

设计指南: TIDA-00449

含 10 节电池的电池组监测、平衡和综合保护、50A 放电参考设计



说明

TI 设计 TIDA-00449 是一种即时可用并经过测试的硬件平台，适用于对电动工具含 10 节串联电池的电池组执行监控、平衡和保护。越来越多的电动工具使用高功率密度的基于锂离子或磷酸铁锂电池的电池组，我们需要防止这些电池组因充电或放电不当而发生爆炸。TIDA-00449 在以持续高电流放电时，也符合电动工具电池组的热要求。使用 2 层 PCB 实施此参考设计。

资源

TIDA-00449	设计文件夹
BQ7693003DBT	产品文件夹
CSD19536KTT	产品文件夹
CSD23381F4	产品文件夹
CSD13381F4	产品文件夹
LMT01LPG	产品文件夹
MSP430G2553IPW20	产品文件夹
TPS3839G33	产品文件夹

特性

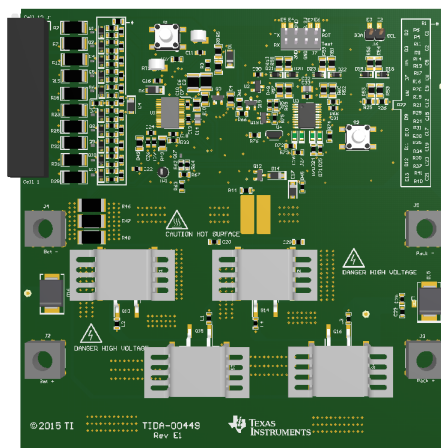
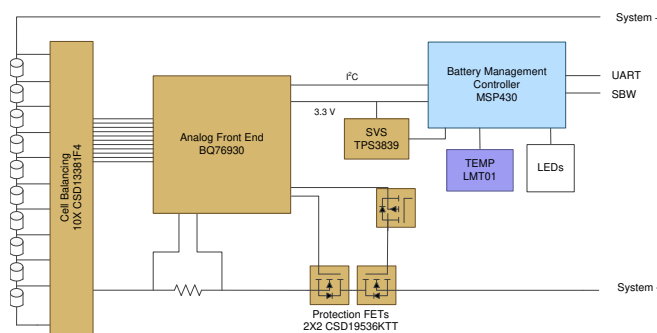
- 专为 36V（10 节锂离子电池或磷酸铁锂电池）而设计的电池组，可实现 50A 最大持续放电电流
- 通过控制充电或放电 FET 监测电池电压、电池组电流、电池组温度，以及平衡电池和提供保护
- 在放电过流、放电短路、过压和欠压情况下，均能提供硬件保护
- 板载超小尺寸、低导通电阻、低 Q_g 和 Q_{gd} 的 FemtoFET™ MOSFET，适用于高达每节电池 150mA 的无源平衡电流
- 适合装运的低静态电流、超低功耗状态
- 采用板载主机微控制器来支持实施电池电量监测

应用

- 电池供电的电动工具
- 电池供电的园艺工具
- 扫地机器人和园艺机器人



咨询我们的 E2E 专家
WEBENCH® 计算器工具



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统说明

电动工具和园艺工具的电池组较常使用的电池类型为锂离子、锂聚合物或磷酸铁锂电池。这些化学物质的体积能量密度和重量能量密度都非常不错。虽然此类化学物质可提供高能量密度，具备体积更小、重量更轻的优势，但也会涉及到安全问题。相关问题包括欠压 (UV) 和过压 (OV)、过热 (OT) 以及过流 (OC)，所有这些都加速电池退化，并可能导致热失控和爆炸。

再加上电池组的数量和大小都有所增加，这些安全问题导致对保护、监测和平衡的需求也增加了。此外，空间和温度也是设计电池组时需要考虑的重要因素。

TI 设计 TIDA-00449 提供了一种经过测试的硬件平台，适用于对含 10 节串联锂离子或磷酸铁锂电池的电池组执行电池监测、平衡、保护和测量。此设计由以下几部分组成：

- 模拟前端 (AFE)，可监测电池和电池组的电压，以及电池组的电流和温度。AFE 还提供全面保护，其中包括 UV 和 OV、短路以及 OC 保护。此外，它还可以驱动电池平衡电路。
- 用作电池管理控制器的微控制器 (MCU)，可配置 AFE 的参数、执行电量监测算法、采用电池平衡方案、处理故障以及与电池组外部的系统进行通信。
- 由 AFE 控制的保护 FET，用于在充电或放电期间发生故障时断开电路。

2 设计 特性

TIDA-00449 使用 10S3P 电池组（30-42V，12.6Ah）。

此设计必须能够提供 50A 的持续放电电流和最大 9A 的充电电流。

TIDA-00449 必须提供全面保护，其中包括：

- 2.75V UV 保护
- 4.3V OV 保护
- 40ms 的 200A OC 保护
- 200 μ s 的 300A 短路保护

由于该电池组由 10 节电池串联组成，电池平衡也非常重要。4.2V 下的目标平衡电流为 150mA。

3 方框图

图 1 显示了系统方框图。

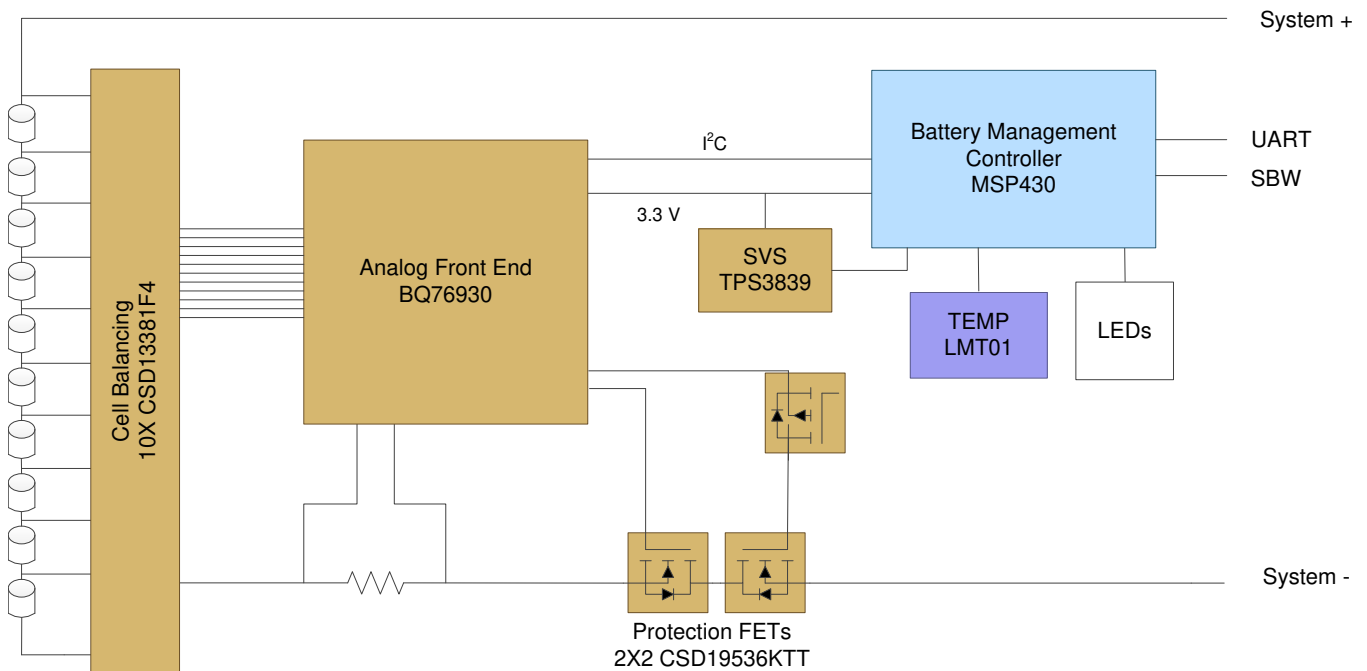


图 1. TIDA-00449 系统框图

4 电路设计和组件选择

4.1 AFE

4.1.1 器件选择

bq769x0 系列的强大 AFE 设备可用作下一代高功率系统（如电动工具）的完整电池组监测和保护解决方案的一部分。bq769x0 在设计时充分考虑了低功耗要求，不仅可通过启用/禁用集成电路 (IC) 中的子块来控制整个芯片的电流消耗，而且还可以利用运输模式将电池组轻松切换至超低功耗状态。

bq76930 最高支持 10 节串联电池或典型的 36V 电池组。该 AFE 可以测量各种电池化学物质，包括锂离子、磷酸铁锂等。通过 I²C，主机控制器可以使用 bq76930 来执行多种电池组管理功能，例如监测（电池电压、电池组电流、电池组温度）、保护（控制充电/放电 FET）以及平衡功能。集成式 ADC 可实现对关键系统参数的纯数字读取，这些参数的校准在 TI 制造过程中进行处理。

4.1.2 电流感测

在设计电池组监测、平衡和保护电路时，首先要做的工作之一是选择传感电阻器。为此，请考虑短路电流限制 (SCD) 和过流限制 (OCD)，以及 AFE 使用的电压阈值设置。请注意，在电池管理控制器中可以进一步实施其他电流限制阈值，以实现更详尽的保护方案（请参见节 4.2.3.1）。

此设计的目标是：300A 左右的 SCD 持续 200 μ s，200A 左右的 OCD 持续 40ms。您可以在 bq76930 产品说明书 (SLUSBK2) 的第 36 页和 37 页查看电压阈值设置。SCD 和 OCD 的电压阈值最大值分别为 200mV 和 100mV。根据欧姆定律，SCD 的传感电阻器最大值为 0.67m Ω ，OCD 的传感电阻器最大值为 0.5m Ω ，如公式 2 和公式 3 中所示。

$$R_{\text{SENSE}} = \frac{V_{\text{THRESHOLD}}}{I_{\text{LIM}}} \quad (1)$$

因此，

$$R_{\text{SENSE_SCD_MAX}} = \frac{200 \text{ mV}}{300 \text{ A}} = 0.667 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

$$R_{\text{SENSE_OCD_MAX}} = \frac{100 \text{ mV}}{200 \text{ A}} = 0.5 \text{ m}\Omega \quad (3)$$

所选的 R_{SENSE} 等于 0.5m Ω 。

为了采用 300A 的 0.5m Ω 传感电阻器，电压阈值现已经过重新计算。重复利用公式 2 可为 SCD 提供 150mV 的电压阈值。bq76930 产品说明书 (SLUSBK2) 第 36 页的表格中未列出 150mV，但列出了 155mV；因此，采用 155mV 为 SCD 提供 310A 的电流。

此应用的最大持续电流为 50A，这意味着使用 0.5m Ω 的传感电阻器时，会消耗 1.25W 功率。

考虑到所有这些因素（包括功耗方面的一些优势），可以并联使用三个 1.5m Ω 的 2512 1% 2W 电阻器装置。使用 SCD 和 OCD 比较器持续监测传感电阻器的电压，从而提供保护。该电压还会被馈送至 16 位集成式 ADC（通常称为库仑计数器 (CC)），该 ADC 会测量电流传感电阻器上累积的电荷。

4.1.3 保护 FET

现在，我们已选择好传感电阻器，下一步是设计保护 FET。

这些 FET 用于在发生故障时断开电路。表 1 显示了放电 FET (DSG) 和充电 FET (CHG) 何时设断开状态。

对于这两个 FET，采用单独控制的方式，即使发生某种故障，也可以安全地使用电池组。例如，如果电池组已完全放电，则会触发 UV 故障，从而断开 DSG FET，防止放电电流进一步流动。与此同时，CHG FET 保持闭合状态，允许所施加的充电电流流动。

表 1. CHG 和 DSG 对不同事件的响应

事件	CHG FET 断开	DSG FET 断开
OV 故障	是	—
UV 故障	—	是
OCD 故障	—	是
SCD 故障	—	是
警报覆盖	是	是
已设置 DEVICE_XREADY	是	是
从正常模式进入运输模式	是	是

在不需要保护 FET 的情况下，TIDA-00449 为用户提供了两个焊盘以绕过保护 FET。7.4 节中提供了更多详细信息。

4.1.3.1 FET 选择

要选择 FET，请考虑以下四个主要参数：电压、电流、热性能和 FET 的开关时间。

FET 的额定电压必须高于每节串联电池约 5V 的直流电压，以及每节串联电池的 10V 瞬态电压。在本设计中，装置使用了 10 节电池串联，这意味着 FET (Q13、Q14、Q15 和 Q16) 的额定电压应高于 50V 直流电压和 100V 瞬态电压。

TIDA-00449 的电流要求如下：75A 持续电流，300A 电流持续 400 μ s，200A 瞬态电流持续 40ms。

在热性能方面，要优先考虑使用尽可能低的 $R_{DS(ON)}$ 值，以便最大程度地减少这些 FET 的功耗。此外，封装也是一项关键因素，因为它应该能够承受热损耗并有效地消散 PCB 或散热器的热损耗。

最后，断开和闭合 FET 所需的时间也至关重要。这主要受 BQ76930 AFE 中栅极驱动器的强度和 FET 的栅极电荷的影响（请参见节 4.1.3.2，了解更多详细信息）。

本设计将所有这些参数均考虑在内，并联使用了两个 CSD19536KTT。CSD19536KTT 是一个 100V、2m Ω 、超低 Q_g 和 Q_{gd} 的 D²PAK (TO-263) NexFET™ 功率 MOSFET。

4.1.3.2 FET 驱动器

bq769x0 系列具有以 V_{SS} 为基准的 FET 控制输出，如其产品说明书中所述。CHG 和 DSG 输出由通过 REGSRC 电源调节的 12V 电源供电。当输出较高时，电压为 12V 标称值；当输出较低时，则电压为 0V。

DSG 引脚可以直接连接到 DSG FET (Q13 和 Q15) 的低侧 N 通道 FET 栅极。

CHG 引脚不能直接连接到 CHG FET (Q14 和 Q16) 的低侧 N 通道 FET 栅极。如果 DSG FET 和 CHG FET 已断开，那么电池组连接器的电压可能会低于主板的接地电压。这意味着，当 AFE 的内部驱动器试图通过在栅极上施加 0V 电压使 CHG FET 保持断开状态时，如果 CHG FET 的源电压低于主板接地电压，则 CHG FET 将会被错误地闭合。

为了解决此问题，可以通过电路将 CHG 引脚连接到 CHG FET 栅极，使其能够在几个操作阶段正常运行。在 CHG 引脚和 FET 栅极之间添加一个 P 通道 FET (Q12) 并将 Q12 的栅极接地，以此来连接电路。这样一来，当 CHG 引脚的电压较高时，Q12 即会闭合，进而闭合 CHG FET。当 CHG 引脚处于低电压状态时，Q12 会立即开启，下拉电阻器 (R45) 将断开 CHG FET。当 FET 处于闭合状态时，必须对开关速度与消耗的电流进行折衷来确定 R45 的值。

您可以在 [bq769x0 系列十大设计注意事项\[1\]](#) 中找到更多详细信息。

MOSFET 栅极上的某些振铃可能是由漏极和栅极的杂散电感以及 Miller 电容引起的，甚至是在 FET 并联时引起的。为防止这种情况发生，芯片铁氧体磁珠 (L1、L2、L3 和 L4) 与保护 FET 的栅极以串联方式添加。

4.1.4 平衡电路

有关如何选择平衡电流、时序和条件的更多详细信息，请参见 [节 4.2.6.3](#)。

建议您对 bq76930 使用外部电池平衡电路来实现所需的平衡方案。每节电池的该电路由以下组件构成：

- 一个平衡电阻器，用于设置平衡电流
- 一个 FET，开启后可通过平衡电阻器消耗电流
- 一个齐纳二极管，用于提供栅极保护
- 一个栅极电阻器，用于限制二极管导通时的电流
- 一个 RC 输入滤波器

在 TIDA-00449 中，4.2V 电压下的目标平衡电流为 150mA。然后，为平衡电阻器 (R2、R7、R12、R15、R18、R23、R28、R32、R36 和 R39) 选择 28.7Ω 的电阻值。为了抵抗功率耗散，我们采用了 2010 型的 0.75W 封装。

然后，我们选择了平衡 FET，如 [bq769x0 系列十大设计注意事项\[1\]](#) 中所述。在本设计中，我们为 Q1、Q2、Q4、Q5、Q6、Q7、Q8、Q9、Q10 和 Q11 选择了 N-FET。然后，我们选择了 FemtoFET CSD13381F4，因为它具有低导通电阻、低 Q_g 和 Q_{gd} 以及超小尺寸 ($1.0 \times 0.6 \times 0.35\text{mm}$)。

选择了 $0.22\mu\text{F}$ 的

输入滤波电容器 (C1、C2、C5、C8、C9、C12、C15、C17、C19、C20、C21 和 C22)。较高的值会使滤波器更强，但可能会影响电池平衡期间的电池测量。对于该值，可以根据电池平衡算法以及在测试期间进行调整。

4.1.5 内部 LDO

在 10 节电池的电池组中，最大电压可能会明显高于 REGSRC 引脚的最大电压 (36V)。然后，需要通过一个电路为 IC 将电压降低到适当值。由于负载电流以及 IC 外部电压下降，FET 也会消耗功率。

FET (Q3) 用作源极跟随器。二极管 (D1) 也用于防止 REGSRC 在重负载或短路期间出现电压下降。电阻器 (R5) 与二极管并联, 用于释放二极管所见的任何瞬态电流。您可以在 [bq769x0 系列十大设计注意事项\[1\]](#) 中找到更多详细信息。

4.1.6 温度测量和唤醒

BQ76930 使用两个外部 10kΩ NTC 103AT 热敏电阻来测量电池组的温度。借助 LMT01, 第三个温度测量点被添加到电池管理控制器中, 如 [节 4.2.3.3](#) 中所述。

然后, bq76930 采用 TS1 和 TS2 中的 14 位 ADC 读数, 根据以下公式来确定外部 103AT 热敏电阻的电阻:

$$V_{TSx} = (\text{ADC in decimal}) \times 382 \frac{\mu\text{V}}{\text{LSB}} \quad (4)$$

$$R_{TSx} = \frac{10000 \times V_{TSx}}{3.3 \times V_{TSx}} \quad (5)$$

根据热敏电阻制造商的产品说明书, 将此电阻值转换为温度。

将一个 4.7nF 电容器与热敏电阻并联放置, 以稳定切换 TSx 引脚时的电压。

为了将 bq76930 从运输模式中唤醒, 需要对 TS1 施加大于 VBOOT 的电压, 这是因为 TS1 与底部单元的正引脚之间添加了一个按钮 (S1) 以及一个电阻器 (R27), 以便在按下 S1 后限制电流进入 TS1。

4.2 电池管理控制器

4.2.1 器件选择

需要通过电池管理控制器来设置保护寄存器、启用 FET、从故障中恢复并在必要时提供平衡算法。MCU 还可以实施电量监测算法, 并为系统提供适当的显示或通信功能。

TI MSP430™ 系列的超低功耗 MCU 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理想之选。该架构与五种低功耗模式配合使用, 专为在便携式测量应用中延长电池使用寿命而应用的。该器件具有一个强大的 16 位精简指令集 (RISC) CPU, 使用 16 位寄存器以及常数发生器, 以便获得最高编码效率。

具有宽运行电压范围 (1.8 至 3.6V) 和超低功耗, 频率为 1MHz 且电压为 2.2V 时, 电流在有源模式下为 230μA, 在待机模式下为 0.5μA, 在关机模式下为 0.1μA, 具有使得 MSP430G2553 成为了电池供电应用其中包括电池管理系统。

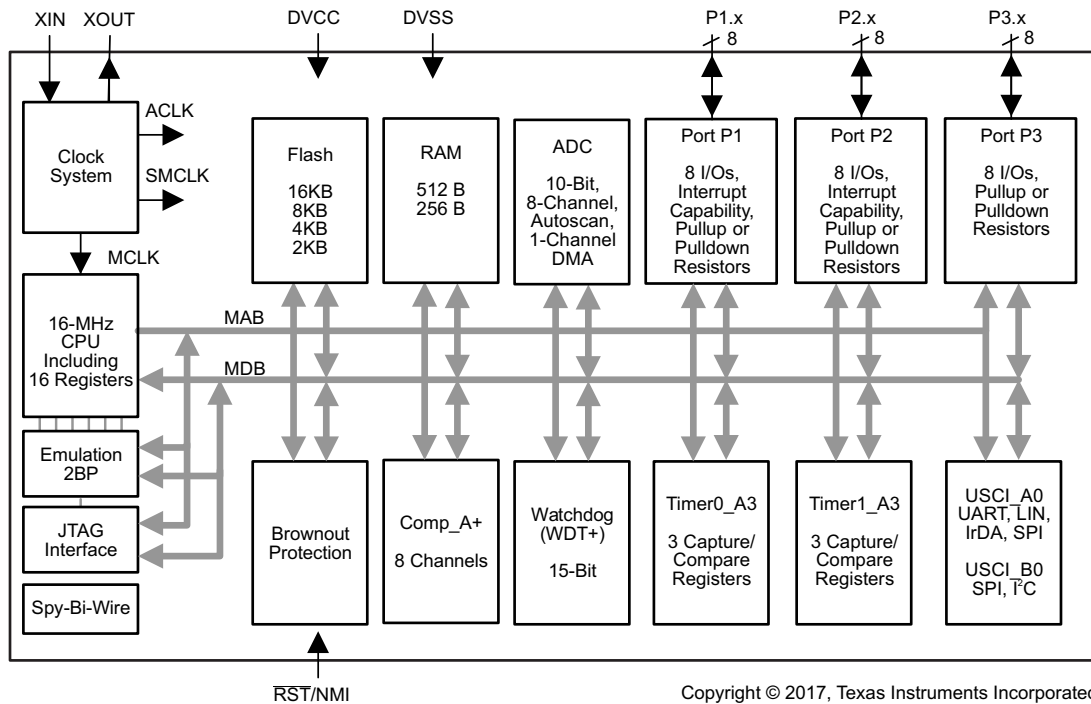


图 2. MSP430G2553 方框图

4.2.2 通信

TIDA-00449 中实施了三个通信渠道。

4.2.2.1 通过 $\mathcal{I}^2\mathcal{C}$

AFE 与控制器进行通信时采用 $\mathcal{I}^2\mathcal{C}$ 通信。跳线 J6 可用于访问 $\mathcal{I}^2\mathcal{C}$ 通信。完整的说明和代码示例在应用报告 bq76940 的 $\mathcal{I}^2\mathcal{C}$ 通信示例代码和基于 MSP430G2553 的 CRC 选项[4]中提供。

4.2.2.2 Spy-Bi-Wire

Spy-Bi-Wire 通信用于对 MSP430 进行编程。MSP430 的 /RST 引脚处需要上拉电阻器 (R68) 和电容器 (C31)。

如果需要，也可以使用跳线 J7 来重置 MSP430。

4.2.2.3 UART

在 TIDA-00449 与计算机之间实施一种简单的 UART 通信协议，以监测系统状态并控制 BMS 系统的操作。

借助该通信协议，MCU 会每 500ms 以 32 字节数据帧的形式发送一次系统状态，并会在帧的末尾包括 1 字节的校验和。

UART 数据格式的设置如下：

- 波特率：9600bps
- 奇偶校验：无
- 数据位：8 位
- 停止位：1 位

表 2 中列出了 TX 帧（从 MCU 发送到 GUI）的定义。

表 2. TX 帧

字节编号	名称	说明
1	接头	从 MCU 发送到 GUI，固定为 0xAA
2	状态/故障	此字节包含手动模式下 bq769x0 的状态寄存器的值以及自动模式下系统的故障状态
3	电池 1 电压	电池组中电池 1 的电池电压 注意：此值与 GUI_CELL_VOLTAGE_DISPLAY_MIN 值相关，精度为 10mV
4	电池 2 电压	电池组中电池 2 的电池电压
5	电池 3 电压	电池组中电池 3 的电池电压
6	电池 4 电压	电池组中电池 4 的电池电压
7	电池 5 电压	电池组中电池 5 的电池电压
8	电池 6 电压	电池组中电池 6 的电池电压
9	电池 7 电压	电池组中电池 7 的电池电压
10	电池 8 电压	电池组中电池 8 的电池电压
11	电池 9 电压	电池组中电池 9 的电池电压
12	电池 10 电压	电池组中电池 10 的电池电压
13	电池组电压	电池组电压 注意：此值与 GUI_PACK_VOLTAGE_DISPLAY_MIN 值相关，精度为 100mV
14	温度 1	此字节包含温度通道 1 的温度信息 范围为 -50°C 至 77°C，精度为 0.5°C
15	温度 2	此字节包含温度通道 2 的温度信息 范围为 -50°C 至 77°C，精度为 0.5°C
16	总库仑计数器 0	总库仑计数器的 0 至 7 位
17	总库仑计数器 1	总库仑计数器的 8 至 15 位
18	总库仑计数器 2	总库仑计数器的 16 至 23 位
19	总库仑计数器 3	总库仑计数器的 24 至 31 位
20	ADC 增益	bq769x0 器件中的 ADC 增益读数 注意：此值与 ADC_GAIN_BASE 值相关，精度为 1μV
21	ADC 偏移	BQ769x0 器件中的 ADC 偏移读数，精度为 1mV
22	电池平衡指数 0	位 0 至位 7 表示电池 1 到电池 8 的电池平衡状态 0：不执行电池平衡 1：执行电池平衡
23	I ² C 通信误差	[7] 位 7 表示 MCU 和 bq769x0 器件间的 I ² C 通信状态 0：无 I ² C 通信误差 1：出现 I ² C 通信误差
	保留	[2:6] 保留
23	电量平衡指数 1	[0:1] 位 0 至位 1 表示电池 9 到电池 10 的电池平衡状态 0：不执行电池平衡 1：执行电池平衡
	电量平衡指数 1	
24	电池电量	利用简单的电量监测机制检测到的电池电量（用百分比表示），精度为 1%
25	警报引脚状态	bq769x0 器件的警报引脚状态 0：警报引脚处于逻辑低状态 1：警报引脚处于逻辑高状态
26	电池组温度	此字节包含 LMT01 温度传感器所感应到的温度信息 范围介于 -50°C 至 77°C 之间，精度为 0.5°C
27	SYSCtrl1	BQ769x0 器件的 SYSCtrl1 寄存器的值
28	SYSCtrl2	BQ769x0 器件的 SYSCtrl2 寄存器的值
29	空闲平衡计时器	空闲平衡计时器计数数值，精度为 1 分钟
30	平衡计时器 1	电池组 1（电池 1 至 5）的电池平衡计时器，精度为 1 秒
31	平衡计时器 2	电池组 2（电池 6 至 10）的电池平衡计时器，精度为 1 秒
32	校验码	8 位范围中的字节 1 至 31 的和，忽略所有负载

表 3 中列出了 RX 帧（从 GUI 发送到 MCU）定义。

表 3. RX 帧

字节编号	名称	说明
1	接头	从 MCU 发送到 GUI，固定为 0x55
2	保留	[3:7] 保留
	温度传感器类型 (仅在手动模式下)	[2] bq769x0 器件的温度传感器类型选择 0: 模温 1: 外部热敏电阻
	ADC EN (仅在手动模式下)	[1] ADC EN 位的设置 0: 清除 ADC_EN 1: 设置 ADC_EN
	运行模式	[0] 主机的运行模式设置 0: 手动模式 1: 自动模式
3	SysCtrl2 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 SysCtrl2 寄存器设置
4	Protect1 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 Protect1 寄存器设置
5	Protect2 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 Protect2 寄存器设置
6	Protect3 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 Protect3 寄存器设置
7	OV_TRIP 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 OV_TRIP 寄存器设置
8	UV_TRIP 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 UV_TRIP 寄存器设置
9	CELLBAL1 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 CELLBAL1 寄存器设置
10	CELLBAL2 寄存器设置 (仅在手动模式下)	固件的 CELLBAL2 寄存器设置
11	保留	[1:7] 保留
	设置更改	[0] 设置更改标志表示 GUI 设置的更改 如果此位为 0，则 MCU 的固件将不会更新系统 GUI 设置 0: 无更改 1: 有更改
12	保留	[3:7] 保留
	应用设置	[2] 用于将所有寄存器设置应用到 bq769x0 器件的命令 0: 无需操作 1: 清除整个库仑计数器
	清除整个库仑计数器	[1] 用于清除整个库仑计数器的命令 0: 无需操作 1: 清除整个库仑计数器
	清除故障	[0] 用于清除故障状态的命令 0: 无需操作 1: 清除故障
13	保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
14	保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
15	保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
16	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
17	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
18	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
19	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
20	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
21	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
22	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00
23	被保留	保留以供将来使用的字节，固定为 0x00

表 3. RX 帧 (continued)

字节编号	名称	说明
24	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
25	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
26	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
27	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
28	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
29	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
30	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
31	被保留	保留以供将来使用的字节, 固定为 0x00
32	校验码	8 位范围中的字节 1 至 31 的和, 忽略所有负载

4.2.3 感应

除了由 AFE 执行的测量外, 还在控制器上添加了一些额外电流、电压和温度传感电路, 以提供更多测试和设计选项。如有需要, 可禁用所有这些测量, 最大限度减少电流消耗。

4.2.3.1 电流

MSP430 可通过其 ADC 和电流测量电路 (Q17、R63、R64 和 R67) 直接读取电流。这些电流测量可用于在固件中实施额外电流限制阈值。

4.2.3.2 电压

电压传感电路 (Q18、Q19、R61、R65、R66、R69 和 R75) 可用于测量整个电池组的电压。此电路还可用于 bq76930 产品说明书 (SLUSBK2) 第 22 页所描述的实时校准。

4.2.3.3 温度之间的关系

除 BQ76930 的两个热敏电阻外, 还可以使用 LMT01 向 TIDA-00449 添加第三个温度测量点。例如, 此附加点可用于监控保护 FET 的温度。这对于短路事件非常重要, 可确保在跳变后再次闭合 FET 之前, FET 能充分冷却。

LMT01 是一款高精度双引脚温度传感器, 具备一个简单易用的脉冲计数接口, 使其成为汽车、工业和消费市场领域中板载和非板载 PTC 或 NTC 热敏电阻的理想数字替代品。凭借数字脉冲计数输出以及在宽温度范围内实现高精度, LMT01 可与所有 MCU 配对, 在最大限度降低软件开销的同时, 无需担忧集成式 ADC 质量不佳或供货短缺。TI 的 LMT01 在 -20°C 至 90°C 的宽温度范围内可实现 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的稳定精度, 同时具有极为精密的精度 (0.0625°C), 无需借助系统校准或软硬件补偿。

上电后, 传感器最多花 51ms 来转换温度, 花 50ms 来传输数据。在此设计中, 持续 1s 对 LMT01 的温度进行检查。

在此设计中, 可通过 MSP430 的模拟比较器捕获由 LMT01 发送的数据。当将比较器阈值设置为 $0.25 \times V_{\text{CC}}$ (0.825V) 时, LMT01 的高级和低级输出信号必须通过比较器阈值。LMT01 的输出电流 (IOL 和 IOH) 在 28 至 $39\mu\text{A}$ 以及 112.5 至 $143\mu\text{A}$ 范围内, 所以, 应使用 $10\text{K}\Omega$ 接地电阻器, 该电阻器可生成 390mV 的 VOL_max 和 1.125V 的 VOH_min。

图 3 显示了 $10\text{K}\Omega$ 电阻器的 LMT01 输出数据。

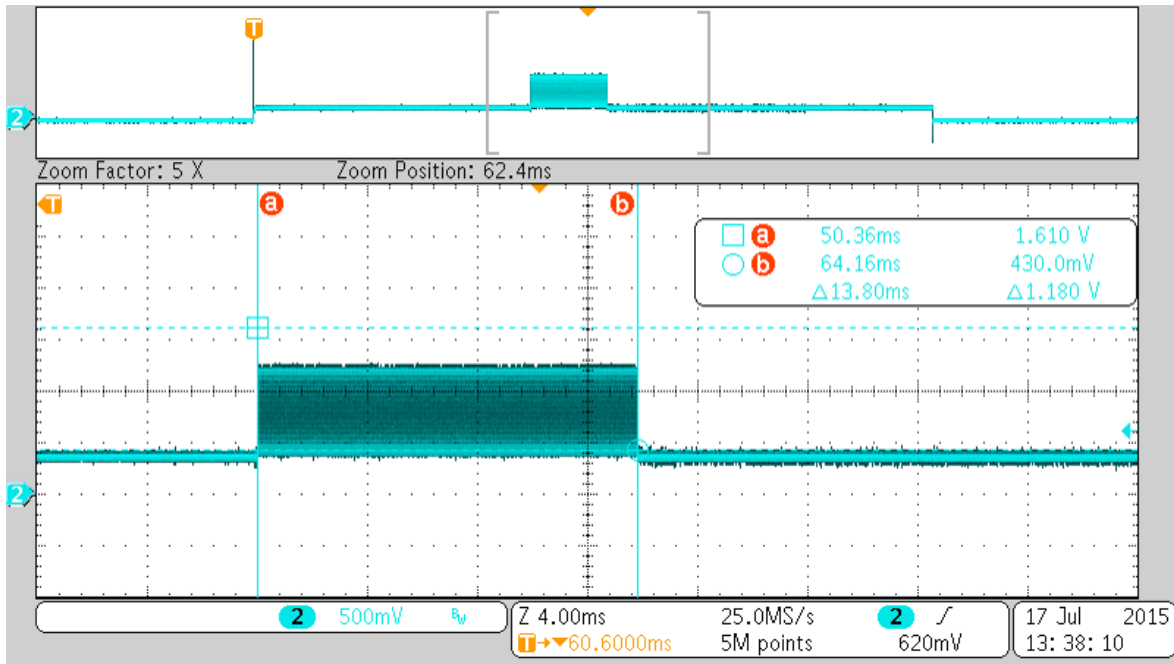


图 3. LMT01 输出数据

要为 LMT01 供电并正确读取它，可按照图 4 中显示的流程图在固件中实施时序。

该序列在 drv_lmt01.c 文件的 lmt01_handler() 例程中实施。

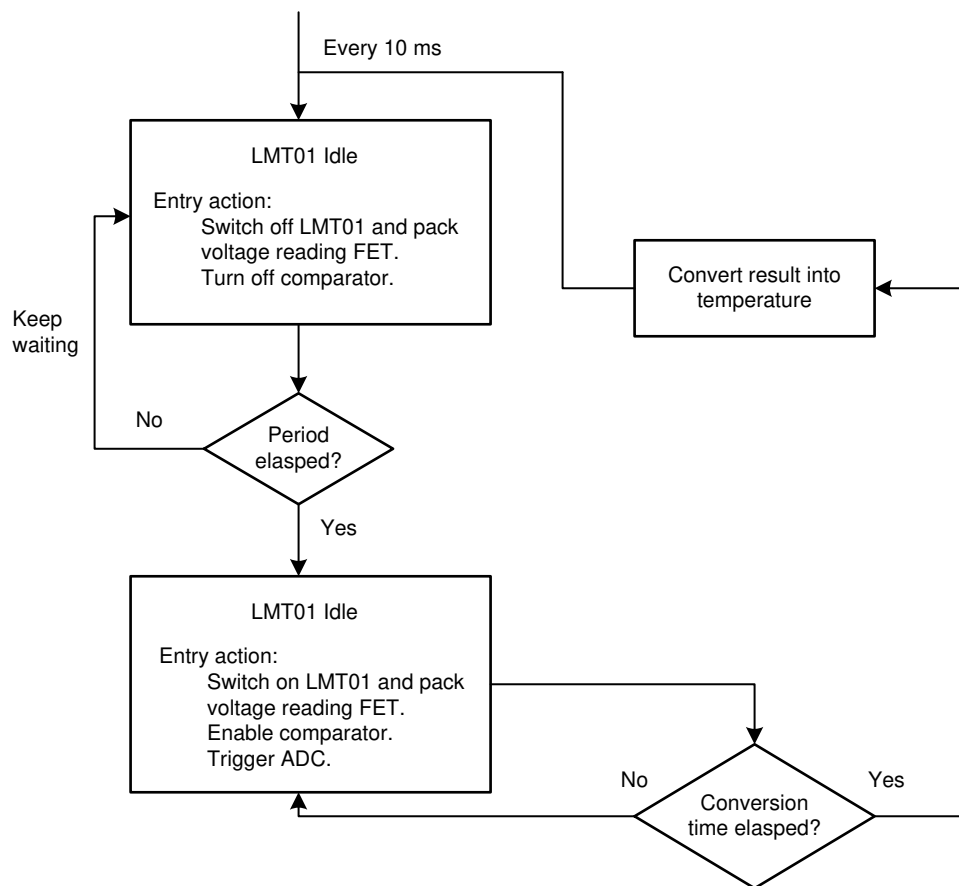


图 4. LMT01 流程图

4.2.4 电压监控器

MSP430 需要介于 1.8V 和 3.6V 之间的电压。当 BQ7693003 提供 3.3V 电压时，超低静态 (150nA)、超小型电压监控器 TPS3839G33 可监控电源电压。在 V_{DD} 电压升至阈值电压和磁滞以上后，它将 MSP430 保持复位状态，以防其电源电压降至 3.08V 以下，且复位输出在 200ms（典型值）内保持低值。

4.2.5 LED 指示

根据节 4.2.6.2 所描述的电量监测算法，可添加四个 LED（D24、D25、D26 和 D27），以显示剩余电量。

为了减少功耗，当按下按钮 S2 时，这些 LED 仅显示剩余电量。

4.2.6 软件

4.2.6.1 概述

固件在任务循环中保持每 2ms 检查一次 bq769x0 器件的警报引脚状态，而在持续 10ms 的任务循环中检查 I_{SENSE} （通过分流电阻器的电池电流），并在持续 1s 的相同任务循环中检查电池组温度和电压。

请参见图 5，查看固件任务处理规程概述。

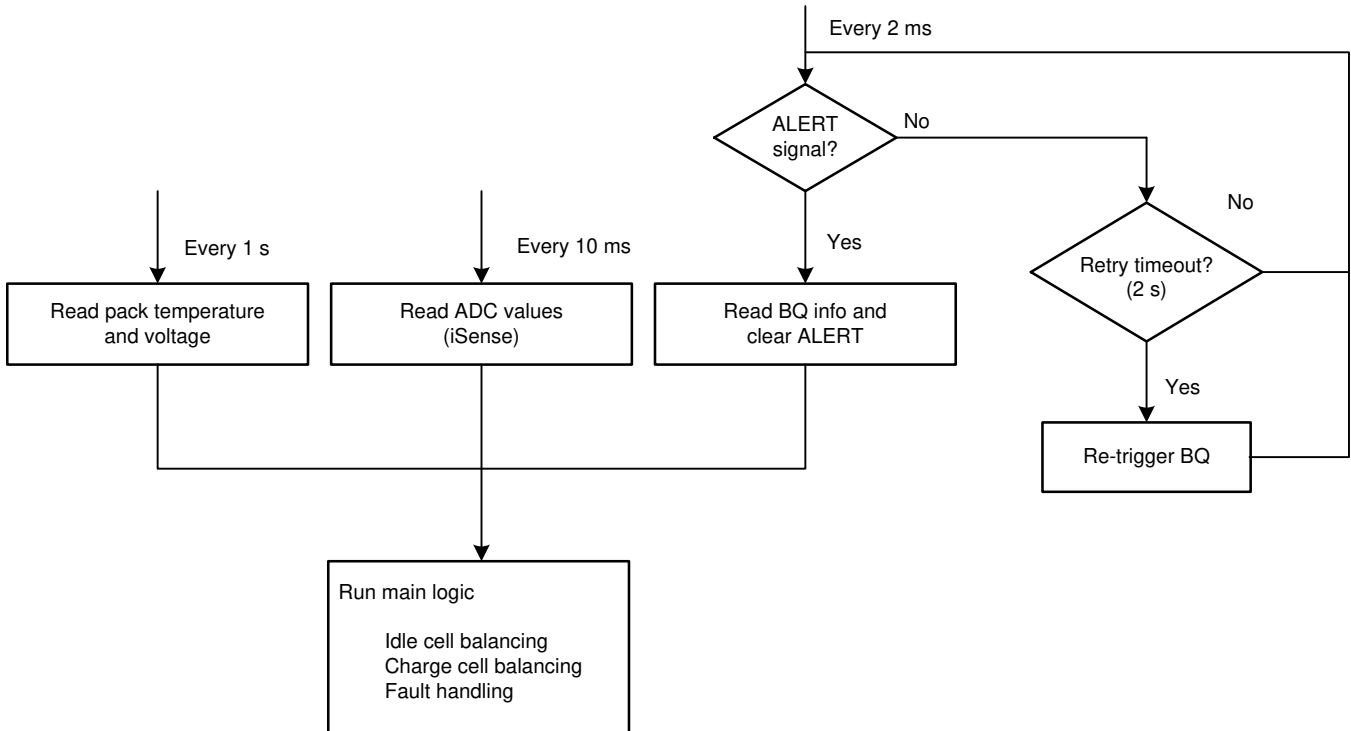


图 5. 任务处理流程图

4.2.6.2 逻辑

固件逻辑在名为 `logic_handler()` 的单个软件例程中实施。此例程在持续 10ms 的任务循环中调用，并且在自动模式下执行电池平衡、电量监测和故障处理。

在手动模式下，按照 GUI 的设置执行所有操作。

在自动模式下，此例程首先检查系统的故障状态。如果系统中没有故障，此例程可确保 CHG 和 DSG FET 处于开启状态、通过对库仑计数器读数结果和 `COULOMB_COUNTING_SOC_THRESHOLD` 进行比较来确定此时的系统 SOC，以及对电池执行电池平衡。

4.2.6.3 电池平衡

4.2.6.3.1 什么是电池不平衡

电池不平衡是含多节电池的电池组经常存在的问题。电池不平衡不利于整个电池组的运行时间和寿命。

电池不平衡的原因如下：

- 电池的容量变化，同一型号的电池间通常有 1% 到 2% 的变化
- 充电状态的差异
- 阻抗变化（高达 15%），会导致在充电和放电时出现电压差
- 局部发热，会使一些电池比其他电池更快退化，尤其是在电池节数较多的电池系统中（由于存在温度梯度并且高速放电时电池会自发热）

不平衡的电池会因过早的充电终止和过早的放电终止而减少有效的运行时间，如图 6 所示。

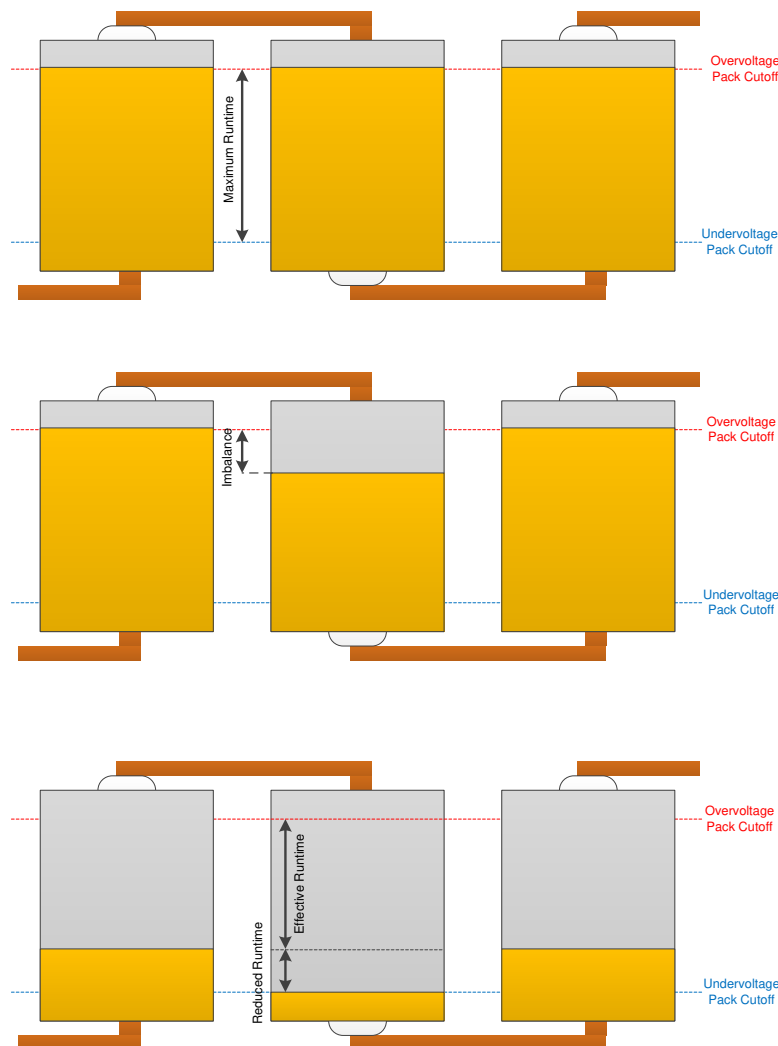


图 6. 电池不平衡对运行时间的影响

电池平衡通过均衡电池来最大程度地减少此问题，从而让电池组工作更长的时间。电池电压不同是最常见的不平衡表现，此问题可以通过具有较高电压的旁路电池来立即或逐渐进行更正。

4.2.6.3.2 何时以及如何进行平衡

平衡通常在充电期间或空闲时完成。

接下来要考虑的事项是确定使用哪种平衡电流以及平衡多长时间。最终的应用和用户行为对于这些要考虑的事项有着重要影响。例如，在不太可能进行电池平衡的应用 需要选择较高的平衡电流和较短的平衡时间。在 流速 需要进行电池平衡的应用中，需要选择较低的平衡电流和较长的平衡时间，以最大程度地减少对电池的影响（即放电期间的自热）。

4.2.6.3.3 如何在 TIDA-00449 中实施

bq76930 使用无源平衡技术，其中包括使用平衡电阻器为电池设置旁路，以减小电池可见的充电电流（充电期间）或对电池进行放电（空闲期间）。

此设计针对空闲时间不可忽视的电动工具（存储、电池组使用充电器充电、使用之间存在空闲等），决定使用较低的平衡电流（42V 下的电流为 150mA）并尽可能经常保持平衡：

- 电池达到 4V 或更高，充电结束时
- 电池组空闲时间超过 30 分钟且电池电压高于 3.3V

在这两种情况下，算法将根据电池电压之间的差异决定是否需要进行平衡。如果差异超过预定义阈值（即 50mV），则激活旁路。bq76930 可以同时两个电池执行平衡，每个电池分别来自不同的电池组（电池 1 到 5 和电池 6 到 10）。

图 7 显示了电池平衡流程图。

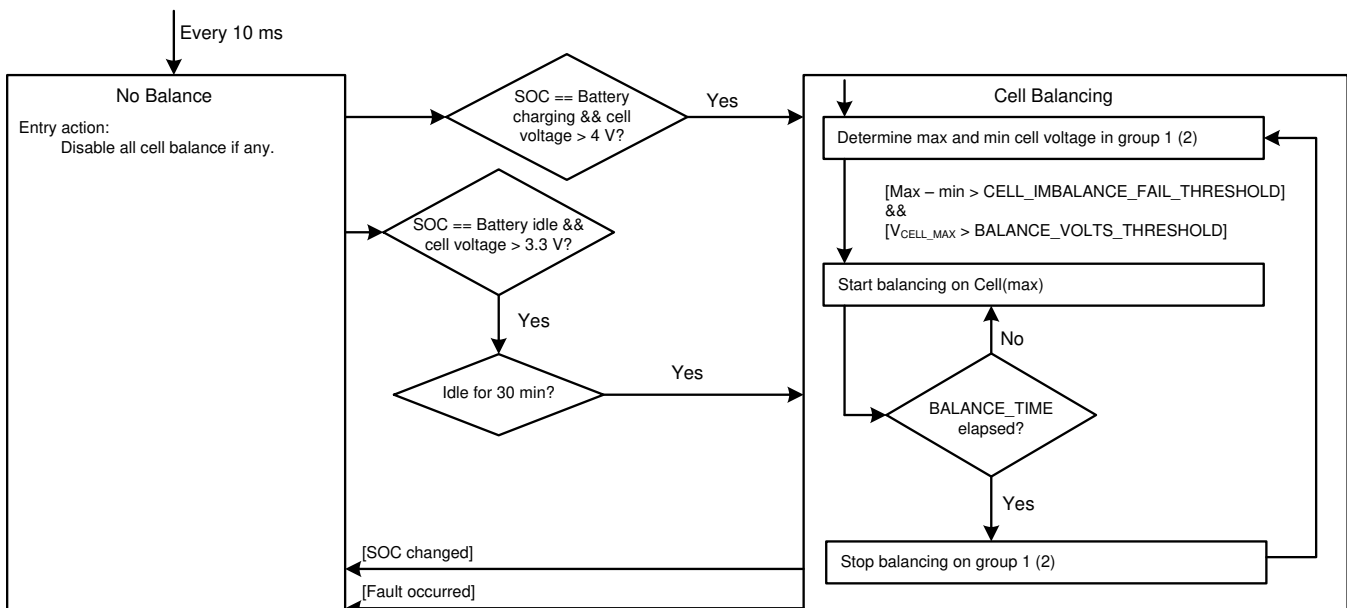


图 7. 电池平衡流程图

4.2.6.4 故障处理

在此设计中，bq769x0 器件根据初始化阶段设置的阈值自动检测系统故障。

要更改阈值，用户可以更改 drv_bq76930.c 文件中的初始化值，也可以通过 GUI 或主机执行 UART 通信来应用阈值。

一旦检测到故障，bq769x0 器件将自动闭合 CHG 和 DSG FET 以保护电池系统。

从故障状态恢复取决于系统要求，并被实施到固件中。故障恢复处理的示例软件规程随固件一同提供。

图 8 显示了固件如何处理不同的故障状态。

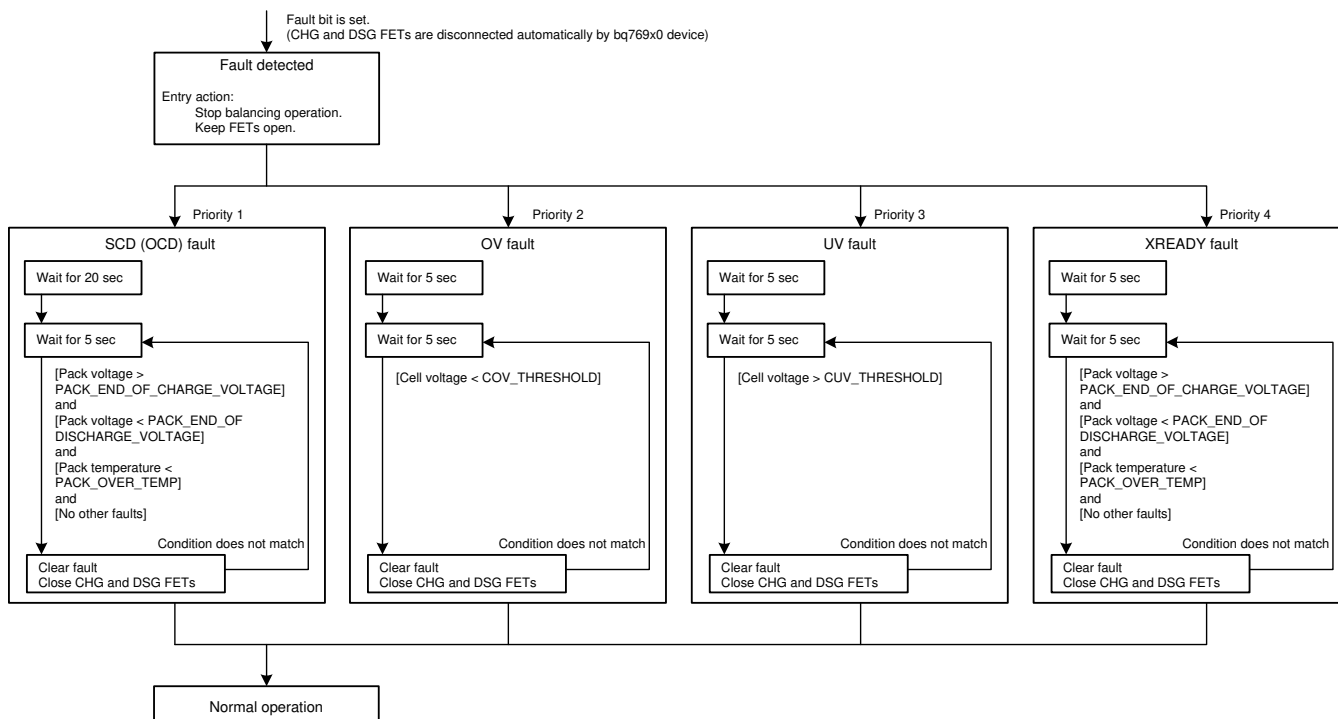


图 8. 故障处理流程图

4.2.6.5 电量监测计

TIDA-00449 中提供了一个简单的电量监测计；不过，用户也可以通过硬件实施自己的更高级、更准确的算法。

默认实施的算法如下所示：

- 如果电池组电压低于 32V，则剩余电量为 0%（无 LED 灯亮起）
- 如果电池组电压介于 32V 到 34V 之间，则剩余电量为 25%（D29 亮起）
- 如果电池组电压介于 34V 到 36V 之间，则剩余电量为 50%（D29 和 D30 亮起）
- 如果电池组电压介于 36V 到 38V 之间，则剩余电量为 75%（D29、D30 和 D27 亮起）
- 如果电池电压高于 38V，则剩余电量为 100%（所有 LED 灯亮起）。

4.3 布局

要了解更多信息，请参见本报告的 bq76930 产品说明书 (SLUSBK2) 7.4 节和本 TI 培训视频 [5]。

5 使用入门

5.1 PCB 概述

图 9 显示了带功能方框的 PCB 图片。

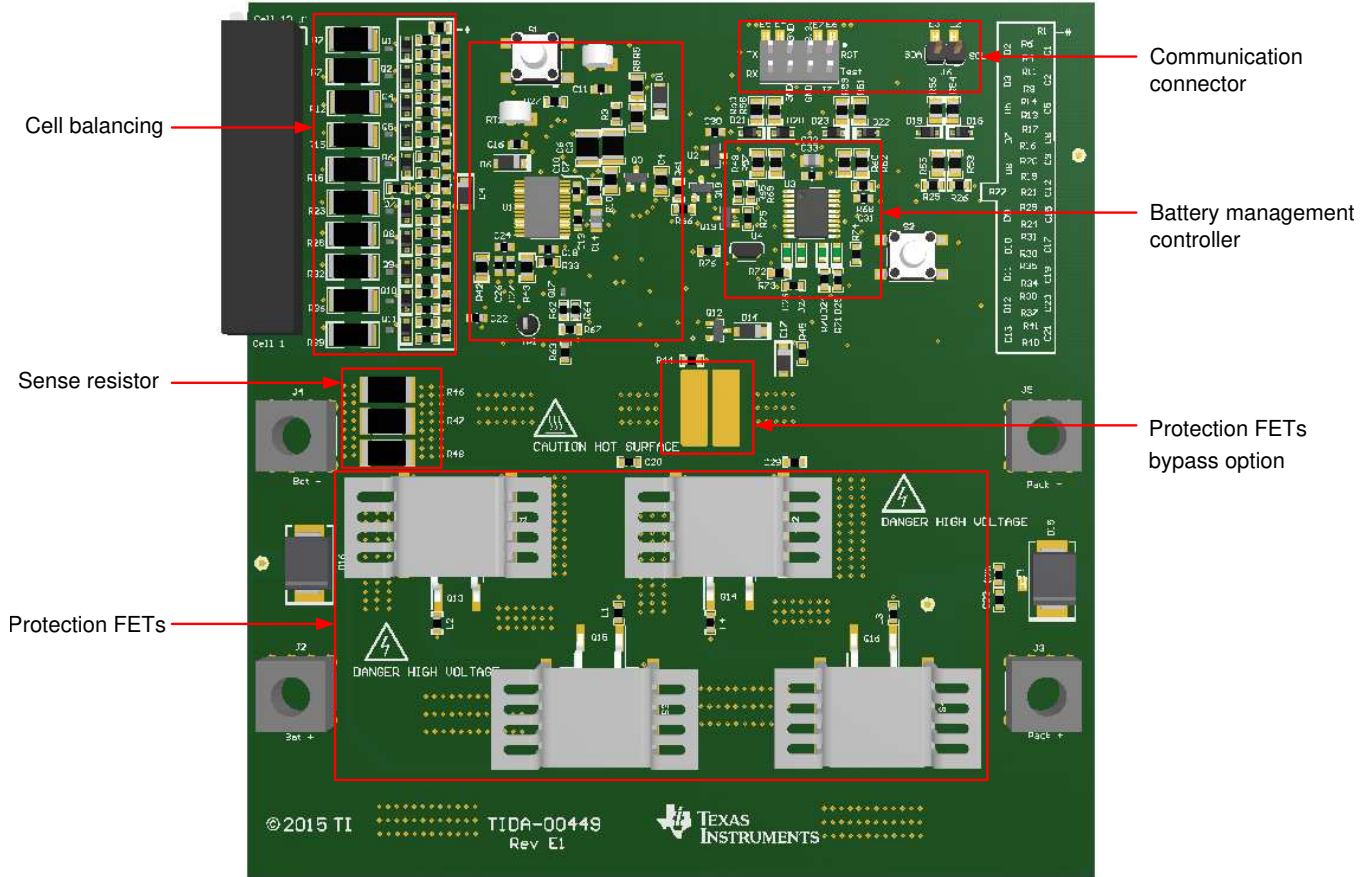


图 9. 带功能方框的 TIDA-00449 PCB

5.2 连接器设置

表 4. 连接器设置

连接器和 引脚分配	说明
J1-1	电池芯 10/电池+
J1-2	电池芯 9
J1-3	电池芯 8
J1-4	电池芯 7
J1-5	电池芯 6
J1-6	电池芯 5
J1-7	电池芯 4
J1-8	电池芯 3
J1-9	电池芯 2
J1-10	电池芯 1
J1-11	电池-
J2	电池+
J3	电池组+
J4	电池-
J5	电池组-
J6-1	SCL
J6-2	SDA
J7-1	/RST
J7-2	测试
J7-3	3.3 V
J7-4	XDS110 与
J7-5	XDS110 与
J7-6	XDS110 与
J7-7	TX
J7-8	RX

6 测试数据

6.1 测试设置

图 10 显示了使用的设置和测试设备。

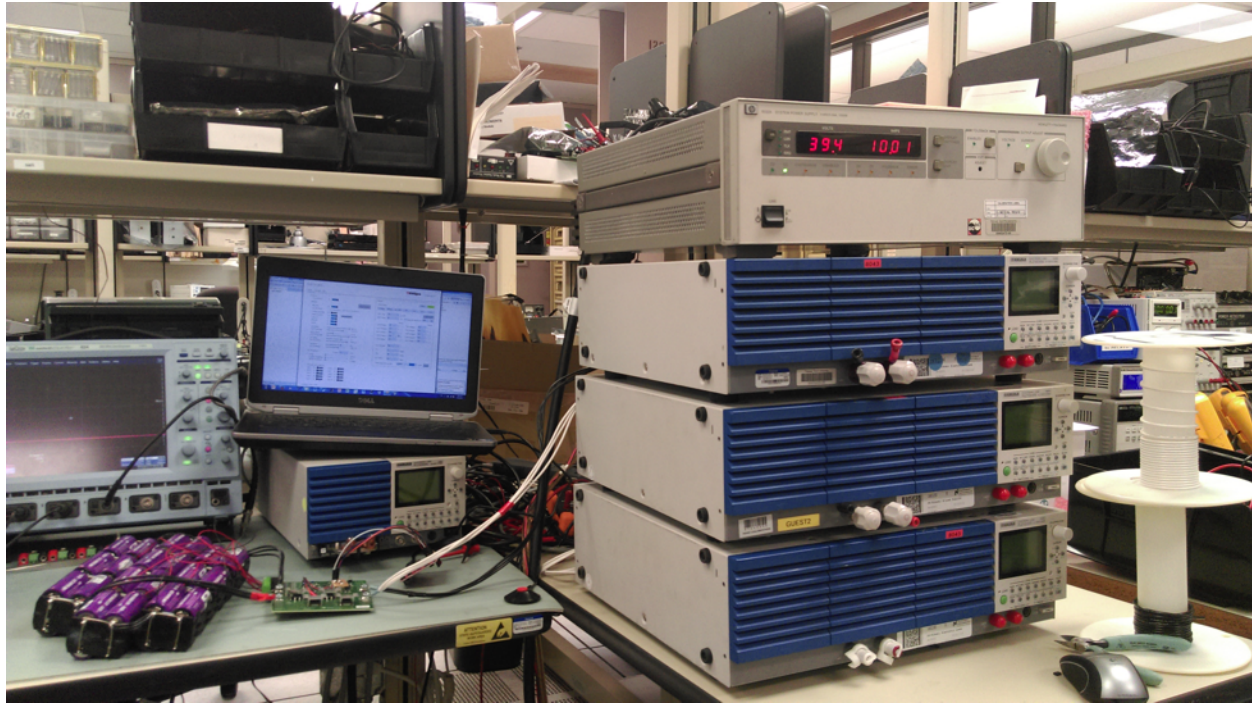


图 10. TIDA-00449 用于充电和放电的测试设置

表 5. 测试设备

测试设备	部件编号
示波器	LeCroy WaveSurfer 424
电子负载	Kikusui PLZ1004W
热像仪	ICI Duracam XT
电源	HP Agilent 6032A
TTL 到 USB 串行转换器	TTL-232R-3V3
电池芯	IMR 2015 P26650 4200 mAh V1
MSP430 编程器	MSP430 LaunchPad™

对于放电，并行安装了三个 Kikusui PLZ1004W 电子负载。

对于充电，使用了 HP Agilent 6032A 电源。通过将电流限制设置为所需的充电电流，该电源可以模拟锂离子电池充电器的行为，即一直保持恒定电流，直到达到所需的电池电压（通常为 4.2V），然后切换至恒定电压。一旦充电电流下降到收尾电流以下，电源就会关闭。

TTL-232R-3V3、TTL 到 USB 串行转换器将 TIDA-00449 的 UART 连接器连接到计算机。

MSP430 LaunchPad 连接到 Spy-Bi-Wire 连接器对 MSP430 进行编程。

6.2 测试结果

6.2.1 热性能

6.2.1.1 40A 放电电流时的完整放电循环

图 11 显示了以 40A 的持续放电电流进行完整放电循环后的结果。

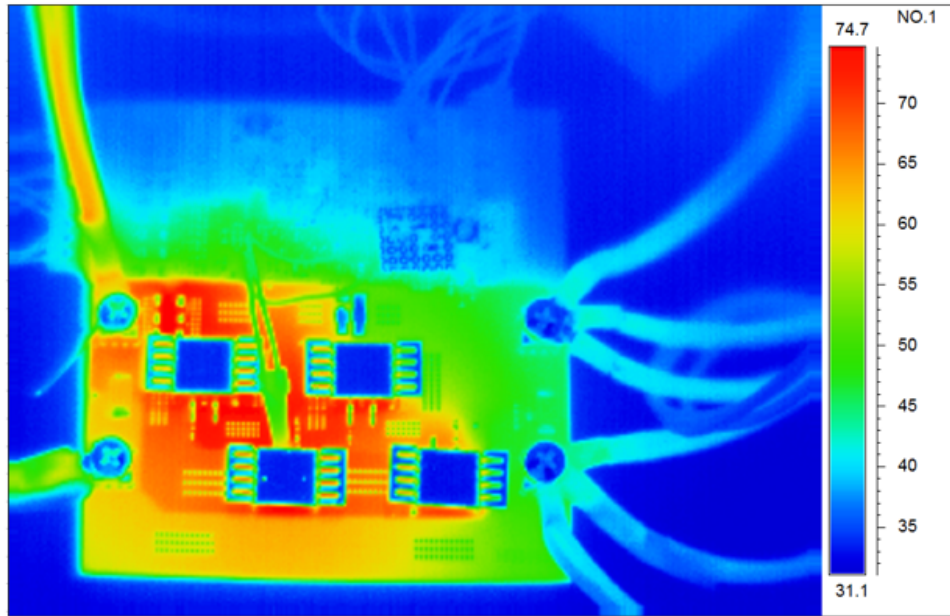


图 11. 40A 放电电流的热像图

6.2.1.2 电池平衡期间的充电结束

图 12 显示了充电结束时的情况，充电器处于恒定电压模式，两个电池（电池 4 和电池 6）达到平衡。

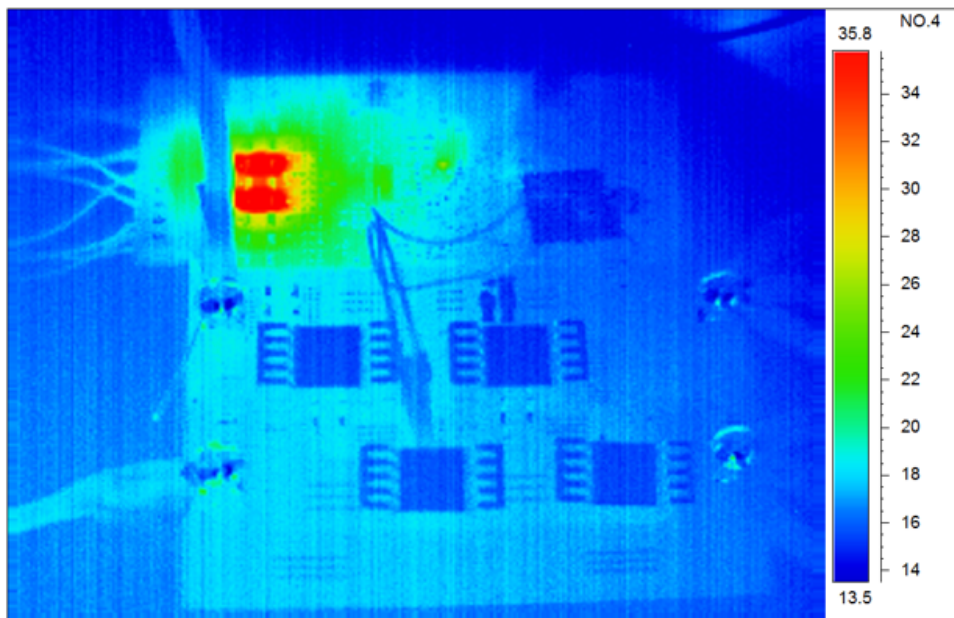


图 12. 电池平衡期间充电结束的热像图

6.2.2 放电和充电循环

图 13 显示了以 40A 持续放电电流和 9A 充电电流进行的放电和充电循环。

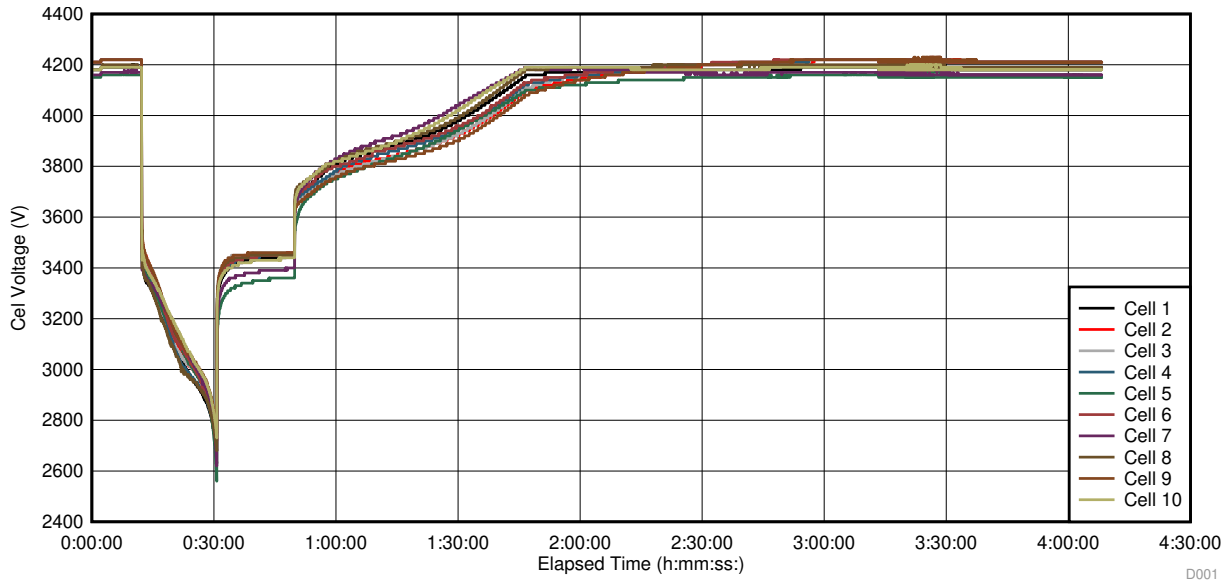


图 13. 放电和充电循环

6.2.3 保护 FET

6.2.3.1 DSG FET

图 14 和图 15 显示了 DSG FET 断开和闭合时的栅极电压。

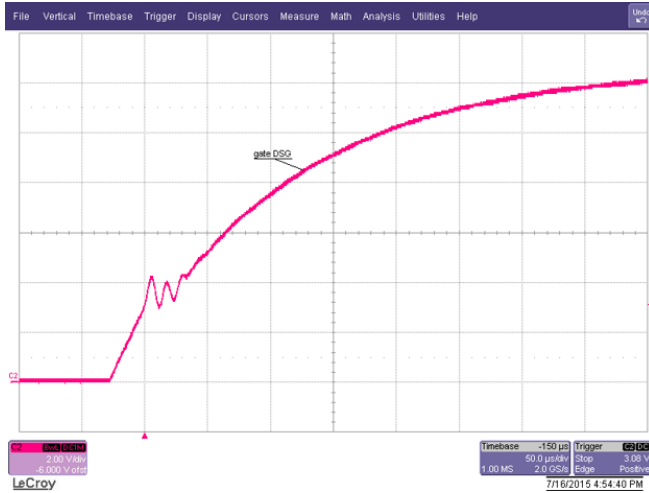


图 14. DSG FET 闭合时的栅极电压

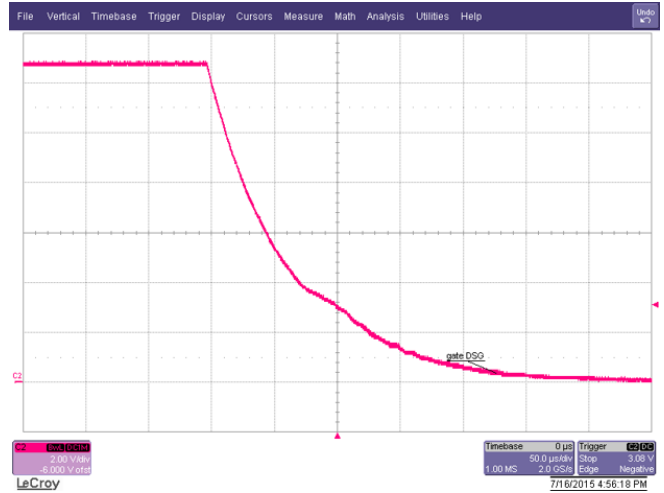


图 15. DSG FET 断开时的栅极电压

6.2.3.2 CHG FET

图 16 和图 17 显示了 CHG FET 断开和闭合时的栅极电压。

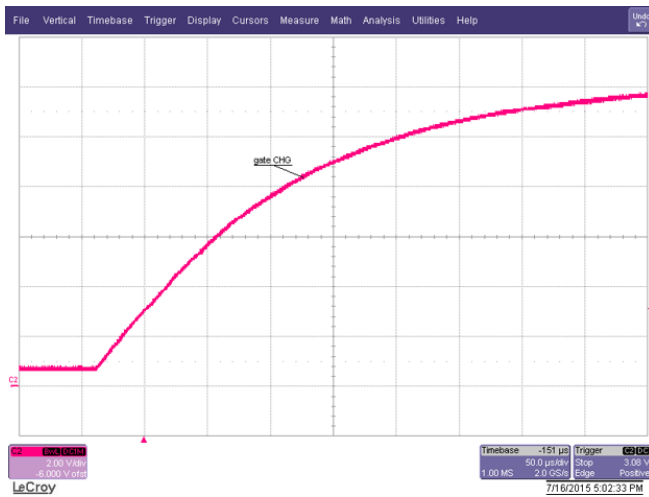


图 16. CHG FET 闭合时的栅极电压

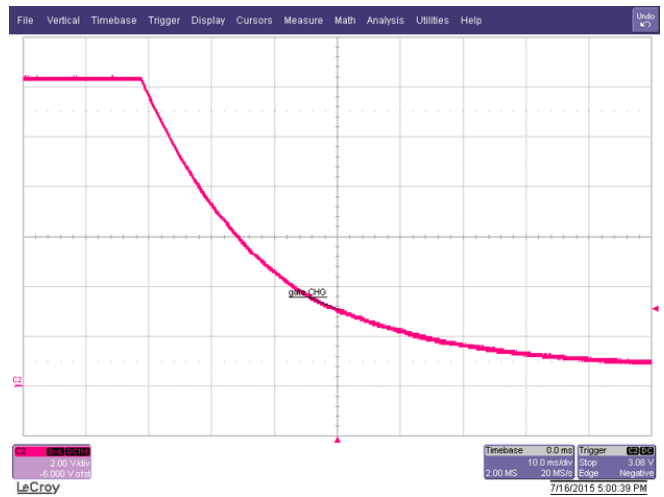


图 17. CHG FET 断开时的栅极电压

6.2.4 短路保护

图 18 显示了在电池组- 和电池组+ 之间出现短路时的短路保护。通道 1 是 DSG FET 栅极电压，通道 2 是传感电阻器之间的电压，通道 3 是电池- 和电池组- 之间的电压。

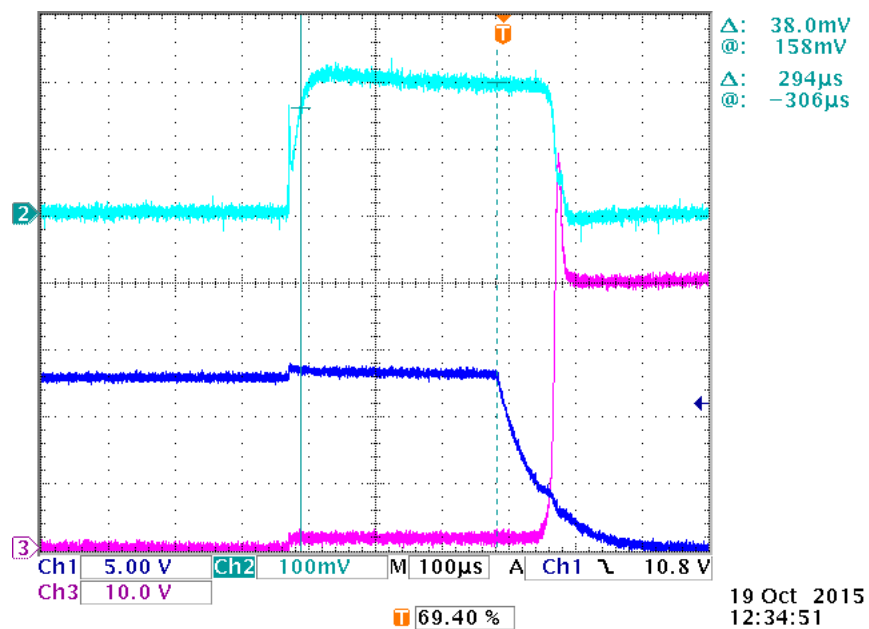


图 18. 短路保护

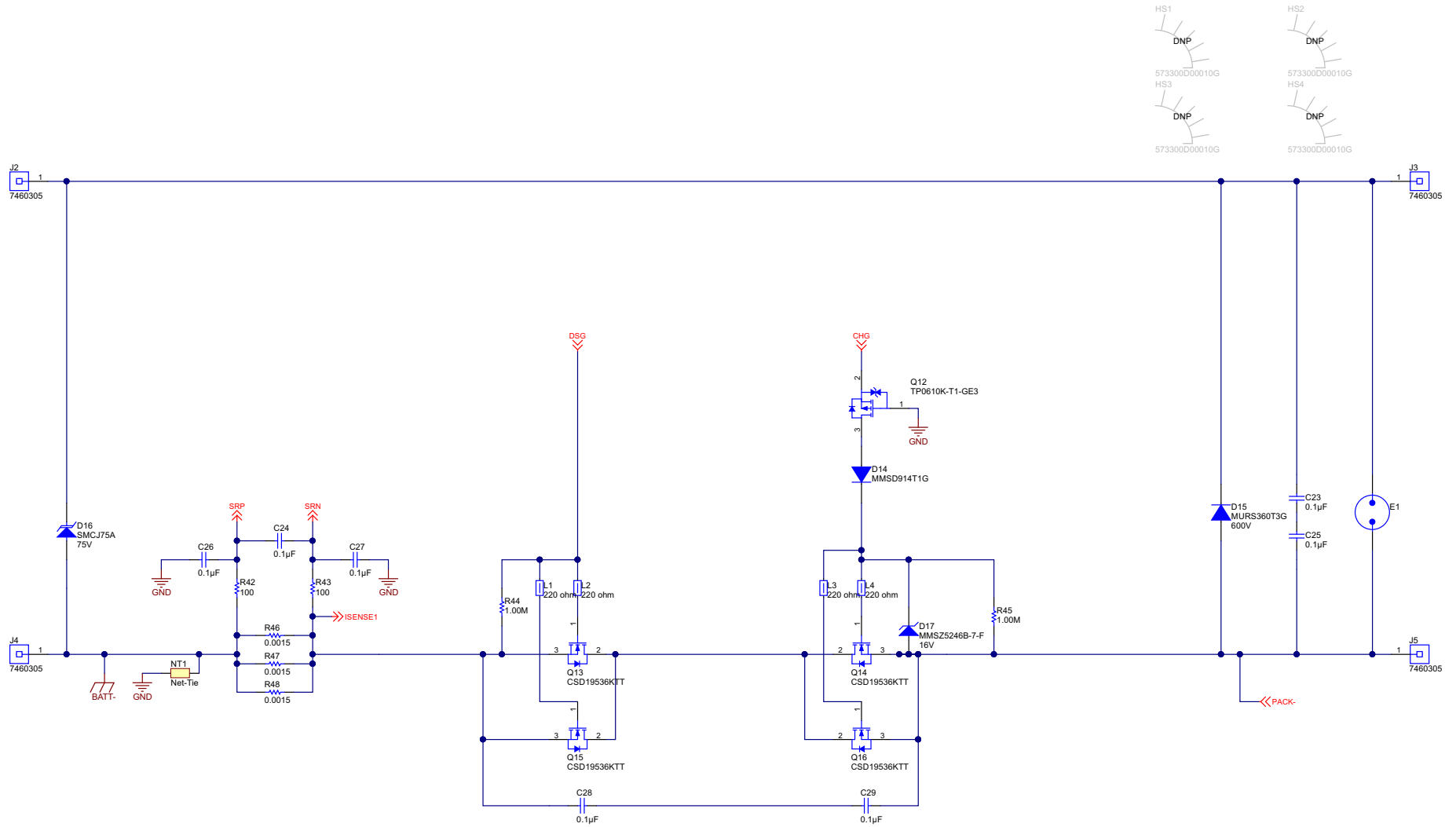


图 20. 传感电阻器和保护 FET 原理图

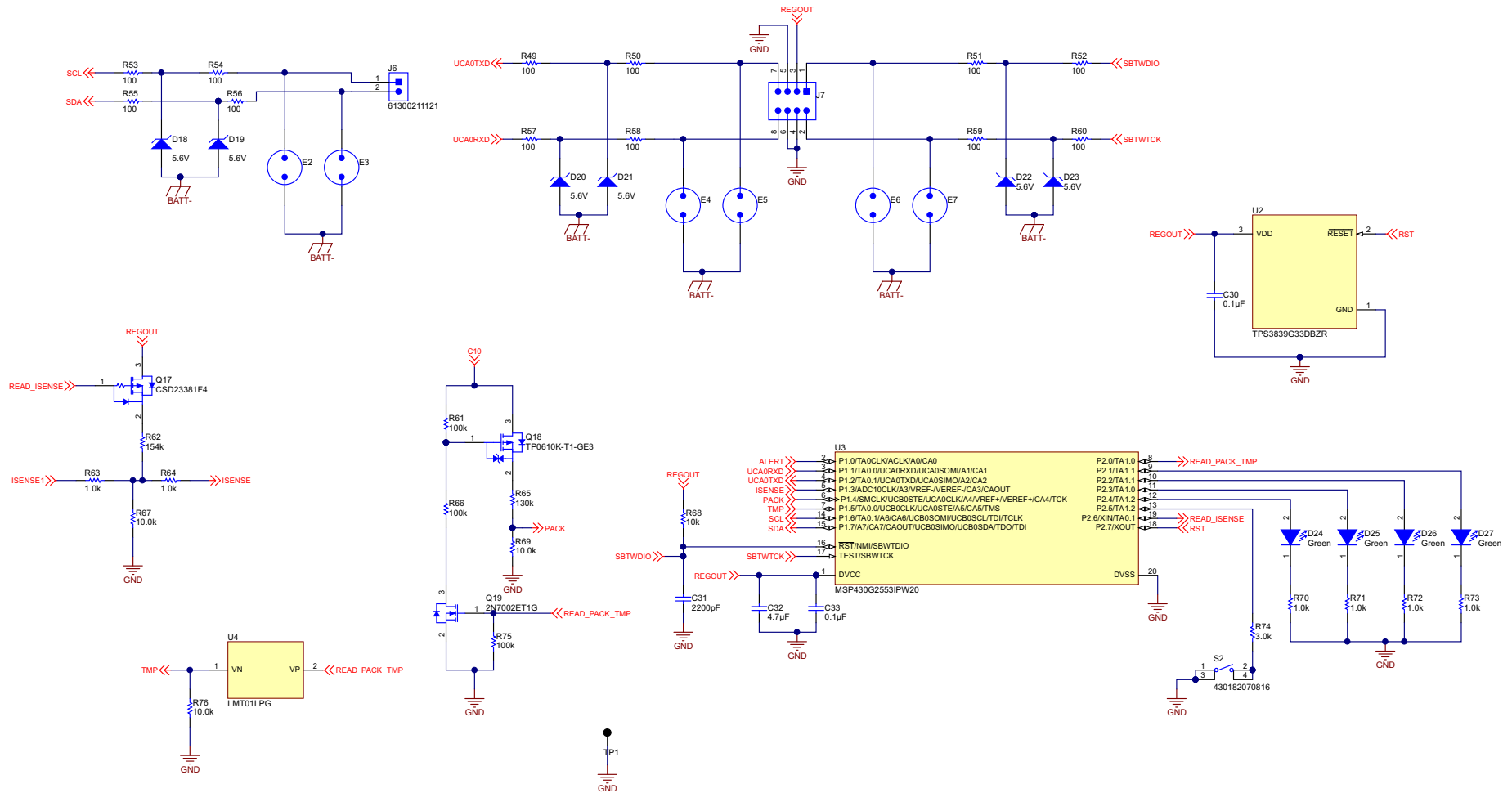


图 21. 电池管理控制器原理图

7.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM), 请参见 [TIDA-00449](#) 的设计文件。

表 6. BOM

项目	数量	基准	值	部件说明	制造商	制造商 部件号	PCB 封装
1	1	!PCB1		印刷电路板	任何一家制造商	TIDA-00449	
2	12	C1, C2, C5, C8, C9, C12, C15, C17, C19, C20, C21, C22	0.22μF	电容, 陶瓷, 0.22μF, 16V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206048	0603_095
3	2	C3, C6	10μF	电容, 陶瓷, 10μF, 35V, +/-10%, X7R, 1210	村田 (Murata)	GRM32ER7YA106KA12L	1210
4	2	C4, C7	1μF	电容, 陶瓷, 1μF, 50V, +/-10%, X7R, 0805	村田 (Murata)	GRM21BR71H105KA12L	0805
5	2	C10, C13	1μF	电容, 陶瓷, 1μF, 16V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206052	0603_095
6	2	C11, C16	4700pF	电容, 陶瓷, 4700pF, 50V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206087	0603_095
7	2	C14, C32	4.7μF	电容, 陶瓷, 4.7μF, 10V, +/-10%, X7R, 0805	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012207025	0805
8	1	C18	470pF	电容, 陶瓷, 470pF, 50V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206081	0603_095
9	4	C23, C25, C28, C29	0.1μF	电容, 陶瓷, 0.1μF, 100V, +/-10%, X7R, 0603	Murata	GRM188R72A104KA35D	0603
10	3	C24, C26, C27	0.1μF	电容, 陶瓷, 0.1μF, 50V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206095	0603_095
11	2	C30, C33	0.1μF	电容, 陶瓷, 0.1μF, 16V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206046	0603_095
12	1	C31	2200pF	电容, 陶瓷, 2200pF, 16V, +/-10%, X7R, 0603_095	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	885012206036	0603_095
13	3	D1, D4, D6	100V	二极管, 超快速, 100V, 0.15A, SOD-123	Diodes Inc.	1N4148W-7-F	SOD-123
14	16	D2, D3, D5, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D18, D19, D20, D21, D22, D23	5.6V	二极管, 齐纳二极管, 5.6V, 200mW, SOD-323	Diodes Inc.	MMSZ5232BS-7-F	SOD-323
15	1	D14	100V	二极管, 开关, 100V, 0.2A, SOD-123	安森美半导体 (ON Semiconductor)	MMSD914T1G	SOD-123
16	1	D15	600V	二极管, 超快速, 600V, 3A, SMC	安森美半导体 (ON Semiconductor)	MURS360T3G	SMC

表 6. BOM (continued)

项目	数量	基准	值	部件说明	制造商	制造商 部件号	PCB 封装
17	1	D16	75V	二极管, 瞬态电压抑制器, 单向, 75V, 1500W, SMC	仙童半导体 (Fairchild Semiconductor)	SMCJ75A	SMC
18	1	D17	16V	二极管, 齐纳二极管, 16V, 500mW, SOD-123	Diodes Inc.	MMSZ5246B-7-F	SOD-123
19	4	D24, D25, D26, D27	绿光	LED, 绿光, SMD	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	150060GS75000	LED_0603
20	3	FID1, FID2, FID3		基准标记。没有需要购买或安装的元件。	不适用	不适用	基准
21	4	H1, H2, H3, H4		Bumpon, Hemisphere, 0.44 X 0.20, Clear	3M	SJ-5303 (CLEAR)	透明 Bumpon
22	4	HS1, HS2, HS3, HS4		散热器, DDPAK/TO-263, SMT	爱美达 (Aavid)	573300D00010G	散热器, DDPAK
23	1	J1		终端块, 3.5mm, 11x1, R/A, TH	莫仕 (Molex)	395021011	39.90x7.03x9.33mm
24	4	J2, J3, J4, J5		电力元件套管, M5, 4x2	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	7460305	电力套管
25	1	J6		插头, 2.54mm, 2x1, 金, TH	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	61300211121	插头, 2.54mm, 2x1, TH
26	1	J7		插头, 100mil, 4x2, 锡, TH	赛凌思科技有限公司 (Sullins Connector Solutions)	PEC04DAAN	插头, 4x2, 100mil, 锡
27	4	L1, L2, L3, L4	220Ω	铁氧体磁珠, 220Ω @ 100MHz, 2.5A, 0603	村田 (MuRata)	BLM18SG221TN1D	0603
28	10	Q1, Q2, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11	12V	MOSFET, N/P 通道, 12V, 2.1A, 1.0x0.35x0.6mm	即用 (OOB) 体验	CSD13381F4	1.0x0.35x0.6mm
29	2	Q3, Q19	60V	MOSFET, N 沟道, 60V, 0.26A, SOT-23	安森美半导体 (ON Semiconductor)	2N7002ET1G	SOT-23
30	2	Q12, Q18	-60V	MOSFET, P 沟道, -60V, -0.185A, SOT-23	Vishay-Siliconix	TP0610K-T1-GE3	SOT-23
31	4	Q13, Q14, Q15, Q16	100V	MOSFET, N 通道, 100V, 200A,	即用 (OOB) 体验	CSD19536KTT	
32	1	Q17	-12V	MOSFET, P 通道, -12V, -2.3A	即用 (OOB) 体验	CSD23381F4	
33	20	R1, R3, R6, R11, R14, R17, R20, R21, R22, R29, R31, R35, R38, R41, R63, R64, R70, R71, R72, R73	1.0kΩ	电阻, 1.0kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06031K00JNEA	0603
34	10	R2, R7, R12, R15, R18, R23, R28, R32, R36, R39	28.7	电阻, 28.7, 1%, 0.75W, 2010	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW201028R7FKEF	2010

表 6. BOM (continued)

项目	数量	基准	值	部件说明	制造商	制造商 部件号	PCB 封装
35	13	R4, R9, R13, R16, R19, R24, R25, R26, R30, R34, R37, R40, R68	10k	电阻, 10kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060310K0JNEA	0603
36	2	R5, R10	100k	电阻, 100k 欧姆, 1%, 0.125W, 0805	威世达勒	CRCW0805100KFKEA	0805
37	15	R8, R42, R43, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59, R60	100	电阻, 100Ω, 1%, 0.125W, 0805	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0805100RFKEA	0805
38	2	R27, R74	3.0k	电阻, 3.0kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06033K00JNEA	0603
39	1	R33	499k	电阻, 499kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0603499KFKEA	0603
40	2	R44, R45	1.00Meg	电阻, 1.00MΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06031M00FKEA	0603
41	3	R46, R47, R48	0.0015	电阻, 0.0015, 1%, 2W, AEC-Q200 0 级, 2512	TT 电子/IRC	ULRB22512R0015FLFSL T	2512
42	3	R61, R66, R75	100k	电阻, 100kΩ, 5%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW0603100KJNEA	0603
43	1	R62	154k	电阻, 154kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0603154KFKEA	0603
44	1	R65	130k	电阻, 130kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0603130KFKEA	0603
45	3	R67, R69, R76	10.0k	电阻, 10.0kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060310K0FKEA	0603
46	2	RT1, RT2	10.0kΩ	热敏电阻 NTC, 10.0k 欧姆, 1%, 圆盘式, 5x8.4mm	SEMITEC Corporation	103AT-2	圆盘式, 5x8.4mm
47	2	S1, S2		开关, SPST-NO, Off-Mom, 1Pos, 0.05A, 12VDC, SMT	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	430182070816	6.2mm x 6.2mm
48	1	TP1	黑色	测试点, 微型, 黑色, TH	启斯东 (Keystone)	5001	黑色微型测试点
49	1	U1		适用于锂离子和磷酸盐电池组的电池监控器, DBT0030A	即用 (OOB) 体验	BQ7693003DBT	DBT0030A
50	1	U2		超低功耗, 电源电压监测器, DBZ0003A	即用 (OOB) 体验	TPS3839G33DBZR	DBZ0003A
51	1	U3		16MHz 混合信号微控制器, 具有 16KB 闪存、512B SRAM 和 24 GPIO, -40 到 85°C, 20 引脚 SOP (PW), 环保 (符合 RoHS 标准, 无镉/溴)	即用 (OOB) 体验	MSP430G2553IPW20	PW0020A
52	1	U4		0.5°C 精度 2 引脚数字 NTC 或 PTC 热敏电阻更换件, LPG0002A	即用 (OOB) 体验	LMT01LPG	LPG0002A

7.3 PCB 板层图

要下载板层图，请参见 [TIDA-00449](#)。

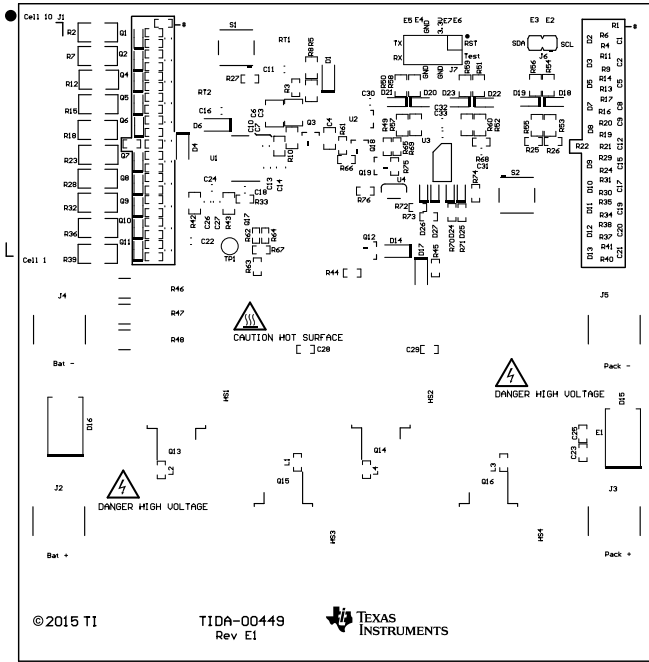


图 22. 顶部覆盖层

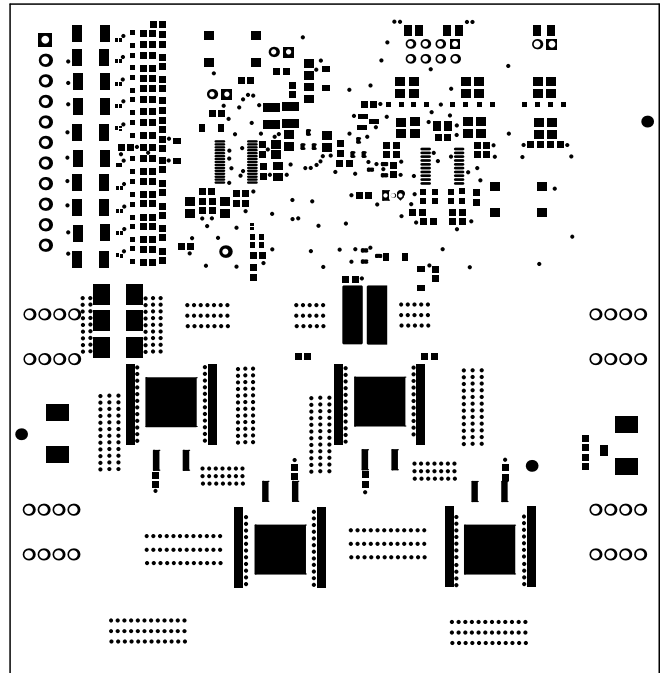


图 23. 顶部焊接掩模

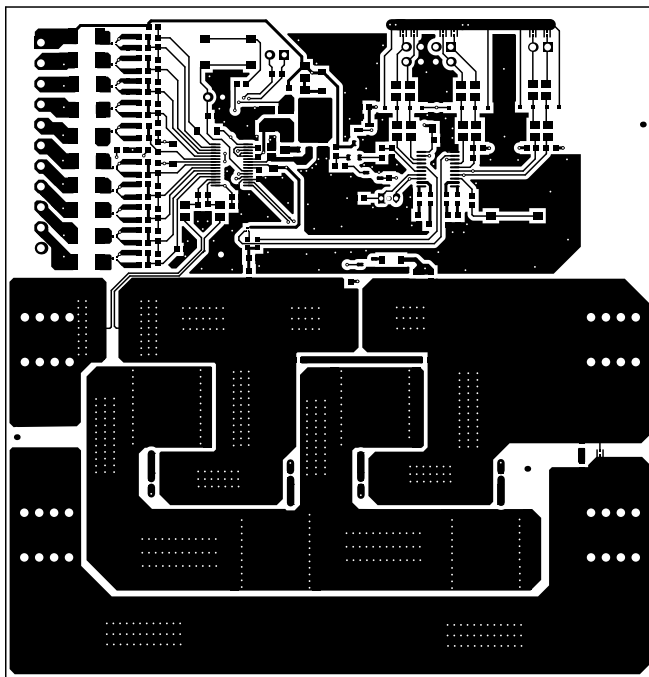


图 24. 顶层

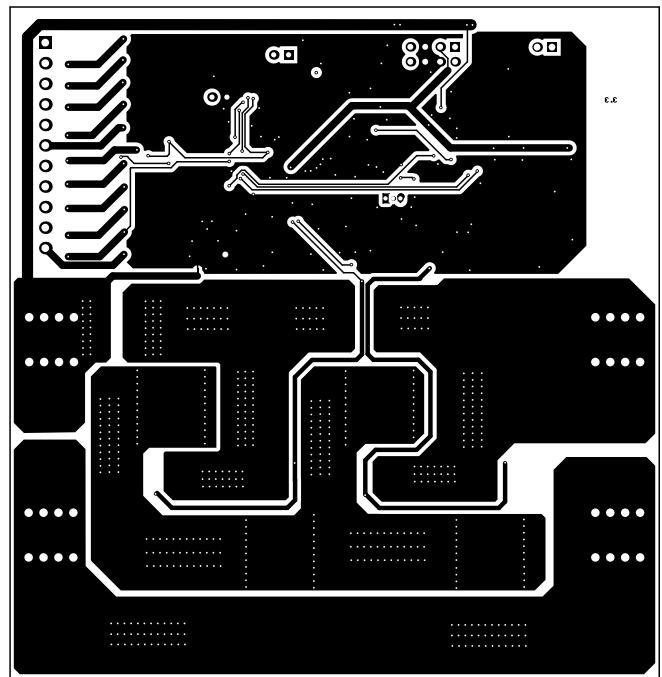


图 25. 底层

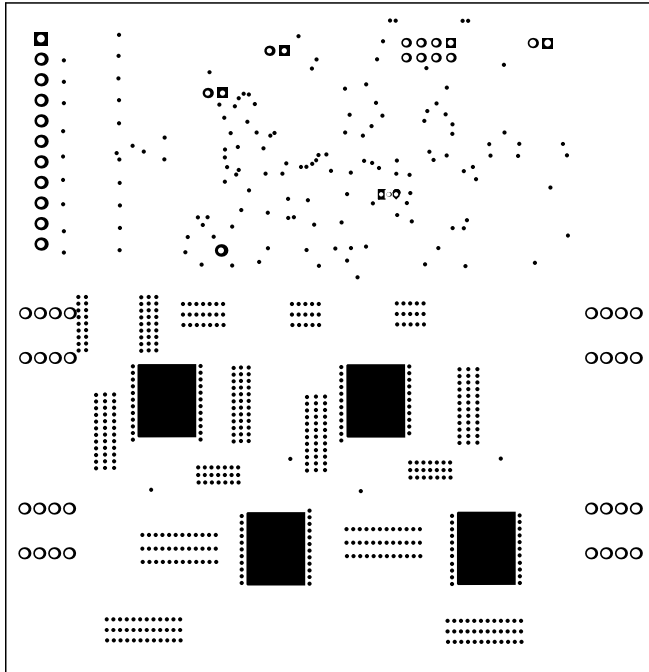


图 26. 底部焊接掩模

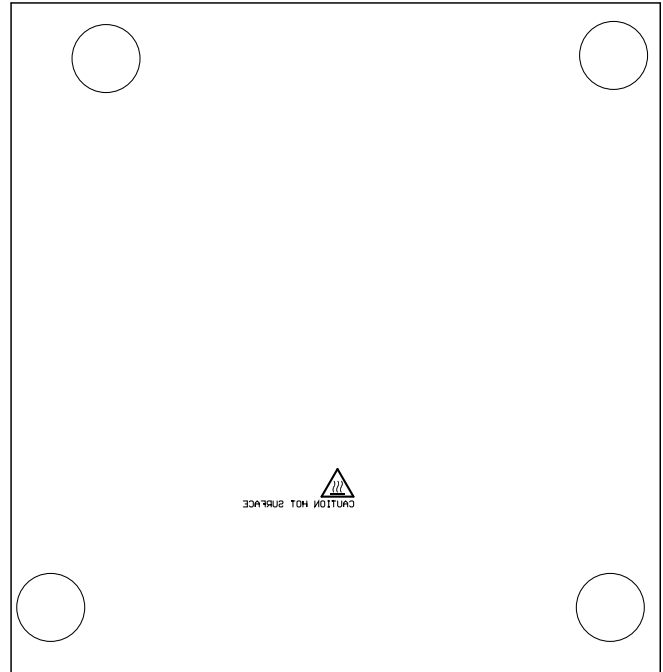


图 27. 底部覆盖层

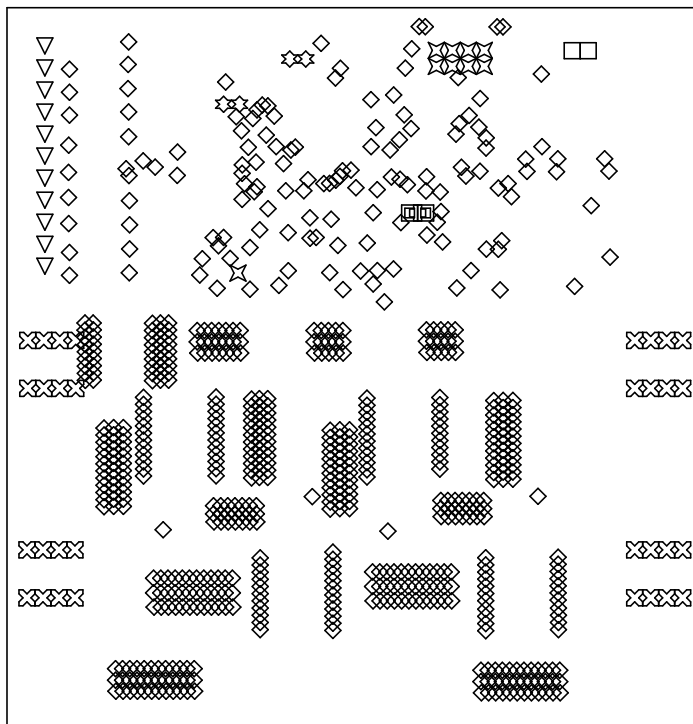


图 28. 钻孔图

Symbol	Quantity	Finished Hole Size	Plated	Hole Type
⊕	1	29.53mil (0.750mm)	NPTH	Round
◇	665	12.00mil (0.305mm)	PTH	Round
■	2	29.53mil (0.750mm)	PTH	Round
☆	4	35.00mil (0.889mm)	PTH	Round
✕	9	40.00mil (1.016mm)	PTH	Round
□	2	45.28mil (1.150mm)	PTH	Round
▽	11	52.00mil (1.321mm)	PTH	Round
⊗	32	57.09mil (1.450mm)	PTH	Round
	726 Total			

7.4 布局准则

关于布局的第一个决策是，考虑到成本以及便于与电池组进行集成，仅在顶层填充组件。决定使用 2 盎司厚的双层铜板。采用双层是在成本和布线复杂性之间采取的折中措施，2 盎司厚的铜有助于满足应用的高电流要求。

TIDA-00449 的布局包含两个区块：

- FET 区块，处理高电流，包括传感电阻器、保护 FET 和高电流连接器
- 控制区块，只处理低电流，包括其余组件（平衡电路、AFE、MCU）

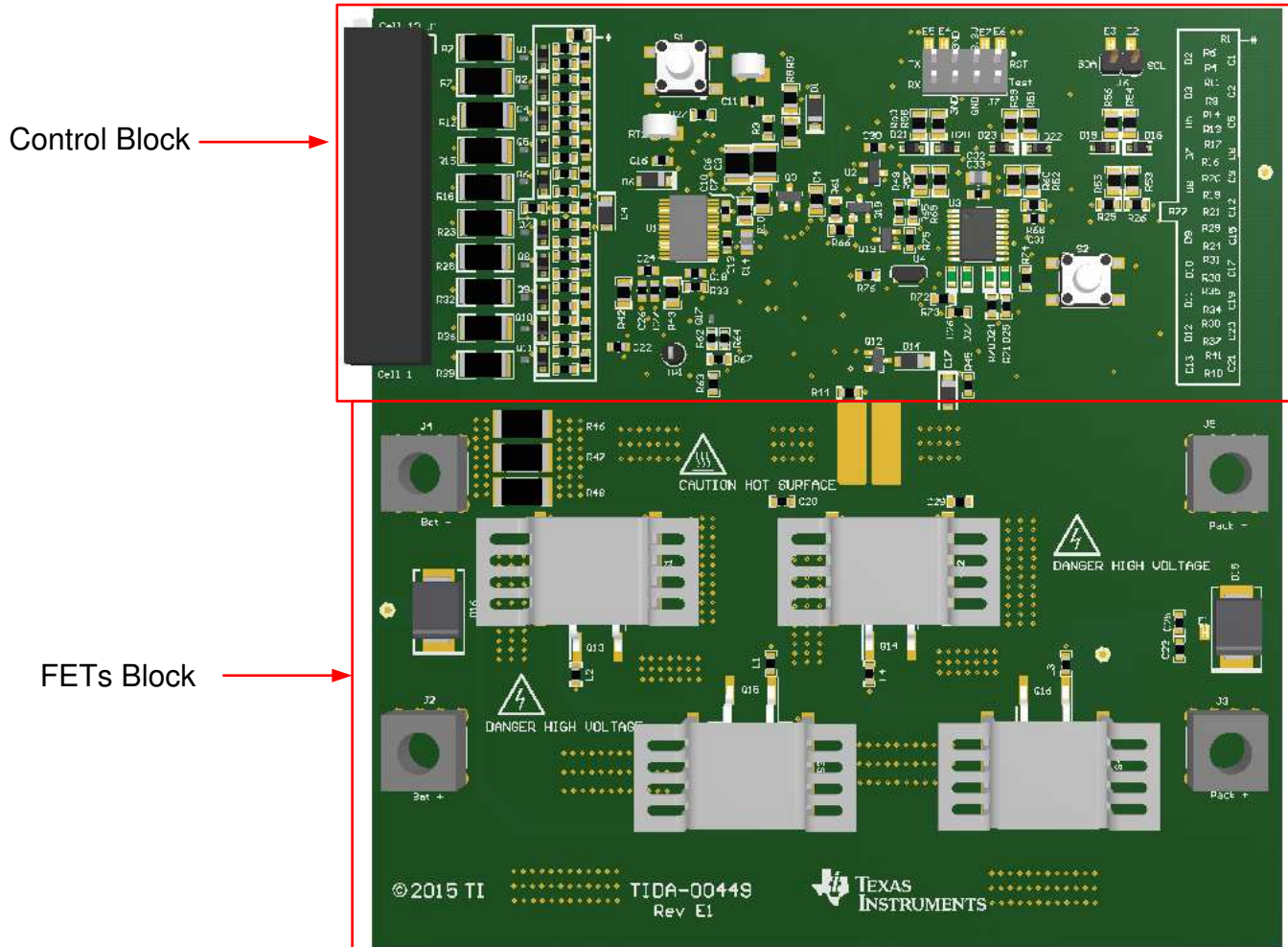


图 29. 布局方框图

7.4.1 FET 区块

这部分的布局的主要考虑因素是通过传感电阻器和保护 FET 的高电流产生的热量。除 2 盎司厚的铜之外，采用宽线迹（宽度大于 350mil）在顶层和底层的电池- 和电池组- 以及电池+ 和电池组+ 之间布线，并使用相当多的通孔链接顶层和底层。

在四个保护 FET 中每个下方的底层上添加的焊盘可以实现在底层上添加散热器。

在某些应用，不使用保护 FET；出于这个原因，添加两个焊盘为保护 FET 设置旁路。

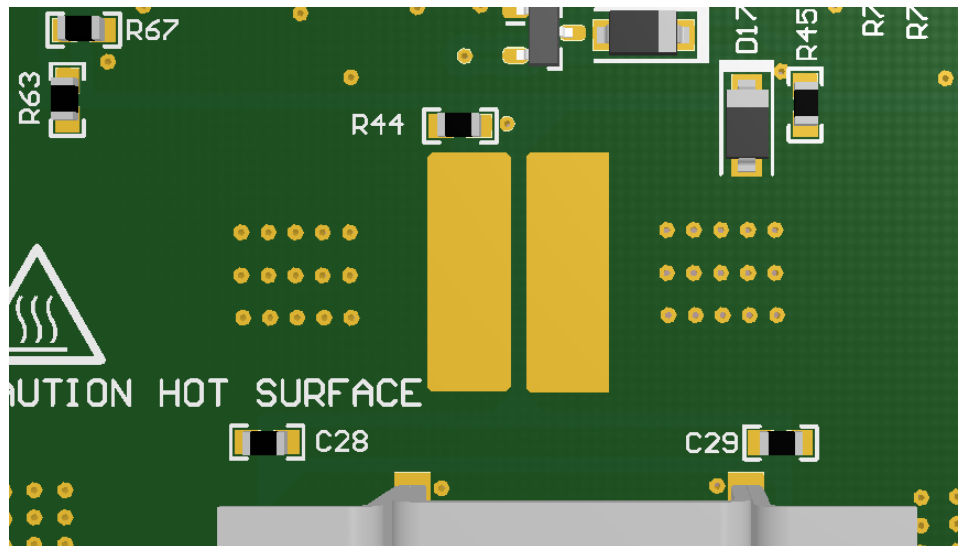


图 30. 保护 FET 旁路选项

7.4.2 控制区块

为了减少寄生 PCB 阻抗，通过网带连接将控制块的接地连接到高电流电池- 线迹。

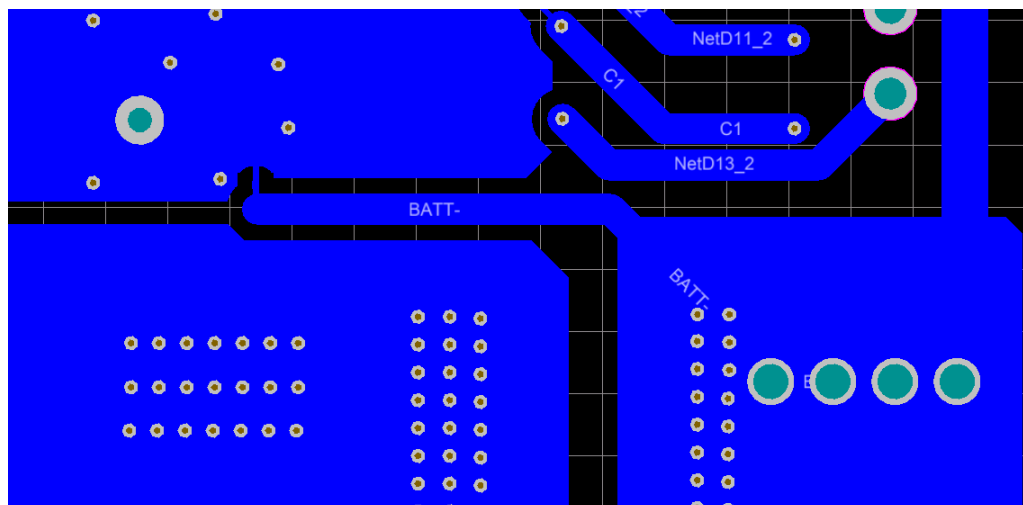


图 31. 通过网带连接的接地连接

将一些电火隙（E1 到 E7）添加到电池组（UART、SBW、电池组- 和电池组+）的连接器，以帮助电池组承受 ESD。

7.5 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参见 [TIDA-00449](#) 的设计文件。

7.6 光绘文件

要下载光绘文件，请参见 [TIDA-00449](#) 的设计文件。

7.7 装配图

要下载装配图，请参见 [TIDA-00449](#) 的设计文件。

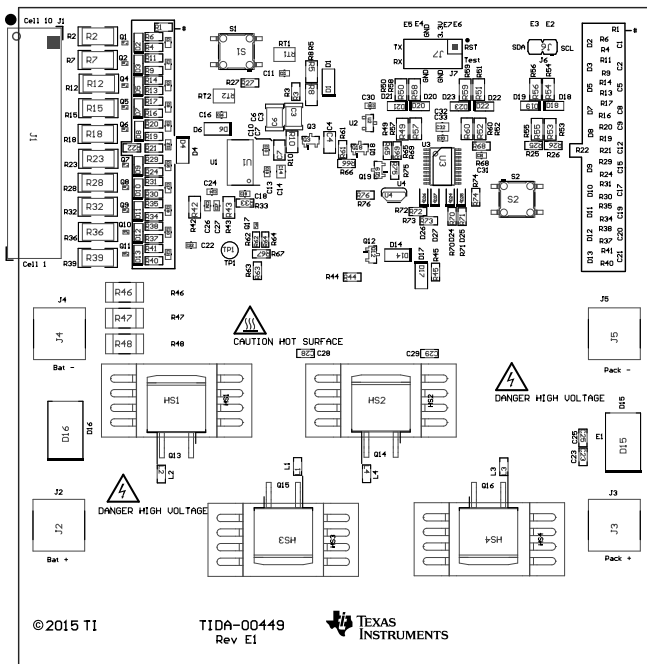


图 32. 顶层装配图

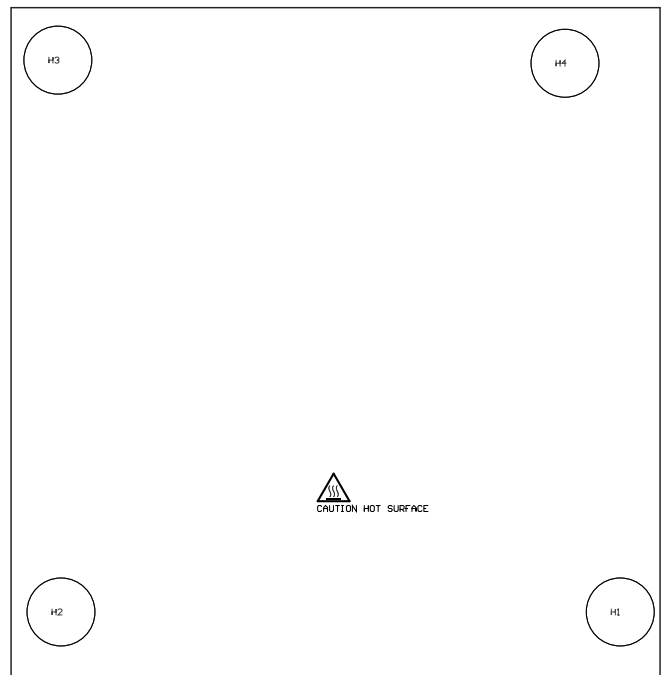


图 33. 底层装配图

8 相关文档

1. 德州仪器 (TI), 《bq769x0 系列十大设计注意事项》, 应用报告 ([SLUA749](#))
2. 德州仪器 (TI), 《bq76930 和 bq76940 评估模块》, 用户指南 ([SLVU925](#))
3. 德州仪器 (TI), 《bq76920、bq76930 和 bq76940 AFE 常见问题解答》, 用户指南 ([SLUUB41](#))
4. 德州仪器 (TI), 《bq76940 的 I²C 通信示例代码和基于 MSP430G2553 的 CRC 选项》, 应用报告 ([SLVA626](#))
5. 德州仪器 (TI), 电量监测计设计的 PCB 布局指南, 视频 (<https://training.ti.com/pcb-layout-guidelines-fuel-gauge-design>)

8.1 商标

9 关于作者

KEVIN STAUDER 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师，负责为工业驱动器开发参考设计。

RENTON MA 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师，负责为工业驱动器开发参考设计。

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from B Revision (July 2018) to C Revision	Page
• 已添加 添加了将此参考设计用于 2 层 PCB。	1
Changes from A Revision (October 2015) to B Revision	Page
• 已更改 更改了标题	1
Changes from Original (September 2015) to A Revision	Page
• 已更改 更改了预览页面	1

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司