器 MSPM0G3519 进行了更新。此设计还为堆叠高压 (高达 1500V) 储能站应用的 BMU 添加了 CAN 接口。 1
-

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