

## Technical White Paper

# 利用电化学阻抗谱实现下一代电池监测



Brian Burk  
Systems Engineer, Battery Management Solutions

### 摘要

在电动汽车 (EV)、储能系统 (ESS) 和工业机器人等大功率应用中, 电池的普及持续推动电池管理监测和控制领域的创新。下一代电池管理系统 (BMS) 必须延长电池寿命、确保超高可靠性, 并为用户和乘客实现超高的安全性。

电池故障召回、电芯过度使用以及导致火灾和财产损失的电池包快速失效等事故, 已经损害了多家电池供应商和原始设备制造商的声誉。行业领导者和政府监管机构将检测方法和安全性作为下一代电池产品的重中之重。

为了应对这些安全和可靠性挑战, 设计人员转向电化学阻抗谱 (EIS), 这项技术在电池领域已有数十年的应用历史。EIS 是一种旨在激励电池电芯并监测电池反应的方法, 可让用户深入洞察电池的状况和状态。通过该过程, 设计人员可以使用非侵入式电信号来监测电池电芯的不同方面, 从而提供有关电池温度、电池电量 (荷电状态)、电池衰减 (健康状态)、热失控检测等关键信息。

本白皮书重点介绍电池系统设计人员目前面临的一些挑战, 以及 EIS 如何帮助实现更可靠且寿命更长的电池设计。

### 内容

1 简介.....	1
2 使用 EIS 分析电池.....	2
2.1 发生了什么变化? 法规推动更早的检测.....	2
2.2 什么是 EIS? .....	2
2.3 电池 EIS 如何工作? .....	3
2.4 如何使用阻抗数据.....	3
2.5 EIS 还提供哪些其他洞察? .....	4
3 EIS 的影响: 三种应用场景.....	5
3.1 热失控检测.....	5
3.2 更快的充电速度.....	6
3.3 电量与可用性.....	7
4 测量 EIS.....	7
4.1 EIS 系统架构.....	7
4.2 EIS 测量的参数.....	8
4.3 TI 的 EIS 芯片组.....	9
4.4 参考设计.....	9
5 结语.....	9

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

### 1 简介

过去十年间, EV 行业飞速发展。这一转型需要取得重大的工程进展, 以克服在续航里程、充电速度和电池可靠性方面的早期局限性。尽管怀疑论者仍将目光投向续航焦虑以及电池随时间推移可能出现的容量逐渐衰减, 但诸多突破性进展已经解决了这些问题, 包括:

- 通过电芯化学成分和制造工艺的进步, 将**电池能量密度**从 100Wh/kg 提升到 300Wh/kg。

- **改进的充电基础设施**可实现更快的充电速度，将充电时间从八小时或更长时间缩短至 30 分钟以内即可实现 80% 的充电。
- 采用先进的高压应用特定半导体实现**更精确的电池监测**，从而能够管理在 400V 和 800V 架构中串联超过 200 节电芯的电池包。

尽管取得了所有上述进步，电池系统设计人员仍面临三大核心挑战：

- **生命周期管理**：设计人员必须提高高能量密度锂电芯（包括磷酸铁锂 [LFP] 和镍锰钴 [NMC] 三元锂）的可靠性和使用寿命。这些电芯对温度波动、过充、欠充和快速充电等高充电速率极为敏感，需要在监测与控制之间取得微妙的均衡，以确保可靠性和稳定性。
- **老化和容量衰减**：目前，电芯的容量衰减（即随着电池老化其所能容纳的电量减少）通常只能通过模型预测，而无法直接测量，这使预测变得十分困难。消费者在使用新型智能手机时也有类似的体验：充满电的电池一开始可以续航数日，但电池容量逐渐下降，最终只有原始容量的几分之一。
- **安全性与热失控**：在行业压力和政府法规的共同推动下，检测触发灾难性热失控的电芯应力和损坏，仍是该行业面临的最迫切的挑战。

采用新工具来应对这些挑战，使电池系统在苛刻的应用场景中变得更安全、更可靠。EIS 是其中一项颇具前景的技术，它使设计人员能够实时洞察电池的状态和状况，从而能够有效地观察电芯内部情况。

## 2 使用 EIS 分析电池

### 2.1 发生了什么变化？法规推动更早的检测

热失控是指电芯开始自发热、增压并最终发生燃烧的链式反应。它会快速蔓延到其他电芯，并导致整个电池包起火。该事件几乎无法阻止，只能进行遏制。

因此，电池行业专家和政府监管机构正在采取措施来实现更早的检测，从而为驾驶员提供更长的预警时间。

2020 年，中国国标 (GB) 38031 国家标准规定，在发出热失控预警后必须确保至少有五分钟的逃生时间。将于 2026 年 7 月生效的 GB 38031-2025 修订版将该窗口期进一步延长到至少两小时：即单节电芯进入热失控状态后，电池包外部出现明火或爆炸之前的时间。

这些标准给汽车制造商带来了极大的压力，要求他们在单个电芯层面检测热失控，并争取每一分钟可能的预警时间。遗憾的是，目前几乎没有解决方案能够确信满足这一要求。EIS 提供了一种方法，将可测量的电芯级洞察集成到德州仪器 (TI) 的下一代 BMS 器件中。

### 2.2 什么是 EIS？

让我们先来拆解一下 EIS。谱分析是许多系统中使用的一种技术，通过在整个频率范围内激励并测量响应来检测系统特性。例如，在生物谱分析中，智能秤通过向人体发送各种频率的电流信号来测量肌肉、脂肪和水分含量，进而估算身体成分。

EIS 的电化学部分将相同的原理应用于电池。电信号用于测量电池的化学反应。跟踪锂在电芯中的位置，或者确定负极或正极是否完好无损等测量，都是非常有用的待监测化学特性（图 2-1）。谱分析的目标是以非侵入方式深入洞察电芯内部的频率相关行为。

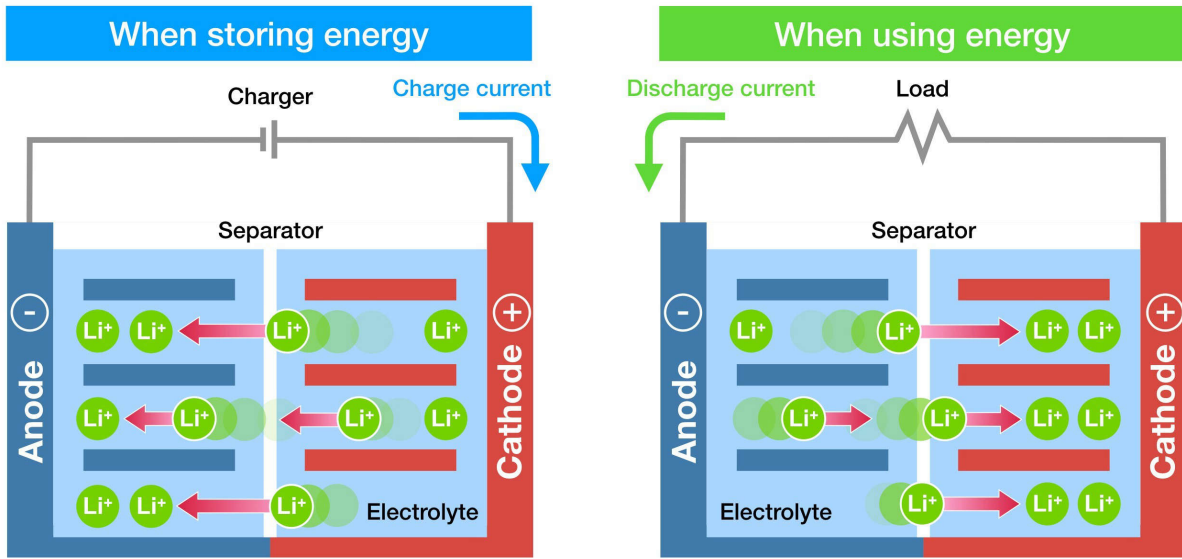


图 2-1. 充电和放电期间的电池锂离子流动

### 2.3 电池 EIS 如何工作？

TI 的 BQ79826Z-Q1 电池监测器和 BQ79881-Q1 电池接线盒与电池包监测器对电池电芯、模组或电池包施加电流激励，并测量响应电压。图 2-2 显示电池内部的电流和电压。通过比较不同频率下的幅值差（阻抗幅值）和时间差（阻抗相位），并监测随时间、温度、电量或其他电池参数的变化，可以深入洞察电芯内部发生的情况。

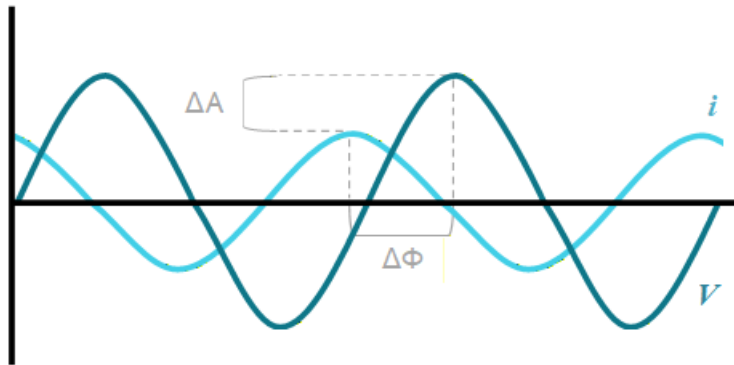


图 2-2. 利用电流和电压进行 EIS 测量

### 2.4 如何使用阻抗数据

BMS 使能阻抗测量功能后，确定与阻抗相关的电池参数成为重点。

奈奎斯特图是一种直观显示阻抗随频率变化的常用技术。图 2-3 在 x 轴上显示阻抗实部，在 y 轴上显示阻抗虚部。每条线均包含 0.1Hz 至 1kHz 的频率扫描，右侧为最低频率，左侧为最高频率。图 2-3 中的线条颜色表示扫描期间电池的温度。

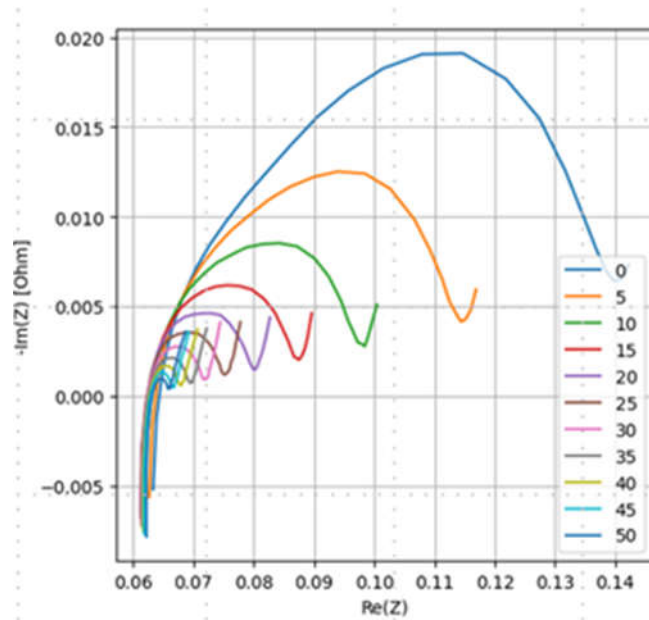


图 2-3. 温度与阻抗奈奎斯特图

在图中，阻抗曲线的形状会随温度而变化。此外，表示 500Hz 时单个阻抗的黑色圆圈会随着温度的变化而移动。设计人员可以使用这种基于 EIS 的温度数据来识别电池的内核温度，监测充电期间的温度峰值，并减少系统中所需的温度传感器数量。

## 2.5 EIS 还提供哪些其他洞察？

除了简单的温度测量之外，EIS 还能深入洞察特定电池组件，如负极、正极、锂扩散、固态电解质界面 (SEI) 层完整性以及对电池运行至关重要的其他组件。按形状和频率拆解奈奎斯特图后，这些参数变得清晰直观。图 2-4 展示了 EIS 分析中使用的频率区域和等效电路模型。

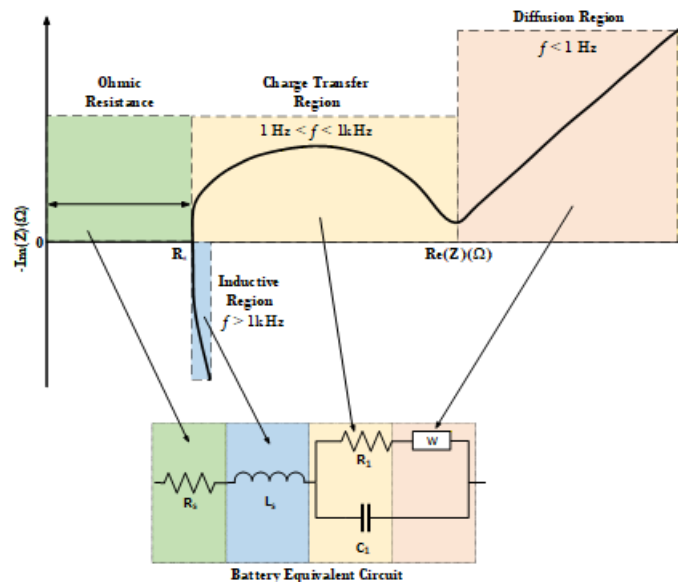


图 2-4. 在奈奎斯特图中识别电池组件

彩色方框标出的区域或奈奎斯特形状突显电池电芯中要监测的特定区域：

- **欧姆电阻 (绿色方框, 水平线)**：该区域显示电解液的直流电阻，指示电池中是否存在任何短路。这些短路可能由制造缺陷、组装错误或者车辆碰撞或暴风雨等事件造成的损坏导致。

- **电荷传递区域 (黄色方框, 半圆)**：该区域通常表示离子和电子在电极中相遇的电极电解质界面的健康状态。该区域监测的电芯中最重要的物理组件之一是 SEI 层，它允许离子和电子进行结合与分离。如果 SEI 层开始劣化，这种劣化通常表明电芯老化，并可作为电芯失效的合理预测指标。
- **扩散区域 (红色方框, 45 度线)**：该区域与负极和正极中的锂扩散过程相关，有助于评估荷电状态、健康状态以及电芯随时充电或放电的能力。

通过将电池电芯的物理建模与车载 EIS 测量相结合，BMS 可以实时评估电池的健康状态、老化程度和可能的损坏。

### 3 EIS 的影响：三种应用场景

让我们根据数据和市场要求，来看看 EIS 的三种应用场景。

#### 3.1 热失控检测

热失控是电芯和电池包的灾难性故障，会导致人员处于危险状况，并可能造成严重的连带损失。图 3-1 显示了 EV 电池包中的多个电芯。



图 3-1. EV 电池包中的锂电芯

之前几代的 BMS 都依赖于反应缓慢的温度传感器，这些传感器通常仅在多个电芯已经进入热失控状态后才提供检测。目前市场上的大多数 BMS 设计都增加了昂贵的压力和气体传感器，用于检测电芯的排气，这种现象可能仅在起火前几分钟发生。这两种方法在单个电芯层面都存在缺陷。

EIS 会检测每一个电芯的内核温度和阻抗变化。EIS 可以基于电阻抗测量来监测电芯的内核温度，从而在早期阶段标记热失控，这是传统温度传感器无法做到的。

此外，EIS 还可以检测电池中的异常或不规则现象。热失控的一个主要原因是枝晶生长，即负极上锂离子的堆积，这会导致电芯内部短路 (图 3-2)。通过监测每个电芯的阻抗，可以监测单个电芯随着时间的推移逐渐形成的问题。这种电芯层级的可见性直接支持 GB 38031-2025 要求的两小时预警窗口。

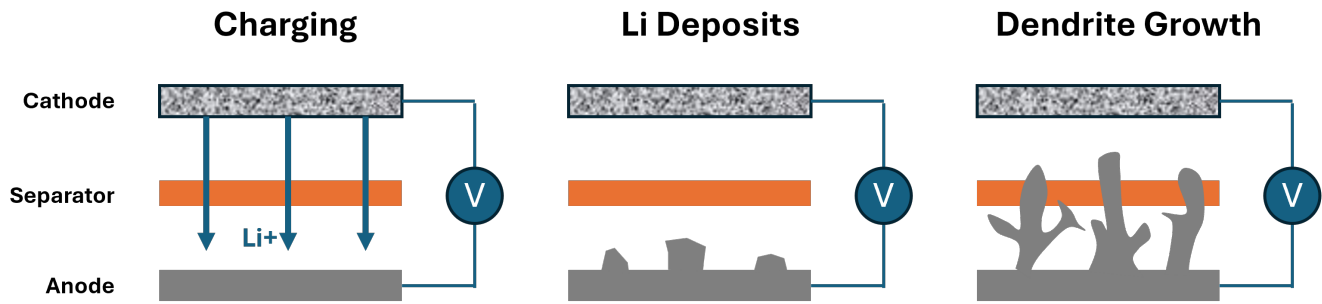


图 3-2. 导致热失控的枝晶生长。

### 3.2 更快的充电速度

由于消费者不想花时间等待 EV 车辆充电，EV 充电这一话题掩盖了 EV 的许多固有优势。为油箱加油的便利性与 EV 电池的充电过程形成了鲜明对比，促使行业致力于开发越来越快的充电能力，这也是理所当然的。

消费者出门在外或公路旅行时需要快速充电。商用车辆（包括卡车和公共汽车）由于需要持续运行，因此必然依赖快速充电。

遗憾的是，频繁的快速充电会加速电池老化，使电池包的寿命缩短 10% 至 20%。大电流充电会给电池组件带来压力，并可能导致称为锂沉积的不可逆情况。锂沉积是指由于锂扩散不良导致锂在负极上堆积，这意味着电芯尚未准备好接受额外的电子。温度、电量水平以及薄 SEI 层的老化都会影响沉积现象的开始时间。这些应力和电芯的锂扩散正是器件制造商建议不要将电池充电至 100% 的原因。

EIS 通过以下两种方式帮助设计人员管理快速充电：

- **温度监测**可在快速充电期间将环境和内核电池温度保持在可接受的范围内。低温会限制扩散，而快速充电又会升高电池温度，因此持续监测非常重要。
- **扩散监测**可实时洞察扩散区域（奈奎斯特图的尾部）。例如，如果阻抗变得过高，则必须降低充电电流。

虽然监测锂扩散可提供电池老化的预警信号，但这些监测器会让系统设计人员提高充电电流。直接测量告知系统何时降低电流，而不依赖于需要额外内置裕度且实际上限制最大充电速率的静态建模锂扩散参数。保持较低的阻抗可实现更快的充电。

TI BQ79826Z-Q1 中的 EIS 引擎具有  $\leq 0.01\text{Hz}$  的超低频率检测，能够实现扩散感知，通过同时激励多达五个阻抗频率来缩短测量时间（图 3-3）。

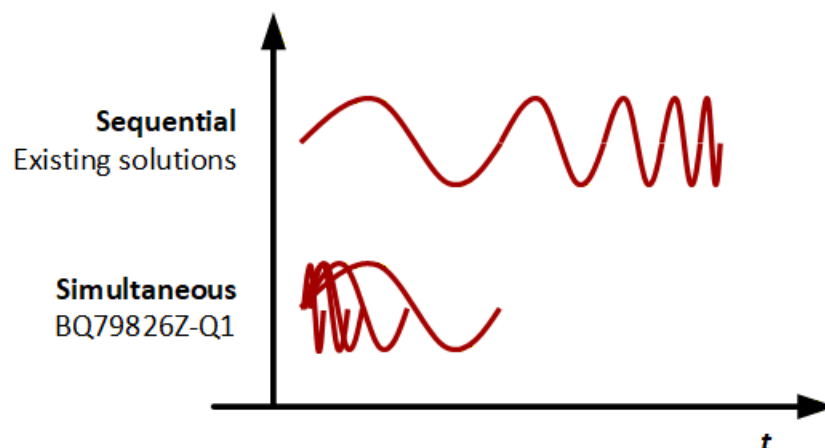


图 3-3. 通过同时激励多个频率缩短测量时间

### 3.3 电量与可用性

电池荷电状态和健康状态是每个电池系统的重要参数。EIS 并非取代传统的直流电压测量，而是通过以下两种方式增强决策所需有意义数据的可用性，并改进了现有系统：

- **直流电压精度**：LFP 电芯在 30% 至 90% 之间表现出非常平坦的电压与荷电状态曲线（如图 3-4 所示），这使得传统的开路电压测量不准确。EIS 通过提供直接的荷电状态测量，将最坏情况下的误差从 5% 或 10% 降至 2% 以下，并提高了可用电量。
- **检测电池闲置时的健康状态**：许多 ESS 系统会长时间处于闲置状态，因此很难确定电芯是否能够在必要时提供电量。遗憾的是，仅靠直流电压无法测量锂扩散或阻抗。EIS 使系统设计人员能够定期检查电池的健康状态，确保系统在需要时能够随时供电。

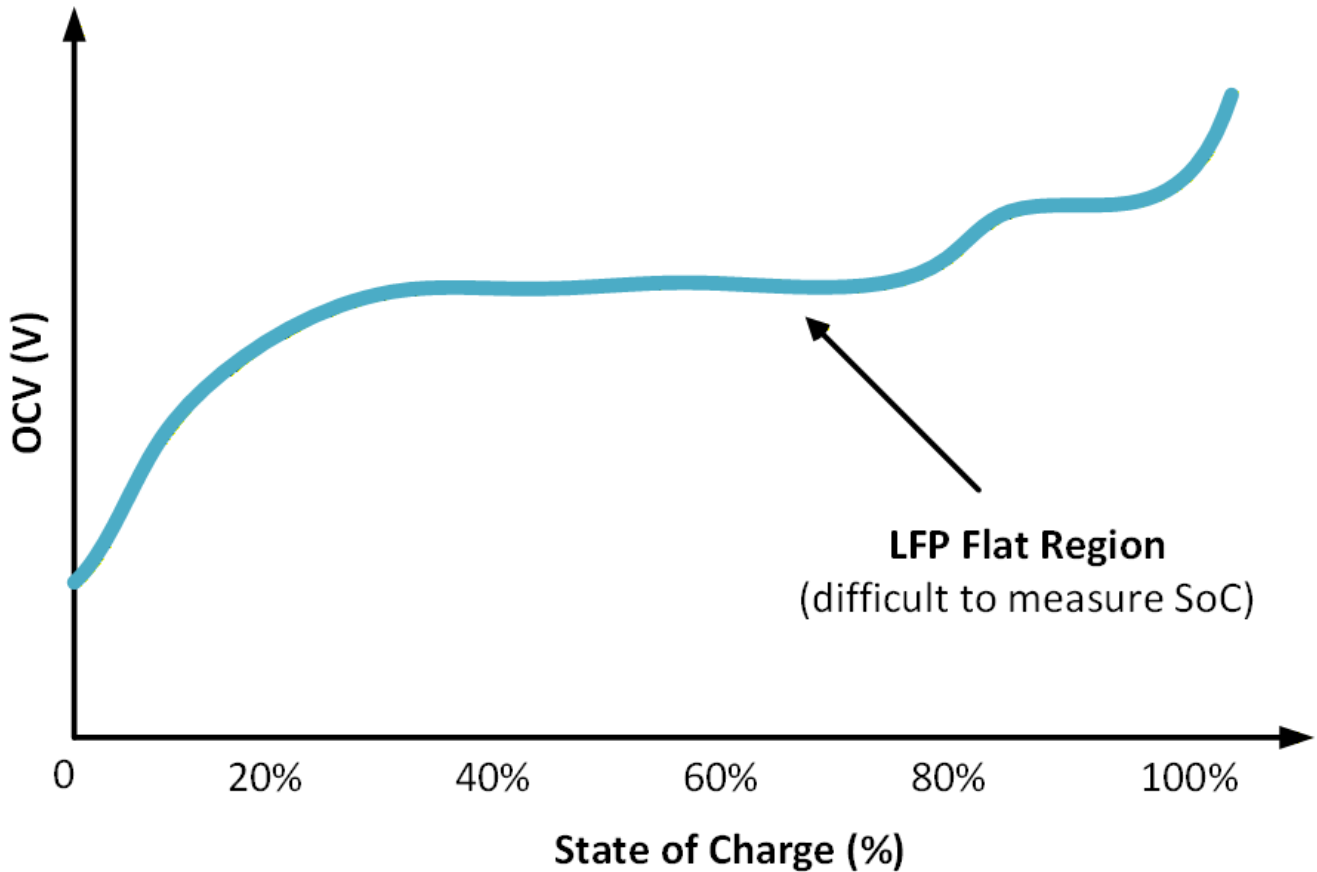


图 3-4. 展现平坦区域的 LFP 开路电压与荷电状态曲线

当传统 BMS 方法较复杂或无法测量时，EIS 可提供额外的洞察，从而提供更准确的荷电状态并保持电源可用性。

## 4 测量 EIS

### 4.1 EIS 系统架构

支持 EIS 的 BMS 以传统架构为基础，包括用于电压检测的多个堆叠式电池监测器和用于电流检测的电池包监测器，以及以下两个组件（图 4-1）：

- **电流激励源**可生成正弦波、方波或其他形状的波形以激励电芯。
- **同步电压和电流采样**可使电流和电压测量器件之间的振荡器保持同步，从而减少阻抗相位误差。

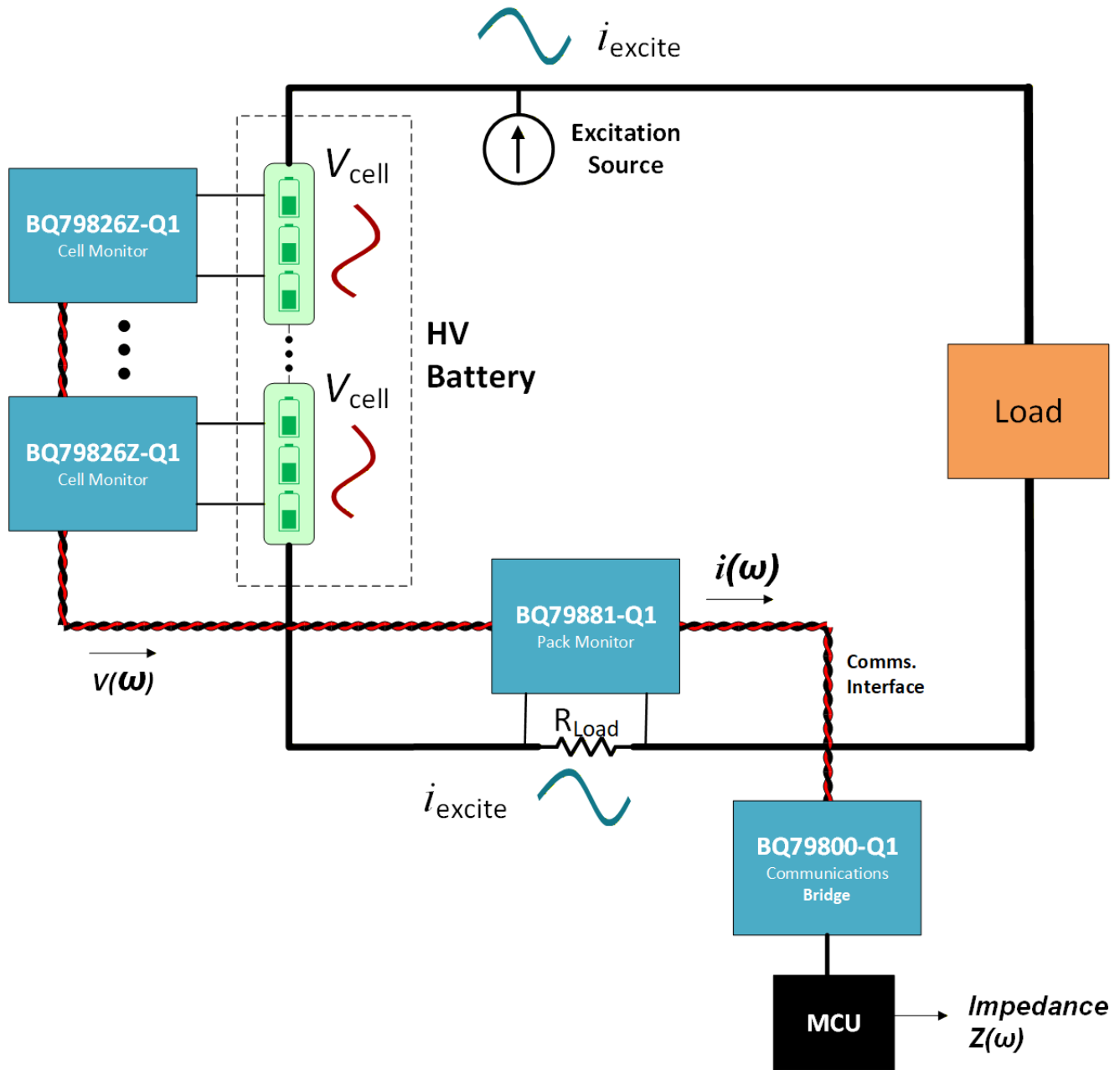


图 4-1. 电池包 EIS 系统方框图

图 4-1 显示典型的电池包配置，包括两个 BQ79826Z-Q1 电芯电压监测器和一个 BQ79881-Q1 电池包电流监测器。BQ798xx 监测器包含集成的同步协议，可使电流和电压测量保持紧密对齐，从而更最大限度地减少阻抗相位误差。激励源可以直接由 BQ798xx 器件控制，也可以由直流/直流转换器、充电器、均衡器、预充电电路或逆变器终端设备中的现有源生成。

## 4.2 EIS 测量的参数

优化 EIS 系统需要注意三个电气设计参数：

- **电芯阻抗**：电池在其整个工作寿命内具有一定的阻抗范围，设计人员可以在奈奎斯特图中采集。阻抗直接决定了激励电芯所需的电流量。例如，100Ah 电芯通常显示  $500\mu\Omega$  至  $750\mu\Omega$  的阻抗，并且模数转换器 (ADC) 测量可能需要 1Ap 至 2Ap 的峰值电流。
- **激励电流幅值**：电流幅值会影响电池线性度要求和 ADC 的理想测量范围。线性度可确保电池在被正弦波激励时以正弦波作出响应。目标是将电流激励幅值保持在尽可能低的水平，以限制功耗。

- **ADC 噪声**：由于电压和电流信号可能处于微伏级范围，因此低 ADC 输入基准噪声对于实现高信噪比 (SNR) 至关重要。选择低噪声 ADC 可提高 SNR 并降低所需的激励电流。

### 4.3 TI 的 EIS 芯片组

借助 BQ79826Z-Q1 和 BQ79881-Q1 电池监测器，设计人员可以使用 TI 的集成式 EIS 引擎测量每个电芯的阻抗。通过采集所有 EIS 频段 (可低至 0.01Hz) 的阻抗，可检测与温度、荷电状态和热失控相关的细微阻抗变化。

BQ798xx 芯片组共同构成了完整的 BMS (如图 4-2 所示)，可提供用于大电芯数配置的可堆叠 26 通道电池监测器，以及用于测量电流和电池包电压的高精度电池包监测器。

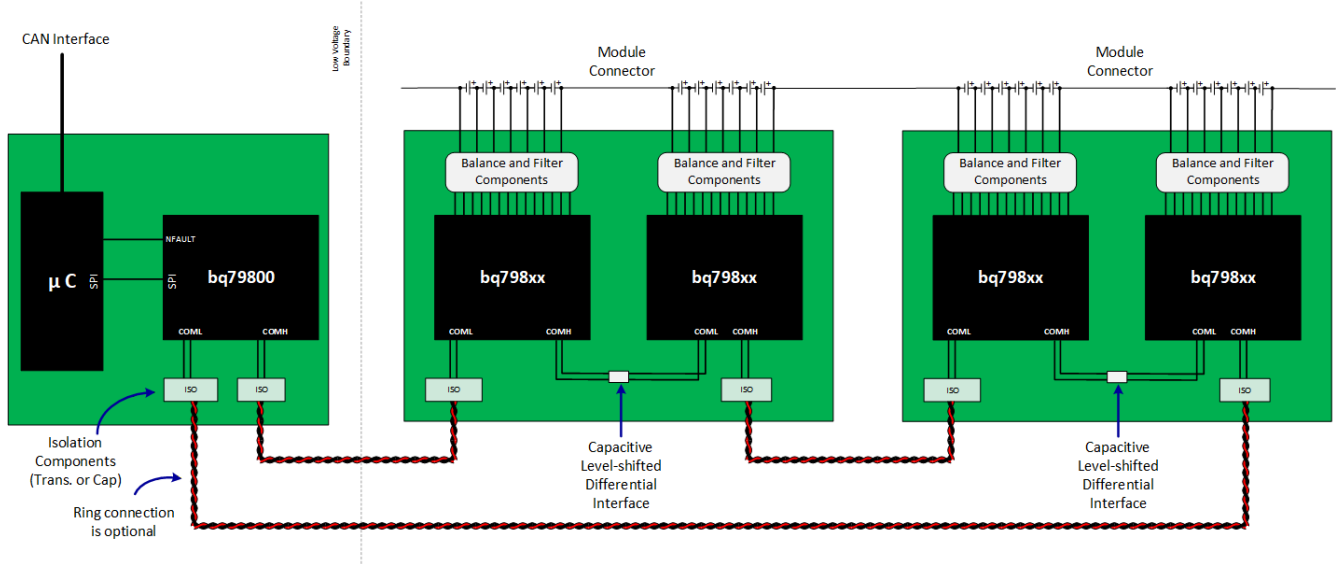


图 4-2. BQ798xx BMS 方框图

这些器件满足了电池容量不断增长的严苛要求，支持使用 EIS 优化型设计测量极小的阻抗。用于电压和电流检测的极低噪声 ADC 可以提高 SNR；0.01Hz 至 3.5kHz 的宽频率范围可以覆盖重要阻抗区域；堆栈同步可以最大限度地缩短电流和电压测量之间的时间，从而减小相位误差。

### 4.4 参考设计

为使用 BQ79826Z-Q1 和 BQ79881-Q1 快速评估 EIS，TI 提供了包括硬件、软件和系统级支持的参考设计。设计人员只需将标准 BQ79826 和 BQ79881 评估模块直接连接到电池、模组或电池包，即可执行大多数 EIS 评估。TI 还提供用于 EIS 性能测试、算法开发的数据收集和车载集成的软件解决方案。此外，包括 TI EV BMS 3.0 参考设计在内的多种参考设计，可帮助设计人员缩短 BMS 和 EIS 系统的规划、测试和开发时间。

TI 可应要求提供的其他参考设计包括：

- 52 节至 104 节电芯串联的 ESS 系统：适用于 ESS 系统的电池包或电池簇参考设计。
- 堆叠式有源桥：获得专利的 EIS 激励源，效率大于 99%。
- 有源电池包均衡：基于双有源桥拓扑的激励源，使用现有的电池包均衡电路来激励电芯。

## 5 结语

EV、储能和工业机器人对更安全、更可靠且寿命更长电池的需求不断增长，影响了 BMS 系统的设计和构建方式以及系统可实现的性能。EIS 让 BMS 系统变得更加智能，从而能够更快地检测到温度峰值、更准确地估算荷电状态，并更早地预警电芯退化。这些洞察可帮助设计人员延长电池寿命、提高充电速度并提升安全性。

TI 的下一代芯片组集成了 EIS 引擎，有助于加速实现这些功能，以满足行业未来的电气化目标。

关于作者

**Brian Burk** 是德州仪器 (TI) 电池管理解决方案团队的系统工程师。自 2009 年加入 TI 以来，他一直负责音频 DSP、放大器、电机驱动控制、电力电子和电池管理系统的研发和产品管理。作为汽车 BMS 产品线的产品经理兼系统工程师，他推动了电化学阻抗谱等技术创新，使 TI 的产品始终处于汽车，工业和消费类电子产品领域的前沿。他积极倡导前瞻性思维的解决方案，已获得十多项专利。**Burk** 拥有德克萨斯大学奥斯汀分校电气工程专业的学士学位，并在 TI 的技术领导委员会任职。

## 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