

# Technical White Paper

## 採用電化學阻抗光譜的新一代電池監控



Brian Burk  
Systems Engineer, Battery Management Solutions

### 摘要

在電動車 (EV)、儲能系統 (ESS) 和工業機器人等高功率應用中，電池的採用持續推動電池管理監控與控制技術的創新。新一代電池管理系統 (BMS) 必須延長電池壽命、確保最高可靠性，並為使用者與乘客提供最高級別的安全性。

因電池故障、電池芯過度使用和電池組快速失效導致火災和財產損失等事件所引起的召回，已對多家電池供應商及原始設備製造商的聲譽造成損害。業界領導者和政府監管機構已將偵測方法與安全性列為新一代電池產品的首要重點。

為因應這些安全性與可靠性挑戰，設計人員正轉向採用電化學阻抗光譜 (EIS)，這是一項已應用於電池領域數十年的技術。EIS 是一種旨在激勵電池芯和監控電池反應的方法，可深入了解電池芯的狀況和狀態。此過程讓設計人員能夠使用非侵入式電子訊號來監控電池芯的不同層面，提供電池溫度、電池電量 (電量狀態)、電池衰退 (健康狀態)、熱失控偵測等重要資訊。

本白皮書將重點探討電池系統設計人員現今面臨的部分挑戰，以及 EIS 如何協助實現更可靠且更長效的電池設計。

### 目錄

1 簡介.....	1
2 使用 EIS 分析電池.....	2
2.1 有哪些變化？法規驅動更早期的偵測.....	2
2.2 什麼是 EIS？.....	2
2.3 電池 EIS 是如何運作的？.....	3
2.4 如何使用阻抗資料.....	3
2.5 EIS 還提供哪些其他洞見？.....	4
3 EIS 的影響：三個使用案例.....	5
3.1 熱失控偵測.....	5
3.2 充電更快.....	6
3.3 電量和可用性.....	6
4 測量 EIS.....	7
4.1 EIS 系統架構.....	7
4.2 EIS 測量參數.....	8
4.3 TI 的 EIS 晶片組.....	9
4.4 參考設計.....	9
5 結論.....	9

### 註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

### 1 簡介

過去十年來，EV 領域蓬勃發展。這種轉變需要取得重大工程技術進步，以克服續航里程、充電速度和電池可靠性的早期限制。儘管懷疑論者仍指出續航里程焦慮以及電池隨著時間逐漸損失容量的問題，但相關技術突破已解決了這些疑慮，包括：

- 透過電池芯化學與製造技術的進步，將電池密度從 100Wh/kg 增加到 300Wh/kg。

- **改良的充電基礎設施**可加快充電速度，將充電至 80% 電量的充電時間從八小時或更長時間縮短至低於 30 分鐘。
- 使用先進、高電壓、特定應用的半導體進行**更準確的電池監控**，能夠管理 400V 和 800V 架構下使用 > 200 個電池芯串聯組成的電池組。

儘管有這些改進，電池系統設計人員仍面臨三個核心挑戰：

- **生命週期管理**：設計人員必須提高密度鋰電池芯（包括磷酸鐵鋰 (LFP) 和鎳錳鈷 (NMC)) 的可靠性和使用壽命。這些電池芯對溫度波動、過度充電、充電不足和高充電速率（如快速充電）非常敏感，需要在監控與控制之間取得微妙的平衡，以確保可靠性和穩定性。
- **老化和容量衰退**：電池芯的容量衰退（即電池隨著老化所能儲存的電量）目前多為建模但無法直接測量，使得預測變得更加困難。消費者在使用新智慧型手機時也有類似體驗：一開始充滿電可維持多天，但電池容量會逐漸衰減，到最後僅能維持原有電量的一小部分。
- **安全和熱失控**：偵測引發災難性熱失控的電池芯應力和損壞，仍然是業界最緊迫的挑戰，這也受業界壓力與政府法規驅動的影響。

因此需要採用新工具來因應這些挑戰，使電池系統變得更安全且更可靠，以滿足嚴苛的應用需求。其中，EIS 是最有前景的技術之一，可讓設計人員即時深入了解電池的狀態和狀況，有效地看到電池芯內部的情形。

## 2 使用 EIS 分析電池

### 2.1 有哪些變化？法規驅動更早期的偵測

熱失控係指電池芯開始自熱、增壓並最終燃燒，且會迅速蔓延至其他電池芯，導致整個電池組起火的一種連鎖反應。這一事件幾乎無法阻止，只能加以遏制。

為此，電池產業專家與政府監管機構正採取措施，以實現更早期的偵測，為駕駛者提供更長的預警時間。

2020 年，中國國家標準 GB 38031 要求，在發生熱失控預警後至少需提供五分鐘的逃生時間。而將於 2026 年 7 月生效的 GB 38031-2025 修訂版，則將此時間區間延長至：在單一電池芯進入熱失控後，到電池組外部可觀察到起火或爆炸之前，至少需要兩小時的預警時間。

這些標準對汽車製造商帶來了極大壓力，要求他們必須在單一電池芯層級偵測熱失控，並盡可能爭取每一分鐘的預警時間。然而，現今很少有解決方案能夠有信心地滿足這項要求。EIS 提供了一種可行的方法，可將可測量的、電池芯層級的洞見整合到德州儀器 (TI) 的新一代 BMS 裝置中。

### 2.2 什麼是 EIS？

讓我們從拆解 EIS 開始。光譜學是許多系統中使用的一種技術，可透過在頻率範圍中激勵並測量反應來偵測系統特性。例如，在生物光譜學中，智慧體脂計透過向身體發送各種頻率的電流訊號來測量肌肉、脂肪和水，從而估算身體組成。

EIS 的電化學部分則是將相同的原理應用於電池。電氣訊號可用來測量電池的化學反應。無論是追蹤電池芯中的鋰離子位置，還是確定陽極或陰極是否完好等，這些測量都是可用於監控的有用化學屬性 (圖 2-1)。光譜學的目標是以非侵入式方式，深入了解電池芯內部與頻率相依的行為。

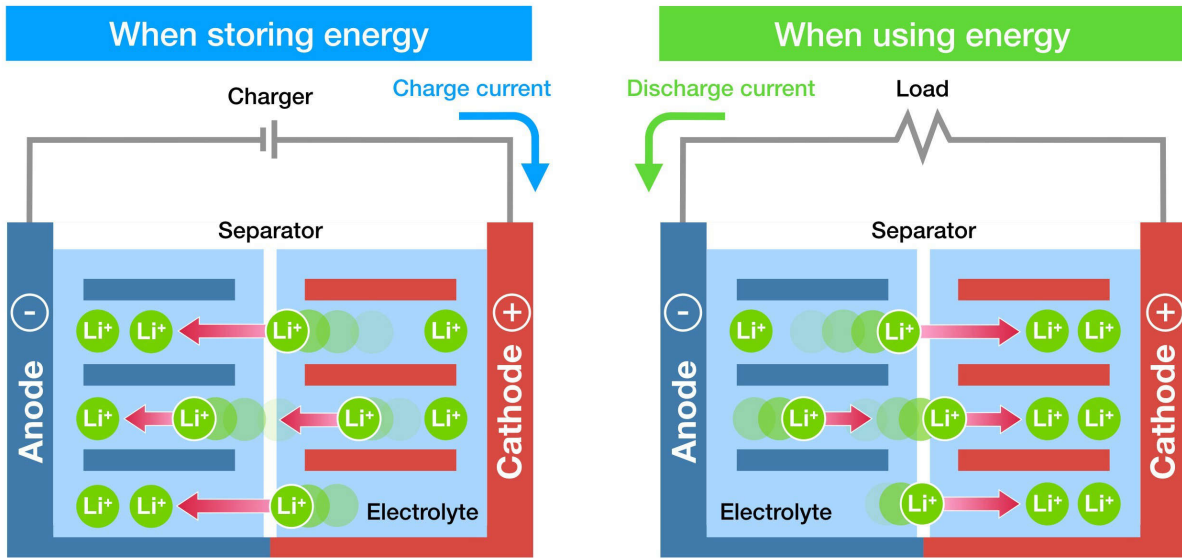


图 2-1. 充電和放電期間的電池鋰離子流動

### 2.3 電池 EIS 是如何運作的？

TI 的 BQ79826Z-Q1 電池監控器和 BQ79881-Q1 電池接線盒電池組監控器將電流激磁應用於電池芯、模組或電池組，並測量響應電壓。图 2-2 顯示了電池內的電流和電壓。比較不同頻率下的振幅差（阻抗幅度）和時間差（阻抗相位），並監控這些參數隨時間、溫度、電量狀態或其他電池參數變化的情況，即可深入了解電池芯內部的運作情形。

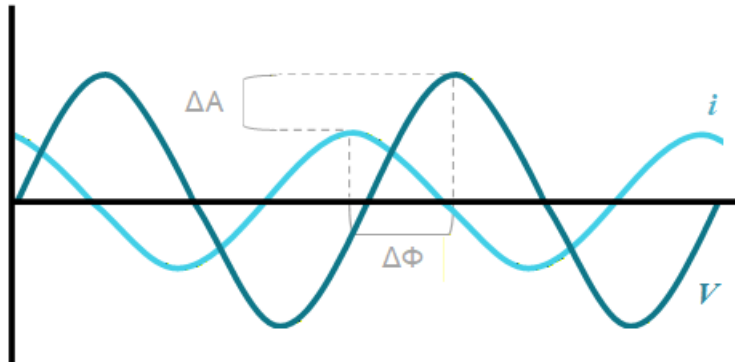


图 2-2. 使用電流和電壓進行 EIS 測量

### 2.4 如何使用阻抗資料

為 BMS 啟用阻抗測量功能後，接下來的重點是識別與阻抗相關的電池參數。

奈奎斯特圖是一種常見的技術，用於將阻抗隨頻率的變化視覺化。图 2-3 顯示了 x 軸上的實數阻抗和 y 軸上的虛數阻抗。每條線路包括從 0.1Hz 到 1kHz 的頻率掃描，其中最低頻率在右側，最高頻率在左側。图 2-3 中的線條顏色表示掃描期間電池的溫度。

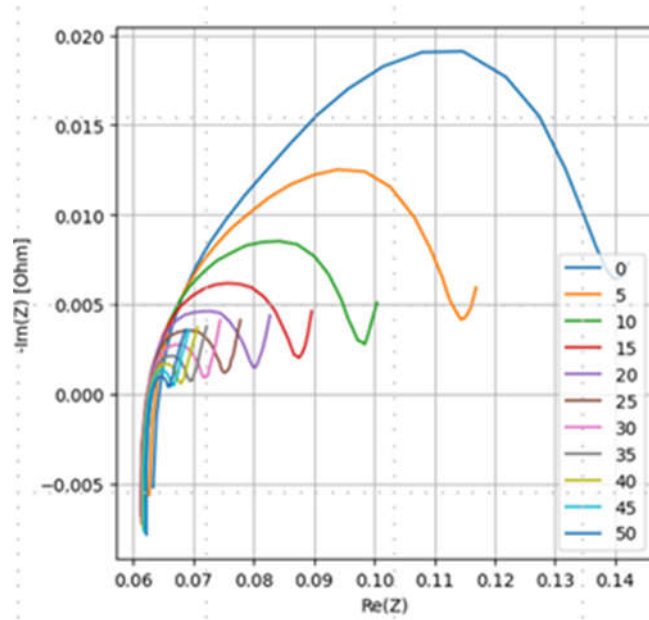


图 2-3. 溫度與阻抗的奈奎斯特圖

在圖中，阻抗曲線的形狀會隨溫度變化而改變。此外，黑色圓圈代表 500Hz 時的單一阻抗，其位置也會隨溫度變化而移動。設計人員可以使用這些基於 EIS 的溫度資料來識別電池的核心溫度，監控充電期間的溫度異常上升，並減少系統中所需的溫度感測器數量。

### 2.5 EIS 還提供哪些其他洞見？

除了簡單的溫度測量外，EIS 還提供了對特定電池元件的洞見，例如陽極、陰極、鋰離子擴散、固液界面膜 (SEI) 層完整性以及對電池運作至關重要的其他元件。在依形狀和頻率來分解奈奎斯特圖時，這些參數便會變得清晰明確。图 2-4 顯示了 EIS 分析中使用的頻率區域和等效電路模型。

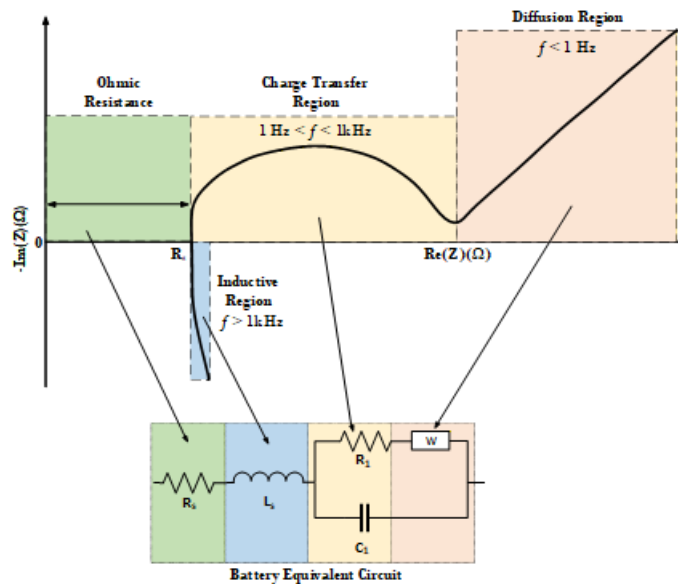


图 2-4. 識別奈奎斯特圖中的電池元件

圖中以彩色方框標示的區域或奈奎斯特形狀，突出顯示了電池芯中需要監測的特定區域：

- **歐姆電阻 (綠色方框、水平線)：**此區域顯示電解液的 DC 電阻，用於表示電池中是否存在可能由於製造缺陷、裝配錯誤或車輛碰撞或風暴等事件造成的損壞所導致的任何短路問題。

- **電荷轉移區域 (黃色方框、半圓形)**：該區域通常反映電極與電解液介面 (即離子與電子在電極中相遇之處) 的健康狀態。在此區域中監測到的電池芯內最重要的實體元件之一即為 SEI 層，該層負責離子與電子的結合與分離。如果 SEI 層開始劣化，這種劣化通常代表電池芯的老化程度，並可作為預測電池失效的合理指標。
- **擴散區域 (紅色方框、45 度斜線)**：此區域與鋰離子在陽極與陰極中的擴散過程相關，有助於評估電池的電量狀態、健康狀態以及電池在任一時間點的充電或放電能力。

將電池芯的物理模型與車載 EIS 測量數據相結合，可讓 BMS 即時評估電池的健康狀態、老化程度及可能的損壞情況。

### 3 EIS 的影響：三個使用案例

讓我們根據資料和市場要求來看一看 EIS 的三個使用案例。

#### 3.1 熱失控偵測

熱失控是指電池芯與電池組發生災難性故障，導致人員面臨危險狀況，並可能造成重大附帶損害。圖 3-1 顯示了 EV 電池組中的多個電池芯。



图 3-1. EV 電池組中的鋰電池芯

前幾代的 BMS 都仰賴反應緩慢的溫度感測器，通常只能在多個電池芯進入熱失控狀態後才提供偵測功能。現今市面上的大多數 BMS 設計增加了昂貴的壓力與氣體感測器，以偵測電池芯的排氣 (排氣後幾分鐘內可能就會起火)。這兩種方法都無法在單一電池芯層級進行偵測。

EIS 能夠偵測每個以及所有電池芯的核心溫度和阻抗變化。EIS 可以根據電氣阻抗測量值監測電池芯的核心溫度，從而在更早期的階段發出熱失控警報，而傳統溫度感測器則無法實現這一點。

此外，EIS 還能偵測電池中的異常或偏離情況。熱失控的一個主要原因是鋰枝晶生長或陽極上的鋰積聚，從而導致電池芯內部發生短路 (圖 3-2)。監控每個電池芯的阻抗，即可監控個別電池芯隨時間推移逐漸形成的問題。這種電池芯層級的可見性直接支援 GB 38031-2025 標準所要求的兩小時預警時間區間。

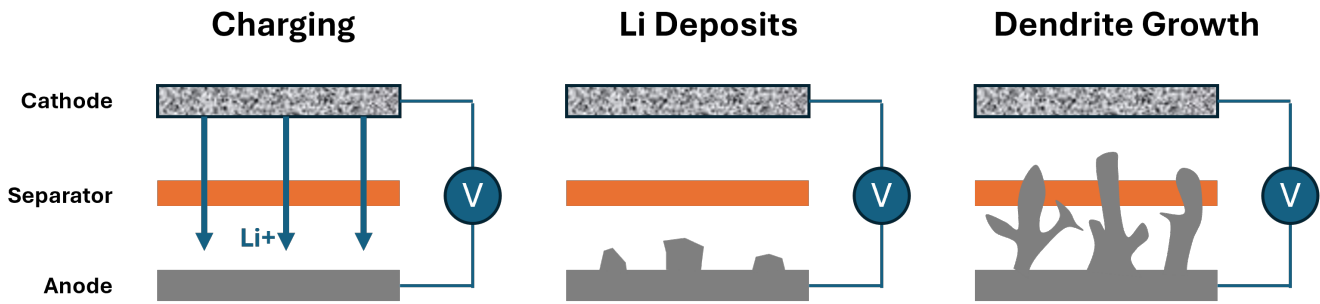


图 3-2. 鋰枝晶生長導致熱失控。

### 3.2 充電更快

消費者對 EV 充電議題的關注，超越了 EV 的許多固有優點，因為消費者不願花時間等待為 EV 車輛充電。為車輛加油相較於為 EV 電池充電更具便利性，這促使業界不斷追求越來越快的充電能力，而這確實是合理的訴求。

消費者需要在離家外出或旅途中時快速充電。包括卡車和公車在內的商用車輛，由於需要持續運轉，必然得依賴快速充電。

遺憾的是，頻繁的快速充電會加快電池老化，進而縮短電池組壽命達 10% 至 20%。大電流充電會對電池元件造成應力，並可能導致被稱為鋰析出的不可逆狀態。鋰析出是指因鋰離子擴散不良，導致鋰積聚在陽極上，這意味著電池芯還沒有準備好接受額外電子。溫度、電量狀態以及薄薄的 SEI 層的老化程度，都會影響鋰析出何時開始發生。這些應力以及電池芯的鋰擴散能力，正是設備製造商建議不要將電池充電到 100% 的原因。

EIS 透過兩種方式協助設計人員管理快速充電：

- **溫度監控**：在快速充電期間，可將環境和電池核心溫度保持在可接受範圍內。低溫會限制擴散，而快速充電則會升高電池溫度，因此持續監控至關重要。
- **擴散監控**：可即時深入了解擴散區域（奈奎斯特圖的尾部）。例如，如果阻抗太高，則必須降低充電電流。

雖然監控鋰擴散能提供電池老化的預警跡象，但這些監控器則讓系統設計人員提高了充電電流。採用直接測量的方式，能告訴系統何時該降低電流，而非依賴靜態、建模的鋰擴散參數（這些參數需要額外預留安全邊際，因而有效限制了最大充電速率）。將阻抗維持在較低水準，便能實現更快的充電。

TI 的 BQ79826Z-Q1 中的 EIS 引擎可透過  $\leq 0.01\text{Hz}$  的超低頻偵測實現擴散感測，並透過同時激勵多達五個阻抗頻率來縮短測量時間 (图 3-3)。

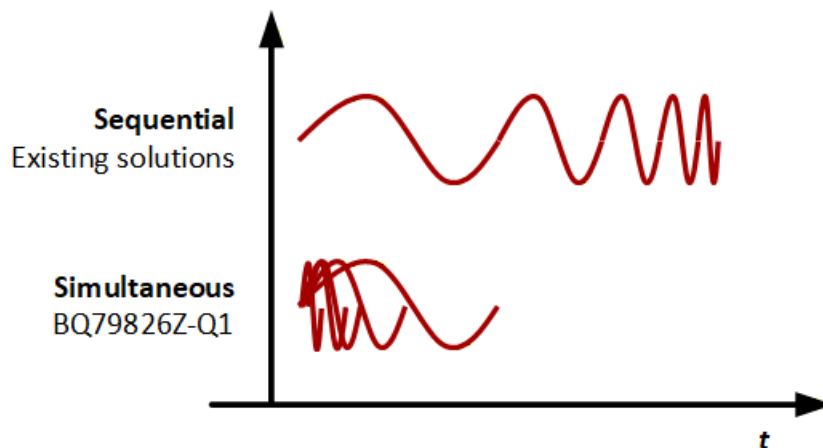


图 3-3. 使用同步頻率實現短測量時間

### 3.3 電量和可用性

電池的電量狀態和健康狀態是每個電池系統的重要參數。EIS 並不取代傳統的 DC 電壓測量，而是增強了有意義資料的可取得性，以利決策判斷，並透過以下兩種方式改進現有系統：

- **DC 電壓準確度**：LFP 電池芯在電量 30% 至 90% 之間時，其電壓與電量狀態的曲線非常平坦 (如 图 3-4 中所示)，這使得傳統的開路電壓測量結果不準確。EIS 透過提供直接的電量狀態測量來提升準確度，將最糟情況的誤差從 5% 或 10% 降低至 2% 以下，從而提供更高可用性的電量。
- **偵測閒置狀態下的電池健康狀態**：許多 ESS 系統會長時間處於閒置狀態，因此很難判斷電池芯在需要時是否能提供電力。遺憾的是，僅靠 DC 電壓無法測量鋰離子擴散或阻抗。EIS 可讓系統設計人員定期檢查電池的健康狀態，確認系統是否已準備好在需要時提供電力。

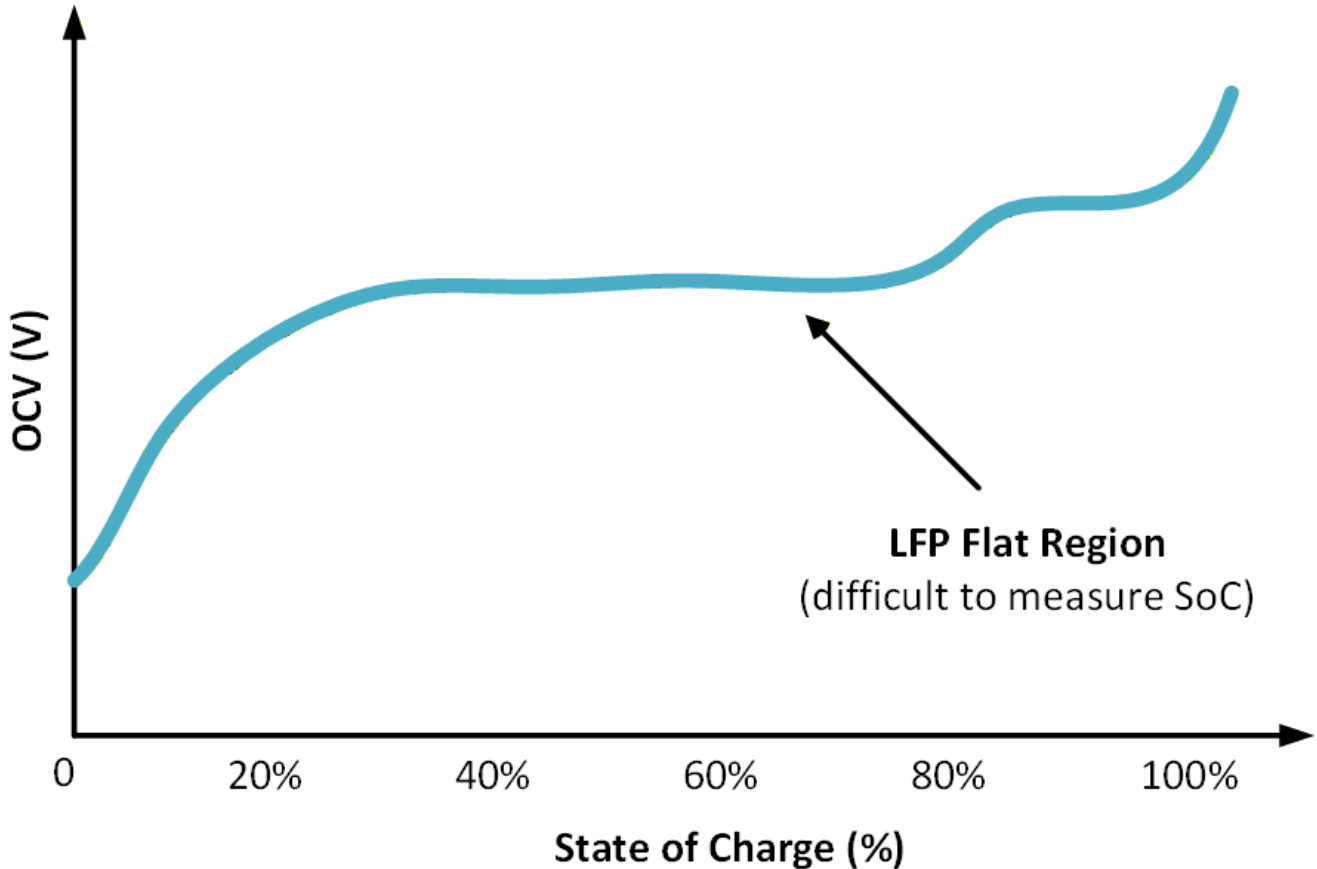


图 3-4. LFP 開路電壓與電量狀態曲線圖 (顯示為平坦區域)

當傳統 BMS 方法難以或無法進行測量時，EIS 提供了額外的洞見，從而提供更準確的電量狀態並維持電量可用性。

## 4 測量 EIS

### 4.1 EIS 系統架構

啟用 EIS 的 BMS 以傳統架構為基礎，包含多個用於電壓感測的堆疊式電池監控器以及一個用於電流感測的電池組監控器，以及以下兩個元件 (图 4-1)：

- **電流激磁源**：產生正弦波、方波或其他形狀的波形，以激勵電池芯。
- **同步電壓與電流取樣**：可同步電流和電壓量測裝置間的振盪器，以減少阻抗相位誤差。

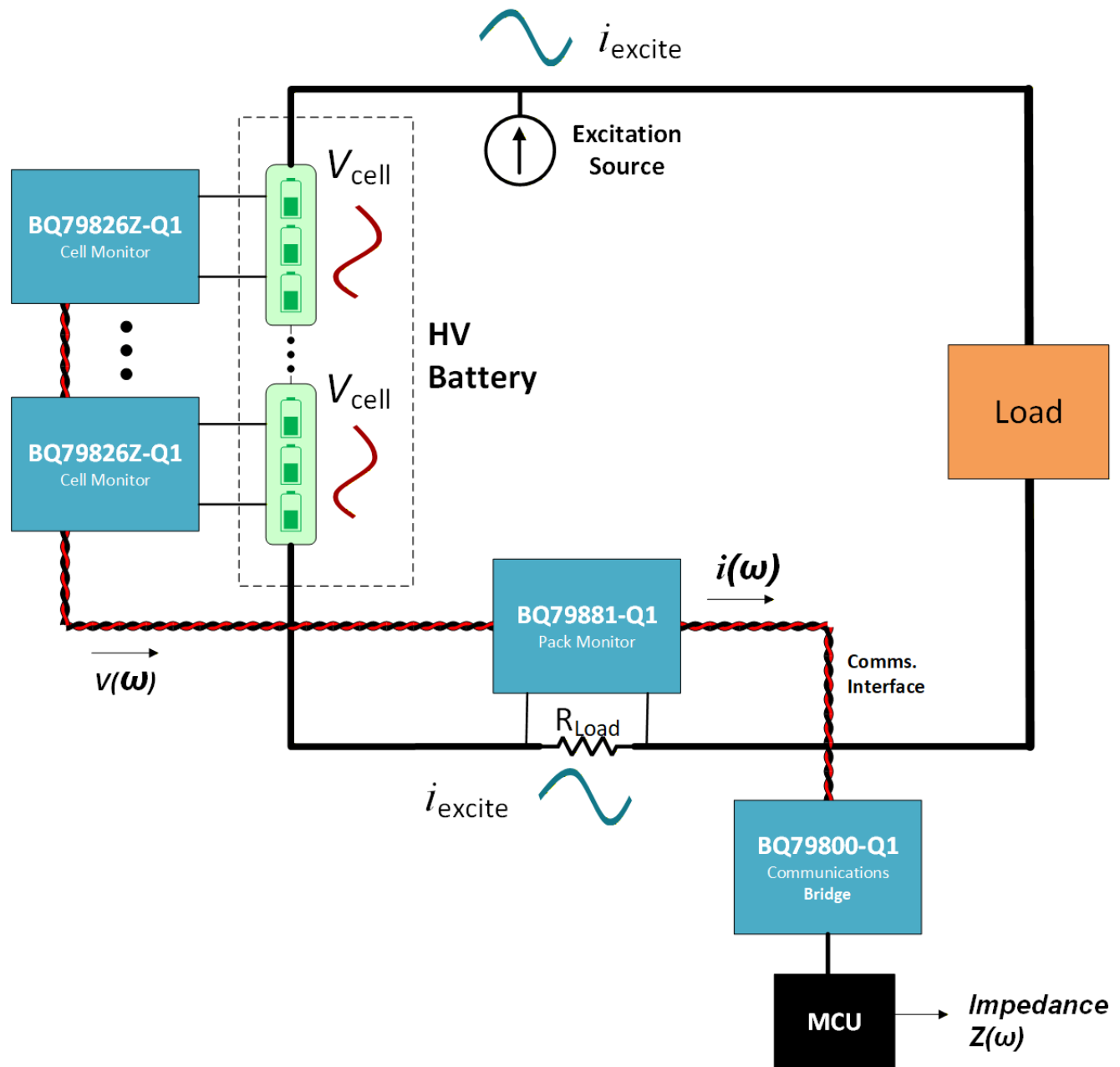


图 4-1. 電池組 EIS 系統方塊圖

图 4-1 顯示了典型的電池組配置，包含兩個 BQ79826Z-Q1 電池芯電壓監控器和一個用於監控電流的 BQ79881-Q1 電池組監控器。BQ798xx 監控器包含整合式同步協定，可保持電流和電壓測量高度一致，從而將阻抗相位誤差降到最低。激磁源可由 BQ798xx 裝置直接控制，或由終端設備中的現有來源產生，例如 DC/DC 轉換器、充電器、平衡器，預充電電路或逆變器。

## 4.2 EIS 測量參數

最佳化 EIS 系統需要注意三個電氣設計參數：

- **電池芯阻抗：**電池在其使用壽命期間會呈現不同的阻抗範圍，設計人員可透過奈奎斯特圖進行擷取。阻抗直接決定激勵電池芯所需的電流量。例如，一顆 100Ah 電池芯，其阻抗通常為  $500\mu\Omega$  至  $750\mu\Omega$ ，且可能需要 1Ap 至 2Ap 的峰值電流，以供類比轉數位轉換器 (ADC) 進行測量。
- **激磁電流振幅：**電流振幅會影響電池的線性要求，以及 ADC 的最佳測量範圍。線性可確保電池在受到正弦波激勵時，也能以正弦波響應。目標是將電流激磁振幅盡可能保持在較低水準，以限制功耗。

- **ADC 雜訊**：低 ADC 輸入參考雜訊對高訊號雜訊比 (SNR) 極為重要，因為電壓和電流訊號可能處於微伏特範圍內。選擇低雜訊 ADC 可改善 SNR，並減少所需的激磁電流。

### 4.3 TI 的 EIS 晶片組

BQ79826Z-Q1 和 BQ79881-Q1 電池監控器讓設計人員能夠透過 TI 的整合式 EIS 引擎測量每個電池芯的阻抗。可擷取所有 EIS 頻帶 (可低至 0.01Hz) 的阻抗，從而偵測與溫度、電量狀態和熱失控相關的細微阻抗變化。

BQ798xx 晶片組共同組成了完整的 BMS (如圖 4-2 中所示)，其可提供可堆疊的 26 通道電池監控器，(以進行大量電池芯數配置) 以及用於測量電流和電池組電壓的高精度電池組監控器。

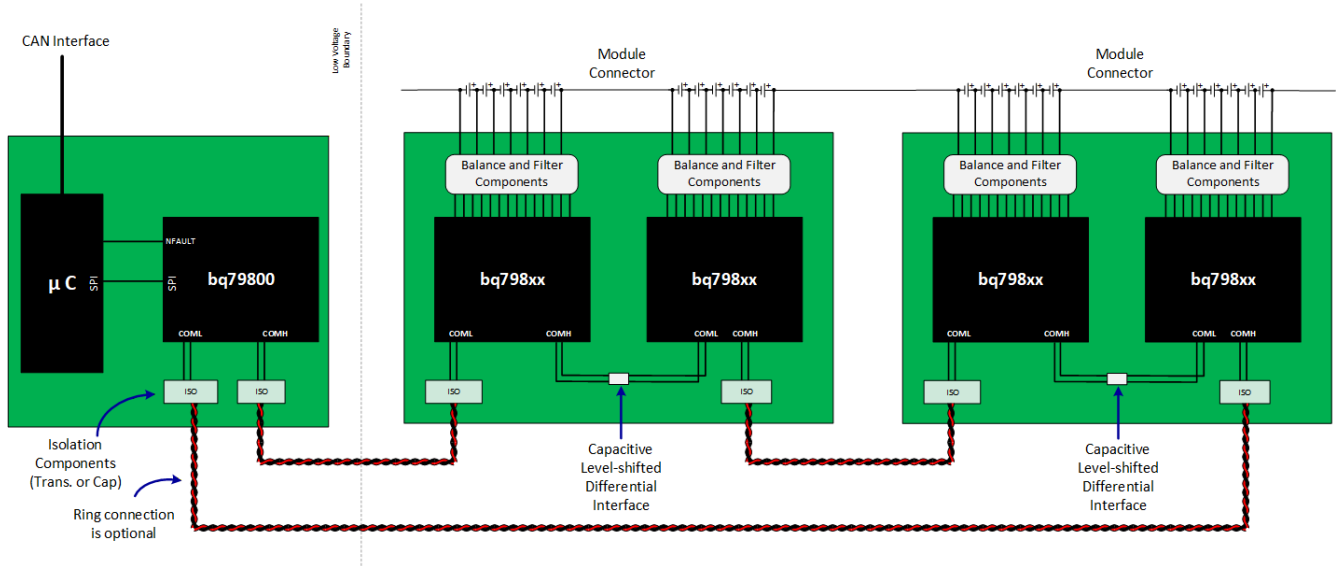


圖 4-2. BQ798xx BMS 方塊圖

這些裝置可滿足日益增長的電池容量的嚴苛要求，其採用 EIS 進行最佳化的設計能夠測量極小的阻抗。適用於電壓及電流感測的極低雜訊 ADC 可改善 SNR；0.01Hz 至 3.5kHz 的廣泛頻率範圍涵蓋重要阻抗區域；而堆疊同步功能則可將電流與電壓測量之間的時間差縮至最小，從而減少相位誤差。

### 4.4 參考設計

為了利用 BQ79826Z-Q1 和 BQ79881-Q1 快速評估 EIS，TI 提供包括硬體、軟體和系統級支援的參考設計。設計人員可將標準的 BQ79826 和 BQ79881 評估模組直接連接至電池芯、模組或電池組，以此來使用這些評估模組執行大多數 EIS 評估。TI 也提供適用於 EIS 性能測試、用於演算法開發的資料收集和車內整合的軟體解決方案。此外，多種參考設計 (包括 TI 的 EV BMS 3.0 參考設計) 可協助設計人員加快 BMS 和 EIS 系統的規劃、測試和開發時間。

可依要求向 TI 索取的其他參考設計包括：

- 串聯 52 節電池芯至串聯 104 節電池芯的 ESS 系統：適用於 ESS 系統的電池組或機架參考設計。
- 堆疊式主動橋接器：一種獲得專利的 EIS 激磁源，效率 > 99%。
- 主動式電池組平衡：基於雙主動橋接器拓樸結構的激磁源，使用現有電池組平衡電路來激勵電池芯。

## 5 結論

在電動車、儲能系統和工業機器人應用中，對更安全、更可靠且更長續航力電池的需求與日俱增，這影響了 BMS 系統的設計、建置方式以及系統所能達到的效能。EIS 使 BMS 系統變得更加智慧，能夠更快偵測溫度異常上升、更準確評估電量狀態，並提早發出電池老化的預警。這些洞見可協助設計人員延長電池壽命、提高充電速度並提升安全性。

TI 的新一代晶片組整合了 EIS 引擎，可幫助加速實現這些功能，以實現業界未來的電氣化目標。

### 作者簡介

Brian Burk 是德州儀器電池管理解決方案團隊的系統工程師。自 2009 年加入 TI 以來，他曾主導音訊 DSP、放大器、馬達驅動控制、電力電子和電池管理系統的研發與產品管理。作為汽車 BMS 產品線的產品經理和系統工程

師，他推動了電化學阻抗光譜等技術創新，使 TI 的產品在汽車、工業及消費性電子領域保持領先地位。他主導開發的前瞻性思維解決方案已獲得超過 10 項專利。Burk 擁有德州大學奧斯汀分校的電機工程學士學位，並擔任 TI 技術領導委員會成員。

## 重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025