

# 采用高侧 N-MOSFET 的堆叠式 BQ769x2 设计注意事项



Ryan Tan

Systems and Engineering Marketing

## 摘要

单个 BQ769x2 系列电池监控器最多可支持 16 个电池组，这对于 36V 和 48V 应用来说已经足够。对于 60V 及更高电压的电池组，需要将两个 BQ769x2 系列监控器堆叠。本文档介绍了如何为 BQ769x2 监控器系列堆叠器件，以及如何利用集成电荷泵驱动高侧 N 沟道 MOSFET。本文档还分析了关键设计注意事项，确保快速稳定的 MOSFET 开关时间，更大限度地减小两个堆叠组之间的电流差，并在堆叠的 BQ769x2 器件和主机 MCU 之间轻松进行通信设计。

## 内容

1 引言.....	2
2 堆叠式 AFE 通信.....	3
2.1 数据通信.....	3
2.2 控制信号.....	4
3 高侧 N 沟道 MOSFET.....	5
3.1 放电 MOSFET 导通和关断过程.....	5
3.2 PACK 端口高电压.....	5
3.3 快速关闭放电 MOSFET.....	6
4 堆叠组的电流消耗.....	8
5 总结.....	10
6 参考文献.....	10

## 插图清单

图 1-1. TIDA-010247 方框图.....	2
图 2-1. 与顶部和底部 BQ769x2 进行通信.....	3
图 2-2. DDSG 电平转换器电路.....	4
图 3-1. TIDA-010247 中的高侧 MOSFET 驱动电路.....	5
图 3-2. TIDA-010247 SCD 保护.....	6
图 3-3. 在 Q49 处于 SCD 状态时关闭放电 MOSFET.....	6
图 3-4. 在 Q48 处于 SCD 状态时关闭放电 MOSFET.....	7
图 4-1. TIDA-010247 辅助电源策略.....	8
图 4-2. 用于检测 TIDA-010247 中充电器或负载的 DET 电路.....	8
图 4-3. 使用隔离式电源模块为 ISO1640 供电.....	9
图 4-4. 与 ISOW7741 进行隔离式 SPI 通信.....	9

## 表格清单

表 2-1. 不同 BQ769x2 版本的默认配置.....	3
表 4-1. ISO1640 电源电流特性 ( $3V \leq VCC1$ , $VCC2 \leq 3.6V$ ) .....	9

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

由于重量限制和更长的寿命需求，电动摩托车、轻型电动车辆和园艺工具电池组的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 36V 或 48V 变为 60V 或 72V，甚至更高。对于 60V 及更高电压的电池组，需要将两个 BQ769x2 系列监控器堆叠。

电池组的一项关键要求是如何在电池组使用寿命期间实现安全使用。堆叠的 BQ769x2 系列监控器架构带来了一些挑战，例如，如何监控所有电池的信息并检测不安全的工作条件，以及如何控制开关以保护电池组免受危险应用场景的影响。TI 发布了 TIDA-010247 参考设计，使用高侧 N-MOSFET 控制的堆叠 BQ769x2 系列监控器电池组设计。图 1-1 展示了 TIDA-010247 方框图。本文档介绍了堆叠式 BQ769x2 系列监控器架构中的常见设计挑战，并介绍了如何应对这些挑战。

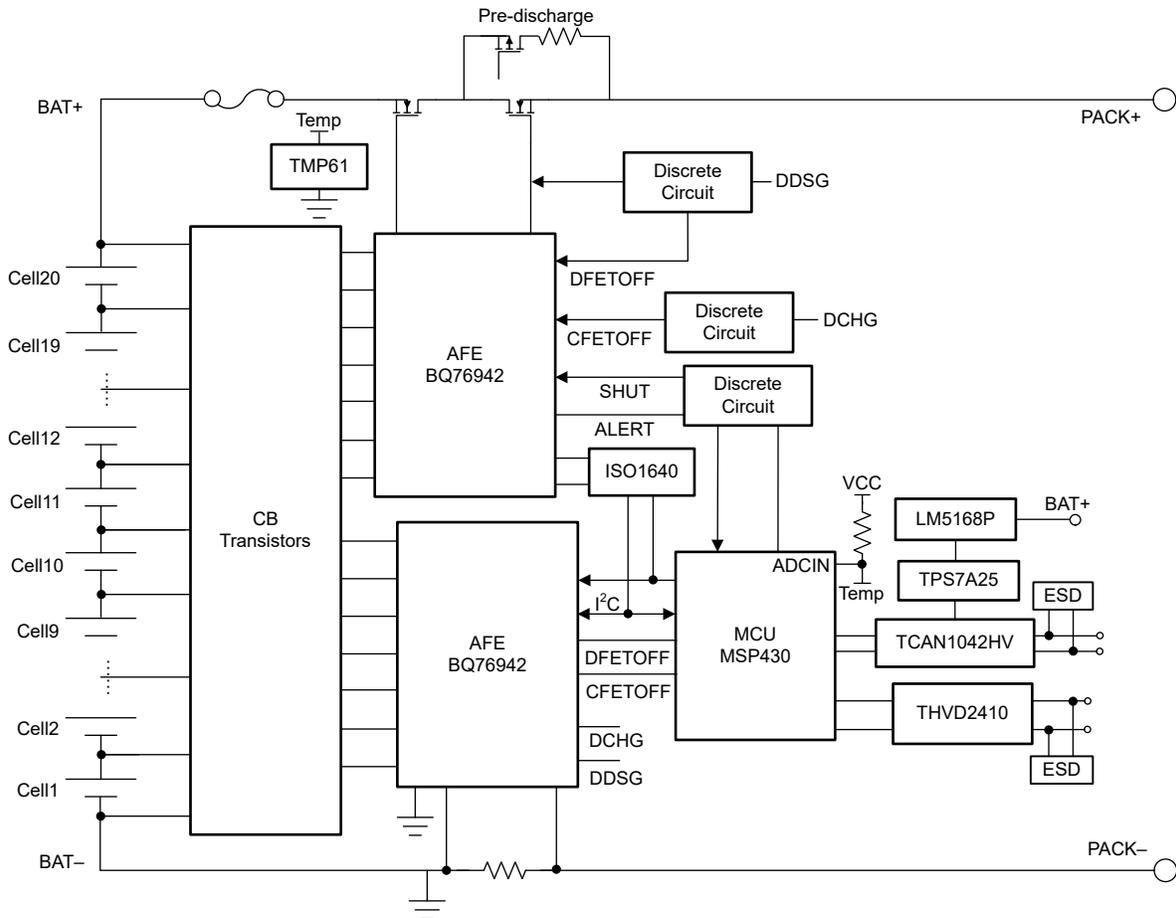


图 1-1. TIDA-010247 方框图

## 2 堆叠式 AFE 通信

为了涵盖多于 16 节电池的电池组和高于 60V 的应用，可堆叠两个 BQ769x2 系列监控器，来监控多达 32 节电池。每个 BQ769x2 可监控一组电池，最多可达 16 节。底部 BQ769x2 与整个电池组和 MCU 共用同一接地端，而顶部 BQ769x2 参考底部组的堆叠电压。因此，在顶部 BQ769x2 和 MCU 之间进行通信需要一个隔离器件或高压电平转换器。

### 2.1 数据通信

BQ769x2 支持 I2C 和 SPI 通信。TIDA-010247 使用 I2C 隔离器 ISO1640，在顶部 BQ769x2 和主机 MCU 之间实现高达 400kHz 的隔离式 I2C 通信。为了简化硬件设计并节省 MCU 资源，两个堆叠的 BQ769x2 器件与 I2C 总线连接。默认情况下，两个目标 BQ769x2 器件共享相同的 I2C 地址，会导致任何主机 I2C 命令发生冲突。**重要的是**，BQ769x2 支持使用一次性可编程存储器 (OTP) 更改 I2C 地址，使主机 MCU 能够更轻松地与两个 BQ769x2 器件分别通信，而不会发生任何冲突。可以通过两种方法对 BQ769x2 的 OTP 进行编程：使用 TI GUI 或主机 MCU。有关 OTP 的更多详细信息，请参阅 [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南](#)，只需要对底部 BQ769x2 进行 OTP 编程，更改 I2C 地址。在与顶部 BQ769x2 进行通信之前，必须为 ISO1640 的次级侧供电。一种方法是添加 [隔离式电源模块](#)，确保两侧均由 ISO1640 供电。更简单的方法是使用此器件的 BQ769x202 版本，该版本默认启用 REG1 3.3V 输出，并使用 BQ769x2 REG1 为 ISO1640 的两侧供电。对于其他版本的器件，顶部 BQ769x2 还需要通过 OTP 编程来启用 REG1 输出。

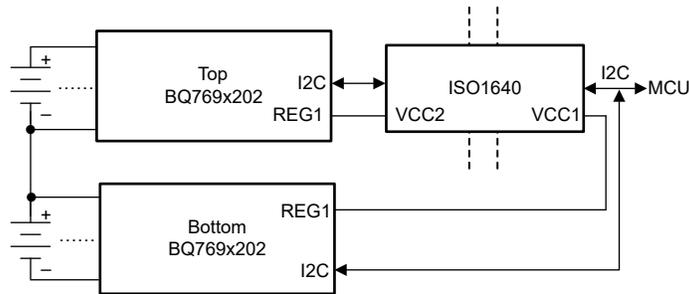


图 2-1. 与顶部和底部 BQ769x2 进行通信

表 2-1. 不同 BQ769x2 版本的默认配置

器件型号	通信接口	启用 CRC	REG1 LDO 默认值
BQ769x2	I2C	N	禁用
BQ769x201	SPI	是	禁用
BQ769x202	I2C	Y	启用, 3.3V
BQ769x203	SPI	是	启用, 5V
BQ769x204	SPI	是	启用, 3.3V

## 2.2 控制信号

对于其他相对较慢的开关信号，例如 ALERT、TS2、RST\_SHUT、DFETOFF 和 CFETOFF，可使用更具成本效益的分立式电平转换器或光耦合器。

由于底部 BQ769x2 可监控电池组电流、底部电池组电压和温度，而顶部 BQ769x2 驱动充电和放电 MOSFET，因此允许底部 BQ769x2 在不使用主机 MCU 的情况下直接关闭充电和放电 MOSFET。这对于 SCD 等更快的保护尤其有用。在 TIDA-010247 中，底部 BQ769x2 的 DDSG 和 DCHG 引脚配置为 DDSG 和 DCHG 功能，顶部 BQ769x2 的 DFETOFF 和 CFETOFF 引脚配置为 DFETOFF 和 CFETOFF 功能。借助两个分立式电平转换器，底部 BQ769x2 DDSG 和 DCHG 可分别控制顶部 BQ769x2 DFETOFF 和 CFETOFF。底部的 BQ769x2 DDSG 还可利用 MCU IO 进行“或”运算，来驱动 Q47，确保放电 MOSFET 完全关闭，因此必须将 DDSG 配置为高电平有效（有关 MOSFET 驱动器的更多详细信息，请参阅高侧 N 沟道 MOSFET）。但 DCHG 配置为低电平有效，以便降低功耗。

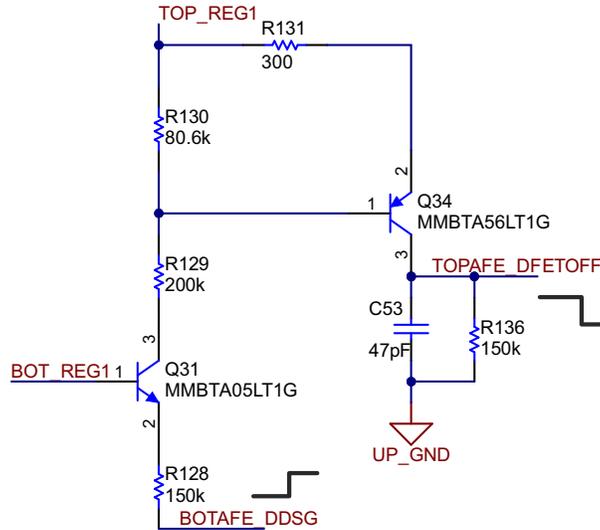


图 2-2. DDSG 电平转换器电路

### 3 高侧 N 沟道 MOSFET

TIDA-010247 支持高侧 N 沟道 MOSFET 架构，并使用顶部 BQ769x2 电荷泵来驱动 MOSFET 的导通和关断。高侧 MOSFET 架构始终保护接地连接，有利于电池组与外部通信，但也带来了新的设计挑战。由于顶部 BQ769x2 参考底部电池组电压，因此当顶部 BQ769x2 尝试关闭 DSG MOSFET 时，DSG 引脚电压会降至 LD 引脚电压，并最终下降到底部电池组电压（顶部 BQ769x2 接地），底部电池组电压过高，无法完全关闭 DSG MOSFET。TIDA-010247 使用分立式电路（如图 3-1 所示）来确保 DSG MOSFET 快速完全关闭。

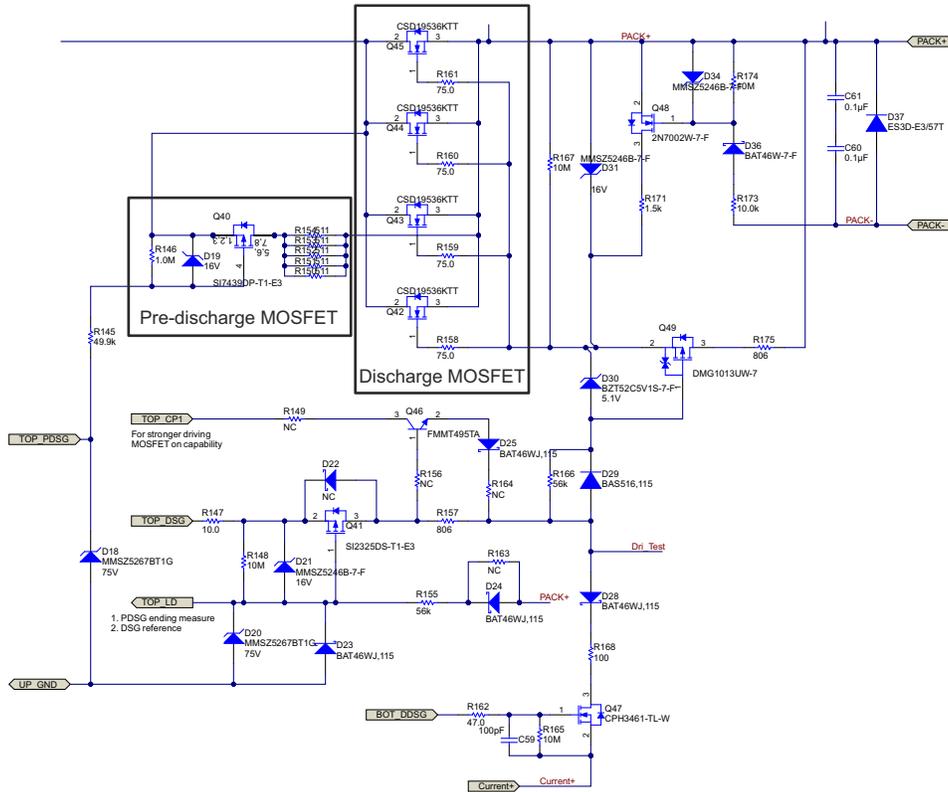


图 3-1. TIDA-010247 中的高侧 MOSFET 驱动电路

#### 3.1 放电 MOSFET 导通和关断过程

当系统需要关闭 DSG MOSFET，来将 Dri\_Test 节点驱动为低电平时，MCU 或底部 BQ769x2 DDSG 会导通 Q47。P 沟道 MOSFET Q49 导通，通过 R175 对 DSG MOSFET 的栅极-源极电压进行放电。齐纳二极管 D30 可保护 Q49 源极-栅极电压。顶部 BQ769x2 器件将 TOP\_DSG 驱动至 TOP\_LD 以关闭 Q41，阻止电荷泵进一步放电并允许 Dri\_Test 接地，确保 DSG MOSFET 完全关断。D21 和 R148 可保护 Q41 栅极-源极电压，并确保 Q41 处于关断状态。当 DSG MOSFET 完全关断后，PACK+ 电压较低，D24 会阻止来自 UP\_GND 和 TOP\_LD 的电流为 PACK+ 充电，并保护顶部 BQ769x2，免受负电压的影响。在 DSG MOSFET 关断过程完成后，Q47 能够关断，以便减少功耗。

当系统需要再次导通 DSG MOSFET 时，系统会首先检查 Q47 是否关断，然后使用顶部 BQ769x2 电荷泵电压驱动 TOP\_DSG。Q41 导通，并通过 R147、Q41、R157、D29 和 D30 为 DSG MOSFET 的栅极-源极电压充电。由于 D24 在 PACK+ 电压较低时阻止 TOP\_LD 跟随 PACK+，因此 TOP\_LD 充电速度过快，无法减慢 Q41 的导通过程。此设计在电路板上保留 R163 与 D24 之间的并联，但不连接 R163，以便降低电流消耗。保留肖特基 D23 提供保护，防止 TOP\_LD 上出现负电压。

#### 3.2 PACK 端口高压

某些电机驱动应用需要在制动时回收能源。如果电池已充满电，且充电和放电 MOSFET 均已关断，则 PACK 侧可能具有高压，如果引脚电压高于 85V，则会损坏 BQ769x2。阻止高压的一种简单方法是在放电 MOSFET 和 TOP\_DSG 之间添加串联二极管 D29，但该二极管还会阻止灌电流关闭放电 MOSFET。电阻器 R166 与 D29

并联，可提供电流通路，在关闭放电 MOSFET 时导通 Q49。D20 和 R155 在顶部 BQ769x2 的上限范围内保护 TOP\_LD 电压。D20 还有助于限制 TOP\_DSG 电压，因为在关闭放电 MOSFET 时，DSG 引脚始终会驱动至 LD 引脚。对于顶部 BQ769x2 和底部 BQ769x2 的其他高压引脚，齐纳二极管和电阻器始终有助于将电压限制在绝对最大值之内。但是，如果将这些高压引脚用于电压测量，通常需要进行进一步校准，确保保护性齐纳二极管和电阻器具有良好的精度。

### 3.3 快速关闭放电 MOSFET

必须快速关闭放电 MOSFET，尤其是在发生短路放电 (SCD) 故障时。MOSFET 导通时如果发生 SCD 故障，放电电流会增加到非常大的值，并触发 SCD 保护，关闭放电 MOSFET。放电电流会快速下降，由于短路连接器和 PCB 布线的寄生电感，PACK+ 上会产生显著的负电压。PACK+ 上的负电压可阻止电流流入齐纳二极管 D30 的阴极并使 Q49 关断，从而减慢放电 MOSFET 的关断过程。二极管 D37 是限制最大负电压所必需的。考虑到放电电流可能很大，D37 正向电压可能会达到放电 MOSFET 的栅极-源极阈值电压 ( $V_{GS\_th}$ )，因此添加了 Q48、R171、D34、R174、D36 和 R173，以便为放电 MOSFET 的输入电容 ( $C_{iss}$ ) 提供另一条放电通路，加快关断过程。当 Q48 由于 PACK 上的负电压而导通时，放电 MOSFET 的  $C_{iss}$  通过 Q48 和 R171 放电。为了确保电路正常工作，在放电 MOSFET 的栅极-源极电压达到放电 MOSFET 的  $V_{GS\_th}$  之前，Q48 必须导通，考虑将 R174、R173 和 D36 作为分压器。在 PACK 侧进行反向电压测试时，为了确保放电 MOSFET 处于关闭状态，也需要满足此条件。当 PACK 具有正常高电压时，D36 可消除漏电流，当 PACK 侧具有超高的负电压时，R173 会限制电流，从而保护 D34 和 Q48。

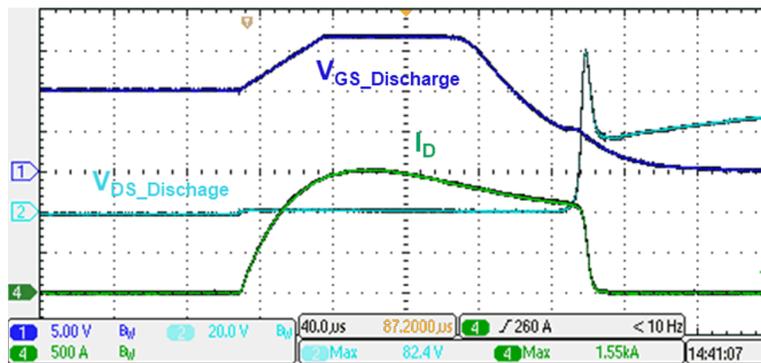


图 3-2. TIDA-010247 SCD 保护

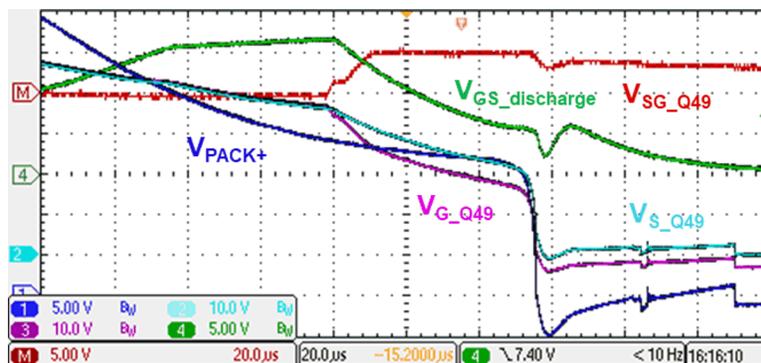


图 3-3. 在 Q49 处于 SCD 状态时关闭放电 MOSFET

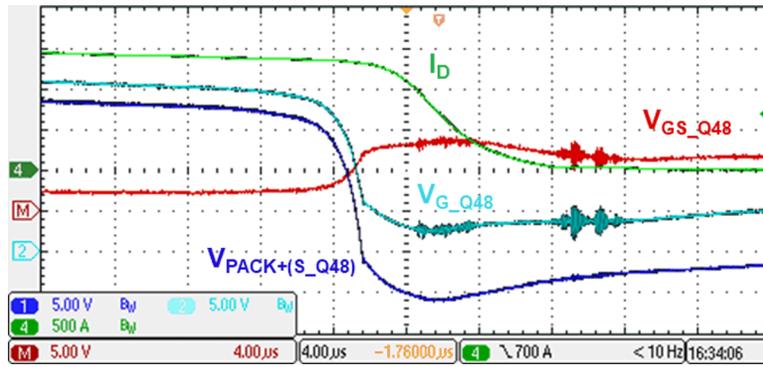


图 3-4. 在 Q48 处于 SCD 状态时关闭放电 MOSFET

## 4 堆叠组的电流消耗

[TIDA-010247 设计指南](#)介绍了堆叠式 BQ769x2 设计的辅助电源策略。在 MOSFET 开启的待机模式下 (DET 下拉至低电平, 接地), TIDA-010247 的总电流消耗约为  $300\ \mu\text{A}$ , 堆叠组之间的电流差约为  $10\ \mu\text{A}$ 。如果 MOSFET 关断 (DET 悬空), 总电流消耗减少至约  $200\ \mu\text{A}$ , 电流差增加至约  $50\ \mu\text{A}$ 。TIDA-010247 利用顶部 BQ769x2 电荷泵来打开和关闭 MOSFET; 因此, 与 MOSFET 关断状态相比, 顶部 BQ769x2 的 MOSFET 处于开启状态时电流消耗更大, 导致总电流消耗更大。在待机模式下, 主机 MCU 通过拉低 EN 来关闭 ISO1640 电源并禁用直流/直流 LM5168P, 从而降低功耗, 而 5V 和 3.3V 电源轨由底部 BQ769x2 稳压器提供。总电流约为  $50\ \mu\text{A}$  (包括 MCU、收发器和其他漏电流), 会导致电流差, 因为顶部 BQ769x2 没有其他电流消耗 (IC 电源电流除外)。TIDA-010247 中设计了一个外部 IO 电路, 来检测电池是否与负载或充电器连接。选择合适的上拉电阻器 (R178) 有助于在连接 DET 的情况下 (允许 MOSFET 导通) 缩小电流差。这对于特定的工作条件尤其有用。

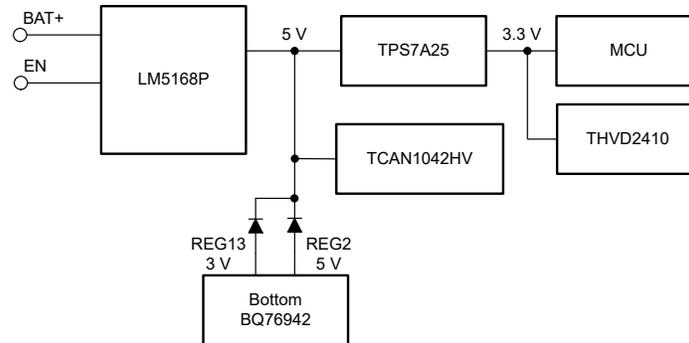


图 4-1. TIDA-010247 辅助电源策略

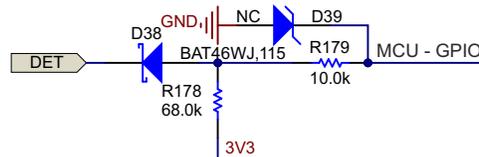


图 4-2. 用于检测 TIDA-010247 中充电器或负载的 DET 电路

当充电或放电电流唤醒 TIDA-010247 时, 会启用直流/直流、接管 5V 和 3.3V 电源轨, 不会导致电流不平衡。I2C 隔离器 ISO1640 仍由顶部和底部 BQ769x2 稳压器分别供电, 以便降低不平衡电流 (请参阅图 2-1、图 2-1)。

表 4-1 中列出了 ISO1640 器件的电源电流规格。在正常工作条件下，ISO1640 器件的电源电流差在组不平衡电流中的占比最大。

表 4-1. ISO1640 电源电流特性 ( $3V \leq VCC1, VCC2 \leq 3.6V$ )

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位	
ICC1	电源电流, 1 侧	VSDA1、VSCL1 = GND1, VSDA2、VSCL2 = GND2, R1 和 R2 = 开路, C1 和 C2 = 开路		5.2	7.1	mA
		VSDA1、VSCL1 = VCC1, VSDA2、VSCL2 = VCC2, R1 和 R2 = 开路, C1 和 C2 = 开路		3	4	mA
ICC2	电源电流, 2 侧	VSDA1、VSCL1 = GND1, VSDA2、VSCL2 = GND2, R1 和 R2 = 开路, C1 和 C2 = 开路		4.9	6.7	mA
		VSDA1、VSCL1 = VCC1, VSDA2、VSCL2 = VCC2, R1 和 R2 = 开路, C1 和 C2 = 开路		2.8	3.5	mA

进一步缩小电流差的另一种好方法是添加 TI 隔离式电源模块为 ISO1640 的次级侧供电，并使用 3.3V 主电源轨为隔离式电源模块和 ISO1640 初级侧供电。图 4-3 显示了方框图。

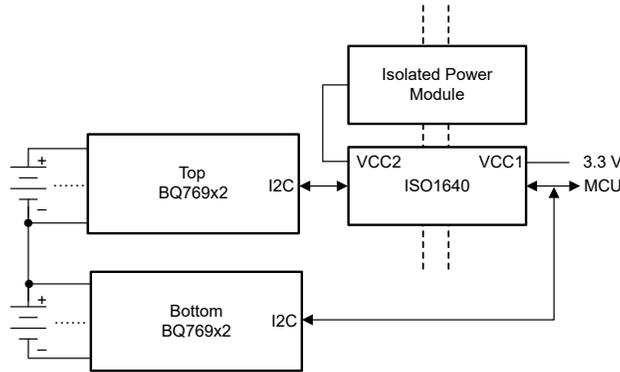


图 4-3. 使用隔离式电源模块为 ISO1640 供电

ISO1640 器件的两侧均由 3.3V 主电源轨供电，因为 3.3V 主电源轨旨在从总电池组电压中接收功率，进一步消除各组之间的电流差。

由于 BQ769x2 器件还支持与主机 MCU 进行 SPI 通信，因此另一种解决方案是将 I2C 替换为 SPI 通信，并使用 TI ISOW7741 器件。ISOW7741 是集成了数字隔离器的直流/直流转换器。ISOW7741 实现了 SPI 通信隔离，并集成了隔离式直流/直流电源为次级侧供电。所有功率均来自 3.3V 主电源轨，因此不会产生不平衡电流。

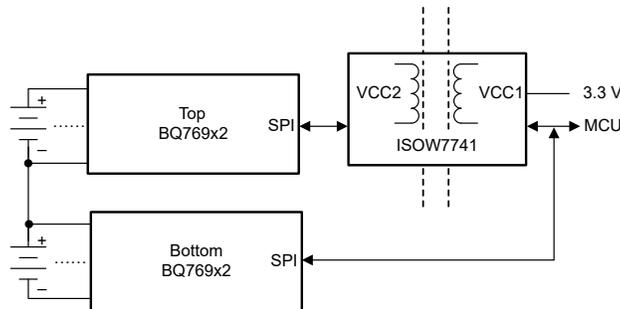


图 4-4. 与 ISOW7741 进行隔离式 SPI 通信

TIDA-010247 还通过顶部和底部 BQ769x2 的 REG2 保留了外部电池组平衡功能。主机 MCU 可以启用 BQ769x2 REG2 中的任何一个，以便启动电池组平衡，但需要注意的是，最大平衡电流必须遵循 BQ769x2 稳压器电流限制。

## 5 总结

堆叠式 BQ769x2 系列监控器设计能够监控 60V 及以上的锂离子、磷酸铁锂电池组，并实现稳健快速的高侧 MOSFET 驱动，无需外部驱动器器件即可确保电池安全。本文档详细分析了一些外部分立式组件，介绍了这些器件如何受益于主机 MCU 与顶部和底部 BQ769x2 之间的数据和命令通信。高侧 MOSFET 驱动架构有利于系统安全和通信，但需要进行进一步的设计，确保稳健安全的 MOSFET 开关。由于堆叠组之间存在电流消耗差距，堆叠式架构会导致组之间的不平衡，从而影响电池运行总时间和寿命。本文档介绍了几种设计，旨在缩小不同工作条件下的电流差。TIDA-010247 是堆叠式 BQ769x2 系列监控器设计的出色参考，适用于 60V 及以上的电池组设计。

## 6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TIDA-010247 具有堆叠式电池监控器的高侧 N-MOSFET 控制 \(高达 32 个\) 电池组参考设计设计指南](#)
2. 德州仪器 (TI), [具有增强型 EMC 和 GPIO 的 ISO164x 热插拔双向 I2C 隔离器数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [BQ76952 适用于锂离子、锂聚合物和磷酸铁锂电池包的 3 节至 16 节串联高精度电池监控器和保护器数据表](#)
4. 德州仪器 (TI), [BQ76952 技术参考手册](#)
5. 德州仪器 (TI), [BQ769x2 校准和 OTP 编程指南 应用手册](#)
6. 德州仪器 (TI), [BQ769x2 电池监控器的多 FET 实现方案应用手册](#)

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司