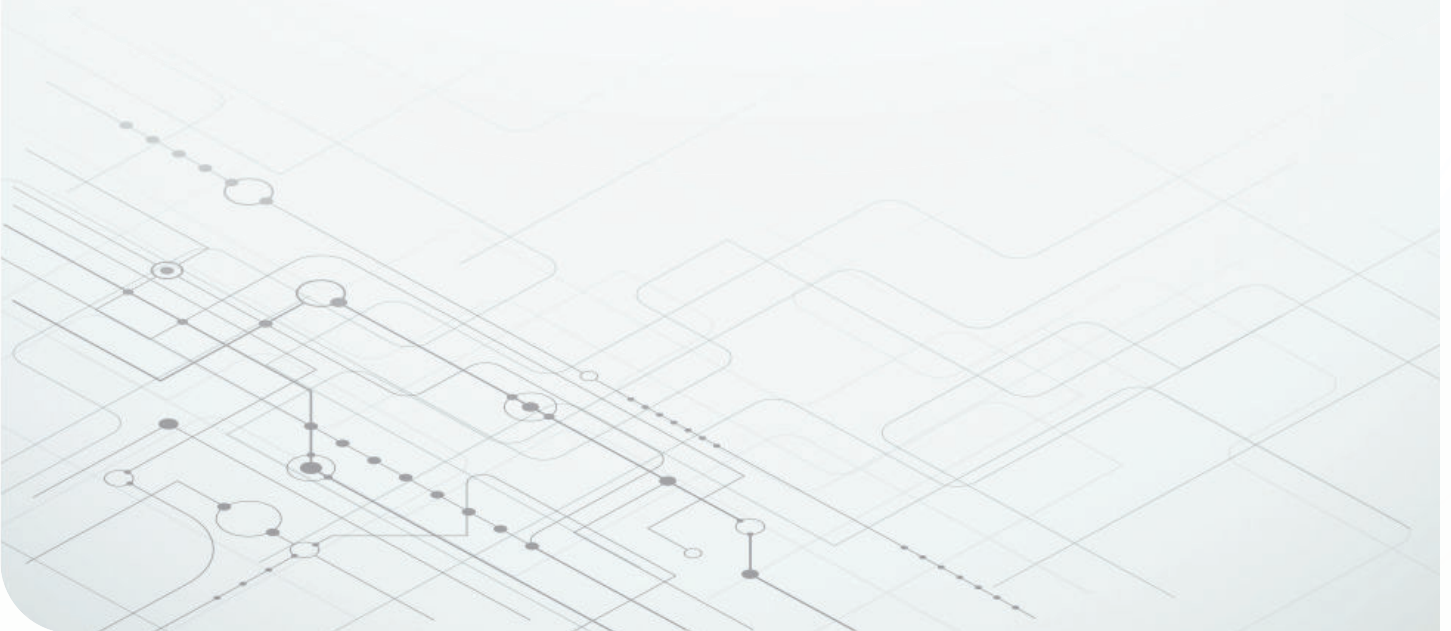


智慧型配電：打造汽車技術的未來



David Martinez
Systems engineer



本白皮書探討區域架構，48V 系統與其他趨勢的出現，如何為車輛實現更智慧，更安全且更最佳化的配電。

摘要



1 配電為何會發生變化？

探索不斷變化的電源，區域架構，48V 低電壓軌和安全需求如何推動汽車配電的改變



2 配電架構演進

閱讀改變的汽車架構如何激發對最佳配線與強化軟體控制的需求。



3 深入了解配電模組

了解配電模組的設計方法和各種設計考量。

簡介

汽車配電架構與電子控制單元 (ECU) 不斷演進，透過加入智慧型半導體解決方案，安全，可靠且有效率地分配電力。隨著車輛朝向自動駕駛與電動動力系統的持續發展，新法規也不斷推出，以確保在發生故障情況時安全可靠的配電。

本白皮書將說明政府法規，區域架構，48V 和注重安全的電源設計如何影響配電架構的變化，以及這些架構目前面臨的挑戰和考量。

配電為何會發生變化？

隨著新法規使得鉛酸電池汽車銷售更具挑戰性 (特別是在歐盟)，汽車原始設備製造商 (OEM) 也逐漸捨棄傳統鉛酸電池。雖然鉛酸電池比鋰離子電池更便宜且更容易生產，但其使用壽命更短，並對環境造成有害影響。這些政府法規和電動車的普及使 OEM 採用不同的輸入源，如鋰離子電池，DC/DC 轉換器和超級電容器，如圖 1 所示。

Input source combinations

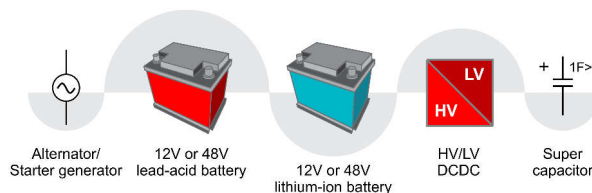


圖 1. 比較車輛各種電源。

轉換至鋰電池，超級電容器或兩者都需要額外電路，以防止發生過度充電情況。這些電源的充電電路需要專用高至低電壓 DC/DC 電源充電電路，並使用智慧型電源開關分配和監控充電電壓和電流。隨著電池電動車 (BEV) 與混合動力電動車 (HEV) 的出現，在車輛關閉或行駛時使用配電電路為電池充電，對於延長行駛距離而言尤其重要。

超級電容器是汽車輸入來源有趣的補充項目。雖然此類電池並不適合長期儲能，但在需要脈衝模式電源的應用中表現較佳，因為其提供比鉛酸電池更多的啟動週期 (即來源在能量大幅下降前可提供大量電源衝突的時間)。因此，超級電容器非常適合處理負載瞬態，例如電容突波電流和馬達啟動或啟動。透過搭配超級電容器使用電池，設計人員即可減輕汽車電池的壓力，延長電池使用壽命。

區域架構和智慧 eFuse

OEM 正在開始將其車輛從領域體系結構過渡到區域體系結構，這是基於位置而不是功能對電子控制進行分組的概念，如圖 2 中所示。區域架構可減少車輛配線量，進而提供大量節省成本的機會。

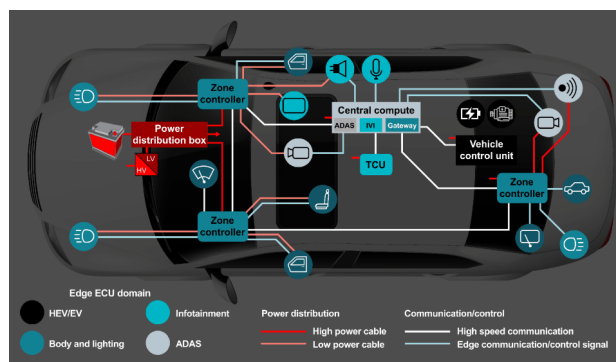


圖 2. 現代車輛的區域架構。

區域架構不從保險絲盒供電，而是透過配電盒 (PDB) 和區域控制模組 (ZCM) 分配電力。PDB 提供從車輛電源供應器到 ZCM 和其他高功率 ECU 的主要高電流配電。然後 ZCM 為附近的 ECU 和傳感器提供二次配電。此設計實務可使配線最佳化，並提升對電子耗電量的控制。

ZCM 和 PDB 也採用稱為智慧 eFuse 的半導體式開關，結合熔斷保險絲和機械繼電器的功能。透過新增軟體可重設開關，區域架構可有效省去對可存取 PDB 的需求，因為軟體現在可個別管理每個開關，包括保護線束及從故障中復原所需的演算法。

區域架構也可讓 OEM 更妥善地管理車輛耗電量，協助他們提升配電系統的控制。在上下文中，這牽涉到車輛軟體關閉 eFuse，以切斷其他或未使用功能的電源，讓重要安全功能有足夠的功率運作。

關閉特定負載電源的概念延伸至透過使用 eFuse 低功率狀態驅動隨時供電 (PAAT) 負載，進而將總功耗降到最低。即使在車輛鑰匙拔除或停車狀態下，車門鎖扣等 PAAT 負載仍會供電，因此重要安全功能仍可維持運作，並保留大量電容。當 PAAT 功能運作時，eFuse 會退出低功率狀態以完全驅動負載，並警告本機微控制器 (MCU)。eFuse 在閒置一段時間後，會返回低功耗狀態。

48V 低電壓軌

另一個節省成本的來源是改用高於 12V 的電源。48V 配電雖然不是汽車中的新概念，但可進一步最佳化車輛配線，重量和成本，同時增加車輛中配電的數量。具體來說，在使用 12V 時，執行 48V 線控驅動等高功率功能所需的電流約為負載電流需求的 25%。更低的負載電流需求可減少車輛配線的電池電量計，重量與成本，進一步延長 BEV 的行駛距離。

提供更安全的配電以啓用自動駕駛車輛

配電系統發生變化的最後一個原因，是 OEM 藉由整合強化車輛智慧，實現無可比擬的駕駛輔助技術，致力於提升車輛安全。許多 OEM 正在競相創新其車輛，以超越汽車工程師協會 Level 2，以及我們現今少數可實現自駕車輛的 Level 3。3 級及以上配電所需的安全原則必須執行設計實務，例如備援輸入供應，在單一電源供應器故障時進行智慧負載管理，以及免受干擾以隔離系統中的故障。這些安全原則在 ISO26262 與 VDA450 標準中有詳細定義。

配電架構演進

車輛配電不斷演進，因為汽車架構整體不斷改變，因此需要最佳化配線並強化軟體控制。如中所示圖 3，配電網路將車輛電源饋入 PDB，從而將電源分配給每個區段。每個區域隨後將電力分配至鄰近的 ECU，致動器或感測器。

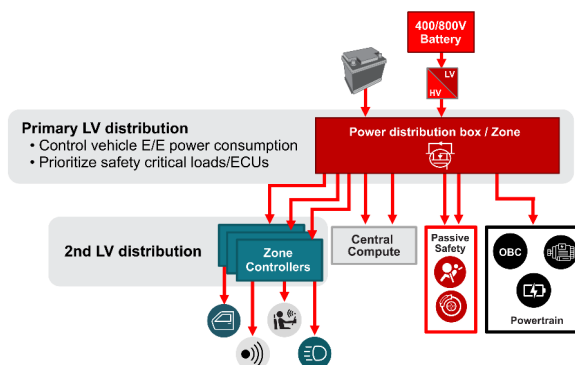


圖 3. 現代配電架構。

圖 4 說明不同的配電架構。隨著智慧 eFuse 和 48V 系統的推出，OEM 正透過以車輛軟體管理的電子保險絲盒取代由駕駛管理的可存取保險絲盒，來強化其系統。轉換至 48V 配電需花費時間，因為並非所有負載與致動器都已準備好跳躍至此更高電壓位準。因此，第一代 48V 系統仍將保留 12V 負載。隨著 OEM 持續評估 48V 配電，配電架構將持續進化，可能會完全取代 12V 電源。

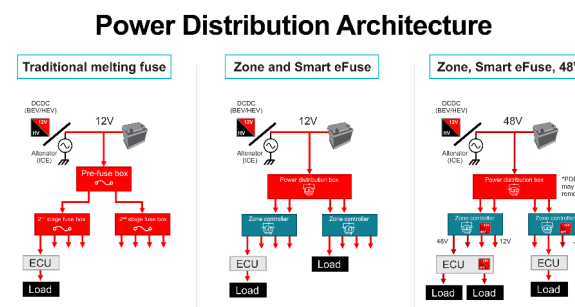


圖 4. 未來配電架構的比較。

48V 系統可讓您使用 ZCM 分散一次和二次電源的骨幹架構，進而實現進一步演進。然後可以卸下 PDB 圖 5，如所示。48V 架構降低的負載電流，在熱損耗較低的情況下，ZCM 可提供更多配電輸入與輸出。此拓撲可大幅簡化配電網路。

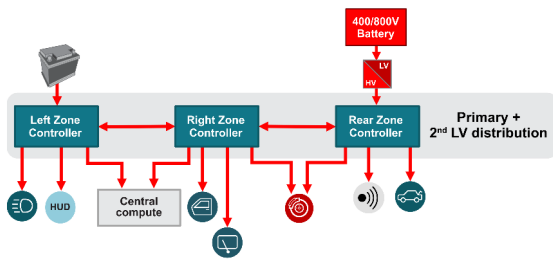


圖 5. 骨幹配電架構。

深入了解配電模組

典型的 PDB 和 ZCM 採用多種實務來啓用更智慧化的車輛。如果系統沒有 PDB，則這些做法可能集成到 ZCM 中。圖 6 顯示主要配電等級的一般實作。

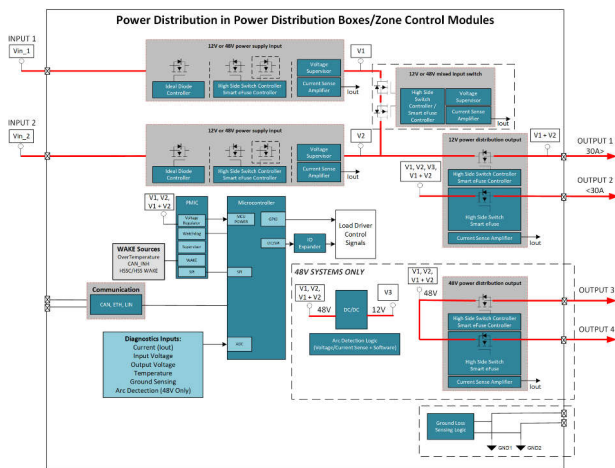


圖 6. 通用配電模組。

輸入考量

要重複一下，PDB 或 ZCM 可以使用圖 1 中所示的五種不同電源中的任何一種。在選擇冗餘輸入時，您必須考量以下問題：系統中存在什麼負載暫態，是否需要低功耗模式（特別是 BEV）或反向電流保護，是否允許雙向電流，以及系統需要什麼安全機制。

負載瞬態是考量的關鍵，因為超級電容器或電池可處理突波電流，確保不間斷的電源。另一方面，DC/DC 控制器和智慧 eFuse 開關需要能夠限制電流並對電容負載充電，以確保下游元件免受這些瞬態突波電流影響。

低電壓電池是設計低功耗模式時應考量的主要輸入來源。低電壓電池消耗極少的電流，且與超級電容器不同，其電壓位準可在更長時間內維持穩定。相比之下，高功率 DC/DC 轉換器會消耗非可忽略的靜態電流。然而，用於支

援系統處於低功耗狀態的並聯低靜態電流 DC/DC 轉換器，可減少高電壓電池的功耗。設計車輛鑰匙拔下狀態時也需以 BEV 中的電池充電。使用 DC/DC 轉換器作為次要輸入來源，開啟混合輸入開關會在無鑰匙狀態下為電池充電，並在停用下游開關時允許電流從 Vin_2 流至 Vin_1，如圖 7 所示。

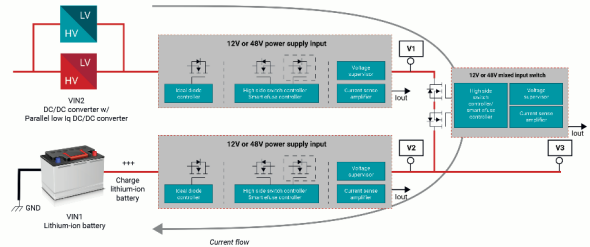


圖 7. 使用混合輸入開關為鋰離子充電。

理想二極體（如白皮書“理想二極體基礎”中所述）非常適合需要反向電流阻斷和 / 或反極性的應用。由於理想二極體可提供反向電流保護，因此在必須組合多個電源以增加系統備援的應用中，也十分實用。

另一方面，智慧型 eFuse 或高壓側開關則非常適合單向和雙向電流應用。支援使用多重電壓匯流排或領域以確保安全的單一 ECU 時，除了為電池充電外，也需要雙向電流。以圖 3 或圖 5 為例，如果此系統中的 DC/DC 轉換器或控制器發生故障，車輛軟體可修改車輛配電，使蓄電池的電源從左區傳輸至後區的高優先級功能。如果支援這些額外功能可能使電池本身不堪重負，車輛軟體會透過電流感測放大器感測供應電流，以判斷應關閉系統中的哪些負載，確保這些高優先順序功能維持穩定的供電。

最後，安全機制會大幅改變配電架構。使用混合輸入開關結合 V1 與 V2 輸出軌，將為 ECU 建立額外受保護的 V1+V2 輸出。超級電容器也可維持 MCU 或外部 ECU 等重要元件的電源。現今，超級電容器被運用在重要的汽車功能中，例如電子車門鎖存器，以便在車禍後失去電力時開啟車門。這些範例說明設計人員在選擇電源以執行不同安全功能時，如何發揮創意。

輸出考量

以智慧型 eFuse 取代熔斷保險絲和繼電器的需求與日俱增，以啓用智慧配電。選擇適當智慧 eFuse 的考量因素包含可編程線路保護 (I2T)，電容式充電，低功耗模式，控制與配置的針腳數，電流與電壓感測，以及安全性等功能。

操作電流，峰值電流，負載類型，PAAT 要求和汽車安全完整性等級 (ASIL) 等負載輪廓特性，將決定所選開關所需的功能。若要支援超高操作電流，請考慮驅動外部場效應電晶體 (FET) 以支援任何負載需求的高壓側開關控制器。建議使用外部 FET 解決方案驅動極高的連續電流位準，例如 30A 或以上，因為視整合式 FET 的 $R_{ds(on)}$ 規格而定，此電流位準會將整合式 FET 解決方案的接點溫度提高至不可持續的位準。

相反的，高壓側開關和智慧 eFuse 在性能和成本上支援較輕電流方面表現出色。PDB 通常由高壓側開關控制器而非高壓側開關組成，因為這些裝置需要支援數百安培以上，才能支援所有下游區域所需的電源。負載輪廓特性也會指示智慧 eFuse 的編程線路特性應為何，如此智慧 eFuse 將在偵測到過電流時自動關閉，且無需主機 MCU 介入。eFuse 的可編程保險絲特性示例如圖 8 所示。

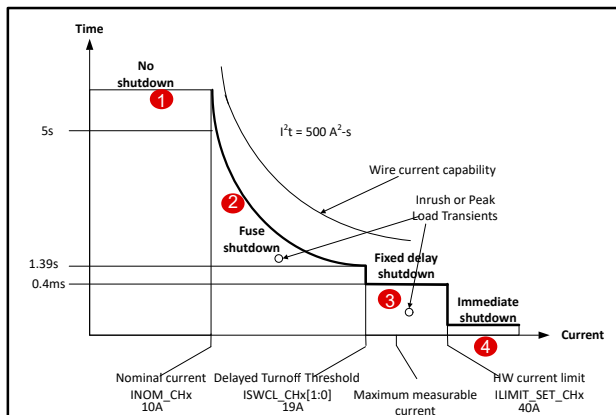


圖 8. 不同 eFuse 可編程保險絲特性的範例。

負載和峰值電流的類型也決定是否可使用智慧 eFuse 電容式充電方式。智慧 eFuse 開關通常配備電容突波技術，可處理電容突波並防止金屬氧化半導體場效應電晶體 (MOSFET) 受損。另一方面，啟動有刷 DC 馬達的電動突波電流通常需要降低智慧 eFuse 汲極至源極導通電阻，或在沒有脈衝寬度調變或電流限制的情況下使用外部 MOSFET。

也必須考量智慧 eFuse 的安全機制，更具體來說就是其跛行回家模式功能。跛行回家模式是一種可編程的安全狀態，如果滿足故障條件，例如高側開關失去與其 SPI 控制器 (通常是 MCU) 的 SPI 通訊，裝置就會進入該狀態。設計保護所需車輛功能的跛行回家狀態時，必須考慮輸出是否應保持開啟，以及恢復方法為何，這兩種方法都是智慧 eFuse 的可編程功能，然後再進入故障狀態。

系統考量

PDB 的設計考量包括系統診斷，物料清單 (BOM)，輸入/輸出 (I/O) 和智慧 eFuse 故障恢復。

系統診斷可包含各種參數，例如故障狀態，各開關的電壓，電流和溫度，以及接地損耗等系統級參數。在感測電壓與電流方面，您可針對低於 1% 的精確度需求選擇電流感測放大器或電壓感測放大器，並使用 MCU 的整合式類比轉數位轉換器 (ADC)。針對 1% 至 5% 電流感測準確度需求，使用開關的整合式感測功能有助於減少系統 BOM。整合式感測功能也非常適合在主動和低功耗模式中都需要電流或電壓讀數的應用。相反的，需要至少兩個電流感測放大器才能準確感測這兩種狀態下的電流。最終，了解每個開關的系統診斷後，車輛軟體即可智慧執行許多安全功能。

判斷 MCU 通用 I/O 和配電模組其他周邊設備的數量，可藉由判斷 MCU 與系統互動的方式，大幅節省成本。PDB (特別是 ZCM) 可具有 60 個以上高壓側開關，半橋和智慧 eFuse 輸出。可轉換為介接多個負載驅動器和智慧 eFuse 積體電路所需的 >300 I/O 和 ADC MCU 針腳。使用序列周邊介面 (SPI) 架構 eFuse 和 SPI/I2C I/O 擴展器，即可最佳化 MCU 封裝尺寸和針腳數。圖 9 顯示每個 IO 架構 eFuse 都需要四個針腳 (EN，診斷啟用，喚醒，ISNS)，且 I2T 特性無法編程。相比之下，單一 SPI 架構 eFuse 只需要五個 MCU 針腳，每個額外裝置只需增加一個晶片選擇。

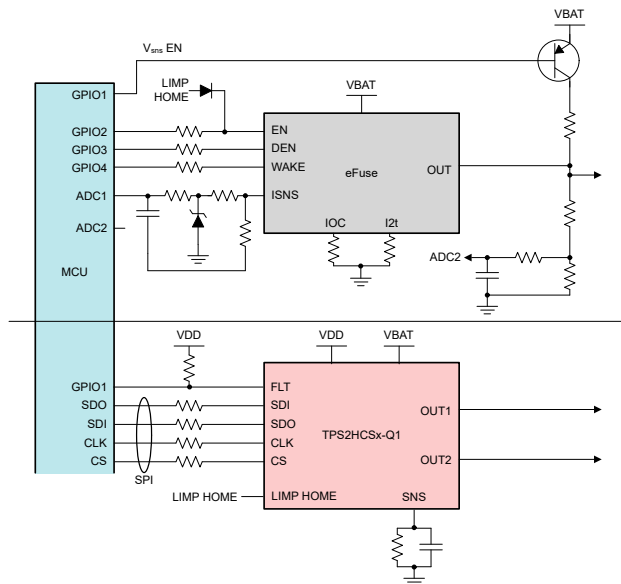


圖 9. 透過 SPI 架構 eFuse 最佳化 IO 計數。

軟體也對決定各 eFuse 的復原方法至關重要。熔斷保險絲會熔斷，並斷開輸入與輸出，以在偵測到過電流時停止電流流動。德州儀器智慧 eFuse 可直接關閉輸出，並提供設定時間後自動再次開啟輸出的選項。此外也可利用纜線熱模型和線路電阻估計線路溫度，以判斷開啟輸出是否安全，進而在本機 MCU 和配電系統中實作更複雜的負載復原演算法。將這些開關重設方式自動化最終可減少對可存取 PDB 的需求，並可將開關放置在更靠近負載的位置，減少從電源到 ECU 的纜線長度。

48V 考量

48V 架構與 12V 架構十分相似，但確實會帶來其他挑戰。

首先，電弧電壓是 48V 時的問題，因此輸出和元件必須有足夠的沿面距離和電氣間隙，以防止不同電壓位準兩點間發生電弧。結合軟體，電壓與電流感測，有助於偵測電弧並快速關閉必要的開關以停止電弧。也可開發機器學習演算法，以更好地區別車輛中的電弧波形與自然瞬態，進而幫助避免錯誤偵測。圖 10 顯示 48V 架構最常見的電弧成因。

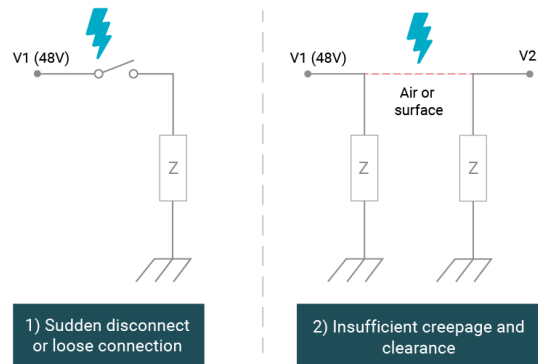


圖 10. 48V 架構電弧的常見原因。

此外，許多第一代 48V 架構仍需要 48V 至 12V DC/DC 轉換器，因為並非所有致動器和半導體都已轉換為 48V 操作或從轉換中獲益。視所需電源，電路板尺寸，成本和效率而定，48V 轉 12V 轉換有許多不同拓撲可考慮。標準方法是傳統降壓轉換器或控制器，以及進階拓撲結構，例如切換式電容器轉換器 (SCC) 和切換式儲槽轉換器 (STC)。

參考資料

1. 如需進一步了解區域架構，請參閱「[區域架構如何為完全軟體定義車輛開拓前路](#)」。
2. 有關區域架構的其他優點及其對軟體定義車輛的影響，請參閱[軟體定義車輛將汽車電子產品的未來移至檔位](#)。
3. 若要進一步了解 48V 架構，其設計挑戰，以及為何再次出現，請參閱 [48V 汽車系統：為何是現在？](#)
4. 若要進一步了解智慧 eFuse 的系統優點與考量，請參閱[區域控制器配電應用的完整軟體可配置高壓側開關](#)。
5. 若要了解智慧 eFuse 如何協助降低 I/O 需求，請參閱[以 SPI eFuse 開關減少系統物料清單和 MCU 針腳需求](#)。

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。

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