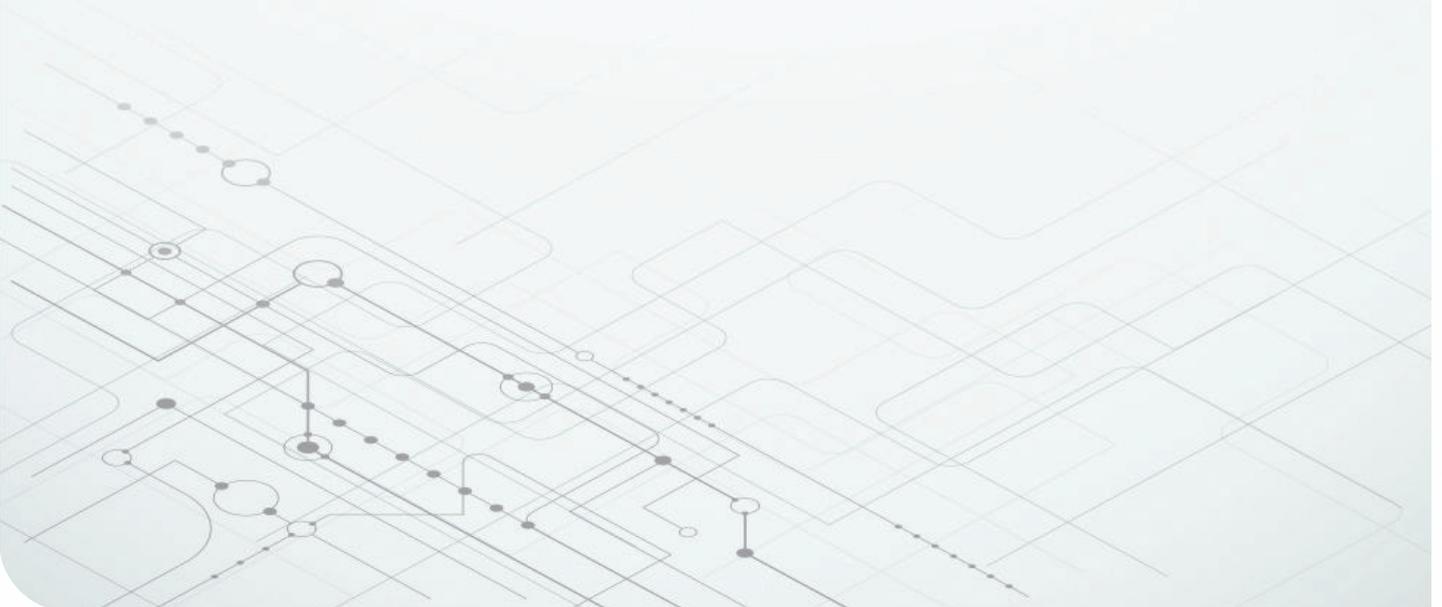


設計更安全、更智慧且更緊密相連的 電池管理系統



Dag Grini
Issac Hsu
Jordan Jennifer
Bryan Marshall
Mike Pienovi
Andreas Schaefer



摘要

隨著車輛架構朝更集中處理與更智慧的系統趨勢發展，這些系統中的半導體技術也必須不斷進化。本文件檢視改變混合動力電動車 (HEV) 與 EV 動力傳動架構的趨勢，以及電池管理系統 (BMS) 技術如何轉變為支援更安全、更智慧的車輛需求。

1 革新動力傳動系統技術，實現網域和區域控制

了解轉向網域和區域架構的轉變，以及其對系統設計和半導體技術的影響。

2 實現 BMS 內智慧功能的技術：MCU

了解轉向更安全、更智慧的 BMS，如何革新 MCU 技術、通訊介面和電池接線盒設計。

3 數位分身、機器學習和車隊管理

了解如何應用機器學習演算法推動智能電池數位分身等趨勢。

由於消費者對安全性、便利性和個性化體驗的期望不斷提升，現代車輛正經歷以軟體為中心的轉型。就如智慧型手機重新定義了行動電話的角色和意義，軟體定義車輛重新定義了汽車的硬體架構，提供駕駛員車內所需功能的靈活性。

汽車製造商發現有機會能重新設計汽車的硬體和軟體架構。軟體定義車輛影響到車內各個子系統，從轉向動力系統網域控制和區域控制架構，到設計更智慧化的系統和減少 MCU 數量，全都透過更智慧的半導體技術實現。

電池管理系統創新如何提升 EV 採用率檢視電池管理系統 (BMS) 架構與重要子系統。我們將深入探討轉向軟體定義車輛的趨勢如何影響 HEV 和 EV 中的 BMS。

革新動力傳動系統技術，實現網域和區域控制

過去設計人員在車輛設計中新增 MCU，其感測器或致動器需要更多智慧功能，因此需要更複雜的控制或通訊。然

而，結合不同車輛平台內的額外選項複雜性，會導致複雜的車輛系統特性、大量開發心力和極具挑戰性的維修。例如，無線更新需要針對所有配置進行測試，大量增加流程的時間和複雜性。

為了解決複雜性、重量和成本方面的挑戰，產生了網域和區域控制架構的概念。請了解這些不同架構對車輛中的子系統有何需求。

在網域架構中，每個網域會根據相關功能累積特定電子控制單元 (ECU)。舉例來說，車載充電器、DC/DC 轉換器、牽引逆變器和 BMS 會包含 HEV/EV 控制領域，並共用單一集中式 MCU，如 **圖 1** 所示。如此可減少分散式 MCU 數量，將各種功能就近配置，達到簡化介面的效果，並將相同功能集中在單一 MCU 以共用運算資源。例如，OBC 和逆變器的運作時間不同，並且會共享運算容量。

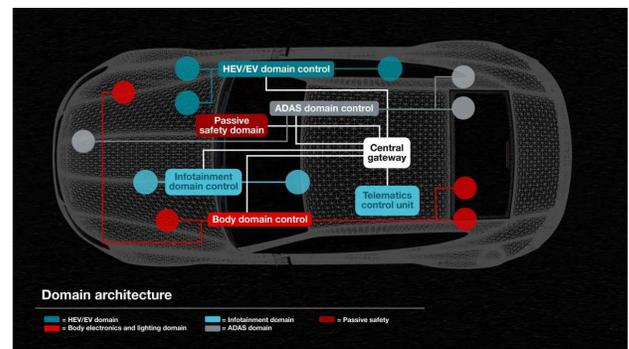


圖 1. 網域控制架構。

區域架構進一步改良網域控制，將功能分類至不同的區域，並由 MCU 根據車輛中的位置進行控制，如 **圖 1** 所示。各個區域透過高頻寬通訊骨幹連接，因為區域之間的分散式感測器和致動器需要及時通訊。區域架構可減少所需的 MCU 數量，同時降低線束複雜性及重量，進一步節省成本並增加行駛距離。硬體和軟體更新週期是分離的，汽車製造商可以轉向服務型的軟體結構。

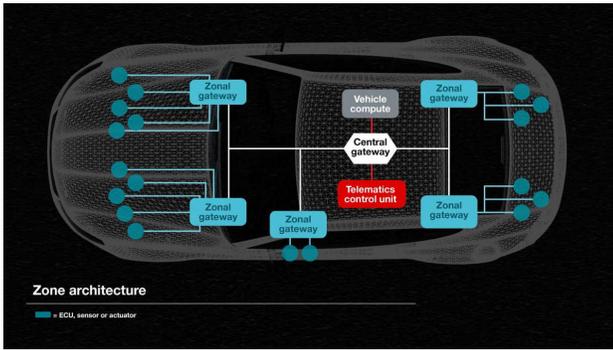


圖 2. 區域控制架構。

雖然網域和區域架構有不同的優點與挑戰，但這些架構也可在跨界架構中共存。例如，BMS 可採用網域控制方式，而同時自動駕駛輔助系統 (ADAS) 可採用區域控制方式。通常會先處理功能安全與系統靈活性的特定應用挑戰，再將動力傳動系統轉為網域或區域控制架構。根據原先的原則盡可能集中 MCU 功能，意味著 BMS 必須透過精密或標準化介面進行通訊，且邊緣無 MCU 智慧功能。這類實作形式可達成減少 MCU 數量的目標。

然而，這種方法伴隨著技術挑戰：電池芯與電池組高電壓晶片組數據 (電壓、電流和溫度讀數及相關安全措施) 將以原始數據的形式傳輸。由於故障偵測時間間隔、故障反應時間間隔和安全狀態都經過嚴格定義，因此介面可用頻寬需要密切觀察與最佳化，而區域或網域控制 MCU 則需要在指定時間間隔內以極短的時隙進行處理。圖 3 比較 BMS 中的嵌入式系統架構。

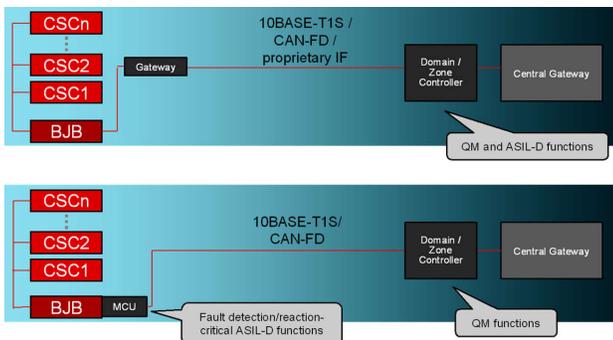


圖 3. BMS 中的嵌入式系統架構比較。

為高電壓晶片組配備更多智慧功能，或在 BMS 邊緣 (例如智能電池接線盒) 增加更小型的安全 MCU，都可簡化這樣的挑戰。藉由在本機處理功能安全措施，除了任務外的數據都不會在本機內部傳輸 – 邊緣的本機安全 MCU 會將

本機取得的 OK/nOK 數據傳輸至集中式 MCU，而非底層的原始數據，進而大幅減少時序和頻寬挑戰。

儘管這種方法與減少 MCU 數量的最初意圖相矛盾，但卻帶來了更多優勢。本機 MCU 可實現控制器區域網路靈活數據速率 (CAN-FD) 或乙太網路 10BASE-T1S 等標準化介面，進一步引進統一的抽象層，幫助實現電池組多源採購，以及跨車輛、跨平台與跨世代相容性。

現在就讓我們來討論 BMS 內可支援這些架構，並實現更智慧化的系統的幾項技術。

實現 BMS 內智慧功能的技術：MCU

MCU 在 BMS 內扮演兩種最基礎的主要角色：連接感測器以接收數據，並將資訊傳回車輛網路。這兩種功能有助於將功能安全和重要診斷資訊 (例如充電狀態) 提供給 BMS。由於市場需要更先進的感測和運算能力，以及更先進的網路，目前 MCU 在這兩個主要功能方面均有較多的進展。進階 MCU 可從電池傳送高品質的數據至車輛其他部分，幫助更精確掌握車輛的情況。

檢視 BMS 內 MCU 運作的進階情境。由於需要使用複雜的演算法處理最大化電池實用性所需的智慧功能，運算能力有所增加。隨著電池尺寸增加，需要測量的個別電池芯數也會隨之增加。電池內儲存的電壓位準較高，整體功率也較高。這代表傳入的訊號比以往都更多，隨著車輛架構從網域控制轉換到區域控制，需要增加 MCU 封裝尺寸和輸入/輸出數量。

滿足這些進階演算法和感測需求的一種方法，是提高核心運算性能。傳統 MCU 已能在 BMS 中運作，以單一核心 100 MHz 的頻率進行簡易的電流與電壓量測及溫度量測。但現在，多核心裝置最高可達 1GHz，不僅能運算，還能在系統內運作。設計人員可運用數位訊號處理器與現場可編程閘陣列，打造能更高速運作的運算引擎。TI 的 Arm® Cortex® 32 位元 MCU 產品組合包括高效能與低功耗裝置，可協助滿足系統需求。

從電池 ECU 到車輛其他部分的通訊，也變得越來越複雜。系統可能需要執行診斷或執行動態變更，例如預測功能，或視電池負載在任務類型間切換。舉例來說，如果車輛高速運轉，電池將滿載，因此執行診斷或更新電池芯等任務會變得毫無效率。但在汽車充電時，有更多的時間和系統

頻寬能執行這些任務，並以無線或有線方式 (透過乙太網路等通訊協定) 與車輛網路通訊，因此可提供比過去 CAN 或 CAN-FD 匯流排更高的資料傳輸速率。根據電池內的模組化程度，BMS 本身甚至可能需要通訊。

BMS 內 MCU 最重要的標準為功能安全能力。隨著連網程度不斷提高，安全性也變得越來越重要。MCU 需支援汽車安全完整性等級 (ASIL) D，並具備內建硬體安全模組，以幫助滿足系統的安全與保全需求。**AM263P4-Q1 MCU 等裝置**皆為多核心，擁有更高的操作頻率，可搭配進階周邊設備進行運算，並提供高品質的感測與致動 IP。MCU 也需支援汽車開放系統架構 (AUTOSAR) 等開放式與標準化汽車軟體架構，以幫助提升安全性並縮短開發時程。

實現 BMS 內智慧化的技術：無線功能

將邊緣處理整合至無線 BMS，是非常重要的技術進展。將運算流程推向邊緣，有助強化即時決策、減少延遲，並實現汽車系統整體性能最佳化。

透過減少將數據傳輸至集中式 ECU 的需求，將能加快回應時間，對於需要立即回饋的應用 (如適應性電池管理和動態能源分配) 而言至關重要。無線 BMS 可運用邊緣運算，對電池健康狀態、使用模式和環境因素執行即時分析。此類數據讓系統能即時修正並最佳化電池性能，幫助車輛在各種情況下以尖峰效率運作。在本機處理關鍵數據，還有助降低與透過擴展網路傳輸敏感資訊相關的網路威脅漏洞。

TI 的軟體定義無線電解決方案 (如 圖 4 所示) 消除了傳統纜線的限制，進而在軟體定義車輛的複雜架構中實現更具創意且高效的功能整合。

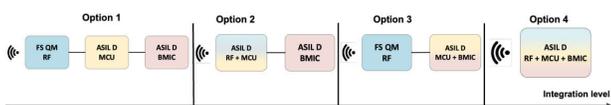


圖 4. 無線 BMS 軟體定義無線電解決方案整合程度。

無線 BMS 可針對不斷變化的車輛配置提供動態適應性。隨著電池組演進，無線方法可確保與更新或修正的系統版本無縫整合，為系統提供可因應未來的解決方案。無線 BMS 也整合安全通訊協定與多層備援等先進技術，以提升系統可靠性。

實現 BMS 內智慧功能的技術：智能接線盒

智能電池接線盒可協助透過電壓、電流和絕緣電阻電池組監控器，直接量測電池的高電壓。一般的電池組監控器中有多個電壓與電流量測通道，可量測保險絲和外包商的電壓，並檢查隔離電壓。圖 5 是電池接線盒的簡化系統圖。

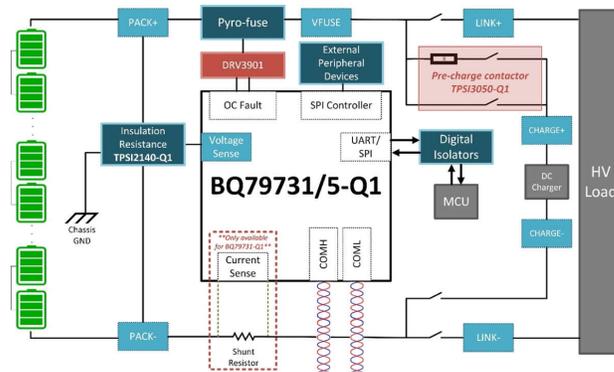


圖 5. 簡化 BJB 系統原理圖。

在電池管理系統中有兩大關鍵功能：電池斷開和配電。智能電池接線盒包含接觸器驅動器和高溫保險絲爆管驅動器的數位控制，可在碰撞時斷開電池組與 EV 系統的連接。

高壓電池斷開可透過熔斷或高溫保險絲處理。車輛內電流較高的系統產生新的條件，導致市場從由過電流熱事件觸發的傳統熔斷保險絲，轉變為透過 MCU/HUB 觸發的高溫保險絲。現今，高溫保險絲由複雜的離散式電路驅動，這些電路可能會造成效率低下。TI 適用於汽車 EV 高溫保險絲部署的單通道爆管驅動器 **DRV3901-Q1**，可提供高度整合且已開發安全性的解決方案，透過高溫保險絲取代傳統熔斷保險絲系統，快速進行電池過電流斷開。

高電壓配電接觸器也需要處理更高的電流，但選項有限且昂貴或過於複雜。節能接觸器具有額外的高電阻節熱器線圈，用於在接觸器通電時減少電流消耗和加熱，進而提高主外包商的效率。雖然這些節能接觸器似乎可提升系統效率的解決方案，但目前的選擇有限，且成本通常相當高昂。反之，非節能接觸器則沒有額外的線圈，因此可降低成本，但必須由更複雜的離散式電路驅動，才能符合安全和效率標準。德州儀器已投入資源，降低驅動非節能接觸器所需電路的複雜性和成本，同時開發 **DRV3946-Q1** 這款完全整合的雙通道接觸器驅動器，讓設計人員享有更多自由和設計靈活性，進而提升效率和穩固性。

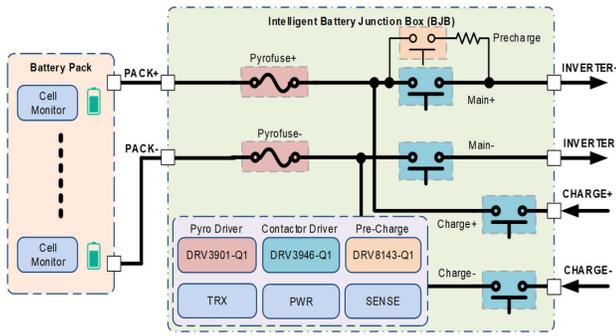


圖 6. 電池斷開和配電，以實現 BMS 內高功率。

電池組使用由電池組監控器控制的機械接觸器來連接或斷開車輛中的子系統。在出現不受控的突入電流時，機械式高壓接觸器可透過電弧與孔蝕進行焊接或受到損壞。**為何在高電壓系統中需採用預先充電電路**說明了如何使用 **TPSI3050-Q1** 隔離式開關驅動器來建立可靠的固態繼電器，以在汽車電池接線盒中進行預先充電。若為智能電池接線盒，**TPSI3100-Q1** 可在此類預先充電應用中實作，透過其整合式隔離比較器和故障報告輸出進一步強化診斷能力。這些功能可結合過電流或溫度監控電路，允許此類故障偵測電路透過 **TPSI3100-Q1** 可靠地回饋此資訊，並將任何事件報告至電池組監控器。

高電壓電池組的正極和負極端子必須與車輛底盤充分分離，以保護駕駛或技師免受可能發生的電擊影響。對前述分離進行定期監控的作業，稱為隔離檢查或絕緣電阻監控。如 **TPSI2140-Q1** 等固態繼電器可同時連接與斷開已知電阻值 (如 1 MΩ) 和未知電阻值 (在電池端子與底盤接地之間)。透過使用 **BQ79731-Q1** 等電池組監控器測量組合電阻，即可判斷電池分離是否在公差範圍內或可能有害。

數位分身、機器學習和車隊管理

BMS 的軟體實作形式也有所創新。獲得的電池組和電池芯測量準確度，是比卡爾曼濾波器或庫侖計數更先進的 X 狀態演算法的基礎。

監控個別駕駛行為、交通狀況，以及地理與道路狀況的能力，可進行更精確的車輛行駛距離預測，以及電池健康狀態數據與充電狀態評估。如果將數據集中在雲端中，機器

學習演算法可以監控整個車隊並實現預測服務。例如，如果之前觀察到並儲存某個故障模式，演算法可以偵測早期跡象，並計算其他車輛未來主動請求汽車維修的可能性。此功能即是建立「數位分身」，可實現更多商用車型，例如在軟體定義車輛中進行臨時車輛行駛里程升級。

TI 的 **AM263P4-Q1** Arm 架構、支援 AutoSAR 的 MCU 包含一個使用適應性電池建模系統的函式庫，可提供機器學習服務，以改善車隊與車輛 X 狀態量測，幫助實現更智慧的充電，以及最佳化的電池健康狀態和行駛距離。

結論

BMS 是許多顛覆性和創新概念的核心。TI 的產品解決方案包含完整的 BMS 產品組合，提供系統層級的優勢，讓車輛更智慧、更安全且更緊密相連。

其他資源

1. 進一步了解電動車的智能電池管理。(https://www.ti.com/applications/automotive/hev-ev-powertrain/overview.html#BMS)
2. 檢視混合式、電動與動力傳動系統的參考設計。(https://www.ti.com/reference-designs/index.html#search?applid=209,84,235167)

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere. 所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), 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 will 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](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.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.

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated