

Design Guide: TIDA-010976

适用于储能系统的 52 芯无线电池管理单元参考设计



说明

此参考设计为具有高电芯电压精度的储能系统提供 52 芯无线电池管理单元 (wBMU)。wBMU 使用无线通信技术将每个电池的电压和温度数据实时传递到主机控制器。此设计通过避免繁琐的制造流程、减少频繁维护需求并更大限度地降低连接器和线束的故障率，克服了有线电池管理系统 (BMS) 架构中的挑战。无线通信可减少所需电缆和连接器的数量，从而减轻系统重量并降低成本。

资源

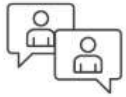
TIDA-010976	设计文件夹
BQ78706、CC2662R-Q1、LM5168	产品文件夹
TMUX1308、TPS3436-Q1、LSF0204	产品文件夹
TMP61、TPS71533	产品文件夹

特性

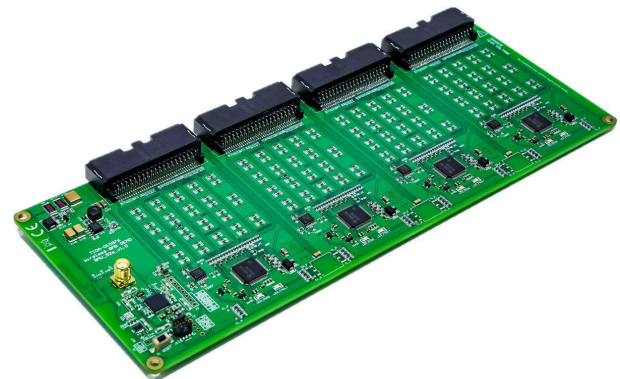
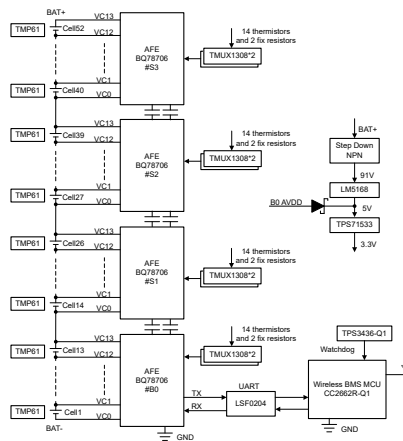
- 电池电压大于 2V 且小于 4V 时的电芯电压精度为 $\pm 2.4\text{mV}$ ，工作温度范围为 -40°C 至 125°C ，无需校准
- 通过多路复用器 (MUX) 实现全面的电芯温度检测
- 采用符合功能安全等级协议的稳健无线通信
- 强大的可编程电池电芯和电池包保护
- 保持活动模式下的 $32\ \mu\text{A}$ 电流消耗
- 与汇流条兼容或无汇流条连接

应用

- ESS - 无线电池管理系统 (wBMS)
- 电池备份单元 (BBU)



请咨询 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。具体取决于系统电压、容量及使用情况。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。由于重量限制和需要更长的续航能力，电池组的电芯化学成分正在从铅酸转为锂离子、锂聚合物或磷酸铁锂 (LiFePO₄) 类型。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。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。

电池管理单元 (BMU) 是一种板，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 可通过有线或无线方法发送回机架级控制器电池控制单元 (BCU)，以提供电池包数据，从而实现安全和充电管理。

在有线 BMS 设计中，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。与 CAN 接口相比，基于菊花链通信的 BMU 只需要几个隔离变压器。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。

无线 BMS (wBMS) 设计使用无线接口，通过无线收发器器件，将通用异步接收器/发送器 (UART) 数据从 BMU 中的电池监测器传输到 BCU 中的主机 MCU。有线和无线设计之间的最大区别在于，wBMS 在每个 BMU 上将通信电缆、连接器和隔离元件替换为无线 MCU。

此设计主要面向储能系统应用，可用于其他高压电池包应用，如服务器电池备用单元。无线 BMS MCU CC2662R-Q1 用于 BMU 之间的稳定无线通信，该通信基于 TI 自行开发的在 2.4GHz 频段运行的无线 BMS 协议。每个 BMU 使用四个 BQ78706 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 52 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。BQ78706 器件之间的板载通信采用电容隔离式菊花链。该设计包含八个采用 8:1 通用输入/输出 (GPIO) 扩展比的 TMUX1308 器件，可测量多达 52 节电芯。该设计使用内部电芯均衡 (CB) 来获得每个电芯通道的 100mA 均衡电流。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了系统方框图。

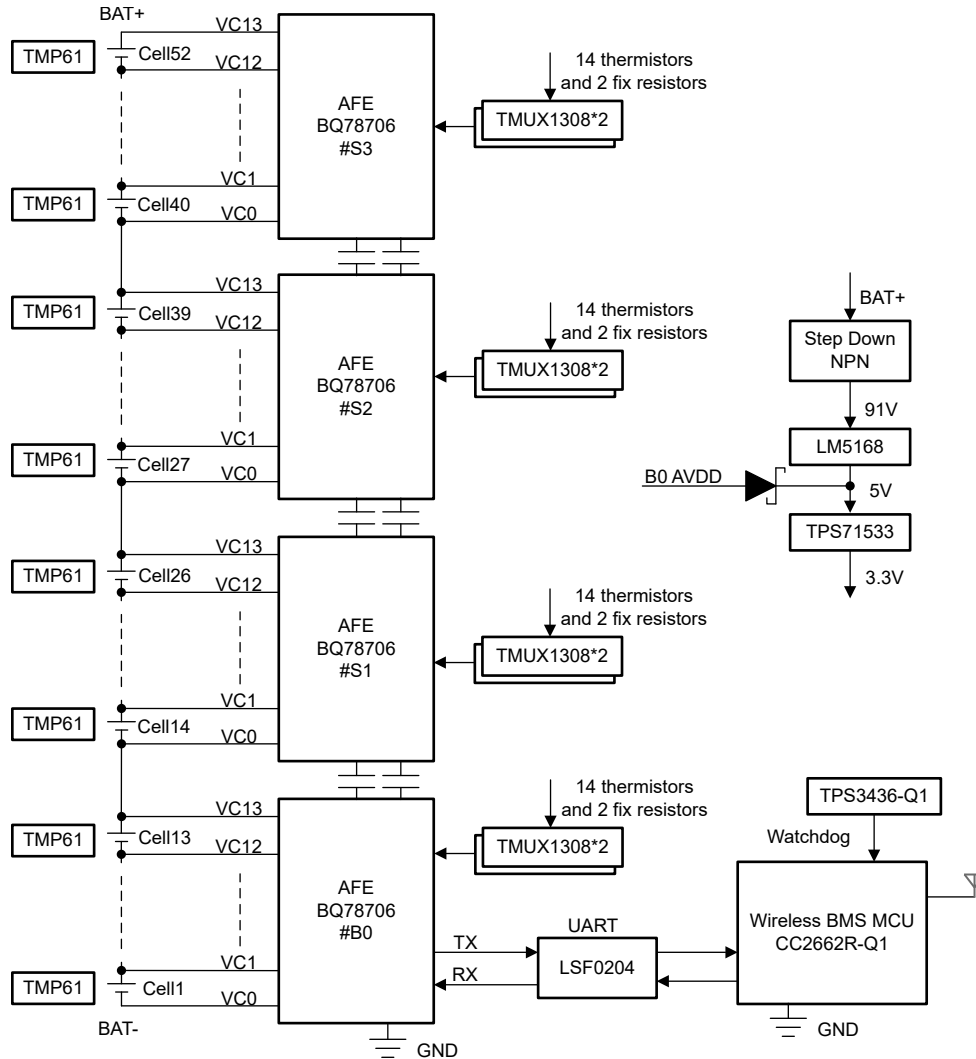


图 2-1. wBMU 方框图

该设计使用 wBMS MCU CC2662R-Q1 来实现 BMU 之间的无线通信。此 wBMS MCU 是集成了射频 (RF) 物理层和用户可编程 MCU 内核的片上系统 (SoC)，可实现通信协议栈和应用软件 (SW)。该协议是基于低功耗蓝牙® 技术、在 2.4GHz 频段运行的自行开发的专有无线 BMS 协议。

该设计使用四个 BQ78706 器件来监测每个电芯的电压、监测 52 芯电池包的温度，以及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 BQ78706 器件是 BQ78706#S3，而底部 BQ78706 器件是 BQ78706#B0。正向菊花链通信方向是从 BQ78706#B0 器件到 BQ78706#S1 器件。

每个 BQ78706 都有 11 个用于温度检测的 GPIO 引脚和 14 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。这些多路复用器将一个 BQ78706 的温度检测能力从 11 个通道扩展到 18 个通道，包括 14 个与多路复用相关的热敏电阻、2 个恒定电阻和 4 个独立热敏电阻。

要对 TMUX1308 运行诊断以防止多路复用器进入失效模式，将每个 TMUX1308 的一个通道连接到恒定电阻器。这个恒定电阻器超出了热敏电阻范围，可进行合理性检查。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。

BQ78706 上的 AVDD 引脚用于为 TMUX1308 供电。由于可通过将 RX 短接至 AVDD 来将 AVDD 配置为关断状态，因此可以实现低关断电流，并且不会对外部多路复用器件产生漏电流。当唤醒 BQ78706 时，AVDD 为所有外部负载提供 20mA 容量，这对于多路复用器或其他器件已足够。#B0 有所不同。AVDD 需要配置为导通，以便在 #B0 关断时启用 UART，因此 #B0 的 TMUX1308 由 LM5168 的输出供电。

为避免不同 BQ78706 器件的电源电流差，该设计构建了一个板载电源轨来为 wBMS MCU 供电，而不是使用 #B0 AVDD。使用了一个具有低 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。由于 52 节串联电池包电压可能超过 120V，因此在 LM5168 之前添加了一个分立式降压电路。

内部被动电芯均衡电阻可支持每个通道高达 100mA 的均衡电流。可以使用奇数和偶数电芯均衡来实现平均 50mA 均衡电流。

具有正温度系数的 $\pm 1\%$ 、10k Ω 线性热敏电阻 TMP61 可用于监测电芯温度，并通过 BQ78706 器件进行测量。

2.2 设计注意事项

2.2.1 无线硬件配置

[CC13xx/CC26xx 硬件配置和 PCB 设计注意事项](#) 应用手册提供了 CC2662R-Q1 射频前端、原理图、PCB 和天线的设计指南。在选择晶体时，请参阅 [CC13xx](#)、[CC26xx](#)、[CC23xx](#) 和 [CC27xx](#) 系列无线 MCU 的晶体振荡器和晶体选型应用手册。

此设计使用单端射频前端配置，可实现低电流消耗和更少的元件数量。平衡-非平衡变压器用于将信号从平衡（差分）转换为非平衡（单端）。图 2-2 显示了相应配置。建议射频元件为 0201（英制）尺寸的元件，因为这样可以使元件焊盘更好地匹配 50 Ω 射频布线，从而减少不连续性并有助于减少插入损耗。

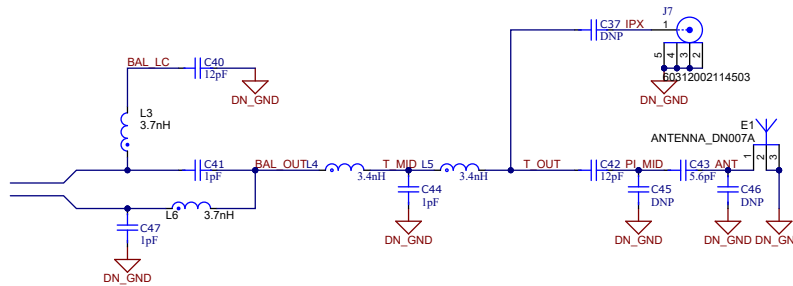


图 2-2. 射频前端

有关天线选择，请参阅天线选择指南：[天线选择快速指南](#) 和全面的 [天线选择指南](#)。

始终建议包含天线匹配网络，这样设计人员可以对天线进行调优并减少天线的失配损耗。对于单频带天线，建议始终在天线之前包含一个 π 型匹配网络，具体请参阅图 2-3。仅需要三个封装（或元件）中的两个。天线的阻抗将决定是使用封装或元件 ANT1 还是 ANT3。将始终使用 ANT2，即使天线完全匹配，也可以直接将其设置为该设计中的 5.6pF 电阻器。

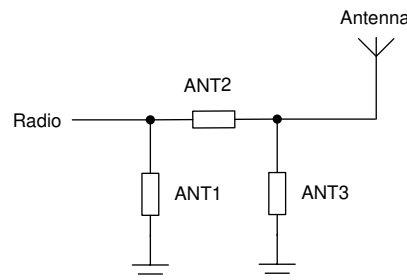


图 2-3. 建议用于单频带天线的天线 π 型网络

此设计选择用于 wBMS 通信的 2.4GHz 倒置 F 型天线。[2.4GHz 倒置 F 型天线](#) 应用手册显示了该天线的测量结果。还包含一个用于初始启动的 SMA 测试端口，有助于进行输出功率验证。

2.2.2 辅助电源策略

将 #B0 AVDD 配置为开启，以便在 #B0 处于关断模式时启用 UART。理论上，#B0 AVDD 可用于为 wBMS MCU、电平转换器和多路复用器供电，但这种配置会增加 #B0 的电流消耗。为了避免这种情况，该设计未使用 #B0 AVDD 为 wBMS MCU 供电，而是构建了板载电源轨。图 2-4 展示了本设计的策略。

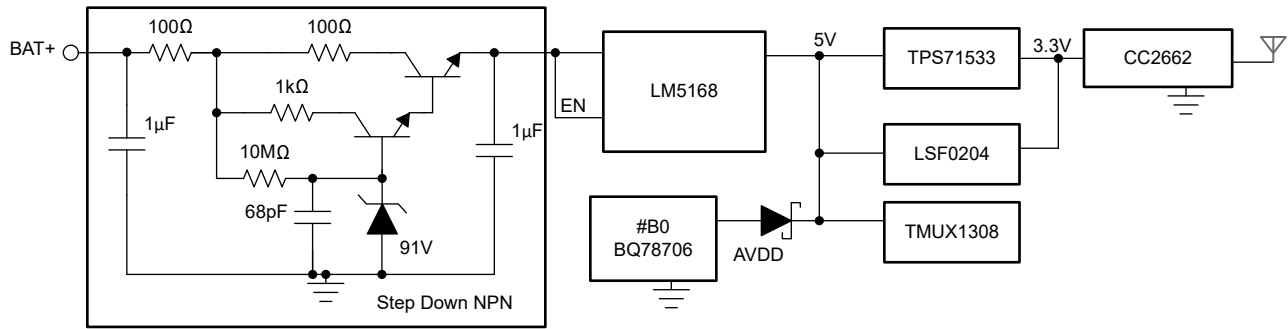


图 2-4. 辅助电源策略

低压 ESS 电源策略采用 120V 输入、0.3A、超低 I_Q 同步降压直流/直流转换器 LM5168P，以低 I_Q 50mA LDO TPS71533 作为主电源，使系统比仅 LDO 具有更好的效率和热性能。

由于 52 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。降压电路中使用了两个 NPN 晶体管来增大直流电流增益，从而降低静态电流。#B0 AVDD 连接到直流/直流的输出端来实现冗余。如果 LM5168 或降压 NPN 电路出现故障，CC2662R-Q1 由 #B0 AVDD 供电。将 LM5168 输出电压设置成略高于 5V，从而允许肖特基二极管在正常运行条件下反向。

辅助电源轨可以消除由 #B0 AVDD 上的额外负载引起的电流差，但电源轨增加了额外的器件，这会增加复杂性和成本。图 2-5 显示了一种低成本替代配置。

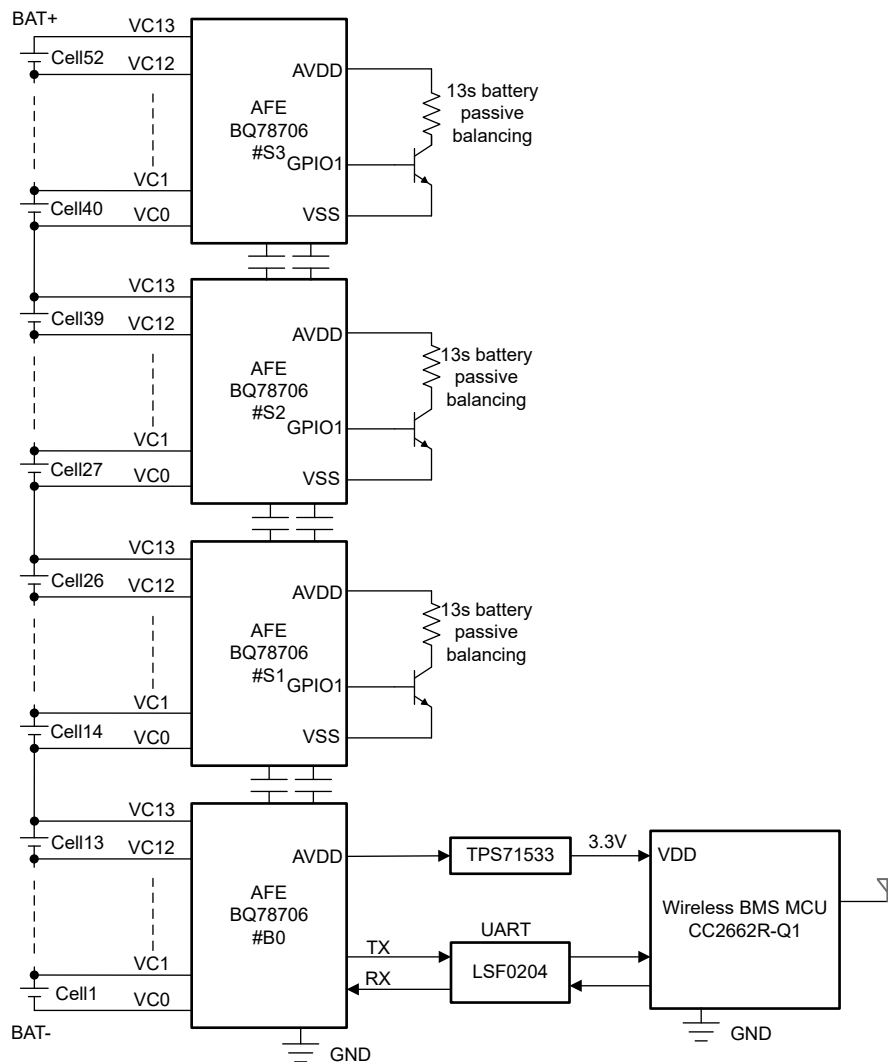


图 2-5. 低成本电源策略选项

BQ78706 AVDD 允许最大 20mA 外部负载，因此只需要大约 10mA 峰值电源电流的 CC2662R-Q1 可以直接由 AVDD 供电。添加了三个由 BQ78706 GPIO 控制的虚拟电阻负载，以平衡电流消耗。

2.2.3 热敏电阻多路复用器

图 2-6 展示了读取所有热敏电阻和电芯电压的策略。使用两个 TMUX1308 器件将 14 个热敏电阻和 2 个恒定电阻 TS_R1 和 TS_R2 多路复用到一个 BQ78706。BQ78706 使用三个 GPIO (GPIO9、GPIO10 和 GPIO11) 来对 TMUX1308 的 8 个热敏电阻通道进行寻址，并使用 2 个 GPIO (GPIO7 和 GPIO8) 来从 2 个 TMUX1308 器件读取公共输出引脚。这意味着 5 个 GPIO 可以测量 16 个热敏电阻。

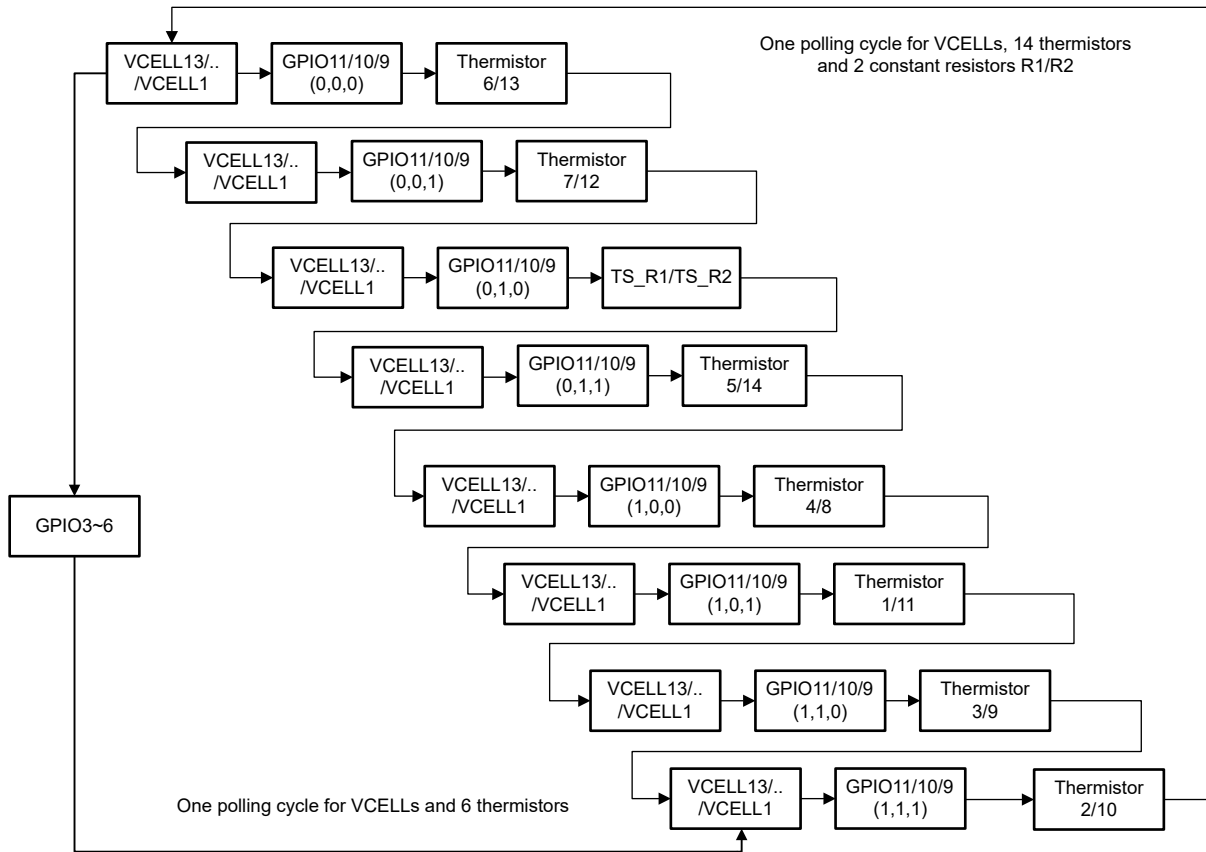


图 2-6. 多路复用器控制逻辑

尽管可以使用 TMUX1308 或其他多路复用器轻松增加热敏电阻的数量，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热敏电阻。

热敏电阻开关的循环包括对所有堆叠的 BQ78706 GPIO9 至 GPIO11 进行广播写入，以及对配置为 ADC 和 OTUT 输入（比例式）的 GPIO7 和 GPIO8 进行广播读取。该设计需要 8 个循环来从 14 个热敏电阻和 2 个恒定电阻读取温度数据。

如果 BESS 机架电压为 1500V，并且一个机架由 416 个串联电池组成，则使用 8 个 BMU（32 个 BQ78706 器件）来监控所有电池电芯。执行一个循环来从堆叠的 BQ78706 器件读取温度数据所需的时间较长，这可能符合 GBT34131-2023 标准（所有热敏电阻的读取间隔均为 1s）。

2.2.4 电芯均衡

图 2-7 展示了电芯均衡电路。

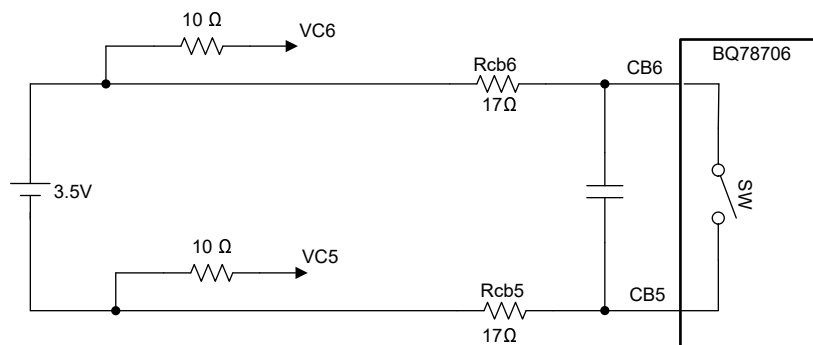


图 2-7. 电芯均衡电路

该设计使用内部场效应晶体管 (FET) 来实现 100mA 均衡电流。假设在给定条件下：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；使用 $R_{cb6} = R_{cb5} = 17 \Omega$ 。

2.3 重点产品

2.3.1 CC2662R-Q1

CC2662R-Q1 SimpleLink™ 无线 MCU 包含一个可运行应用程序和更高层无线 BMS 协议栈的 Arm® Cortex®-M4F 系统 CPU。

系统 CPU 是高性能、低成本平台的基础，满足系统对于减小存储器和降低功耗的要求，同时还能提供出色的计算性能和优越的系统中断响应能力。

该器件的突出特性包括：

- 支持 TI 的 SimpleLink™ 无线 BMS (WBMS) 协议，可实现稳健、低延迟和高吞吐量的通信
- 功能安全质量管理分级，包括 TI 质量管理开发过程，以及将要提供的功能安全时基故障率计算、FMEDA 和功能安全文档
- 符合 AEC-Q100 标准，提供 2 级温度范围 (- 40°C 至 +105°C)，并采用具有可湿性侧面的 7mm x 7mm VQFN 封装
- 完全 RAM 保持时，具有 0.94µA 的低待机电流
- 出色的 97dBm 无线电链路预算

2.3.2 BQ78706

BQ78706 可为储能系统 (ESS)、电池备份单元 (BBU) 和移动式发电站 (PPS) 的高压电池管理系统中高达 14 芯串联的电池模块提供高精度的电芯电压测量。该器件具有先进的 ADC 架构，测量系统满足严格的安全要求。该器件通过变压器 (或电容器) 隔离菊花链，适用于住宅、商业或电网规模储能系统的集中式或分布式架构。

2.3.3 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。

2.3.4 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，从而更大限度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 TMP61

[热敏电阻设计工具](#) 提供了电阻与温度关系表 (R-T 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。

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时间和内存的简化转换方法。

TMP61 目前采用 0402 X1SON 封装、0603 SOT-5X3 封装，以及 2 引脚穿孔式 TO-92S 封装。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

此设计的关键性能在 TI 实验室进行了测试。本节介绍了使用的终端设备以及测试过程和结果。表 3-1 介绍了设计电路板的硬件连接。

表 3-1. 电池连接器 J1_n (n = B0、S1、S2、S3)

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J1_n - 21	GND	系统接地
J1_n - 1	TS1	热敏电阻 1 的正极端子
J1_n - 22	TS2	热敏电阻 2 的正极端子
J1_n - 2	TS3	热敏电阻 3 的正极端子
J1_n - 23	TS4	热敏电阻 4 的正极端子
J1_n - 3	TS5	热敏电阻 5 的正极端子
J1_n - 24	TS6	热敏电阻 6 的正极端子
J1_n - 4	TS7	热敏电阻 7 的正极端子
J1_n - 5	TS8	热敏电阻 8 的正极端子
J1_n - 25	GND	系统接地
J1_n - 26	TS9	热敏电阻 9 的正极端子
J1_n - 6	TS10	热敏电阻 10 的正极端子
J1_n - 27	TS11	热敏电阻 11 的正极端子
J1_n - 7	TS12	热敏电阻 12 的正极端子
J1_n - 28	TS13	热敏电阻 13 的正极端子
J1_n - 8	TS14	热敏电阻 14 的正极端子
J1_n - 30	Module_N	BQ78706 接地
J1_n - 10	CELL0	CELL1 的负极端子
J1_n - 31	CELL1	CELL1 的正极端子
J1_n - 11	CELL2	CELL2 的正极端子
J1_n - 32	CELL3	CELL3 的正极端子
J1_n - 12	CELL4	CELL4 的正极端子
J1_n - 33	CELL5	CELL5 的正极端子
J1_n - 13	CELL6	CELL6 的正极端子
J1_n - 34	CELL7	CELL7 的正极端子
J1_n - 14	CELL8	CELL8 的正极端子
J1_n - 35	CELL9	CELL9 的正极端子
J1_n - 36	CELL10	CELL10 的正极端子
J1_n - 16	CELL11	CELL11 的正极端子
J1_n - 37	CELL12	CELL12 的正极端子
J1_n - 17	CELL13	CELL13 的正极端子
J1_n - 38	CELL14	CELL14 的正极端子
J1_n - 18	CELL15	CELL15 的正极端子
J1_n - 39	CELL16	CELL16 的正极端子
J1_n - 19	CELL17	CELL17 的正极端子
J1_n - 40	CELL18	CELL18 的正极端子
J1_n - 20	Module_P	BQ78706 电源
J1_n - 15	CELL_BB	汇流条终端

表 3-2 MCU 提供与无线 MCU 的 JTAG 连接。

表 3-2. JTAG 连接

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J5 - 1	3V3_CC	3.3V 电源
J5 - 2	TMS	JTAG TMS 端口
J5 - 3,5,9	GND	接地
J5 - 4	TCK	JTAG TCK 端口
J5 - 6	TDO	JTAG TDO 端口
J5 - 8	TDI	JTAG TDI 端口
J5 - 10	RST_CC	CC2662R-Q1 复位信号

3.1 硬件要求

表 3-3 汇总了用于测试的设备。

表 3-3. 测试设备汇总

设备	型号或说明
万用表	Agilent® 34401A
直流电源	Agilent® 6030A
调试器	LP-XDS110ET
逻辑分析仪	Kingst® LA5016

3.2 软件要求

这种设计需要软件开发环境。本节包含将 Code Composer Studio™ 与无线 BMS SDK 配合使用的步骤。

使用以下下载链接访问该软件：

- CCSTUDIO : [Code Composer Studio 集成开发环境 \(IDE\)](#)
- SysConfig : [系统配置工具](#)
- 无线 BMS SDK : [SIMPLELINK-WBMS-SDK](#)

安装完成后，打开 CCSTUDIO 并创建一个新的工作区以导入工程。在加载软件之前，需要使用 TI 的 UNIFLASH 软件或其他工具 (包括所有受保护的扇区) 擦除所有 CC2662R-Q1 器件的整个闪存。这一步至关重要。

在运行网络之前，请阅读 SDK 文件夹下的无线 BMS 用户指南。

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 52 芯串联电池包配置。为了模拟 1500V 电池架配置，需要堆叠八个设计板以支持 416 芯串联电池电芯，这些电池电芯由直流电源供电的电阻梯进行仿真。LAUNCHXL-CC26X2R1 开发套件充当无线主 (WM) 节点，以将命令从串行端口工具传输到无线命令，然后传输到无线器件 (WD) 节点。

图 3-1 显示了 1500V 电池架的测试设置。测试期间，设计板和 CC2662R-Q1 器件均未屏蔽附近工作中的无线耳机和鼠标，这些设备属于 2.4GHz 干扰源。

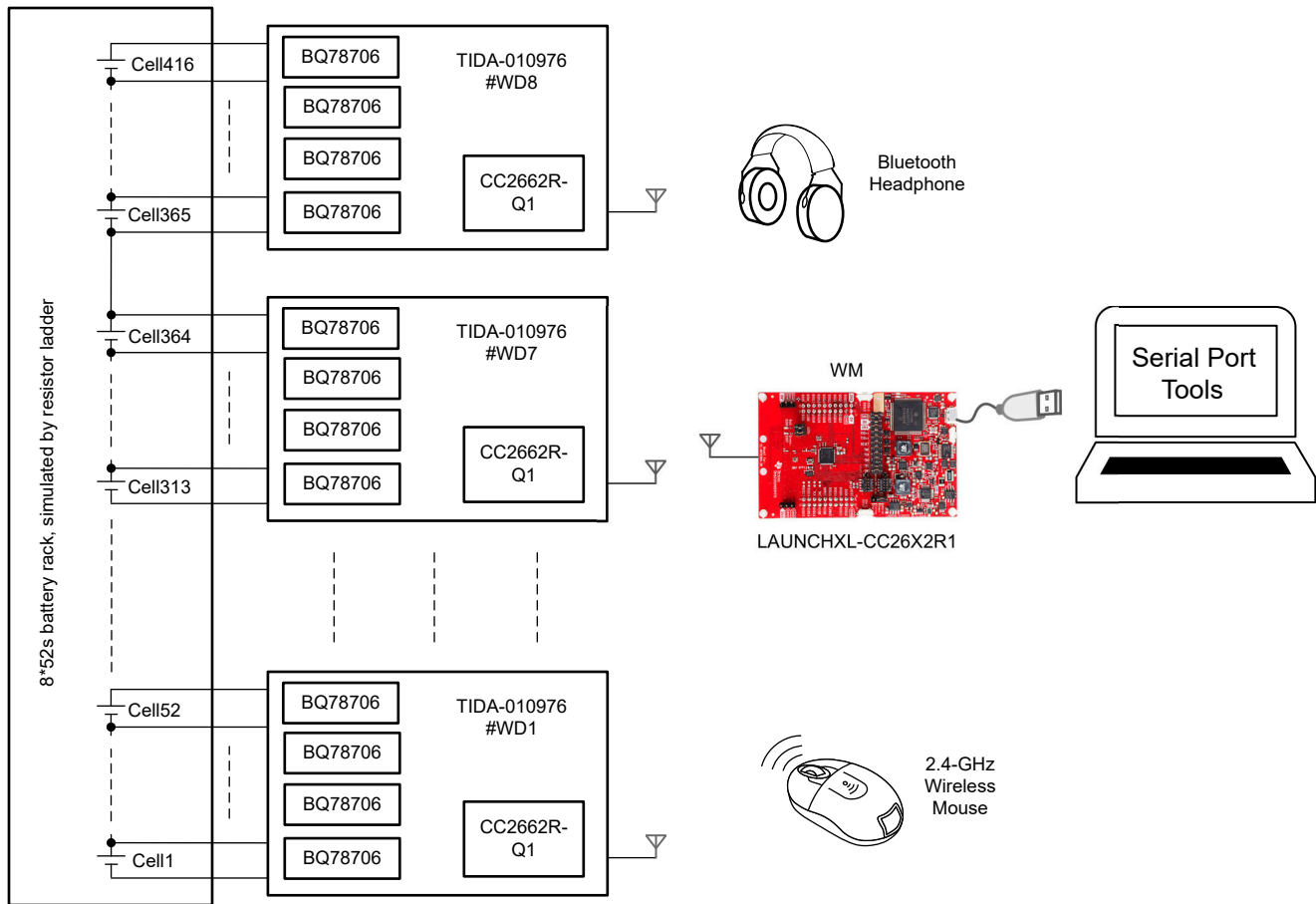


图 3-1. 1500V 电池架的测试设置

3.4 测试结果

3.4.1 网络性能

3.4.1.1 网络启动

为 WM 和 WD 节点定义了项目级定义 *Manual_network_start* 模式。这允许通过主机微控制器手动设置网络配置。

WM 节点利用 TI 的 uNPI 来与主机微控制器进行串行通信。uNPI 帧格式由以下字段组成：

- 起始帧 (SOF)：始终为 0xFE
- 长度字段：小端格式的长度 (LSB 在前)
- 命令类型：正在发送的命令类型
 - 0x3A：同步请求
 - 0x5A：异步请求|指示
 - 0x7A：同步响应
- 命令 ID：所发送命令的操作码。按照 wBMS 用户指南中 *命令参考* 部分的详细命令进行操作。
- 有效载荷：通过长度字段确定的可变长度的有效载荷
- 帧校验序列 (FCS)：通过按照总线上发送或接收的顺序对帧的每个字节执行异或运算来计算。始终从 FCS 计算中排除 SOF 字节。

表 3-4. 主机数据包格式

开始字节	有效载荷长度 (LSB)	有效载荷长度 (MSB)	命令类型	命令 ID	有效载荷	校验和
1B	1B	1B	1B	1B	变量	1B
0xFE	0x01	0x00	0x3A	0x08	0x00	0x33

加载软件后，使用串行端口工具进行测试。将以下命令从串行端口工具发送到 WM 以启动网络：

1. 复位 WM 节点
2. 设置 MAC 的网络运行模式
3. 设置网络主配置
4. 将网络加入模式设置成选择性加入或非选择性加入
5. 如果设置选择性联接模式，请设置选择性联接的设备配置
6. 启动网络

关于步骤 5，FLASH-PROGRAMMER-2 工具读取 WD 节点的 MAC 地址。此设计使用易失性运行模式和选择性连接模式进行测试。

3.4.1.2 网络延迟

本设计可测试主机微控制器响应数据而向 WM 发送命令的延迟。这包括主机微控制器与 WM 节点之间的 UART 接口以及 WM 和 WD 节点之间的 wBMS 通信帧所涉及的延迟。

BQ78706 接收由 WM 节点转发的来自主机微控制器的读取/写入命令。WM 节点将请求广播（或单播）到一个或多个 WD 节点，然后这些接收请求的节点会将命令转发给 BQ78706。BQ78706 处理该请求并返回包装在一个数据包中的响应，其中包含特定于每个 WD 节点的数据。每个 WD 节点接收来自 BQ78706 的响应，并将响应传回 WM 节点。要将主机微控制器的请求传输到 WM 节点并返回响应，通常需要 1 - 2 个 wBMS 通信帧。帧周期取决于 WD 节点数量和网络配置。

- 如果 WM 节点在帧开始前收到主机命令，则最好是 1 帧
- 如果 WM 节点在帧开始后接收到主机命令，最坏的情况是 2 帧，因为 WM 节点需要等待下一帧
- 如果进行了重新传输，则需要添加额外的帧

表 3-5 中的参数用于延迟测试。

表 3-5. 网络配置

属性	长度 (B)	DATA	说明
networkID	2	0xDDDD	网络的网络 ID
numULSlots	1	0x08	网络中的器件数
ulSlotTime	1	90	上行链路时隙持续时间，单位为 16 μs
dlSlotTime	2	310	下行链路时隙持续时间，单位为 16 μs
minPNWDevices	1	=numULSlots	局部网络 (PNW) 的最小设备数
maxRetries	1	03	发送数据帧时的最大重试次数
keepAliveInt	1	17	保持活动间隔
ul2dlTime	1	40	上行链路到下行链路的周转时间，单位为 16 μs
NumSkipRxInt (保留)	1	3	跳过的保持活动间隔数
DenyList	5	0xFFFFFFFF	信道跳频序列的拒绝列表。注意：确保数据通道的数量 ≥ 15

为了测试延迟，串行端口工具每 100ms 发送一次具有 168 字节有效载荷的广播电压和 GPIO 读取命令。168B 字节可包含 52 芯串联电芯电压数据和 8 个 GPIO 电压数据，这些数据与热敏电阻多路复用器的输出端关联。UART 波特率为 921600bit/s。

图 3-2 示出了未重新传输时的结果。测试的总延迟为 39.2ms，这意味着 WM 节点在帧开始后收到了命令。理论最短长度为 24.1ms。

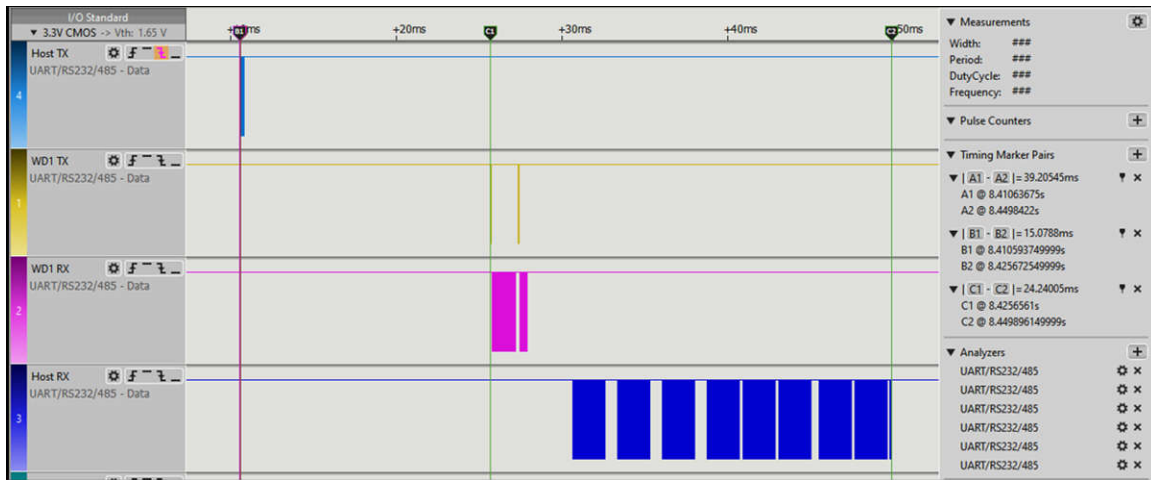


图 3-2. 168B 读取延迟 (未重传)

为了可靠地传送数据包，如果节点未接收到来自 WD 节点的确认 (ack)，WM 节点会重新传输数据包。图 3-3 示出了进行 3 次重新传输时的结果。测试的总延迟为 88ms，这意味着 WM 节点在帧开始后收到了命令。理论最短长度为 72.9ms。即使进行 3 次重新传输，416 芯串联电芯电压和 64 个 GPIO 读取间隔也小于 100ms。

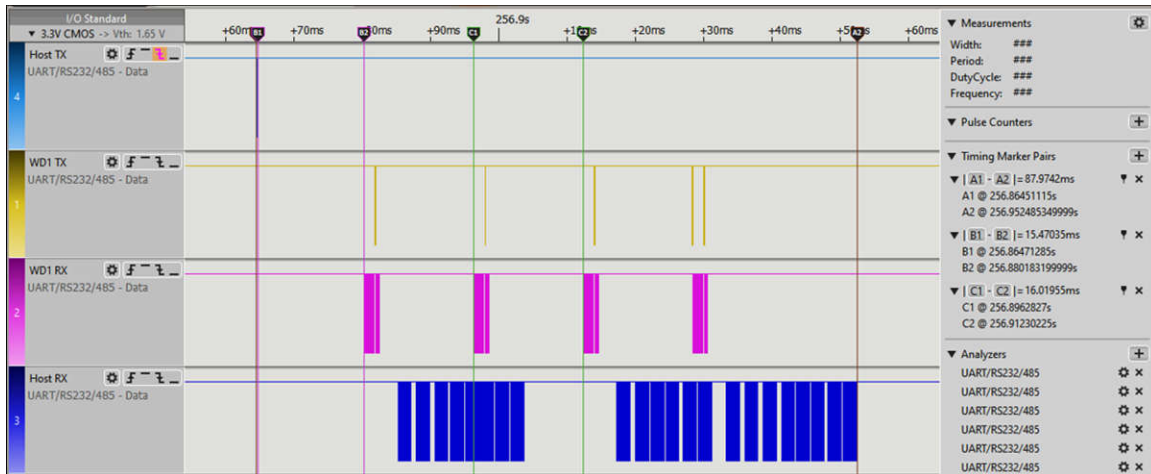


图 3-3. 168B 读取延迟 (有 3 次重新传输)

如果需要每 100ms 读取更多 GPIO 电压，则需要延长上行链路和下行链路时隙持续时间，以实现稳定的无线通信。请参阅 wBMS 用户指南中的配置超级帧和时序部分。

3.4.1.3 PDR、PS

要测试无线 BMS 网络的稳健性，可测量两个网络关键性能指标 (KPI) 参数。相关定义如下：

1. **路径稳定性 (PS)**：路径稳定性的计算方式：将每个 WD 节点首次成功接收数据包的百分比除以 WM 节点传输的数据包总数。
 - a. **指标**：PS > 85%
 - b. **注意**：数据包数必须大于 10000
2. **数据包传输速率 (PDR)**：PDR 的计算方式：将在每个 WD 节点成功接收的数据包的百分比除以 WM 节点发送的数据包总数。这包括 100ms 间隔内所需的重新传输。
 - a. **指标**：PDR > 99.9%
 - b. **注意**：数据包数必须大于 10000

这三个 KPI 通过 wBMS SDK 中统计命令读取的数据而计算得出。使用 [方程式 1](#) 计算节点 n 的 PDR。

$$PDR = 1 - \frac{\text{NumRxMissedPackets}_n}{\text{NumTxSuccessPackets}} \quad (1)$$

其中

- n 为 WD 节点的数目

使用 [方程式 1](#) 计算节点 n 的 PS。

$$PS_n = 1 - \frac{\text{Sum}(\text{Retry}_{1-3})}{\text{NumTxActualPackets}} \quad (2)$$

其中

- **NumTxActualPackets** 根据 **NumTxSuccessPackets** 加上每次传输期间所有 WD 节点的最大重试次数而计算得出
- **NumTxActualPackets** 表示从射频物理层发送的 TX 数据包的实际数量

30000 数据包的 PS 和 PDR 测试结果如 [表 3-6](#) 所示。测试结果表明，对于 416 芯串联电芯，此设置具有良好的网络稳健性。

表 3-6. PS 和 PDR 测试结果

节点	WD0	WD1	WD2	WD3	WD4	WD5	WD6	WD7
NumTxSuccessPackets	30001							
NumTxActualPackets	33095							
NumRxMissedPackets	0	0	0	0	0	0	0	1
重试	225	710	560	643	465	341	609	1396
PDR	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99.997%
PS	99.320%	97.855%	98.308%	98.057%	98.595%	98.970%	98.160%	95.782%

3.4.1.4 低功耗模式

无线 BMS 协议提供了将网络置于保持活动模式（这是一种低功耗模式，可很大程度地降低功耗）的功能。在保持活动模式下，WM 节点和 WD 节点以配置的 wBMS 通信帧数指定的每个特定间隔间歇性通信，直到 WM 节点恢复正常运行。WD 节点可以在进入保持活动模式时自动将 BQ78706 置于睡眠或关断模式，并在退出保持活动模式后立即唤醒 BQ78706。

通过此设计的配置，[图 3-4](#) 展示了 3.3V 电源轨在保持活动模式下的电流消耗。[INA229_239EVM](#) 和一个 10 Ω 串联电阻器用于测试电流。3.3V 电源轨的平均电流消耗约为 70 μA。

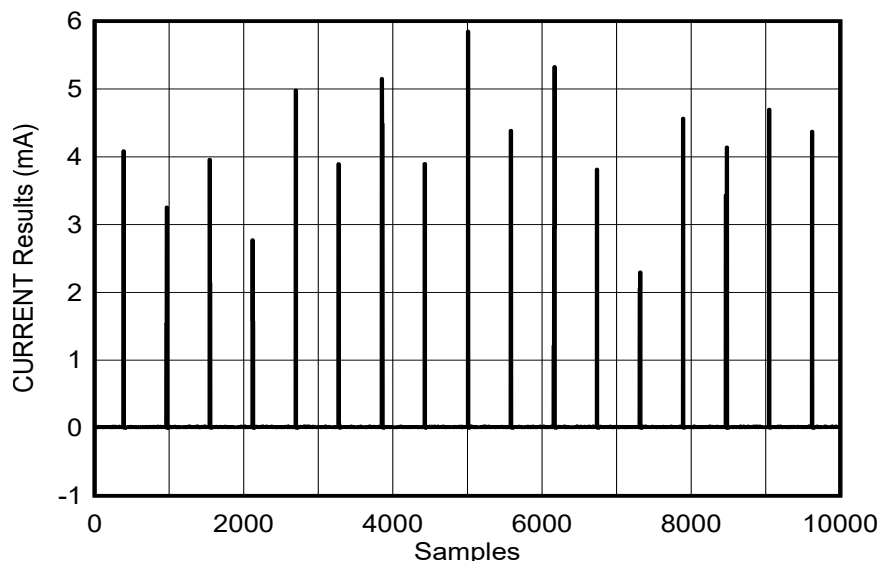


图 3-4. 保持活动模式下 WD 节点的功耗

3.4.2 电芯电压精度

由于在使用 LFP 电池电芯时，BQ78706 在 -40°C 至 125°C 下已实现 $\pm 2.4\text{mV}$ 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 BQ78706 完全相同。请索取完整的 BQ78706 数据表符合 ASIL-B 标准的工业级 14 芯可堆叠电池监测器、平衡器和集成保护器，以检查电压精度规格。

3.4.3 使用 TMP61 进行温度检测

使用四个 TMP61 热敏电阻来验证 BMU 温度检测功能。本节重点介绍如何使用 TMP61 通过 BQ78706 测量温度。

在此设计中，GPIO3 至 GPIO8 配置为 ADC 和 OTUT 输入（比例式）。通过 $10\text{k}\Omega$ 上拉电阻器将 GPIO3 至 GPIO6 直接连接到 TMP61。以 GPIO3 为例，RT3 是连接到 GPIO3 的 TMP61 的电阻，RATIO3 是 GPIO3_RATIO 读取数据， R_{pull} 是 $10\text{k}\Omega$ 上拉电阻，T3 是 TMP61 的温度检测。使用方程式 3 计算 RT3。

$$RT3 = \frac{RATIO3}{1 - RATIO3} \times R_{\text{pull}} \quad (3)$$

TMP61 提供四阶多项式 TMP。使用方程式 4 计算 T3。

$$T3 = A4 \times RT3^4 + A3 \times RT3^3 + A2 \times RT3^2 + A1 \times RT3 + A0 \quad (4)$$

其中

- $A0 = -2.691712\text{E}+02$ ， $A1 = 5.062889\text{E} - 02$ ， $A2 = -3.099051\text{E} - 06$ ， $A3 = 1.153395\text{E} - 10$ ， $A4 = -1.746912\text{E}-15$

在测试中，BQ78706 GPIO3 读取数据为 50.46%。相应的 RT3 为 10185.71Ω 。温度 T3 为 28.1°C 。要提高 TMP61 的温度测量精度，请参阅 [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](#) 应用说明中概述的步骤。

3.4.4 热敏电阻多路复用器时序

TMUX1308 通过 WM 发送的命令接受控制。图 3-5 中提供了 BQ78706#1 的测试点，包括 GPIO0、GPIO1、GPIO9、GPIO10 和 GPIO11。温度检测测试软件执行图 2-6 中的步骤。

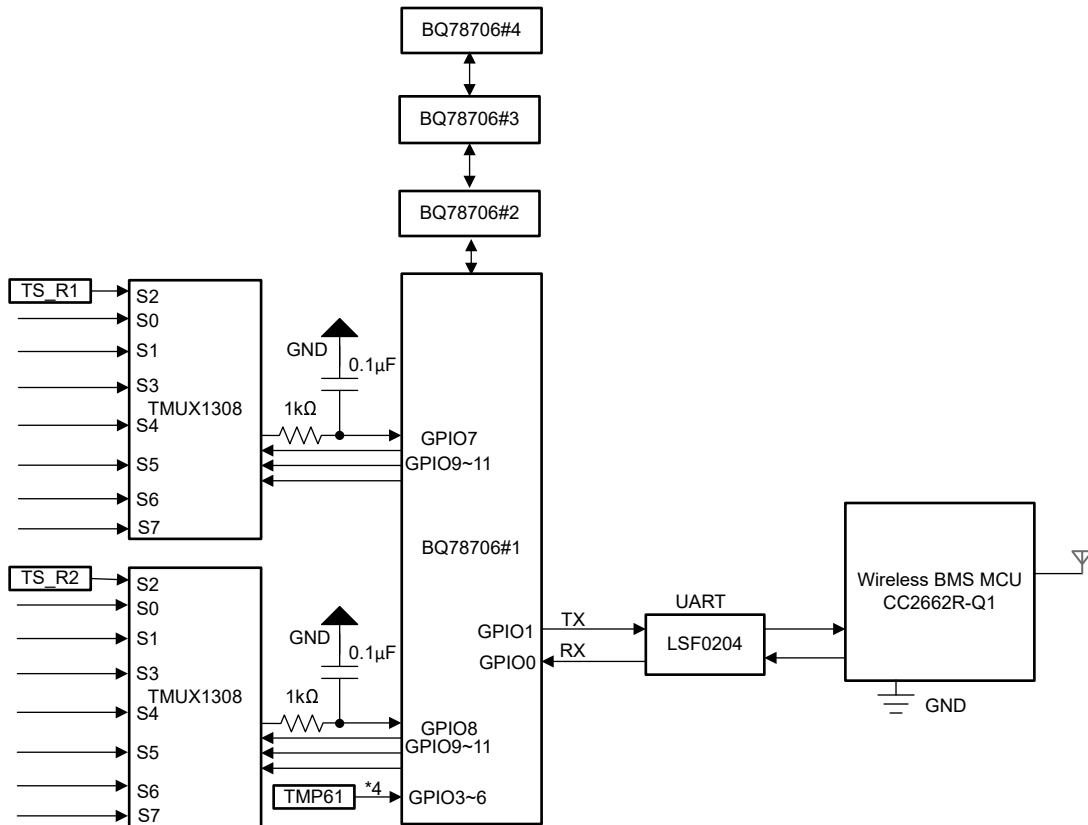


图 3-5. 温度检测的测试设置

图 3-6 展示了多路复用器的温度检测时序。该测试是 13 个电芯电压、14 个热敏电阻和 2 个恒定电阻器的轮询周期。

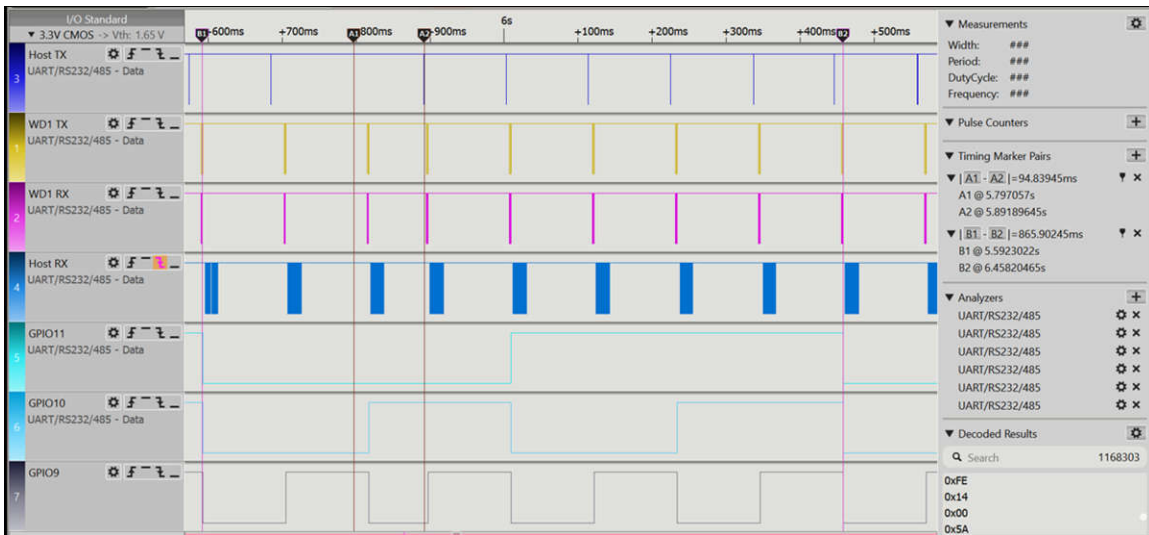


图 3-6. 多路复用器的温度检测时序

该测试需要以 100ms 的间隔发送八个命令来读取所有热敏电阻。每个命令都包含一个用于设置 TMUX1308 地址线的广播写入，以及广播读取，读取对象包括来自 8 个 WD 节点中所有 32 个 BQ78706 器件的 13 个电芯电压、GPIO7 和 GPIO8 比率。RS_R2 连接在通道 S2 中，具有 1kΩ 的小电阻，可以通过超低温读数识别。在图 3-5 中，八个步骤逐个传输，从步骤 0 到步骤 7 的持续时间为 865.9ms，这是读取所有热敏电阻的最大延迟。为了缩短延迟，需要发送命令的间隔小于 100ms。此过程表明，八个 TMUX1308 状态传输可以正常工作。

此外，为了避免可能影响 GPIO 电压测量的多路复用器稳定瞬态，需要在用于设置地址线的广播写入命令之前发送广播读取。然后，下一次广播读取在 100ms 间隔后具有稳定的 GPIO 电压。

3.4.5 电流消耗

图 3-7 展示了电流消耗的测试设置。这里测试了两种运行模式，包括保持活动模式和活动模式。选择 #S1 - 3 BQ78706 的 VSS 系列和 #B0 BQ78706 的 BAT 系列作为电流测量的测试点，以测试每个 BQ78706 的电流消耗。此外，还测试了电源轨的输入和输出电流以显示电源轨的性能。在这两种模式下，电阻梯由设置为 63V 和 150V 以模拟实际电芯的直流电源供电。6.5 位万用表用于测量串联电阻器两端的电压。万用表配置为慢速模式和 10G Ω 输入电阻，以获得出色精度。

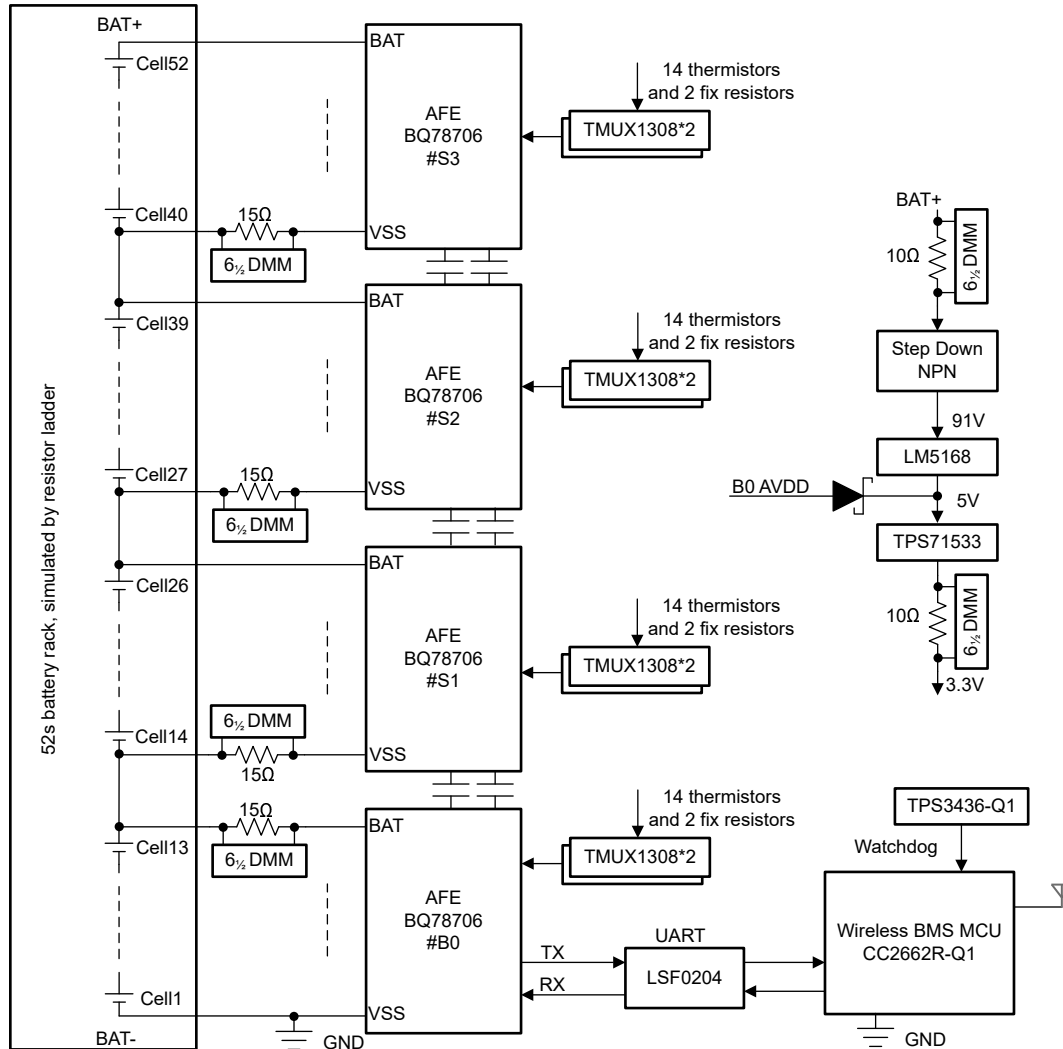


图 3-7. 电流消耗的测试设置

在活动模式下，WM 从每个 WD 节点发送一个具有 168B 有效载荷的轮询命令。在保持活动模式下，BA78706 在关断模式下工作，以最大程度地降低功耗。

表 3-7 展示了 BMU 电流消耗测试结果。

表 3-7. 功耗测试结果

输入电压	测试点	电源轨输入	电源轨输出	#B0	#S1	#S2	#S3
	运行模式	AVG	AVG	AVG	AVG	AVG	AVG
63Vdc	有效	558.6 μ A	2.67mA	11.32mA	11.47mA	11.23mA	11.29mA
	保持活动	37.3 μ A	70.7 μ A	32.6 μ A	3.0 μ A	3.0 μ A	3.0 μ A
150Vdc	有效	274.2 μ A	2.67mA	11.35mA	11.49mA	11.24mA	11.32mA
	保持活动	32 μ A	70.6 μ A	32.0 μ A	3.5 μ A	3.3 μ A	3.2 μ A

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-010976](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010976](#) 中的设计文件。

4.1.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010976](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

[LM5169 快速入门计算器](#)

LM5163 和 LM5164 转换器快速入门设计工具

[INA229_239EVM](#)

INA229 和 INA239 评估模块

[热敏电阻设计工具](#)

TMP6-THERMISTOR-DESIGN

软件

[CCSTUDIO](#)

Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE)

[FLASH-PROGRAMMER-2](#)

SmartRF Flash Programmer

[UNIFLASH](#)

UniFlash 闪存编程工具

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[CC13xx/CC26xx 硬件配置和 PCB 设计注意事项应用手册](#)
2. 德州仪器 (TI)，[CC13xx、CC26xx、CC23xx 和 CC27xx 系列无线 MCU 的晶体振荡器和晶体选型应用手册](#)
3. 德州仪器 (TI)，[2.4GHz 倒置 F 型天线应用手册](#)
4. 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™, SimpleLink™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

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

Agilent® is a registered trademark of Agilent Technologies Inc.

Kingst® is a registered trademark of Qingdao Kingst Electronics Co., Ltd.

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结构工程师，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。

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