

## Design Guide: TIDA-010271

## 面向储能系统的可堆叠电池管理单元参考设计



## 说明

该参考设计是一种全面的电芯温度传感和高电芯电压精度锂离子 (Li-ion)、磷酸铁锂 (LiFePO4) 电池包 (32 芯)。该设计可监控每个电芯的电压和电芯温度，并保护电池包以确保安全使用。该设计使用板载和非板载菊花链通信接口，以实现具有成本效益的堆叠式总线连接。得益于这些特性，该参考设计适用于高容量电池包应用。

## 资源

TIDA-010271

设计文件夹

BQ79616、TPS22810-Q1

产品文件夹

TMUX1308、TMUX1574

产品文件夹

ISO7742、TMUX1102

产品文件夹

TS205C、ESD441、ESD2CAN24-Q1

产品文件夹

## 特性

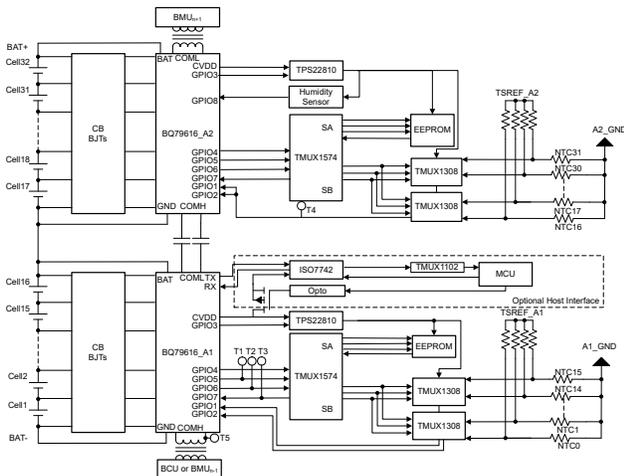
- 25°C 时的电压精度为  $\pm 1.5\text{mV}$ ，无需校准
- 高达 100mA 的内部电芯均衡，可通过外部均衡电路提供更高容量的支持
- 通过多路复用器 (MUX) 实现全面的电芯温度检测
- 强大的可编程电池电芯和电池包保护
- 具有数据重新计时和环形架构的稳健菊花链通信
- 关断模式下为  $15\mu\text{A}$
- 可选隔离式通用异步接收器/发送器(UART)接口，用于微控制器和控制器局域网 (CAN) 通信

## 应用

- 电池储能系统
- 其他工业电池包 (10 节及以上)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



## 1 系统说明

目前，电池储能系统 (BESS) 在住宅、商业和工业、电网储能和管理领域发挥着重要作用。BESS 具有多种高压系统结构。商业和工业以及电网 BESS 包含多个机架，每个机架都包含多个堆叠的电池包。住宅 BESS 仅包含电池包。

*电池包* 是构成 BESS 的基本模块。*电池包* 由串联和并联的电池电芯组成。电芯通道数量从 12 到 64 不等。由于电池电芯需要适当的工作和贮存温度、电压范围和电流范围，以确保生命周期和安全，因此设计人员必须监测并保护电池包级别中的电池电芯。

电池管理单元 (BMU) 是一种控制器，用于在整个生命周期内监控 *电池包* 中每个电池电芯的电压和温度。BMU 需要具备高测量精度来进行电压和温度监测。BMU 收集的信息将传输到机架级控制器电池控制单元 (BCU)，以进行安全和充电管理。BMU 和 BCU 之间还需要稳健且快速的通信。

出于安全、法规和成本方面的考虑，需要在 BESS 中使用磷酸铁锂电池。磷酸铁锂电池的充电或放电曲线在大约 85% 至 100% 的充电状态 (SOC) 范围内保持相当高的线性，但曲线在大约 10% 至大约 85% 的 SOC 范围内会突然发生斜率变化。在选择 BESS 设计中可接受的电压精度时，这一点非常重要。大多数情况下，测量精度需要为 3mV 至 5mV，以计算高 SOC 精度和宽放电深度 (DOD)。

对于通信接口，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。

菊花链可以替代 CAN 设计。与 CAN 接口相比，BMU 中只需要几个变压器。因此，菊花链设计在成本上优于 CAN，尤其是在大容量电池包应用中，因为在由许多 BMU 节点和 CAN 接口器件组成的大容量 BESS 中，成本是 CAN 结构的一个问题。绝缘要求还会提高成本，因为 BMU 和 BCU 通信接口之间所需的增强型绝缘要求采用数字隔离器和隔离式电源模块。

该设计侧重于大容量电池包应用和适用于住宅、商业和工业、电网 BESS 等领域的应用。该设计使用两个 BQ79616 器件 ( 电池监测器、平衡器和集成硬件保护器 ) 来监测每个电芯的电压和 32 芯电池包的温度，并在电芯过压、电芯欠压和过热等情况下保护电池包。该设计包含四个具有 8:1 GPIO 扩展比的 TMUX1308 器件 ( 用于测量多达 32 个电芯的温度 ) 和一个用于串行外设接口 (SPI) 扩展的 TMUX1574 器件，以在外部电可擦除可编程只读存储器 (EEPROM) 中恢复电池包信息。该设计使用内部电芯均衡 (CB) 来获得每个电芯通道 100mA 的均衡电流，并保留一个外部 CB 电路，以处理潜在的更大均衡电流。

两个 BQ79616 器件之间的板载通信采用电容隔离式菊花链。BMU 和 BMU 或 BCU 之间的非板载通信采用变压器隔离式菊花链。该设计还为可用于 CAN 结构的非板载 MCU 保留了一个隔离式 UART 接口。

## 2 系统概述

该设计使用两个 BQ79616 器件来监测每个电芯的电压和 32 芯电池包的温度，并保护电池包免受电芯过压、电芯欠压和过热等所有异常情况的影响。在图 2-1 中，顶部 BQ79616 器件是 BQ79616-A2，而底部 BQ79616 器件是 BQ79616-A1。正向菊花链通信方向是从 BQ79616-A1 器件到 BQ79616-A2 器件。

每个 BQ79616 都有 8 个用于温度检测的 GPIO 引脚和 16 个用于电压检测的 VC 引脚。要在 GPIO 引脚较少的情况下监测所有 VC 通道的温度，需要使用两个 TMUX1308 多路复用器。多路复用器将一个 BQ79616 的温度检测功能从 8 个通道扩展到 16 个通道。TMUX1574 用于将 BQ79616 的 GPIO4 至 GPIO7 扩展到恢复电池包信息的外部 SPI EEPROM。

要对 TMUX1308 运行诊断，TMUX1308 的每个通道可以一次一个连接到 BQ79616 的 TSREF 输出引脚。TSREF 会根据 BCU 命令设置为高电压电平或低电压电平。然后，BCU 会轮询多路复用器通道，并确定连接到 TSREF 的多路复用器通道上报告的电压是否与 TSREF 引脚输出相匹配。该诊断方法可以显示多路复用器是卡在特定通道上，还是报告与错误通道对应的电压。

在该设计中，GPIO8 引脚保留用于湿度传感器接口。

BQ79616 上的 CVDD 引脚用于为 TMUX1308、TMUX1574、外部 EEPROM 和湿度传感器供电。由于 CVDD 提供恒定导通电源，因此当 BQ79616 处于关断模式时，该引脚可能导致外部负载漏电流。TPS22810 由 BQ79616 的 GPIO3 启用，并用于切换 CVDD 的电源输出，以防止意外漏电流。

BQ79616 支持与 MCU 的 UART 接口。ISO7742 放置在 BQ79616 和 MCU 之间，以隔离每个器件的 TX 和 RX 引脚。由于 BQ79616 的 TX 和 CVDD 引脚是恒定导通电源，因此这些引脚在关断模式下可能导致 ISO7742 漏电流。PMOS、TMUX1102 和光耦合器用于阻断漏电流。要启动 UART 通信，MCU 需要启用光耦合器以从 MCU 侧接通 PMOS 和 TMUX1102。

该设计还使用 BJT 网络来实现外部被动电芯均衡。内部被动电芯均衡电阻可支持高达 100mA 的均衡电流。内部被动电芯均衡电阻两端的电压用于接通外部 BJT，以实现内部被动电芯均衡。

为了隔离通信，该设计使用两个高压电容器来实现两个 BQ79616 之间的菊花链通信，并在 BMU 或 BCU 之间的菊花链通信中使用两个变压器。

## 2.1 方框图

图 2-1 展示了系统方框图。

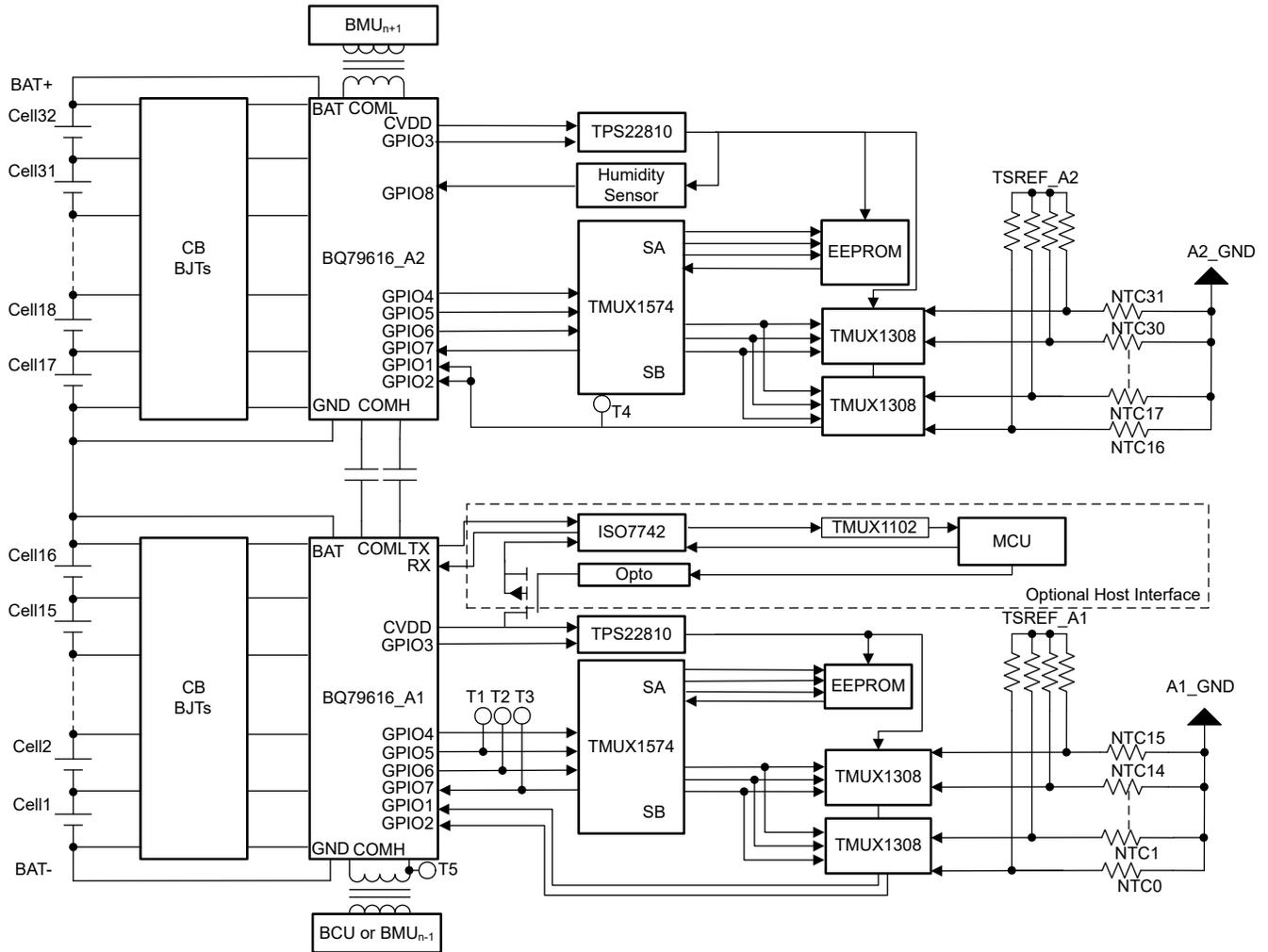


图 2-1. TIDA-010271 方框图

## 2.2 设计注意事项

### 2.2.1 多路复用器网络和开关策略

图 2-2 展示了读取所有热敏电阻和电芯电压的策略。两个 TMUX1308 器件用于将 16 个负温度系数 (NTC) 热敏电阻多路复用至一个 BQ79616。BQ79616 使用三个 GPIO (GPIO5、GPIO6 和 GPIO7) 来对 TMUX1308 的 8 个 NTC 热敏电阻通道进行寻址，并使用两个 GPIO (GPIO1 和 GPIO2) 来从两个 TMUX1308 器件读取公共输出引脚。这意味着 5 个 GPIO 可以开关 16 个 NTC 热敏电阻。如果需要更多的热敏电阻，6 个 GPIO 可以开关 24 个 NTC 热敏电阻。

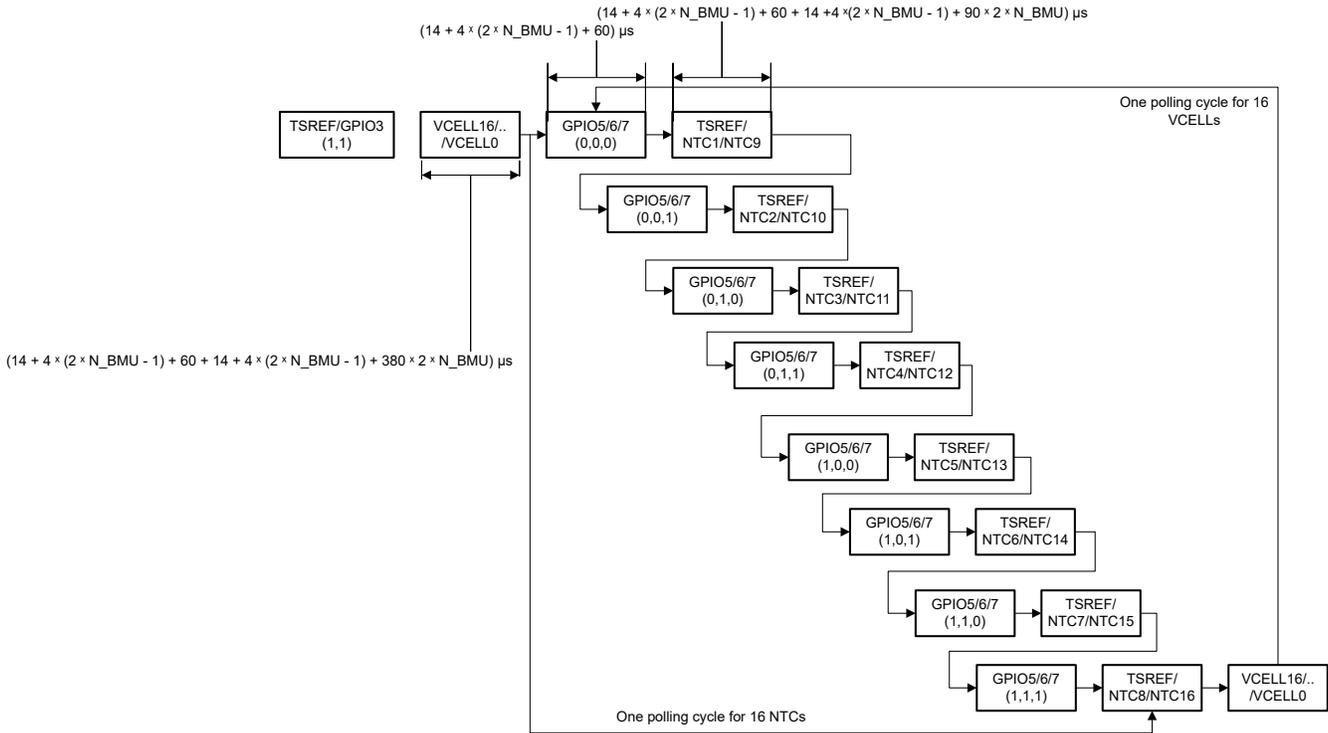


图 2-2. 读取所有热敏电阻和电芯电压的策略

尽管可以使用 TMUX1308 或其他多路复用器轻松增加 NTC 热敏电阻的数量，但系统仍需要高效的开关策略，以在法规规定的安全时间内连接所有 16 个 NTC 热敏电阻。

NTC 热敏电阻开关的循环包括对所有堆叠的 BQ79616 GPIO5 至 GPIO7 引脚进行广播写入，以及对 TSREF 和 GPIO1 至 GPIO2 进行广播读取。该设计需要 8 个循环来从 16 个 NTC 热敏电阻读取温度数据。假设堆叠 BMU 的数量为  $N$ ，并且该设计使用 BQ79600 基础器件（确定  $N$  时不计入），则一个循环需要  $(14 + 4 \times (2 \times N_{\text{BMU}} - 1) + 60) \mu\text{s}$  来对所有器件上的 GPIO5 至 GPIO7 引脚进行广播写入。对 TSREF 和 GPIO1 至 GPIO2 的广播读取需要  $(14 + 4 \times (2 \times N_{\text{BMU}} - 1) + 60 + 14 + 4 \times (2 \times N_{\text{BMU}} - 1) + 90 \times 2 \times N_{\text{BMU}}) \mu\text{s}$ 。

如果 BESS 机架电压为 1500V，并且一个机架由 470 个串联电池组成，则使用 15 个 BMU (30 个 BQ79616 器件) 来监控所有电池电芯。执行一个循环来从堆叠的 BQ79616 器件读取温度数据需要 4.11ms，然后轮询堆叠中每个 BQ79616 上 16 个 NTC 热敏电阻中的 2 个。从堆叠中每个 BQ79616 上的所有 16 个 NTC 热敏电阻读取温度数据需要 32.880ms。在读取 NTC 热敏电阻数据后，需要 11.706ms 才能读取所有堆叠 BQ79616 器件的电芯电压 (VCELL) 数据。为 1500V 机架收集温度和 VCELL 数据所需的总时间约为 44ms，符合 GBT34131-2023 标准 (VCELL 为 100ms，NTC 热敏电阻为 1s)。

## 2.2.2 Cell Balancing

图 2-3 展示了电芯均衡电路。

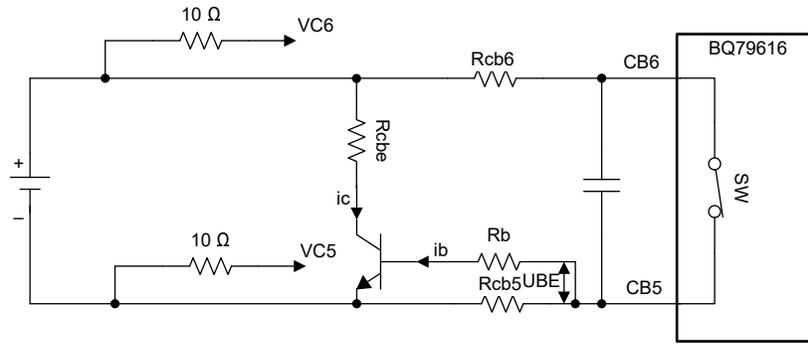


图 2-3. 电芯均衡电路

该设计使用内部场效应晶体管 (FET) 来实现 100mA 均衡电流。假设给定条件：初始 CB 电压为 3.5V，最终 CB 电压为 3.3V。为了在 CB 电压为 3.5V 时实现 100mA 均衡电流，这里使用  $R_{cb6} = R_{cb5} = 15 \Omega$ 。

$R_{cb5}$  两端的电压还为外部电芯均衡 NPN 晶体管提供偏置电压。 $R_{cbe}$  值可以根据 CB 电压和所需的外部电芯均衡电流来确定。 $R_b$  需要满足以下两个条件：

1. 条件 1：NPN 晶体管在饱和区工作，散热面积小： $i_c < \text{系数} \times h_{fe} \times i_b$ 。 $h_{fe}$  是 NPN 晶体管的直流电流传输静态比。 $i_c$ - $h_{fe}$  曲线可在 NPN 晶体管数据表中找到。当  $i_c$  等于所需的外部电芯均衡电流时，可以使用整个温度范围内相应的最大  $h_{fe}$  来满足条件 1。该系数通常设置为 2，以使 NPN 晶体管保持在饱和区的一定安全裕度范围内。
2. 条件 2： $U_{BE} > U_{BE(on)}$ 。 $U_{BE(on)}$  是基极-发射极导通电压。 $U_{BE(on)}$  必须小于  $R_{cb5}$  两端的电压并尽可能小，以便可以轻松选择  $R_b$ 。

该设计使用  $300 \Omega$  的  $R_b$ ，可支持高达 600mA 的外部电芯均衡电流。

## 2.2.3 堆叠式 AFE 通信

对于电芯数量非常多的系统，BQ79616 器件可以串联堆叠来监测电池电芯。该设计使用两个 BQ79616 器件来监测多达 32 个电池电芯。底部 BQ79616 监测下方 16 个电池电芯，顶部 BQ79616 监测上方 16 个电池电芯。底部 BQ79616 器件与 BAT - 共用同一接地端，而顶部 BQ79616 将 16 芯电池组顶部电压作为接地基准。需要隔离，以便与顶部 BQ79616 器件通信。该设计在两个 BQ79616 器件之间使用电容隔离式菊花链，并将变压器隔离式菊花链连接到非板载 BMU 或 BCU。BMU 旨在支持正向和反向通信。从底部 BQ79616 到顶部 BQ79616 的通信方向为正向（北）。从顶部 BQ79616 到底部 BQ79616 的通信方向为反向（南）。图 2-4 展示了 BMU 的环网通信。

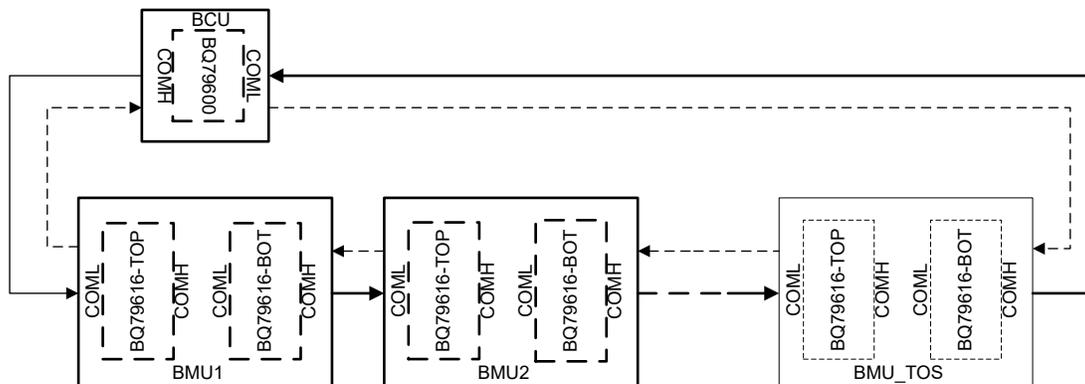


图 2-4. BMU 环网通信

BCU 使用 SPI 向 BQ79600 发出 ping。Ping 是用于唤醒和关断等简单操作的非通信信号。命令用于传输数据。BQ79600 能够在一个占空比内按南北方向从与堆叠的 BQ79616 接收音调并向其发送音调。考虑到 GBT34131-2023 标准，电压周期需要小于 100ms，温度周期需要小于 1 秒。

### 2.2.4 连接到 MCU 的隔离式 UART 接口

该设计为 CAN 结构保留一个连接到 MCU 的隔离式 UART 接口。ISO7742 用于连接 BQ79616 的 UART 接口和 MCU。由于 BQ79616 的 CVDD 和 TX 引脚在关断和活动模式下均提供恒定电压，因此当 ISO7742 的 BQ79616 关断模式直接连接到 BQ79616 时，ISO7742 由 VCC (CVDD) 和输入 (TX) 供电。

图 2-5 展示了直接连接到 BQ79616 的 ISO7742 电路。

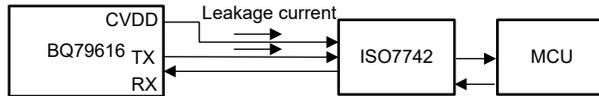


图 2-5. 直接连接到 BQ79616 的 ISO7742 电路

TMUX1102 用于阻挡来自 TX 引脚的电流。TMUX1102 具有断电保护功能和 300MHz 的高带宽，适用于 TX 信号发送路径。PMOS 用于阻止 CVDD 引脚从 BQ79616 单向连接到 ISO7742。TMUX1102 和 PMOS 均通过 MCU 控制的光耦合器下拉信号来启用。

图 2-5 展示了连接到 TMUX 和 PMOS 的 ISO7742 电路。

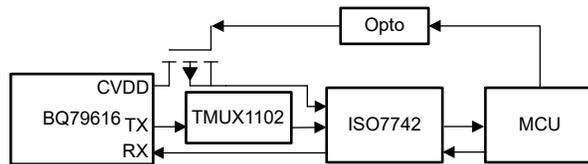


图 2-6. 连接到 TMUX 和 PMOS 的 ISO7742 电路

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 BQ79616

BQ79616 器件可对 HEV 和 EV 的高压电池管理系统中 16 节串联电池模块提供高精度的电芯电压测量，且仅需不到 200  $\mu$ s 的时间就能完成。该监测器在同一封装类型中提供不同的通道选项，同时提供引脚对引脚兼容性，并支持在任何平台上高度重复使用既有的软件和硬件。借助集成式前端滤波器，可以在电池输入通道上使用简单、低额定电压的差分 RC 滤波器来实施系统。集成式后 ADC 低通滤波器可以执行经过滤波、类似于直流电的电压测量，以便更好地计算荷电状态 (SOC)。此器件支持自主内部电芯均衡，并通过监测温度来自动暂停和恢复均衡，以免出现过热条件。

### 2.3.2 TMUX1308

TMUX1308-Q1 和 TMUX1309-Q1 为通用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 多路复用器 (MUX)。TMUX1308-Q1 是 8:1、单通道 (单端) 多路复用器，而 TMUX1309-Q1 是 4:1 双通道 (差分) 多路复用器。这些器件可支持源极 (Sx) 和漏极 (Dx) 引脚上 GND 到 VDD 范围的双向模拟和数字信号。

TMUX13xx-Q1 器件具有内部注入电流控制功能，从而无需外部二极管和电阻器网络 (通常用于保护开关并使输入信号保持在电源电压范围之内)。内部注入电流控制电路允许禁用信号路径上的信号超过电源电压，而不会影响启用信号路径的信号。此外，TMUX13xx-Q1 器件没有到电源引脚的内部二极管路径，从而消除了损坏连接到电源引脚的元件或为电源轨提供意外电源的风险。

所有逻辑输入均具有兼容 1.8V 逻辑的阈值，在有效电源电压下运行时，这些阈值可确保晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 和 CMOS 逻辑兼容性。失效防护逻辑电路允许先在控制引脚上施加电压，然后在电源引脚上施加电压，从而保护器件免受潜在的损害。

### 2.3.3 TMUX1574

TMUX1574 是一款 CMOS 开关。TMUX1574 提供具有 4 个通道的 2:1 SPDT 开关配置。1.5V 至 5.5V 的宽工作电源电压范围使其适用于从服务器和通信设备到工业应用的各种应用。此器件可在源极 (SxA、SxB) 和漏极 (Dx) 引脚上支持双向模拟和数字信号, 并且能够传递高于电源电压 (最高  $V_{DD} \times 2$ ) 的信号, 最大输入和输出电压为 5.5V。

TMUX1574 的信号路径上高达 3.6V 的关断保护功能可在移除电源电压 ( $V_{DD} = 0V$ ) 时提供隔离。如果没有该保护功能, 开关可通过内部静电放电 (ESD) 二极管为电源轨进行反向供电, 从而对系统造成潜在损坏。

失效防护逻辑电路允许在施加电源引脚上的电压之前, 先施加逻辑控制引脚上的电压, 从而保护器件免受潜在的损害。所有控制输入均具有兼容 1.8V 逻辑的阈值, 当器件在有效电源电压范围内运行时, 这些阈值可确保 TTL 和 CMOS 逻辑兼容性。逻辑引脚上带有集成下拉电阻器, 无需外部元件, 因此可减小系统尺寸并降低系统成本。

### 2.3.4 TMUX1102

TMUX1101 和 TMUX1102 都是精密 CMOS 单极单投 (SPST) 开关。1.08V 至 5.5V 的宽工作电源电压范围使其适用于从医疗设备到工业系统的各种应用。这些器件可支持源极 (S) 和漏极 (D) 引脚上 GND 到 VDD 范围的双向模拟和数字信号。

逻辑控制输入 (SEL) 具有兼容 1.8V 逻辑电平的阈值。当器件在有效电源电压范围内运行时, 该阈值可确保 TTL 和 CMOS 的逻辑兼容性。SEL 为逻辑 1 时, TMUX1101 的开关导通, 而 SEL 为逻辑 0 时, TMUX1102 导通。失效防护逻辑电路要求先在 SEL 引脚上施加电压, 然后在电源引脚上施加电压, 从而保护器件免受潜在的损害。

TMUX110x 器件是精密开关和多路复用器器件系列中的一部分。这些器件具有非常低的导通和关断漏电流以及较低的电荷注入, 因此可用于高精度测量应用。3nA 的低电源电流和小型封装。(数据表 = 3nA 的低电源电流和小型封装选项使其可用于便携式应用。)

### 2.3.5 TPS22810

TPS22810 是一款单通道负载开关, 具有可配置的上升时间和集成式快速输出放电 (QOD) 功能。此外, 该器件还具有热关断功能, 可保护器件不受高结温的影响。由于这一功能, 该器件固有安全工作区。该器件包括一个 N 通道 MOSFET, 可在 2.7V 至 18V 的输入电压范围内运行。SOT23-5 (DBV) 封装可支持 2A 的最大电流。WSON (DRV) 封装可支持 3A 的最大电流。此开关由一个开关输入控制, 能够直接连接低电压控制信号。

该器件的可配置上升时间可大幅降低大容量负载电容所产生的浪涌电流, 从而降低或消除电源压降。欠压闭锁用于在  $V_{IN}$  电压降至阈值以下时关闭器件, 以确保下游电路不会因为供电电压低于预期值而受到损坏。可配置的快速输出放电 (QOD) 引脚控制器件的下降时间, 以便针对掉电进行灵活设计。

TPS22810 采用支持目测检查焊点的带引线 SOT-23 封装 (DBV) 以及 WSON 封装 (DRV)。该器件在自然通风环境下的额定运行温度范围为  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $+105^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.3.6 ISO7742

ISO774x 器件是高性能四通道数字隔离器, 可提供符合 UL 1577 的  $5000V_{RMS}$  (DW 封装) 和  $3000V_{RMS}$  (DBQ 封装) 隔离额定值。该系列包含的器件具有符合 VDE、CSA、TUV 和 CQC 标准的增强绝缘等级。ISO7741B 器件专为仅需要基本绝缘额定值的应用而设计。在隔离 CMOS 或 LVCMOS 数字 I/O 时, ISO774x 器件可在低功耗下提供高电磁抗扰度和低辐射。每条隔离通道的逻辑输入和输出缓冲器均由双电容二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 绝缘栅相隔离。这些器件配有使能引脚, 可用于将各自输出置于高阻态以适用于多主驱动应用中, 并降低功耗。

ISO7740 器件具有四条方向相同的通道, ISO7741 器件具有三条正向通道和一条反向通道, 而 ISO7742 器件具有两条正向通道和两条反向通道。如果输入功率或信号丢失, 不带后缀 F 的器件默认输出高电平, 带后缀 F 的器件默认输出低电平。

### 2.3.7 TSD05C

TSD05C 是一款双向瞬态电压抑制器 (TVS) 保护二极管, 专为钳制 ESD 和浪涌等有害瞬变而设计。TSD05C 的额定 ESD 冲击消散值高达  $\pm 30\text{kV}$  (接触放电和空气间隙放电), 并且符合 IEC 61000-4-2 国际标准中规定的最高级别 (4 级)。对于浪涌, 根据 IEC 61000-4-5 标准, 该器件可以钳制峰值脉冲电流高达 30A 的  $8\mu\text{s}$  至  $20\mu\text{s}$  浪涌。

该器件还具有 4pF (典型值) IO 电容, 因此能够保护高速数据线路。低动态电阻和低钳位电压支持针对瞬态事件提供系统级保护。

TSD05C 结合了该器件的强大钳位性能和低电容, 是一款出色的 TVS 二极管, 可在许多不同应用中保护数据线路和电源线路。

TSD05C 采用业界通用的引线式 SOD-323 封装, 可轻松焊接。

### 2.3.8 ESD441

ESD441 是一款单向 ESD 保护二极管, 用于保护数据线路和其他 I/O 端口。ESD441 的额定 ESD 冲击消散值高达  $\pm 30\text{kV}$ , 符合 IEC 61000-4-2 国际标准 (高于 4 级)。

该器件具有 1pF (典型值) IO 电容, 可为 USB 2.0 等协议提供高速接口保护。超低的动态电阻 ( $0.1\ \Omega$ ) 和钳位电压 (16A TLP 时为 7.6V) 可针对瞬态事件提供系统级保护。

该器件采用微型封装并具有 30kV ESD 等级和 6.2A 浪涌, 可提供强大的瞬态保护, 用于保护便携式电子产品和其他空间受限应用 (如可穿戴设备) 中的 5.5V 电源轨。

ESD441 采用业界通用的 0201 (DPL) 封装。

### 2.3.9 ESD2CAN24-Q1

ESD2CANxx24-Q1 是一款用于提供 CAN 接口保护的双向 ESD 保护二极管。ESD2CANxx24-Q1 的额定消散接触 ESD 冲击能力超过了 ISO 10605 汽车标准所规定的最高水平 ( $\pm 30\text{kV}$  接触放电,  $\pm 30\text{kV}$  空气间隙放电)。低动态电阻和低钳位电压支持针对瞬态事件提供系统级保护。这种保护很关键, 因为汽车系统对安全应用的稳健性和可靠性要求很高。

该器件具有每通道低 IO 电容和引脚排列, 以便适合两条汽车 CAN 总线 (CANH 和 CANL), 防止因静电放电 (ESD) 和其他瞬变造成损坏。此外, ESD2CANxx24-Q1 的 3pF (典型值) 或更小线路电容适合 CAN、CANFD、CAN SiC 和支持高达 10Mbps 数据速率的 CAN-XL 应用。

ESD2CANxx24-Q1 采用两种引线式封装, 以便轻松实现直通式路由。

### 3 硬件、软件、测试要求和测试结果

TIDA-010271 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-010271 电路板的硬件连接。

**表 3-1. 顶部 16 芯电池连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J21 - 3	A2_CELL0	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J21 - 4	A2_CELL0S	CELL1 的负极端子，顶部 BQ79616 的 VC0 路径的实际检测接头
J21 - 5	A2_CELL1	CELL1 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL2 的负极端子
J21 - 6	A2_CELL2	CELL2 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL3 的负极端子
J21 - 7	A2_CELL3	CELL3 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL4 的负极端子
J21 - 8	A2_CELL4	CELL4 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL5 的负极端子
J21 - 9	A2_CELL5	CELL5 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL6 的负极端子
J21 - 10	A2_CELL6	CELL6 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL7 的负极端子
J21 - 11	A2_CELL7	CELL7 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL8 的负极端子
J21 - 12	A2_CELL8	CELL8 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL9 的负极端子
J21 - 13	A2_CELL9	CELL9 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL10 的负极端子
J21 - 14	A2_CELL10	CELL10 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL11 的负极端子
J21 - 15	A2_CELL11	CELL11 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL12 的负极端子
J21 - 16	A2_CELL12	CELL12 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL13 的负极端子
J21 - 17	A2_CELL13	CELL13 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL14 的负极端子
J21 - 18	A2_CELL14	CELL14 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL15 的负极端子
J21 - 19	A2_CELL15	CELL15 的正极端子，顶部 BQ79616 的 CELL16 的负极端子
J21 - 20	A2_CELL16	CELL16 的正极端子，顶部 BQ79616 的 VC16 路径的实际检测接头
J21 - 21	A2_CELL_TOP	CELL16 的正极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 BAT、LDOIN

**表 3-2. 顶部 16 芯热敏电阻连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J9 - 1	A2_NTC0_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor0
J9 - 2	A2_NTC1_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor1
J9 - 3	A2_NTC2_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor2
J9 - 4	A2_NTC3_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor3
J9 - 5	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 6	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 7	A2_NTC4_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor4
J9 - 8	A2_NTC5_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor5
J9 - 9	A2_NTC6_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor6
J9 - 10	A2_NTC7_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor7
J9 - 11	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 12	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 13	A2_NTC8_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor8
J9 - 14	A2_NTC9_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor9
J9 - 15	A2_NTC10_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor10
J9 - 16	A2_NTC11_C	连接到 10k $\Omega$ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor11
J9 - 17	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 18	A2_GND	CELL1 的负极端子，直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND

**表 3-2. 顶部 16 芯热敏电阻连接器 (续)**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J9 - 19	A2_NTC12_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor12
J9 - 20	A2_NTC13_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor13
J9 - 21	A2_NTC14_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor14
J9 - 22	A2_NTC15_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和顶部 BQ79616 的 thermistor15
J9 - 23	A2_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND
J9 - 24	A2_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至顶部 BQ79616 的 AVSS GND

**表 3-3. 顶部菊花链 (COMH) 连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J31 - 3	ISO_A2_COMMH_P	COM 高侧正极
J31 - 4	ISO_A2_CO/MMH_N	COM 高侧负极

**表 3-4. 湿度传感器连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J1 - 1	A2_CVDD	湿度传感器的 5V 电源
J1 - 2	A2_RHS_T_MUX	湿度传感器的温度模拟输出
J1 - 3	A2_GPIO8	湿度传感器的湿度模拟输出
J1 - 4	A2_GND	湿度传感器的 GND

**表 3-5. 底部 16 芯电池连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J10 - 3	A1_CELL0	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J10 - 4	A1_CELL0S	CELL1 的负极端子, 底部 BQ79616 的 VC0 路径的实际检测接头
J10 - 5	A1_CELL1	CELL1 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL2 的负极端子
J10 - 6	A1_CELL2	CELL2 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL3 的负极端子
J10 - 7	A1_CELL3	CELL3 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL4 的负极端子
J10 - 8	A1_CELL4	CELL4 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL5 的负极端子
J10 - 9	A1_CELL5	CELL5 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL6 的负极端子
J10 - 10	A1_CELL6	CELL6 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL7 的负极端子
J10 - 11	A1_CELL7	CELL7 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL8 的负极端子
J10 - 12	A1_CELL8	CELL8 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL9 的负极端子
J10 - 13	A1_CELL9	CELL9 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL10 的负极端子
J10 - 14	A1_CELL10	CELL10 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL11 的负极端子
J10 - 15	A1_CELL11	CELL11 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL12 的负极端子
J10 - 16	A1_CELL12	CELL12 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL13 的负极端子
J10 - 17	A1_CELL13	CELL13 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL14 的负极端子
J10 - 18	A1_CELL14	CELL14 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL15 的负极端子
J10 - 19	A1_CELL15	CELL15 的正极端子, 底部 BQ79616 的 CELL16 的负极端子
J10 - 20	A1_CELL16	CELL16 的正极端子, 底部 BQ79616 的 VC16 路径的实际检测接头
J10 - 21	A1_CELL_TOP	CELL16 的正极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 BAT、LDOIN

**表 3-6. 底部 16 芯热敏电阻连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J11 - 1	A1_NTC0_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor0
J11 - 2	A1_NTC1_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor1
J11 - 3	A1_NTC2_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor2
J11 - 4	A1_NTC3_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor3
J11 - 5	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 6	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 7	A1_NTC4_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor4
J11 - 8	A1_NTC5_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor5
J11 - 9	A1_NTC6_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor6
J11 - 10	A1_NTC7_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor7
J11 - 11	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 12	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 13	A1_NTC8_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor8
J11 - 14	A1_NTC9_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor9
J11 - 15	A1_NTC10_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor10
J11 - 16	A1_NTC11_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor11
J11 - 17	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 18	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 19	A1_NTC12_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor12
J11 - 20	A1_NTC13_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor13
J11 - 21	A1_NTC14_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor14
J11 - 22	A1_NTC15_C	连接到 10kΩ 上拉电阻和底部 BQ79616 的 thermistor15
J11 - 23	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND
J11 - 24	A1_GND	CELL1 的负极端子, 直接连接至底部 BQ79616 的 AVSS GND

**表 3-7. 底部菊花链 (COML) 连接器**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J30 - 1	ISO_A1_COMML_N	COM 低侧负极
J30 - 2	ISO_A1_COMML_P	COM 低侧正极

**表 3-8. 底部主机接口**

连接器和引脚分配	功能或原理图网	说明
J12 - 1		不适用
J12 - 2		不适用
J12 - 3	A1_NFAULT_C	
J12 - 4		不适用
J12 - 5	A1_GND_ISO	
J12 - 6	A1_USB2ANY_3.3V	
J12 - 7	A1_USB2ANY_TX_3.3	
J12 - 8	A1_USB2ANY_RX_3.3	
J12 - 9		不适用
J12 - 10		不适用

### 3.1 硬件要求

表 3-9 汇总了用于测试的设备。

表 3-9. 测试设备汇总

设备	型号或说明
万用表	Agilent 34401A
电池模拟器	TZ1104
USB2ANY	TI HAP655
逻辑分析仪	Kingst LA5016

首次调试电路板时，建议使用 *Battery Management Studio (bqStudio)* 软件。

### 3.2 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 24 节串联电池模拟器进行了测试来以模拟整个电池包。底部 16 个电芯通道连接到底部 BQ79616 器件。cell17 的负极端子连接到 A2\_CELL0，cell24 的正极端子连接到 A2\_TOP。

图 3-1 展示了 BMU 测试设置。

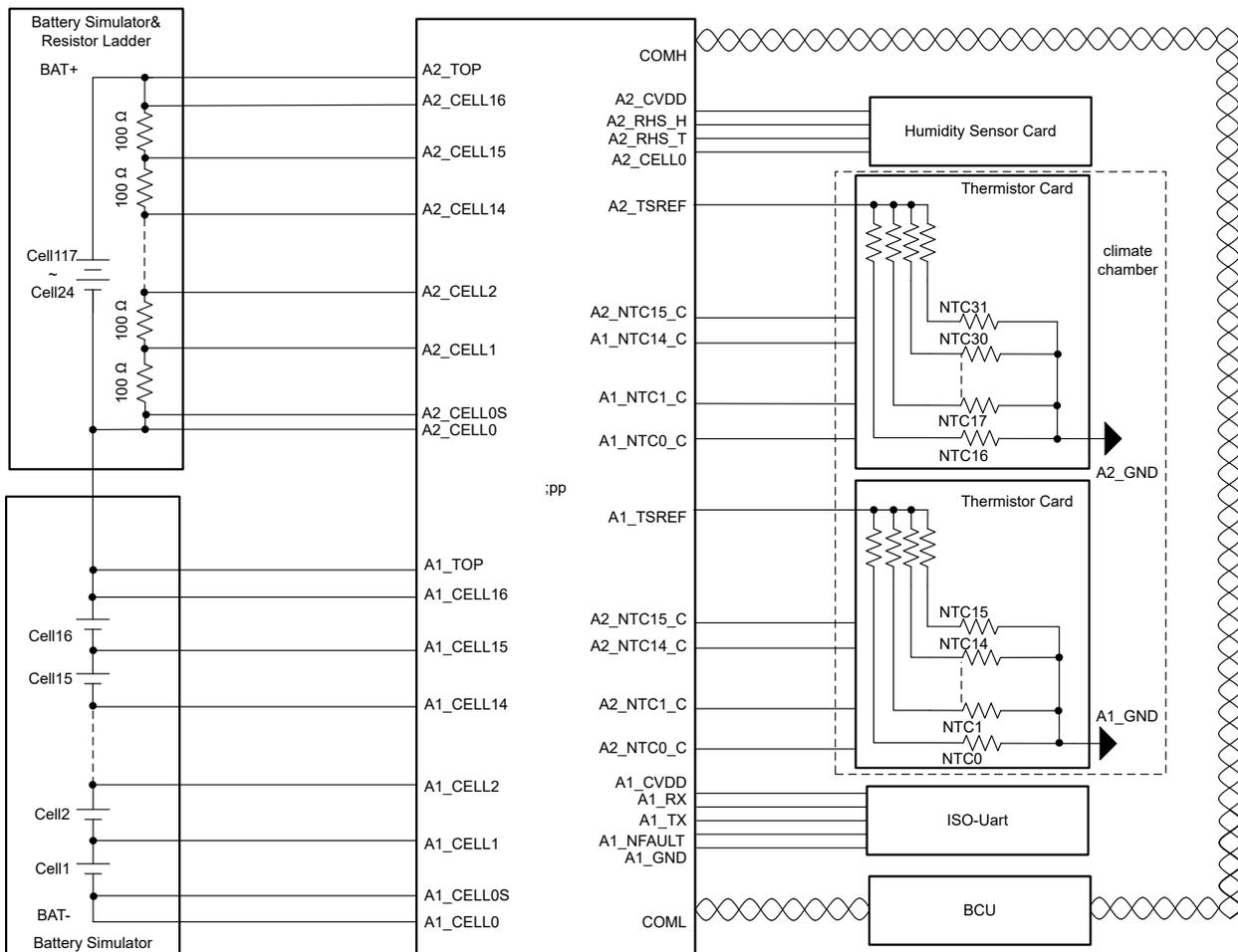


图 3-1. BMU 测试设置

### 3.3 测试结果

#### 3.3.1 电芯电压精度

由于 BQ79616 在 25°C 下已实现  $\pm 1.5\text{mV}$  的精度，因此该设计不执行任何校准来进一步提高电池电压精度。磷酸铁锂电芯的典型电压范围为 2.5V (0% SOC) 至约 3.65V (100% SOC)，因此该设计中使用电池模拟器提供 2.5V 至 3.7V 的电芯电压，以验证 BMU 的 VCELL 精度。

在 27°C 的室温下，底部 BMU 所有电芯通道的最大误差为 1.3mV。

图 3-2 展示了电芯电压精度。

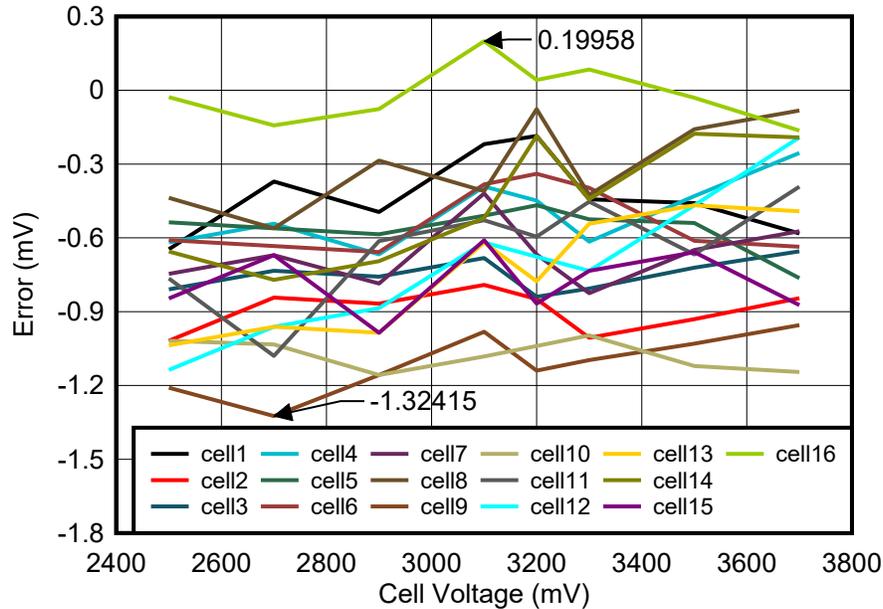


图 3-2. 电芯电压精度

#### 3.3.2 温度检测精度

热敏电阻卡板用于在人工气候室中验证 BMU 的温度检测精度。NTC 热敏电阻 6 上连接了一个精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$  的热电偶。根据 GPIO1 和 TSREF 电压，可以使用 VNTC 来计算 BMU NTC 热敏电阻 RNTC\_0。该测试使用两种方法来计算温度。一个简单的 Steinhart-Hart 公式 (方程式 1) 精确到一个小范围，用来计算 BMU NTC 热敏电阻的温度。

$$\text{Equation temperature} = \frac{B_{85}^{25} \times 298.15}{298.15 \times \log \frac{R_{NTC\_0}}{R_{NTC}}} + B_{85}^{25} \quad (1)$$

为了获得更高的精度，可使用热敏电阻 R/T 表查找和线性拟合方法来计算温度。

图 3-3 展示了温度检测精度在  $-35^{\circ}\text{C}$  至  $85^{\circ}\text{C}$  范围内，最大温度误差为  $1^{\circ}\text{C}$ 。

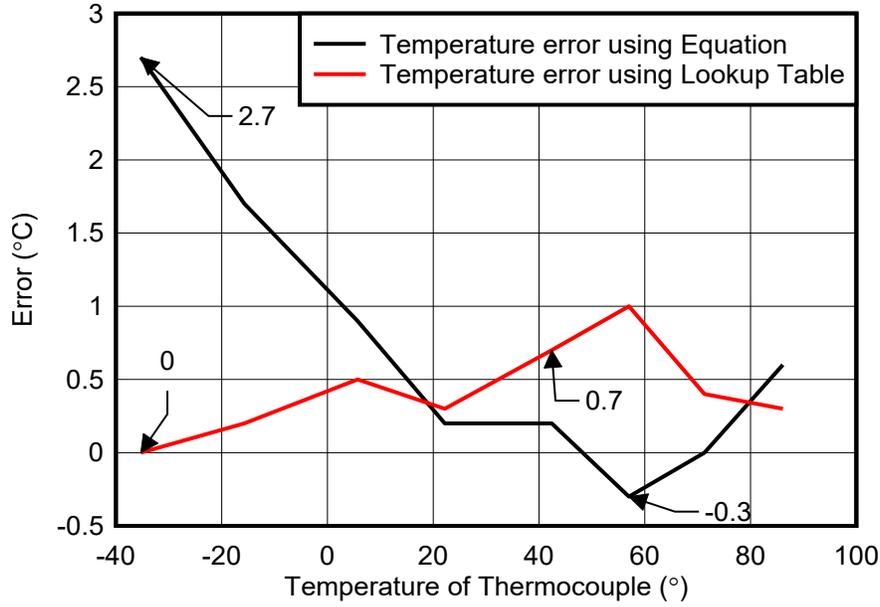


图 3-3. 温度检测精度

图 3-4 展示了热敏电阻电压精度。在  $-35^{\circ}\text{C}$  至  $85^{\circ}\text{C}$  范围内，最大电压误差为  $2\text{mV}$ 。

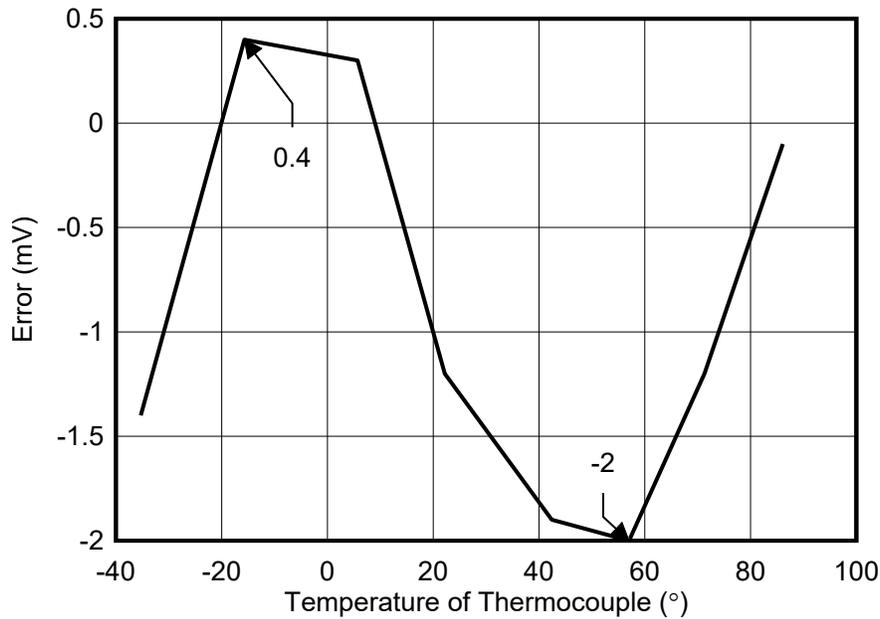


图 3-4. 热敏电阻电压精度

### 3.3.3 电芯电压和温度传感时序

此测试使用一个 BMU 和一个 BCU。测试点可图 2-1 中找到，包括底部 BQ79616 器件的 T1-GPIO5、T2-GPIO6、T3-GPIO5、T4-GPIO2 和 T5-COML。电芯电压和温度传感时序的测试软件遵循图 2-2 中的步骤。

图 3-5 展示了电芯电压和温度传感时序。

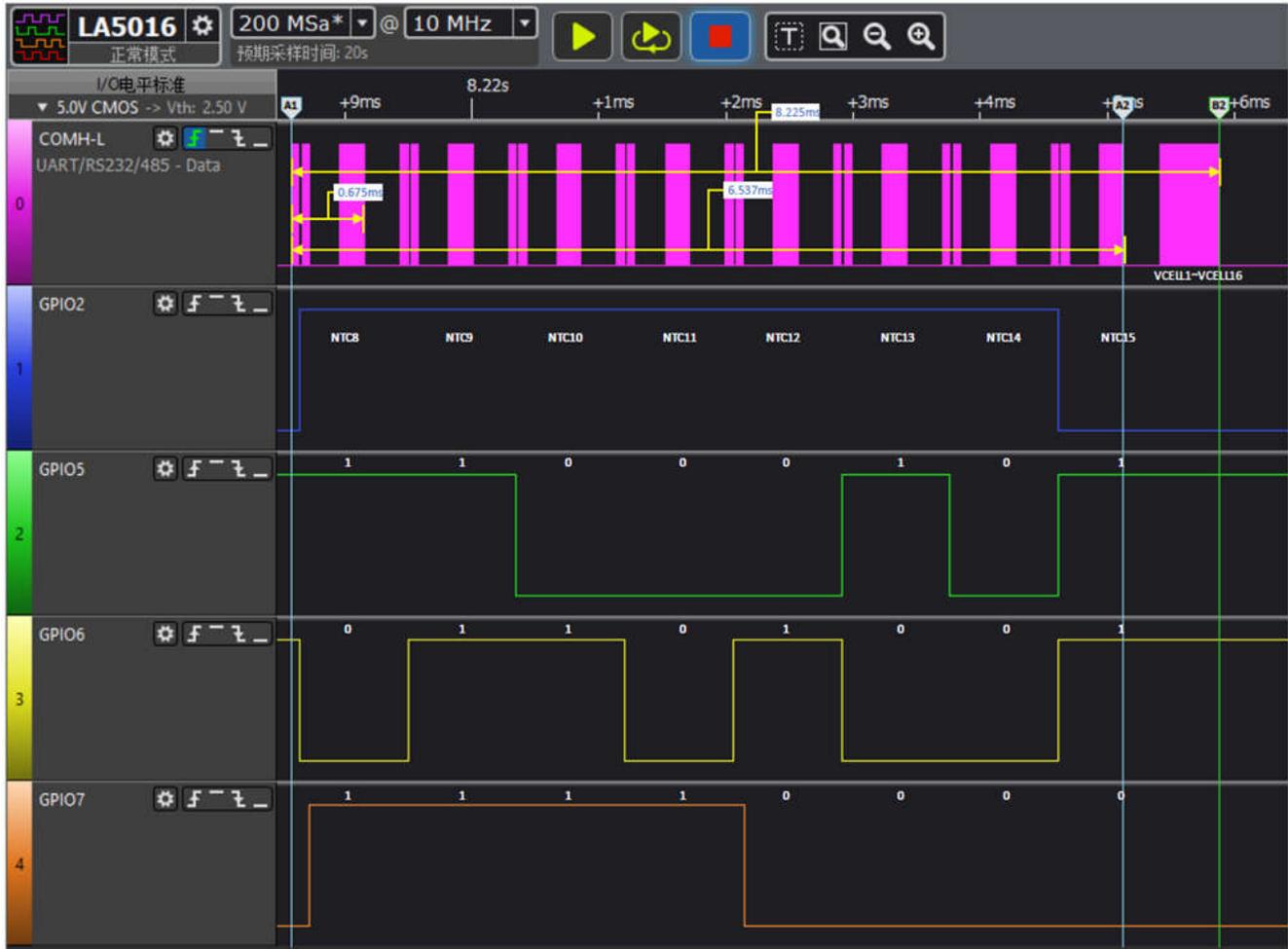


图 3-5. 电芯电压和温度传感时序

该测试需要八个步骤来读取所有 NTC 热敏电阻电压。每个步骤包含一个用于设置 TMUX1308 的广播写入以及从堆叠 BMU 的所有 BQ79616 器件中对 TSREF 和 GPIO1 至 GPIO2 的广播读取。读取堆叠中每个 BQ79616 的 2 个 NTC 热敏电阻电压是一个步骤，需要 675 $\mu$ s。读取所有电压需要 8 个步骤，需要 6.637ms。读取整个 BQ79616 器件堆叠的所有 NTC ( NTC0 至 NTC31 ) 电压和电芯电压 ( VCELL1 至 VCELL32 ) 的步骤总共需要 8.225ms。

为了轻松验证 GPIO1 和 GPIO2 引脚以及 TMUX1308 的配置是否正确，NTC15 设置为固定的 100 $\Omega$  下拉电阻，逻辑分析仪可以将其识别为信号 0。可以看到 TMUX1308 的 8 个状态传输工作正常。

### 3.3.4 电芯均衡和热性能

该测试使用电池模拟器在室温 (27°C) 和 3.5V 电芯电压下测试 BMU 的底部 BQ79616 器件。测试中使用了自动均衡控制并以奇数和偶数方式启用 CB FET，占空比为 30 分钟。在以奇数或偶数方式进行 30 分钟电芯均衡后，温度达到稳定。

表 3-10 展示了电池模拟器中的电芯均衡电流。BQ79616 的电源电流接近 15.3mA。每个通道的电芯电流接近 109mA。

表 3-10. 来自电池模拟器的电芯均衡电流

电芯	电芯电压 (V)	电流 (A)	电芯	电芯电压 (V)	电流 (A)	电芯	电芯电压 (V)	电流 (A)
8	3.5000	0.0153	16	3.5000	0.0150	24	3.5003	0.0000
7	3.5000	0.1242	15	3.5001	0.1242	23	3.5002	0.0000
6	3.5003	0.0152	14	3.5001	0.0152	22	3.5001	0.0000
5	3.5000	0.1241	13	3.5000	0.1242	21	3.5001	0.0000
4	3.4996	0.0152	12	3.5000	0.0152	20	3.5000	0.0000
3	3.5005	0.1229	11	3.4998	0.1242	19	3.4998	0.0000
2	3.5000	0.0152	10	3.5002	0.0152	18	3.5005	0.0000
1	3.4999	0.1231	9	3.5002	0.1233	17	3.5000	0.0000

下图展示了室温下的电芯均衡热性能。图 3-6 所示为顶部热像图，图 3-7 所示为底部热像图。

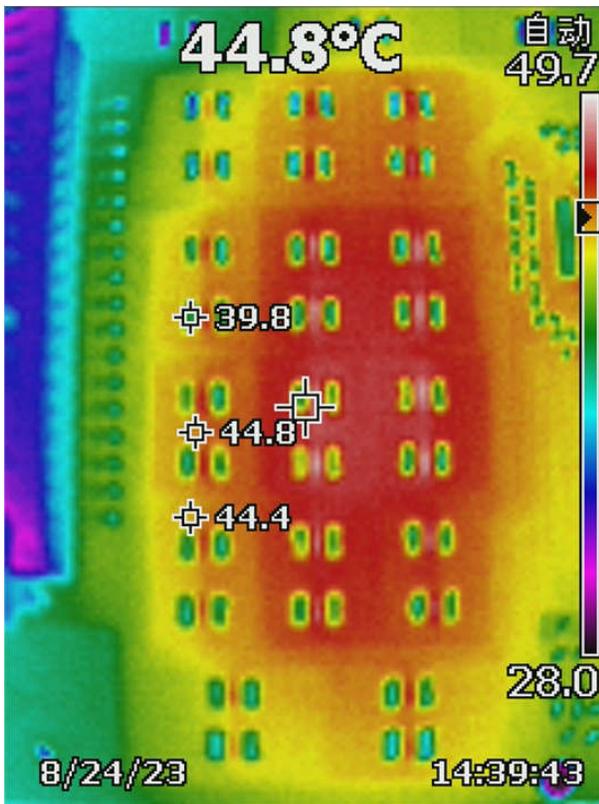


图 3-6. 电路板顶部

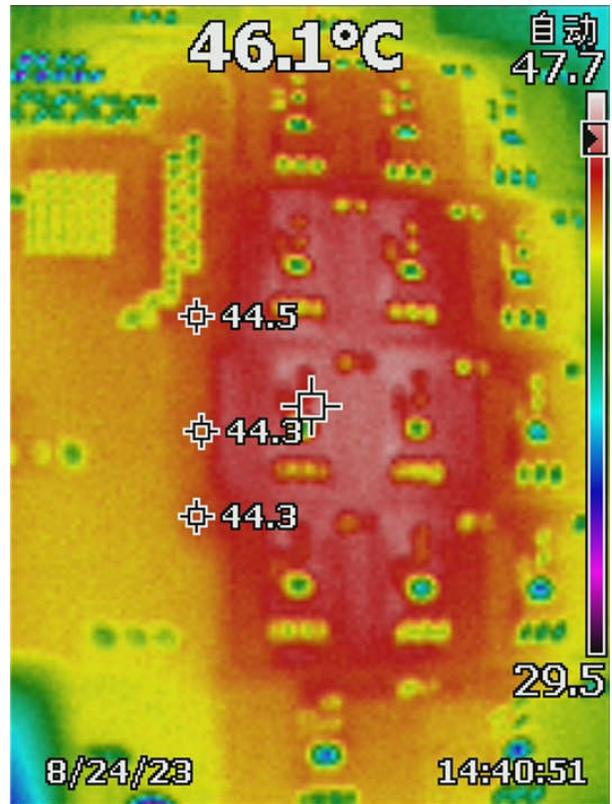


图 3-7. 电路板底部

最高温升为 19°C。

### 3.3.5 电流消耗

图 3-8 展示了 BMU 测试设置中电流消耗的测试点。这里测试了两种工作模式，包括关断模式和活动模式。Cell16 和 cell32 被选为电流测试点，因为它们是电源线直接连接到 BQ79616 BAT 引脚的位置。在这两种模式下，电池模拟器均设置 3.2V 电芯电压。

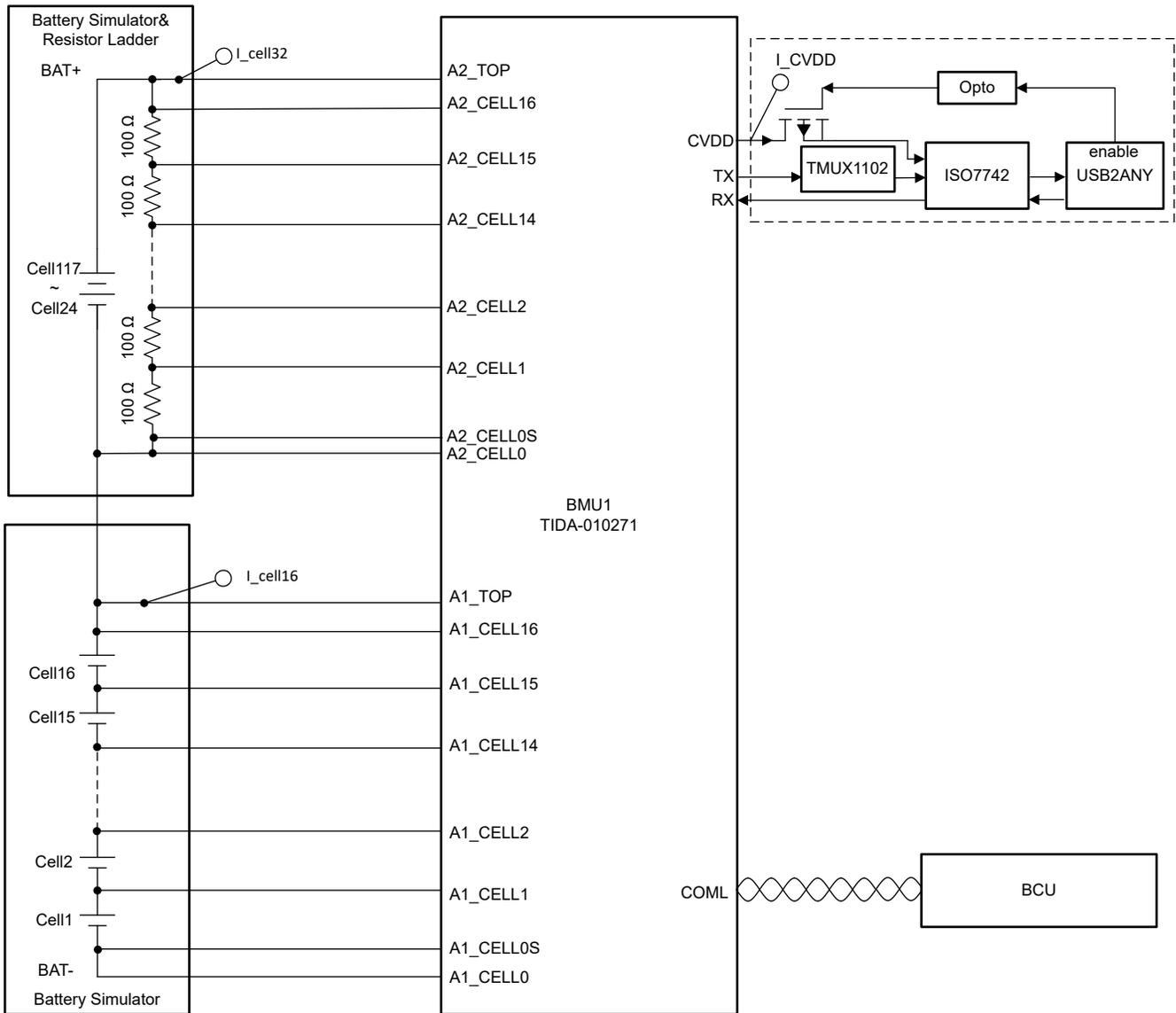


图 3-8. BMU 测试设置中的电流消耗测试点

在活动模式下，BCU 以 100ms 的占空比运行图 2-2 中所示的测试环路。在关断模式下，BQ79616 BAT 引脚的漏电流为 14.6  $\mu$ A 和 15.5  $\mu$ A。在活动模式下，工作电流为 18.39mA 和 18.22mA。表 3-11 展示了电池的 BMU 电流消耗。

表 3-11. 电池的 BMU 电流消耗

说明		Icell16	Icell32
关断模式	电流 ( $\mu$ A)	14.60	15.50
工作模式	电流 (mA)	18.39	18.22

该测试还使用隔离式 UART 接口来与 BMU 而非 BCU 进行通信。USB2ANY 用于启用光耦合器。当使能信号发送到光耦合器时，BMU 将从关断模式转换到待机模式。此时，BQ79616 的 CVDD 切换到 ISO7742，并且接近 5.393mA 的漏电流流向 ISO7742。UART 通信开始后，BMU 进入活动模式，流向 ISO7742 的漏电流升至 7.042mA。表 3-12 展示了隔离式 UART 接口的 BMU 电流消耗。

**表 3-12. 隔离式 UART 接口的 BMU 电流消耗**

说明		I_CVDD
关断模式	电流 (μA)	0.001
待机模式	电流 (mA)	5.393
工作模式	电流 (mA)	7.042



## 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