

Design Guide: TIDA-010978

高达 1,500V 可堆叠电池管理单元参考设计 (集成 EIS)



说明

该参考设计是一种全面的电芯温度传感和高电芯数电压精度锂离子 (Li-ion)、磷酸铁锂 (LiFePO₄) 电池组 (52S 和 104S)。该设计可监测每节电芯的电压、电芯温度和阻抗, 同时支持集成电化学阻抗谱分析 (EIS) 和稳健的菊花链通信。该参考设计支持高达 1,500V 的可堆叠储能系统。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-010978

设计文件夹

BQ79826Z-Q1

产品文件夹

TMUX1308

产品文件夹

SN74LXC1T14

产品文件夹

TMP61

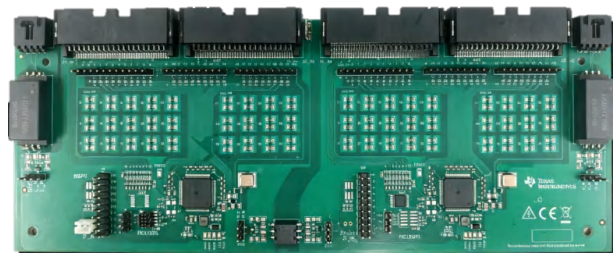
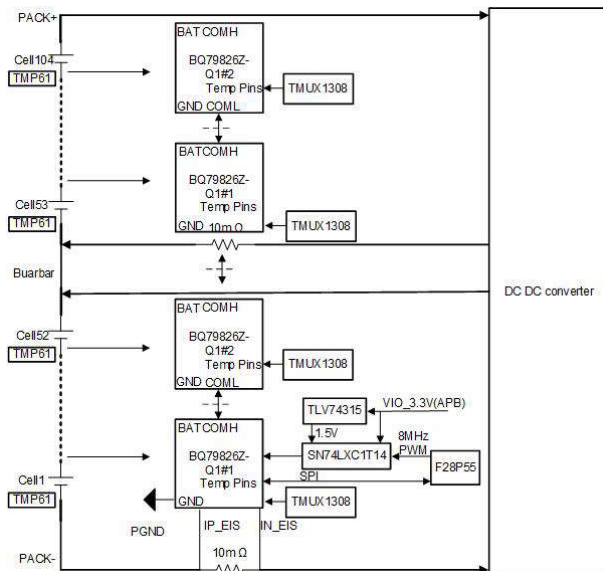
产品文件夹

特性

- 用于实时监测的集成 EIS
- 阻抗精度: 1% (具有 5A 激励和 100μΩ 阻抗, 测量频率: 0.04Hz 至 2kHz)
- -40°C 至 85°C 时的电芯电压精度为 ±1.7mV
- 具有数据重定时和环形架构的稳健菊花链通信, 适用于 1,500V 可堆叠系统
- 通过多路复用器 (MUX) 实现全面的电芯温度检测, 每个电池组最多可支持 52 或 104 节电芯
- 具有低功耗关断模式 (< 10μA) 的可编程电芯/电池组保护 (OVP、UVP、OTP)
- 可扩展的模块化架构, 支持通过菊花链和 CAN 接口进行多组扩展

应用

- ESS - 电池管理系统 (BMS)



1 系统说明

电池储能系统 (BESS) 在住宅、商业、工业及电网级部署中持续快速增长。业界正明显朝向 1,500V 高压平台、500Ah+ 大容量电芯及 104s 节高电芯数串联电池组架构发展。大尺寸锂离子及磷酸铁锂电芯提升了系统能量密度，降低了整体 BOM 及安装成本，并支持长时储能场景，同时也为传统 BMS 设计带来新的安全与监测挑战。

传统电池管理系统仅依赖电芯电压与表面温度采样进行保护与状态估计。然而，大容量电芯具有高热惯性，内部电化学反应与外部温升之间存在明显时延。传统温度传感器仅在热失控后期触发报警，导致用于系统缓解的响应窗口极短。此外，传统 SOC 及 SOH 算法缺乏内部电化特性数据，导致动态充放电工况下估算精度低。

为应对这些行业痛点，我们开发了 TIDA-010978 参考设计，作为集成原生 EIS 功能的新一代可堆叠 BMU。该设计采用 BQ79826ZQ1 作为核心 26S 电池检测器，每板支持 52S，并可级联至 104 以用于 1,500V ESS 应用。

与传统 BMU 设计不同，TIDA-010978 在不增加额外激励硬件的条件下，通过复用主动电池组均衡功率级 (TIDA-010990)，集成了电池组级 EIS 测量功能。TIDA-010978 实现了高精度阻抗测量。同时，该设计保留了完整的标准 BMU 功能，包括高精度电芯监测、通过多路复用器扩展实现的全温度范围覆盖、被动电芯均衡、隔离式菊花链堆叠以及 CAN FD 通信。

该参考设计完全符合 UL1973、IEC 62477 及 GB 38031 安全规范，为高压大容量储能开发者提供了完整的硬件原理图、PCB 版图、固件框架、GUI 上位机及测试验证报告。

1.1 主要系统规格

通用系统特性

- 支持最高 1,500V 可堆叠 ESS，每个 BMU 板 52S，可扩展至 104S 电池组
- 电芯电压精度：-40°C 至 125°C 范围内为 $\pm 1.7\text{mV}$ ，无需出厂校准
- 通过 TMUX1308 模拟多路复用器扩展，实现每节电芯的全温度覆盖
- 超低功耗模式：5 μA 关断、20 μA 睡眠、3mA 典型工作电流
- 稳健的隔离式菊花链，支持环网结构，适用于多板堆叠
- 全面保护：OVP、UVP、OTP、UTP、断线、通信故障诊断

EIS 专属特性

- EIS 频率范围：0.01Hz 至 3.5kHz，支持完整电池特性分析
- 重用主动均衡电路作为 EIS 激励源，最大激励电流为 5A
- 阻抗精度：全温度范围内幅值偏差 < 2%，相位偏差 < 1°
- EIS 扫描与 APB 均衡分时复用，互不干扰
- 支持热失控早期检测、高精度 SoC/SoH 估算、析锂监测

2 系统概述

TIDA-010978 系统划分为多个核心功能模块，模块间具有清晰的接口及信号交互：

高压电芯监测模块

采用两个 BQ79826Z-Q1 以菊花链堆叠方式同步采样 52S 电芯电压。每个 BQ79826Z-Q1 执行本地过压/欠压判断，并将原始数据传输至主 MCU 进行系统级处理。菊花链拓扑简化了高压堆叠布线，提升了同步精度。

温度检测与多路复用器模块

TMUX1308 扩展有限的 GPIO 端口，实现对每个电芯的全温度范围采样覆盖。TMP61 线性热敏电阻布置于电芯表面及汇流排关键位置。各多路复用器保留了固定电阻通道，用于开关卡滞或断路问题的在线故障诊断。

EIS 激励与控制模块

该系统基于 TMS320F28P55 及外部 FET，生成高分辨率 PWM 信号来控制功率级。重用主动均衡电路作为 EIS 激励源，向电池组注入可调交流电流。同步采样电压与电流响应，用于阻抗谱计算。支持多种电池组级激励模式，适应不同堆叠配置。

通信接口模块

板载 BQ79826Z-Q1 采用电容器隔离式菊花链；板间堆叠使用变压器隔离构成环形通信网络。隔离式 CAN FD 提供 BMU 与上位 BCU 控制器之间的高速数据交互，用于上传电芯数据、EIS 频谱及故障信息。

保护与诊断模块

集成硬件阈值保护与软件逻辑判断，覆盖电芯电压异常、过热、激励过流、接线开路及通信故障。故障代码与时间戳被记录并通过 CAN 上传，以便远程维护。

2.1 方框图

图 2-1 显示了 EIS BMU 方框图。

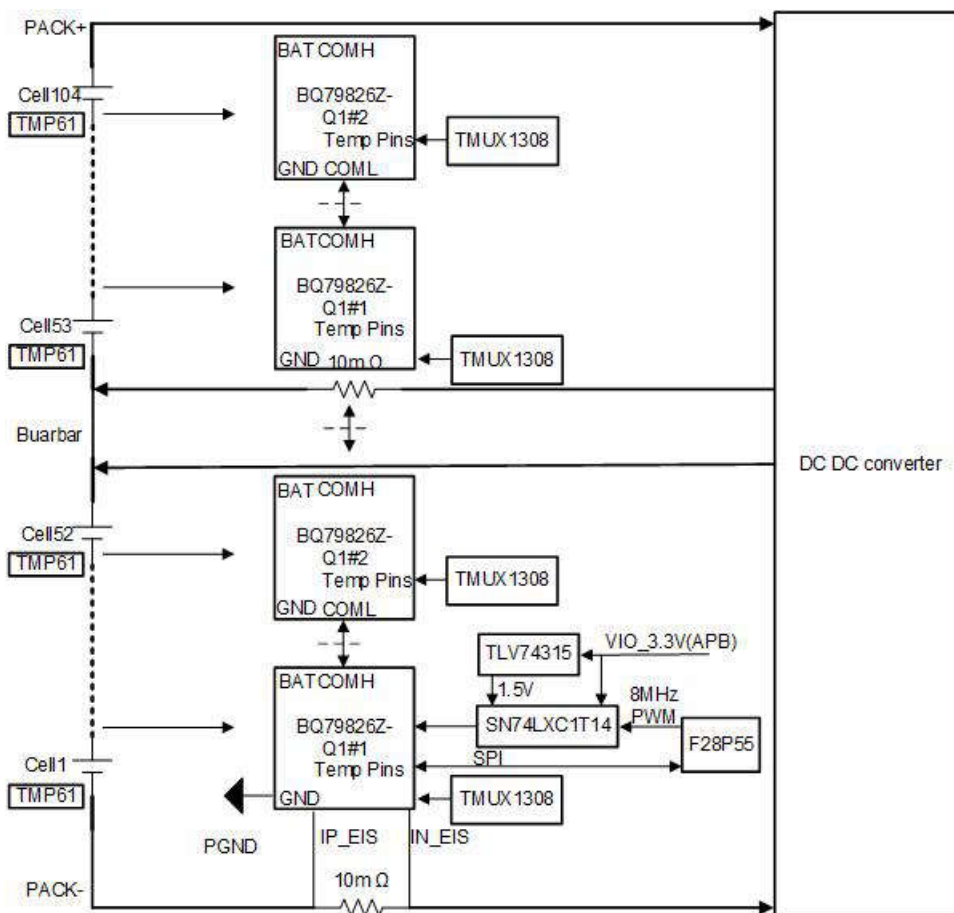


图 2-1. 1. TIDA-010978 EIS BMU 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 高压可堆叠架构

TIDA-010978 采用模块化堆叠设计。单板集成两个 BQ79826Z-Q1，支持监测 52S 电芯。多个 BMU 可通过菊花链级联，扩展至 104S 乃至更高的 1,500V 电池系统。

每个 BQ79826Z-Q1 独立完成本地电芯电压采样和基本过压/欠压保护。数据通过菊花链传输至主 MCU，进行系统级综合分析调度。菊花链通信采用重定时与信号整形机制，在高压堆叠柜环境中保持稳定传输。模块化设计简化了容量扩展、现场装配与售后维护。

2.2.2 电化学阻抗谱 (EIS) 子系统

传统温度和压力传感器仅在热失控的中后期响应。电池内部失效会经历 SEI 分解 (80 - 120°C)、电解液分解 (120 - 150°C)、压力上升 (150 - 200°C) 及阴极崩溃 (> 200°C)。只有 EIS 能够捕捉到最早 SEI 阶段的细微阻抗变化，实现超早期预警。

EIS 工作原理：对电池组施加可控交流激励 → 同步采集电压与电流响应 → 计算阻抗幅值与相位 → 扫描多个频率形成阻抗谱 → 与 SOC、SOH、温度及老化状态关联。

该设计采用主动均衡电路复用激励方案，无需额外的激励功率级。该设计支持 0.04Hz - 2kHz 精确扫描，单电芯幅值偏差 < 2%，相位偏差 < 1°，具有优异的可重复性及 SOC/温度分辨能力。该设计可用于热失控早期预警、高精度状态估计及电池批量筛选。

2.2.3 EIS 同步要求

激励输出与电压/电流采样必须保持精确的时间同步。采用统一时钟域和硬件触发，将器件间同步误差保持在允许范围内，避免相位偏差影响 EIS 计算。

2.2.4 第一个 BQ79826Z-Q1 的 PWM 输入作为晶振

3.3V 辅助输入经 TLV74315 降压，再由 LDO 转换为 1.5V 模拟/数字电源轨。MCU 产生 8MHz PWM，作为第一个 BQ79826Z 的晶振。模拟与数字电源/地严格隔离，以抑制对高精度采样及 EIS 微弱信号的干扰。所有电源轨具备过压、欠压及过流保护。

2.2.5 温度检测与多路复用器网络

受限于 AFE GPIO 数量，采用 TMUX1308 8 选 1 多路复用器扩展温度通道，实现一对一电芯温度覆盖。TMP61 线性热敏电阻具有宽温度线性度、低自发热及快速响应特性。

每个多路复用器保留固定电阻诊断通道。系统通过识别标准电阻值，判断多路复用器通道卡滞、开路及阻值异常。所有堆叠式 AFE 同步切换多路复用器通道，在业界通用的 1s 周期内完成全温度范围采样。

2.2.6 电芯均衡电路与工作原理

该设计采用被动均衡，配合 BQ79826ZQ1 内部开关与外部功率电阻器实现。奇偶交错均衡策略分散了发热，避免局部过热。均衡动作与邻近温度点联动；检测到过热时，自动降低或关断均衡电流，以维持长期安全运行。

2.2.7 MCU 及系统控制架构

TMS320F28P55 作为系统主器件，承担 EIS PWM 生成、同步采样控制、数据算法处理、均衡逻辑、故障诊断及 CAN 通信。软件分层设计实现硬件与业务逻辑去耦合，便于功能迭代与移植。多周期任务调度兼顾实时性与 MCU 资源消耗。

2.2.8 保护与板载诊断

多级保护覆盖电芯 OVP/UVP、OTP/UTP、接线开路、EIS 激励过流、通信异常。系统自动记录故障时间与代码，通过 CAN 上传至上位机，支持远程故障排查与运维。日常自诊断可预判潜在隐患，提升系统可靠性。

2.3 重点产品

2.3.1 BQ79826Z-Q1

BQ79826Z-Q1 是一款新型高电芯数 26S 可堆叠电池监测器，内置集成式电化学阻抗谱 (EIS) 引擎。EIS 引擎提供了一种检测电芯阻抗变化的新方法，可用于监测电芯老化、温度、SoC、热失控和许多其他电芯参数。此外，该器件还集成了智能传感器控制器，使传感器测量更便捷、更可靠。

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 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，以及用于生成温度和示例 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。

2.3.4 SN74LXC1T14

SN74LXC1T14 是一款具有施密特触发输入的一位双电源反相电压电平转换器件。输入引脚 A 以 V_{CCI} 逻辑电平为基准，输出引脚 Y 以 V_{CCO} 逻辑电平为基准。输入引脚 A 能够接受 1.1V 至 5.5V 的电压，并且可以直接连接到 V_{CCI} 或 GND。请参阅器件功能模式，简要了解该逻辑的运行方式。

该器件可保持低功耗，并且完全符合使用 I_{off} 的部分断电应用的规范要求。当器件断电时， I_{off} 电路将会禁用输出。这会抑制电流回流到器件中，从而防止损坏器件。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

TIDA-010978 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。

3.1 硬件要求

电路板连接器分为电池采样、温度和菊花链三类。为每个引脚定义了电芯差分采样、热敏电阻接入、差分通信及故障信号功能，遵循统一规范，以便于组装与调试。

表 3-1. 电池连接器 J4

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J4-1	TS1	温度检测 1
J4-2	TS3	温度检测 3
J4-3	TS5	温度检测 5
J4-4	TS7	温度检测 7
J4-5	GND	系统地
J4-6	NC	无连接
J4-7	NC	无连接
J4-8	NC	无连接
J4-9	NC	无连接
J4-10	CELL0	电芯 0 电压检测
J4-11	CELL2	电芯 2 电压检测
J4-12	CELL4	电芯 4 电压检测
J4-13	CELL6	电芯 6 电压检测
J4-14	CELL8	电芯 8 电压检测
J4-15	CELL10	电芯 10 电压检测
J4-16	CELL12	电芯 12 电压检测
J4-17	NC	无连接
J4-18	NC	无连接
J4-19	NC	无连接
J4-20	NC	无连接
J4-21	GND	系统地
J4-22	TS2	温度检测 2
J4-23	TS4	温度检测 4
J4-24	TS6	温度检测 6
J4-25	TS8	温度检测 8
J4-26	NC	无连接
J4-27	NC	无连接
J4-28	NC	无连接
J4-29	NC	无连接
J4-30	GND	系统地
J4-31	CELL1	电芯 1 电压检测
J4-32	CELL3	电芯 3 电压检测
J4-33	CELL5	电芯 5 电压检测
J4-34	CELL7	电芯 7 电压检测
J4-35	CELL9	电芯 9 电压检测
J4-36	CELL11	电芯 11 电压检测
J4-37	CELL13	电芯 13 电压检测

表 3-1. 电池连接器 J4 (续)

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J4-38	NC	无连接
J4-39	NC	无连接
J4-40	NC	无连接
J4-MNT1	安装引脚 1	机械/屏蔽地
J4-MNT2	安装引脚 2	机械/屏蔽地

表 3-2. 电池连接器 J5

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J5-1	TS8	温度检测 8
J5-2	TS10	温度检测 10
J5-3	TS12	温度检测 12
J5-4	TS14	温度检测 14
J5-5	GND	系统地
J5-6	NC	无连接
J5-7	NC	无连接
J5-8	NC	无连接
J5-9	NC	无连接
J5-10	CELL14	电芯 14 电压检测
J5-11	CELL16	电芯 16 电压检测
J5-12	CELL18	电芯 18 电压检测
J5-13	CELL20	电芯 20 电压检测
J5-14	CELL22	电芯 22 电压检测
J5-15	CELL24	电芯 24 电压检测
J5-16	CELL26	电芯 26 电压检测
J5-17	PWR	电源轨
J5-18	NC	无连接
J5-19	NC	无连接
J5-20	NC	无连接
J5-21	GND	系统地
J5-22	TS9	温度检测 9
J5-23	TS11	温度检测 11
J5-24	TS13	温度检测 13
J5-25	TS15	温度检测 15
J5-26	NC	无连接
J5-27	NC	无连接
J5-28	NC	无连接
J5-29	NC	无连接
J5-30	NC	无连接
J5-31	CELL15	电芯 15 电压检测
J5-32	CELL17	电芯 17 电压检测
J5-33	CELL19	电芯 19 电压检测
J5-34	CELL21	电芯 21 电压检测
J5-35	CELL23	电芯 23 电压检测
J5-36	CELL25	电芯 25 电压检测

表 3-2. 电池连接器 J5 (续)

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J5-37	NC	无连接
J5-38	NC	无连接
J5-39	NC	无连接
J5-40	NC	无连接
J5-MNT1	安装引脚 1	机械/屏蔽地
J5-MNT2	安装引脚 2	机械/屏蔽地

表 3-3. 通信连接器 J1

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J1-1	BMU_COMML_P	菊花链正输入
J1-2	BMU_COMML_N	菊花链负输入
J1-3	(GND/基准)	变压器返回路径
J1-4	(NC)	无连接

表 3-4. 通信连接器 J2

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J2-1	BMU_COMMH_N	菊花链负输出
J2-2	BMU_COMMH_P	菊花链正输出
J2-3	(GND/基准)	变压器返回路径
J2-4	(NC)	无连接

表 3-5. 逻辑电平连接器 J6

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J6-1	AVDD	模拟 3.3V 电源轨
J6-2	VIO	数字 3.3V 电源轨
J6-3	GND	系统地

表 3-6. MCU 连接器 J7

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J7-1	MCU2AFE_PWM	到 AFE 的 PWM 控制信号
J7-2	MCU_SCLK	SPI 时钟
J7-3	MCU_MOSI	SPI 主器件输出/从器件输入
J7-4	MCU_MISO	SPI 主器件输入/从器件输出
J7-5	MCU_NCS	SPI 片选
J7-6	VIO	3.3V 电源轨
J7-7	GPIO3/NFAULT	故障指示信号
J7-8	GND	系统地
J7-9	AFE2MCU_PWM	来自 AFE 的反馈 PWM
J7-10	GND	系统地

表 3-7. GPIO 调试连接器 J8

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J8-1	GPIO19	通用 I/O 19
J8-2	GPIO20	通用 I/O 20
J8-3	GPIO17	通用 I/O 17
J8-4	GPIO18	通用 I/O 18
J8-5	GPIO15	通用 I/O 15
J8-6	GPIO16	通用 I/O 16
J8-7	GPIO13	通用 I/O 13
J8-8	GPIO14	通用 I/O 14
J8-9	GPIO11	通用 I/O 11
J8-10	GPIO12	通用 I/O 12
J8-11	GPIO9	通用 I/O 9
J8-12	GPIO10	通用 I/O 10
J8-13	GPIO7	通用 I/O 7
J8-14	GPIO8	通用 I/O 8
J8-15	GPIO5	通用 I/O 5
J8-16	GPIO6	通用 I/O 6
J8-17	GPIO3	通用 I/O 3
J8-18	GPIO4	通用 I/O 4
J8-19	GPIO1	通用 I/O 1
J8-20	GPIO2	通用 I/O 2

表 3-8. 菊花链连接器 J9

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J9-1	GND	系统地
J9-2	COMMH_N	菊花链负极
J9-3	COMMH_P	菊花链正极

表 3-9. 菊花链连接器 J10

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J10-1	GND	系统地
J10-2	COMML_N	菊花链负极
J10-3	COMML_P	菊花链正极

表 3-10. 外部 SPI 连接器 J12

连接器和引脚分配	功能或原理图网	注释
J12-1	VIO	3.3V 电源轨
J12-2	MSPI_SCLK	SPI 时钟 (AFE)
J12-3	MSPI_MOSI	SPI 主器件输出/从器件输入 (AFE)
J12-4	MSPI_MISO	SPI 主器件输入/从器件输出 (AFE)
J12-5	MSPI_NCS	SPI 片选 (AFE)
J12-6	GND	系统地

3.2 软件

软件框架是 TIDA-010978 最关键的设计考量之一，采用完整的分层模块化架构，分工清晰，可扩展性强。整体软件分为硬件驱动层、中间件层、应用层及上位机 GUI 层。

硬件驱动层：包含 SPI、CAN、ePWM、eCAP、ADC、GPIO、多路复用器等外设驱动器，为上层提供标准调用接口。

中间件层：集成温度转换、电压滤波、通信协议解析、EIS 原始数据预处理及均衡逻辑算法。

应用层：采用多周期实时任务调度：

- 20 μ s 高优先级任务：EIS 闭环控制、PWM 时序及 ADC 同步采样
- 100ms 任务：电芯电压与温度数据刷新、正常状态上传
- 5s 任务：AFE 状态检测与故障诊断更新
- 300s 任务：全频段 EIS 扫描与谱数据存储

上位机 GUI 交互层：实现数据解析、协议交互、实时曲线显示、参数配置及自动化测试接口。

严格划分任务优先级，确保保护及 EIS 同步控制不被低优先级任务阻塞。故障处理、低功耗开关及 EIS 流程逻辑嵌入各层，维护系统稳定性与功能完整性。

3.3 测试设置

BMU 置于温箱中；电芯接口连接电池，温度端口连接热敏电阻，电源及通信接口连接测试仪器。校准设备参数，配置 BMU 保护阈值及工作模式，然后按电压精度、EIS 及功耗顺序依次测试。

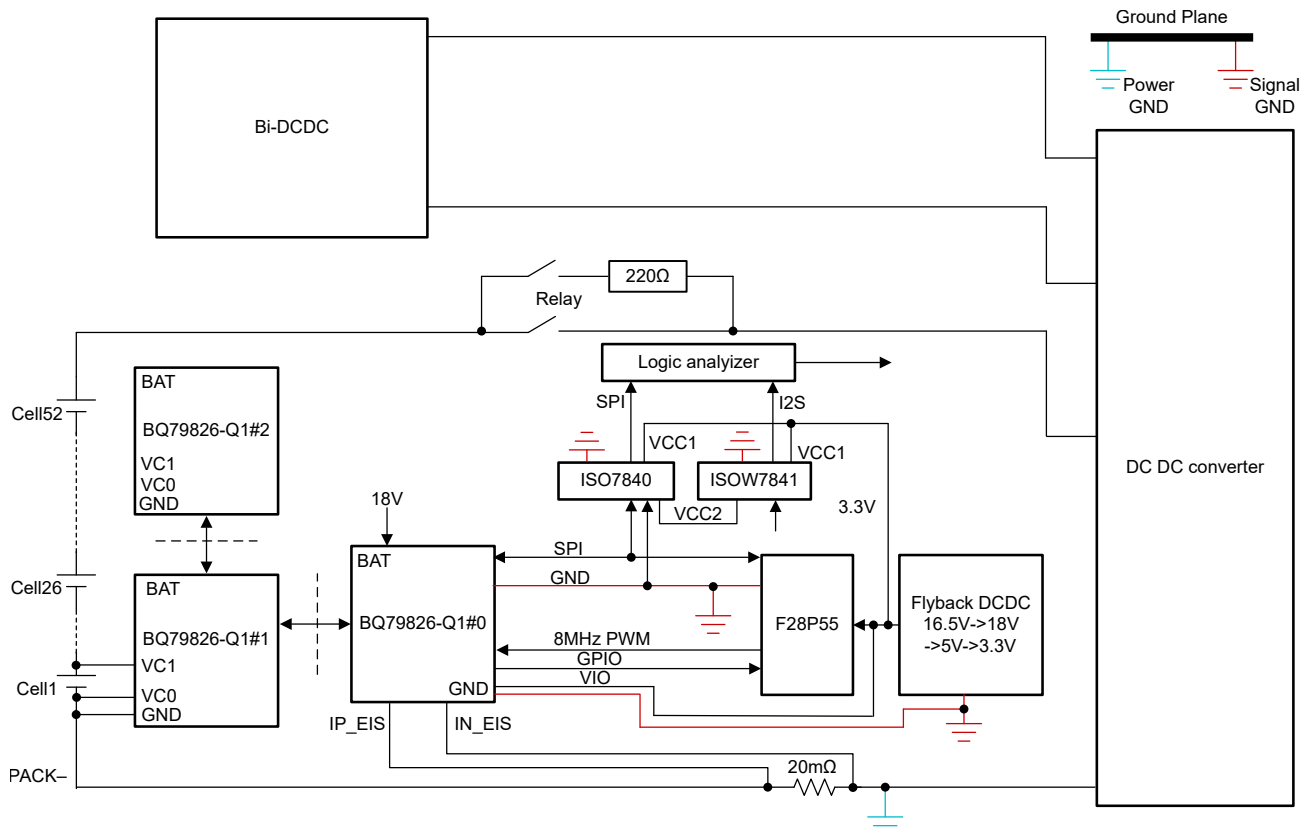


图 3-1. EIS BMU 测试设置

图 3-1 是一个围绕 BQ79826 AFE 器件构建的高完整性测试台，设计用于验证集成电化学阻抗谱 (EIS) 的 52 节串联可堆叠电池管理系统 (BMS)。

该系统使用多个级联 BQ79826 IC 同时监测整个电池组的电芯电压、温度和阻抗。该系统采用隔离式电源架构，包含反激式 DC/DC 转换器，由 16.5V 输入生成 18V 及 3.3V 电源轨，为 AFE 链路及 F28P55 C2000™ MCU 供电。

高压 BQ79826 域与低压 MCU 之间的通信通过 ISO7840/ISO7841 数字隔离器实现隔离，支持安全地跨隔离栅传输 SPI 及 I2S 信号。预留逻辑分析仪接口，用于在调试期间采集并验证这些数字通信链路的完整性。

该测试台还包含专用 EIS 信号路径，MCU 生成 8MHz PWM 激励信号并通过 BQ79826 的 EIS 接口注入电池。精密 20mΩ 分流电阻器测量生成的响应电流，以用于阻抗计算。

外部 220Ω 电阻器用作预充电电阻器，由继电器控制，以限制系统加电期间的浪涌电流并保护下游负载电路。该电路板采用分割接地平面设计，分离电源 GND 与信号 GND，以降低高压环境中的噪声，提高测量精度。

这种全面设置支持所有验证步骤，包括从温箱内的电芯电压可靠性测试到全频段 EIS 扫描，使该设置成为在实际工况下验证 BMS 功能与性能的完整平台。

3.4 电池组测试结果

3.4.1 电芯电压可靠性测试

测试步骤

1. 将电池组放入温箱，将温度设为室温。等待热平衡。
2. 采集所有电芯的 Vcell 数据。
3. 重复第 2 步九次 (共测量 10 次)。
4. 计算各电芯电压的平均值与有效值 (rms)。

测试结果

每节电芯的 $V_{rms} < 0.3mV$

每节电芯的 $V_{max} < 1mV$

3.4.2 EIS 测量可重复性

测试步骤

1. 将电池组放入温箱，将温度设为室温。等待热平衡。
2. 采集所有电芯的 Vcell 数据。
3. 将激励电流设置为 I_{max} ，测量 Z 数据 (0.04Hz 至 563Hz) 5 次。
4. 采集所有电芯的 Vcell 数据。

测试结果

幅值偏差 < 2%，相位偏差 < 1°。

表 3-11 展示了相位与幅值偏差测试结果。重复扫描曲线高度一致；不同 SOC 和温度下的阻抗特性区别明显。

表 3-11. 相位与幅值偏差测试结果

电芯编号	cell0	cell 1	cell 2	cell 3	cell 4	cell 5	cell 6	cell 7	cell 8	cell 9	cell 10	cell 11	cell 12	cell 13	cell 14	cell 15	cell 16	cell 17	cell 18	cell 19	cell 20	cell 21	cell 22	cell 23	cell 24	cell 25
相位偏差 (度)	0.82	0.41	0.64	0.43	0.43	0.42	0.44	0.44	0.39	0.42	0.42	0.43	0.43	0.43	0.47	0.42	0.42	0.42	0.47	0.43	0.45	0.43	0.45	0.47	0.41	0.50
幅值偏差 (%)	1.69	0.77	0.97	0.87	0.72	0.71	0.69	0.75	0.67	0.68	0.69	0.73	0.71	0.70	0.72	0.66	0.68	0.64	0.71	0.76	0.83	0.83	0.83	0.81	0.79	0.77
电芯编号	cell26	cell 27	cell 28	cell 29	cell 30	cell 31	cell 32	cell 33	cell 34	cell 35	cell 36	cell 37	cell 38	cell 39	cell 40	cell 41	cell 42	cell 43	cell 44	cell 45	cell 46	cell 47	cell 48	cell 49	cell 50	cell 51
相位偏差 (度)	0.67	0.83	0.69	0.91	0.33	0.54	0.27	0.49	0.32	0.48	0.29	0.42	0.35	0.37	0.38	0.40	0.38	0.36	0.46	0.45	0.40	0.38	0.43	0.39	0.41	0.41
幅值偏差 (%)	1.32	0.74	0.80	1.78	0.45	0.47	0.46	0.53	0.46	0.56	0.53	0.48	0.47	0.53	0.43	0.49	0.51	0.42	0.58	0.54	0.53	0.51	0.56	0.51	0.52	0.54

3.4.3 电池组 EIS 测量奈奎斯特图

图 3-2 是一幅奈奎斯特图，显示了串联电池组中多节电芯的实测阻抗谱。每条曲线代表单节电芯的阻抗，描绘为一定频率范围内虚阻抗与实阻抗间的关系。

所有曲线遵循相同的总体趋势：高频段始于实轴附近，中频段形成明显弧线，低频段向下延伸至负虚部平面。靠近原点的高频区域对应各电芯的欧姆内阻，这在所有电芯中高度一致。中频段弧线反映电极界面电荷转移与电容行为的综合效应。低频段尾部显示与电池内部物质传输过程相关的典型响应。

尽管所有曲线基本形状相同，但曲线间存在微小但可辨的离散差异。这表明电芯之间在阻抗幅值与相位上存在细微差异，可归因于正常制造差异及运行历史中的微小不同。没有曲线明显偏离共同趋势，证实所有电芯在相近的电气特性范围内运行。

此测量展示了持续捕获电池组内每节电芯阻抗响应的能力。该图直观呈现了整体阻抗分布，并确认所有电芯均表现出此类储能器件应有的预期行为。

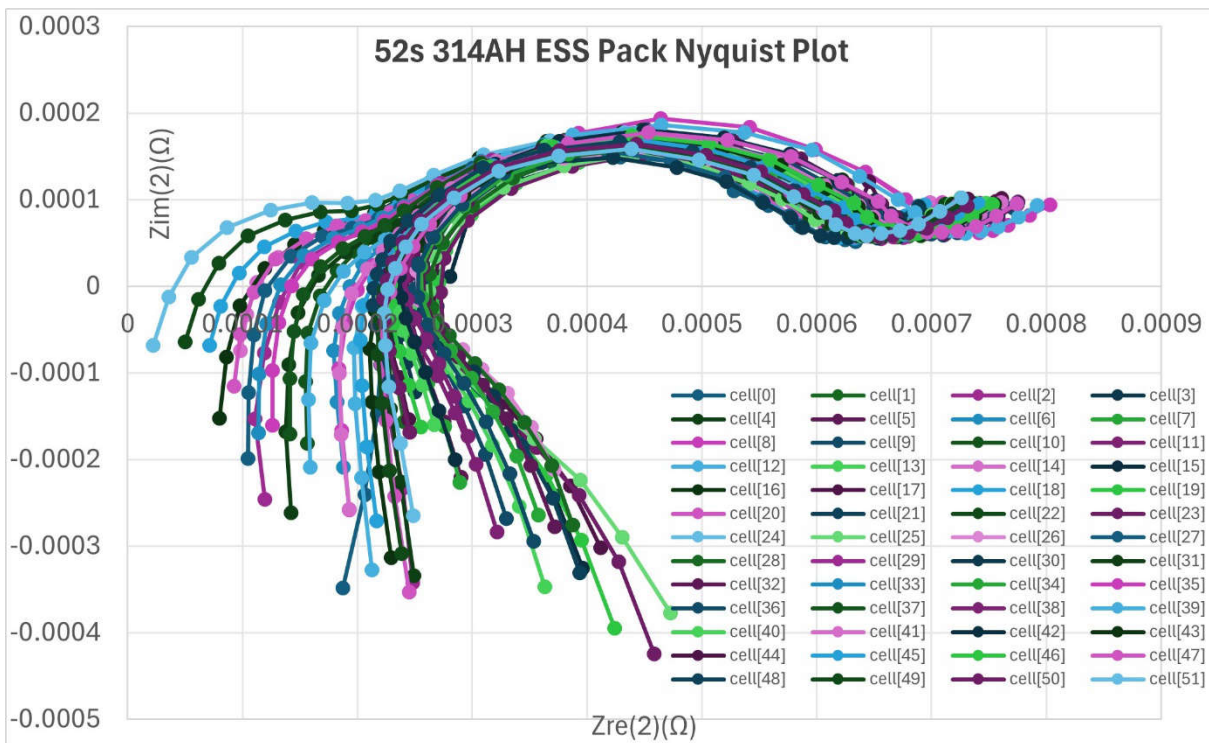


图 3-2. 2. 电池组 EIS 测量奈奎斯特图

3.4.4 各个 BQ79826Z-Q1 的电流消耗

表 3-12. 电流消耗

	关断电流	有效工作电流
第 1 个 BQ79826Z-Q1	<5uA	<3mA
第 2 个 BQ79826Z-Q1	<5uA	<3mA
第 3 个 BQ79826Z-Q1	<5uA	<3mA
第 4 个 BQ79826Z-Q1	<5uA	<3mA

表 3-12 展示了各个 BQ79826Z-Q1 的电流消耗。低功耗可适应长期待机 ESS 应用。

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-010978 中的设计文件。

4.1.2 BOM

若要下载 BOM，请参阅 TIDA-010978 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

- 严格的高压/低压分区，遵循 1,500V 爬电距离/电气间隙
- 模拟 EIS 与温度走线远离大电流开关回路
- 隔离区完整分区，无交叉布线
- 发热器件保留了充足的散热铜箔与间距
- 模拟/数字地分开，单点星形接地
- 多路复用器采样线等长布线，确保一致性

4.2 工具与软件

CCSTUDIO Code Composer Studio™ 集成式开发环境 (IDE)

4.2.1 工具

USB2ANY 接口适配器

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[LiFePO4 设计注意事项](#)应用手册
2. 德州仪器 (TI)，[BQ78706 功能安全合规型 14 节串联电池监测器](#)数据表
3. 德州仪器 (TI)，[扩展电池管理系统中电芯监控单元的功能](#)应用简报

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](#)。

商标

C2000™ and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

JUNHUA YAN 是 SEM 能源基础设施团队的 TI 系统工程师。Junhua 专注于电池包和储能系统应用，并创造了多种设计来解决工业电池包设计难题。

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月