

從晶圓到底盤：汽車高低壓電源系統的極致工程演進

編輯部整理

全球新能源汽車產業正在經歷一場新的結構性重塑。過去的技術競爭主要圍繞在「電池化學成分」與「單體續航里程」，現在，極致能效優化、跨域高度融合與全生命週期成本控制為核心的汽車電源系統正在引導發展方向。在席捲全球的價格戰與利潤壓縮背景下，車企與供應鏈廠商不再盲目追求技術參數的堆砌，而是全面轉向「極致工程學」，逼迫功率半導體、高低壓配電網絡以及拓撲結構向物理極限發起衝刺。

這場技術演進的底層動力源於效率與降本的雙輪驅動。根據國際能源署 (IEA) 於 2026 年春季發布的《Global EV Outlook 2026》全球電動汽車展望報告指出：「隨著全球主要市場的新能源汽車滲透率跨越臨界點，消費者對補能效率的剛需與車企對物料清單 (BOM) 成本的極致壓榨，正共同推動車載功率電子器件以年均 15% 以上的幅度進行實質性降本與技術迭代。」

與此同時，智能化的高速滲透也對低壓供電系統帶來了前所未有的考驗。2025 年起，隨著高階自動駕駛 (如運算能力大於 1000 TOPS 的中央計算晶片) 與全線控底盤 (如線控轉向、線控制動) 在量產車型中的比例大幅提升，整車的瞬態功率需求與安全冗餘標準呈幾何級數增長，傳統的電氣架構已無法負擔。

英飛凌 (Infineon) 執行長在 2026 年年初的全球汽車半導體峰會上所言：「汽車電氣化已經進入第二階段。我們不再僅僅關注如何驅動電機，而是關注如何以最少的分立元件、最低的熱損耗以及最聰明的區域配電，來管理整車從 800V 高壓到 48V/12V 低壓的每一瓦能量。晶片級與結構級的極致融合，是贏得 2026 年後汽車市場的唯一鑰匙。」

這種趨勢直接倒逼了整車結構的變革。過去 18 個月內，電芯 (Cell) 直接集成至底盤 (CTB/CTC) 的無模組電池技術全面普及，這導致電池包內部

物理空間被壓榨至極限，傳統密密麻麻的採樣線束與低壓接插件已經無處安放。這種物理空間的「去冗餘化」，反向推動了低壓供電向區域架構 (Zone Architecture) 以及智能、無線化配電拓撲的實質性落地。

功率半導體基石：SiC 進入 8 英寸時代

隨著碳化矽 (SiC) 產業化進程的加速，其核心焦點已從前幾年的“盲目追求技術指標”全面轉向“規模化量產下的極致降本與微觀架構的精細化迭代”。這一轉變在 8 吋 SiC 晶圓的產能爆發、新型溝槽柵 (Trench Gate) 結構的全面成熟，以及雙碳化矽 (Dual SiC) 前後軸配電網絡的普及中得到了最直觀的體現。

8 吋 SiC 晶圓產能爆發驅動的車用市場平權

直到 2024 年底，全球汽車級 SiC MOSFET 仍有超過七成依賴 6 吋 (150 mm) 晶圓線生產，高昂的襯底與外延成本直

接抬高了高壓車型的物料清單 (BOM) 成本。

從 6 吋轉向 8 吋並非簡單的晶圓面積放大，而是出芯率高達 80% 至 90% 的物理跨越。根據權威調研機構 Yole Group 於 2026 年第一季發布的《Power SiC 2026 Industry Report》報告指出：自 2025 年第三季起，全球主要晶圓廠的 8 吋 SiC 襯底與外延片綜合良率普遍突破了 68% 的商業臨界點，使得單顆車規級 SiC 晶片的晶圓級分攤成本相比 2024 年同期大幅暴跌 30% 到 33%。這直接引發了 2026 年初高壓電控逆變器核心模組的連鎖降本效應。

SiC MOSFET 徹底擺脫了“高端旗艦車專屬”的標籤，開始大舉下沉並標配於 3 萬美元以下的主流乘用車型。

溝槽柵 (Trench Gate) 結構演進與高溫 Rds(on) 優化

2025 至 2026 年全面成熟的非對稱溝槽柵與雙溝槽柵結構，通過精密的垂直蝕刻製程將導通溝道由水平改為垂直，在大幅提升晶片表面通道密度的同時，徹底消除了 JFET 電阻。2026 年最新量產的車規級溝槽柵 SiC (例如英飛凌 CoolSiC Gen2 以及意法半導體最新的第五代車規 SiC 技術)，成功將 175°C 高溫下的 Rds(on) 漂移控制在常溫的 1.3 至 1.4 倍以內，高溫下的導通電阻整體降

低了約 30%。

在實際整車運行中，這一指標意味著驅動逆變器在高負載狀態下的導通損耗直降近三分之一，使整車在高速公路等典型高能耗場景下的綜合續航里程提升了 1.5% 到 2%。

安森美 (onsemi) 汽車功率方案副總裁在 2026 年 3 月的全球汽車電氣化技術論壇上明確指出：「過去我們在優化逆變器時，總是試圖通過外部散熱器來解決 SiC 的高溫發熱問題。而 2025 和 2026 年的溝槽柵技術迭代，讓我們直接在晶片本徵層面解決了發熱源頭。175°C 時導通電阻漂移的壓制，是動力總成能效跨越的新里程碑。」

前後軸雙碳化矽 (Dual SiC) 與多元混合拓撲演進

在整車動力域的配電系統配置上，一個顯著技術特色是“雙碳化矽 (Dual SiC)”主驅平台的全面普及。

2025 ~ 2026 年新上市的高性能四驅車型 (如小米 SU7 Ultra 量產版、極氪系列最新迭代版本以及華為鴻蒙智行旗艦系列) 幾乎全線轉向前後雙軸均配備 SiC MOSFET 逆變器的“全碳化矽架構”。全碳平台配合先進的微秒級扭矩分配算法，能夠在日常輕載巡航時，精準控制其中一個 SiC 逆變器進入零功耗的動態待機狀態；而在加速或能量回收時，雙軸

SiC 以高達 99% 的逆變效率瞬時協同工作，徹底消除了過去硅基 IGBT 頻繁啓停、切換響應滯後所帶來的尾端開關損耗。

同時，針對預算極度受限的 2 萬美元以下車型，市場也演進出了極具成本效益的多元混合拓撲方案。在這些方案中，業界流行將“碳化矽二極管 (SiC SBD) 與硅基 IGBT”合封在同一個功率模組內 (Hybrid Module)。它成功利用了 SiC SBD 零反向恢復電流的物理特性，幫傳統 IGBT 減少了高達 40% 的開通損耗，成為主攻下沉市場的利器。而在低壓配電端，氮化鎵 (GaN) 功率器件也大舉進入車載充電器 (OBC) 的低壓側與 48V DC-DC 的高頻切換電路中，與高壓側的 SiC 形成了完美的第三代半導體高低壓協同鏈條。

SiC MOSFET 晶片本體在微觀結構與材料成本上的突破，與外部封裝材料及製程的演進存在著密不可分的因果關係。正是因為溝槽柵技術將晶片功率密度推向了物理極限，傳統的單面散熱與錫膏焊接才徹底無法滿足散熱需求，這便直接倒逼了封裝領域從“銀燒結 (Silver Sintering)”向“抗氧化銅燒結 (Copper Sintering)”以及“雙面水冷陶瓷基板”的變革。

封裝製程與材料向能效極限衝刺

當碳化矽晶圓在完成製程迭代後，其優異的物理特性——高達 175°C 至 200°C 的極限工作結溫、超過 100 kHz 的高頻切換速度——迅速對傳統的車載功率模組封裝技術提出了近乎毀滅性的挑戰。如今，封裝製程不再僅僅是保護晶片的“外殼”，而是直接決定整車動力電源系統能效上限與 BOM 成本的核心戰場。產業在此期間發起了一場材料級與拓撲級的實質性變革。

1. 抗氧化銅燒結技術的產業化突破

全球功率電子材料領域最引人注目的突破，當屬抗氧化銅燒結 (Copper Sintering) 技術的全面產業化。銅的導熱率可達 250 至 300 W/m·K，在電遷移抗性與機械強度上甚至優於銀，而其原材料成本卻比銀低了將近 80%。

根據權威研究機構 Yole Group 於 2026 年 5 月發布的最新產業專訪報告指出：以 CuNex (Schlenk 旗下大廠) 以及賀利氏 (Heraeus) 最新獲得 2025 全球技術獎的 PE360 汽車級銅燒結膏為代表，封裝產業通過導入創新的原位還原有機載體與包裹技術，成功實現了在高溫 (約 200°C)、低壓力甚至無真空保護的常規車規

級產線環境下進行高性能銅燒結。這項材料級革命在 2026 年全面解鎖了高產量、大眾化 EV 功率模組的極致降本。

2. 材料級突破：氮化矽 (Si₃N₄) AMB 陶瓷基板的全面標配化

過去，市場上普遍採用傳統的氧化鋁 (Al₂O₃) 或氮化鋁 (AlN) 直接敷銅 (DCB) 基板。然而，全面爆發的 800V 甚至高動態分佈式驅動工況，傳統 DCB 基板由於銅與陶瓷間的熱膨脹係數 (CTE) 錯配，在頻繁的瞬態熱衝擊下極易發生陶瓷脆裂或銅層分層剝離，失效比例一度高達 12%。

為了攻克這一瓶頸，氮化矽 (Si₃N₄) 活性金屬鈎焊 (AMB) 基板完成了從高端選配向 800V 系統全線標配的過渡。AMB 製程通過在鈎料中加入鈦 (Ti) 等活性元素，在超過 800°C 的高溫

下與氮化矽陶瓷表面發生化學反應，形成強力的冶金結合，而非傳統 DCB 的物理機械黏附。

智研產業界於 2026 年春季發布的《Active Solder for AMB Ceramic Substrate Market Outlook》白皮書數據顯示：隨著全球車企全面轉向全域高壓架構，預計到 2026 年底，僅電動汽車主驅逆變器領域就將為 Si₃N₄ AMB 基板創造超過 4.2 億美元的市場空間。其核心驅動力在於氮化矽高達 90 W/m·K 的導熱率以及超越常規陶瓷 3 倍以上的抗彎曲斷裂韌性。

以 Wolfspeed 最新裝車的 XM3 半橋 SiC 功率模組系列為例，其內部完全棄用了傳統基板，改用定制化的 Si₃N₄ AMB 陶瓷基板與銅底板的組合。這使得模組即使在 175°C 的持續高溫結晶運轉下，也能完全免疫因瞬間大電流切換產生的機

圖說：Denka Silicon Nitride AMB substrate.



圖片來源：denka.co.jp

圖說：Wolfspeed XM3 半橋 SiC 功率模組



圖片來源：wolfspeed.com

械應力。這種熱衝擊抗性讓整車功率模組的運行壽命無形中延長了 4 倍以上，徹底根治了 800V 快充車型在極限補能時的電壓擊穿隱患。

3. 雙面水冷 (DSC) 與直接晶圓冷卻技術的普及

除了材料層面的革新，封裝的物理幾何拓撲也迎來了 3D 結構的進化。傳統的單面 Pin-Fin (針狀散熱鱗片) 散熱技術，晶片產生的熱量只能單向向下傳導，晶片上表面的塑封料或打線層則成了“蓄熱槽”，嚴重限制了開關頻率的進一步推高。

截至 2026 年 6 月，以日本電裝 (Denso)、羅姆 (ROHM) 以及日立能源 (Hitachi Energy) 最新披露的技術專利與量產解構來看，直接雙面液冷 (Direct Double-Sided Liquid Cooling, DSC) 已成為新一代高功率密度逆變器的核心標準。

此種 3D 封裝消除了傳統粗重的鋁鍵合線 (Wire Bonding)，改用上下兩片對

稱的金屬錐墊或銅直連結構 (Copper Bump)，將晶片上下兩面同時焊接在兩塊 AMB 陶瓷基板上。更具顛覆性的是日立能源於 2025 年下半年發布的直接晶圓冷卻 (Direct-die Cooling) 演進方案：冷卻液不再隔著厚厚的金屬底板進行間接散熱，而是通過專門設計的中空密封外殼與微通道結構，讓冷卻液體直接流經靠近晶片表面的上下金屬覆蓋層。

這種極致的拓撲設計徹底消除了底板基膏層的固有熱阻，將整個封裝系統的綜合結殼熱阻暴砍了 35% 到 40%。在體積和重量較傳統 62mm 標準模組直接縮減一半的前提下，DSC 封裝將逆變器的極限功率密度推高了近 1.5 倍。這為四電機獨立驅動車型在寸土寸金的輪邊空間內布置超高功率電控系統，提供了最為關鍵的散熱底牌。

車載電源 (OBC/DC-DC) 向高頻高密與雙向演進

隨著整車電壓平台全面向 800V 乃至更高架構演進，車載充電器 (OBC) 與低壓直流轉換器 (DC-DC) 這類核心車載電源組件，其傳統的拓撲結構與磁性元件設計已遭遇嚴重的物理瓶頸。受益於 SiC/GaN 寬禁帶半導體的全面普及，車載電源系統的切換頻率從傳統的 50 kHz 劇烈推高至 150 kHz 至

300 kHz 區間。

在高頻化的衝擊下，傳統繞線式變壓器與電感器由於存在嚴重的集膚效應 (Skin Effect) 與鄰近效應 (Proximity Effect)，在超過 100 kHz 的環境下導線發熱會呈指數級上升。印刷電路板 (PCB) 平面變壓器與高頻磁集成 (Integrated Magnetics) 技術實現了決定性的量產突破。平面變壓器利用多層 PCB 的銅箔作為繞組，將原本立體、臃腫的銅線圈“壓扁”成平面結構，不僅散熱面積大幅增加，更將漏感控制在 1% 以下。在此基礎上，最新的電源模組全面導入了磁集成技術，將傳統相互獨立的隔離變壓器與諧振電感器共用同一個鐵氧體磁芯。這種磁 / 電結構的深度去冗餘設計，成功將車載電源內磁性元件的體積砍掉 40% 以上。

根據全球權威產業調研機構 TrendForce (集邦諮詢) 於 2026 年第一季度發布的《2026 全球汽車功率電子市場深度解析報告》指出：截至 2026 年 5 月，在新出廠的 800V 高壓車型中，車載電源 (OBC/DC-DC/PDU) 的『三合一』或動力域『多合一』集成滲透率已突破 78%。其中，採用平面變壓器與高頻磁集成技術的二代高密模組，已將車載電源的綜合功率密度從 2024 年底的 2.1 kW/L 瘋狂推高至 3.6 kW/L，重量則減輕了 32%。

這種極致的微型化不僅釋放了前艙空間，更與同期落地的雙向交互拓撲 (DAB / CLLC) 產生了完美的技術協同。隨著全球多地 (如歐盟全面推行車載雙向補能標準，以及中國國家電網全面啟動車網互動量產試點) 對 V2G (Vehicle-to-Grid, 車輛向電網送電) 與 V2H (Vehicle-to-Home, 車輛向家庭供電) 的政策與市場雙重驅動，傳統單向拓撲加速退場。

截至 2026 年年中，對稱式 CLLC 諧振拓撲與雙主動橋 (DAB, Dual Active Bridge) 拓撲已正式成為主流主機廠新一代 11 kW / 22 kW OBC 的標配。這兩種拓撲結構在原邊和副邊均採用全控開關管 (全橋 SiC MOSFET)，具備完全對稱的雙向電能傳輸能力，且在正向充電與反向放電狀態下均能實現全負載範圍的零電壓開關 (ZVS)

或零電流開關 (ZCS) 軟切換。

台達電子 (Delta Electronics) 在 2026 年 4 月舉辦的台北國際汽車零配件展 (AMPA 2026) 技術論壇上明確指出：高頻磁集成與雙向 CLLC 拓撲的結合，解決了 800V 系統下雙向功率轉換的效率難題。台達最新量產的 11 kW 雙向 OBC 在正向補能與反向 V2G 輸出時，均能將綜合轉化效率穩定維持在 96.5% 的極高水平，這意味著電動汽車在作為移動儲能電站向家庭逆變供電時，自身的轉換內耗已經可以忽略不計。

圖說：台達最新量產的雙向 OBC 充電機



圖片來源：deltaww.com

電壓架構兩極分化：800V 的黃金時代與 1200V 的邊界探索

產業過去曾盲目推測「電壓越高越好、1200V 將迅速取代 800V」的激進論調，在過去的商業實踐中被市場修正。當前的全球電氣化格局已演進為極其精準的陣營分化：乘用車市場全面進入 800V 的「平權與普及黃金期」，而 1200V 架構則作為一種強力的「重工業補能武器」，在商用重卡、工程機械以及極少數頂級電動超跑中開闢出精準的特種戰場。

1. 800V 高壓架構的「大眾化平權時代」

以中國大陸為例，在過去的 18 個月裡，800V 全域高壓平台 (指電池、電機、電控、車載電源乃至空調壓縮機等全

表：車載電源 (OBC/DC-DC) 核心技術參數與拓撲形態演進對比

技術與商業維度	2024 年底傳統架構	2025~2026 年 6 月最新演進架構	核心技術效益與演進亮點
電路切換頻率	45 kHz ~ 70 kHz	150 kHz ~ 300 kHz	由 SiC/GaN 寬禁帶半導體驅動，開關頻率提升數倍，直接推動元器件微型化。
變壓器結構	傳統立體繞線式變壓器 / 電感	PCB 多層銅箔平面變壓器	消除高頻集膚效應，漏感控制在 1% 以下，散熱面積與耐壓強度大幅提升。
磁性元件架構	電感與變壓器物理分離、各自獨立	高頻磁集成 (變壓器與電感合一)	共用鐵氧體磁芯，消除結構冗餘，使磁性元件整體體積劇烈壓縮 40%。
核心電路拓撲	單向移相全橋 (PSFB) 或 單向 LLC	對稱式雙向 CLLC / 雙主動橋 (DAB)	具備完全對稱的雙向電能轉換能力，正反向均實現全負載 ZVS/ZCS 軟切換。
綜合功率密度	1.8 kW/L ~ 2.2 kW/L	3.4 kW/L ~ 3.8 kW/L	模組綜合功率密度近乎翻倍，整體重量減輕 32% 以上，加速充配電高度集成。
V2G 轉化效率	不具備此功能，或逆變效率低於 88%	正 / 反雙向均穩定達到 96.5% 以上	攻克雙向高壓轉換的能耗頑疾，反向家庭 / 電網供電時的內耗降至物理極限。

套電氣部件均原生支持 800V 耐壓) 完成了從「4 萬美元以上高端豪華秀場」向「3 萬美元以下的主流國民車型」的全面下沉。這一大眾化普及的背後，是全球超充基礎設施與車端 C-rate(充放電倍率) 電芯技術的深度閉環。

根據中國汽車工業協會 (CAAM) 與中國充電聯盟於 2026 年 4 月聯合發布的《2025-2026 中國新能源汽車高壓快充產業生態發展報告》數據顯示：2025 年新上市的純電動車型中，原生 800V 架構車型的市場滲透率已由 2024 年底的 11% 暴增至 2026 年 5 月的 43%。尤其在 2 萬美元至 3 萬美元的核心主力市場，800V 平台已基本完成對傳統 400V 平台的實質性替代，正式形成 800V 全域平權。

這種平權直接消除了消費者的「補能焦慮」。配合時下全球主流能源巨頭與車企 (如華為液冷超充網絡、極氪 V3 極充航站、特斯拉 Supercharger V4 升級版) 井噴式鋪設的 4C/5C 超充網絡，800V 平台成功將「充電 10 分鐘，續航 300+ 公里」轉化成更多用戶體驗。車企不再需要為主打大眾市場的車型堆砌動輒 100 kWh 以上、既沉重又昂貴的大電池包，而是通過「800V + 75 kWh 磷酸鐵鋰神行 / 金磚電池」的組合，既把整車 BOM 成本壓低到競爭

區間，又提供了媲美燃油車加油的高效補能體驗。

2. 1200V 架構的技術邊界與乘用車止步的原因

與 800V 的大眾化普及截然不同，1200V 高壓架構在乘用車領域的進展顯得極為克制。截至 2026 年年中，除了布加迪 (Bugatti Rimac) 新一代電驅平台、保時捷極限賽車驗證車以及比亞迪仰望高性能仰望 U9 改良版等極少數追求極速、用以克服電機在 22,000 rpm 以上超高轉速下產生強大「反向電動勢」的性能怪獸外，大眾主流乘用車企在過去 18 個月內一致選擇了對 1200V「按兵不動」。

這種克制基於嚴格的邊際效益遞減與半導體物理瓶頸。一旦將系統架構強行推高至 1200V，為了保證安全，車內的功率器件、逆變器和絕緣絕緣材料的擊穿電壓必須飆升至 1700V 甚至更高。

安森美 (onsemi) 高級副總裁在 2026 年初的底特律汽車電子安全論壇上曾一針見血地指出：現階段 1700V 的車規級 SiC MOSFET 在晶圓生長過程中，其晶格缺陷率 (Defect Density) 呈幾何級數上升，導致產線良率極低。2026 年一隻 1700V 模組的綜合採購成本是 1200V 模組的 2.6 倍。對於家用乘用車而言，從 800V 提升到 1200V 縮短的區區 3 分鐘充

電時間，根本無法覆蓋高達數千美元的整車高壓 BOM 成本激增。800V 就是現階段乘用車電壓平台的黃金分水嶺。

3. 商用重卡主戰場與兆瓦級超充 (MCS) 車端配電創新

在遠離城市乘用車的幹線物流與重型物資運輸領域，1200V 架構在過去 18 個月內卻迎來了「剛需爆發」。對於動輒搭載 350 kWh 到 600 kWh 電池包的純電動重型卡車、大型拖頭或礦山工程機械而言，如果繼續固守 800V 平台，即使使用高達 800A 的極限電流，充滿電也需要一個半小時以上，這對於講求高週轉率的商業物流而言是不可接受的。

因此，隨著國際充電標準倡導組織 CharIN 於 2024 年底正式確立、並在 2025 年開始全面啓動商業化落地的兆瓦級充電系統 (MCS, Megawatt Charging System) 標準，1200V 成為了純電重卡的標準電壓。在 MCS 標準下，充電電壓高達 1250V，最大電流衝破 3000A，綜合補能功率達到驚人的 3.75 兆瓦 (MW)。

區域架構 (Zone) 與 48V 系統落地

當高壓平台在 800V 乃至 1200V 區域正在進行材料與拓撲的重塑，整車的低壓配電網絡也迎來了自汽車誕生一個

世紀以來最劇烈的顛覆。高階自動駕駛的算力井噴與底盤線控化 (X-by-Wire) 的實質落地反向逼迫低壓配電網絡全面重構。傳統以功能劃分的「中央集中式域控制器」和「12V 鉛酸蓄電池」配電體系，在過去 18 個月的商業量產車型中加速瓦解，取而代之的是由物理位置主導的區域供電架構 (Zone Architecture) 與 48V 低壓網絡的強勢崛起。

1. 物理與邏輯的去中心化：由「域」向「區域 (Zone)」的空間重組

全球新一代純電平台 (如比亞迪 e 平台 4.0、吉利 SEA 浩瀚架構最新演進版、以及寶馬 2025 年底投產的 Neue Klasse 新世代平台) 全面棄用了過去將車身電子、動力、智駕分開管理的“域控制架構”，全面跨入基於地理物理位置的區域控制器 (ZCU, Zone Control Unit) 供電網絡。

圖說：BMW Neue Klasse 新世代平臺



圖片來源：bmwgroup.com

在這種全新的低壓配電拓撲中，整車配電不再依靠一個位於儀表板下方的巨大中央保險絲盒，而是將配電權力下放到分布在車身「前、後、左、右」四個角落的 ZCU。每個區域控制器就像一個地方政府，就近管理該物理區域內的所有用電終端 (例如：左前 ZCU 負責左前大燈、左前雷達、左前車窗馬達及懸吊執行器的供電與通訊)。這種物理位置的去中心化，打破了傳統線束必須從車尾穿過大半個車身連至車頭中央控制器的冗餘設計。在過去 18 個月上市的旗艦車型中，這種架構直接促成了整車低壓通信與供電線束總長度銳減了 40% 以上，為極度緊湊的整車空間清理出了寶貴的物理通道。

2. 智慧電子保險絲 (E-Fuse / Smart FET) 對傳統熔斷器的全面終結

與區域架構協同落地的，是低壓配電硬件元件的電路級

革命。2025 年至 2026 年年中，傳統的玻璃管、片狀金屬熱熔斷保險絲 (Fuse) 與機械式繼電器 (Relay) 加速退出歷史舞台，全產業在 ZCU 內部全面標配可編程的智慧電子保險絲 (E-Fuse，亦稱 Smart FET)。

傳統保險絲依賴電流過載發熱熔斷來保護電路，其響應時間通常在數百毫秒甚至秒級，且屬於“一次性消耗品”，一旦熔斷車輛便直接癱瘓，必須人工更換。而 E-Fuse 則是由高性能矽基或氮化鎵基 MOSFET 晶片組成的固態智慧開關。

根據麥肯錫 (McKinsey & Company) 於 2026 年 3 月發布的《Automotive Software and Electronics Report 2026》全球汽車電子白皮書指出：

「截至 2026 年第二季度，全球一線智慧電動汽車供應鏈中，E-Fuse 的整體出貨量較 2024 年底暴增了 240%。」

作為歷史上發明並完美定義了汽車 MINI 葉片保險絲和 JCASE 卡式保險絲的行業鼻祖，Littelfuse 推出了車規級 eFuse 整合控制晶片 (如 LS2406 / LS1205 系列)。以其 LS24062RQ23 雙向負載開關為例，在極小的 QFN 封裝內集成了兩路具有 24 mΩ 超低導通電阻的 N-Channel MOSFET。針對線控底盤執行器、智駕運算平台等動輒需要數十安培至上百安培的線路，Littelfuse 藉

圖說：Littelfuse 48785



圖片來源：digikey

由其 48785 系列大電流固態直流接觸器 實施技術破局。該方案支持高達 200A 的持續電流與 500A 的瞬態浪湧電流，且擁有 IP67/IP69K 的極限車規防護等級。

以意法半導體 VIPower M09 系列與英飛凌 PROFET 智慧高邊開關為代表的晶片，已成功將車載低壓電路故障隔離時間從傳統的 100 毫秒縮短至 10 微秒級別，響應速度提升了上萬倍。

意法半導體公司新推出的 VIPower M0-9 四通道智慧高側驅動器，經過擴展的多通道電源開關產品系列可為汽車電源管理系統提供穩健的負載保護、精準的診斷和可靠的性能。

E-Fuse 的毫米級乃至微秒級斷路能力，為現代智慧汽車帶來了無可比擬的配電優勢。它不僅支持動態電流精準監測與軟件遠程重置（不需人工更換保險絲），更重要的是，它允許線束工程師精準匹配導線線徑。過去為了防止短路瞬間線束起火，工程師不得不把低壓線束做得極粗；而有了 E-Fuse

圖說：ST 推出的 VIPower-M09 車用智慧高邊驅動器



的超高速斷路保護，低壓導線可以直接選用最極致的細線。這項配電器件的固態化革新，在過去 18 個月內為整車低壓線束系統帶來了高達 20% 甚至 25% 的實質性輕量化減重，直接轉化為整車能效的提升。

3. 48V 低壓供電系統的崛起與三級電壓體系的成型

在低壓配電系統中，過去 18 個月最具顛覆性的演進莫過於 12V 供電牆的徹底倒塌。

自 20 世紀 50 年代全球汽車產業從 6V 升級到 12V 以來，12V 電壓已經統治了汽車低壓世界 70 年。然而，到了 2025 和 2026 年，隨著運算能力衝破 1000 TOPS 甚至 2000 TOPS 的中央運算晶片（如 NVIDIA DRIVE Thor 平台於此期間的大規模裝車）、以及高功率全線控轉向（Steer-by-Wire）和線控制動（Brake-by-Wire）的全面量產，系統的瞬態功率需求動輒飆升至 2 kW 至 3 kW 之間。

圖說：NVIDIA DRIVE Thor 平台



圖片來源：nvidia.com

在特斯拉 Cybertruck 開創性嘗試的啓發下，全球主流車企在 2025 年至 2026 年 6 月間加速完成了向 48V 低壓系統的實質性倒戈。當低壓網絡升級至 48V 時，在相同功率下，電流直接驟降至原本的四分之一（僅約 62.5A），導線發熱損耗則暴跌至原來的 十六分之一。這使得車企可以用極細的銅線輕鬆驅動高大上的智駕計算機和線控底盤執行器。

博世 (Bosch) 智慧交通業務部全球總裁在 2026 年 4 月的北京國際車展技術發布會上表示：

「12V 低壓系統已經無法承載 2026 年高階智駕與全線控底盤的野心。產業在過去 18 個月內加速達成共識，正式確立了『高壓 (800V) — 區域低壓 (48V) — 局部終端 (12V)』的三級動態配電新常態。48V 作為車身骨幹網絡負責長距離、大功率傳輸，僅在最末端保留微型局部 DCDC 將 48V 轉換為 12V，用以兼容那些不需改造的微型傳感器與小功率 ECUs。這套體系將低壓配電銅耗降低了 70%，是智慧汽車電氣架構的必然終局。」

這種三級電壓體系的成型，標誌著汽車低壓配電網正式告別了臃腫、混亂的過渡期。48V 區域架構在車內鋪設了一條高效、輕量的“低壓高速公路”，為主驅 800V 高壓補能

與車內高階智駕運算之間，搭建起了一座堅固且極具成本效益的配電橋樑。

電池與動力重拾無線技術

「空間去冗餘」與「極致響應」的變革力量正在迅速深入車最核心、最沉重的能量源泉——動力電池包以及高壓功率分配單元 (PDU)。從 2025 年至今，車載儲能與動力分流拓撲告別了過往依靠密集物理採樣線束與宏觀機械斷路的舊時代。伴隨著超寬頻 (UWB) 無線通訊、晶片級零延時採樣以及火工智能熔斷技術的實質量產，電池與動力域配電成功向「微秒級高動態安全隔離」和「結構無線化」完成了高階突圍。

1. 無線電池管理系統 (wBMS) 的 UWB 技術破局與高階突圍

無線電池管理系統 (wBMS) 在誕生之初曾被寄予厚望，被譽為擺脫電池包內部重達數公斤隔離線束與易鬆脫接插件的「終極線束殺手」。然而在 2025 年之前，全球車企在實踐中遭遇了慘烈的商業卡關：基於 2.4 GHz 窄頻 (如低功耗藍牙 BLE) 的第一代 wBMS，在密閉的金屬電池箱 (法拉第籠) 內部面臨嚴重的「訊號地獄」，電磁反射干擾與多徑衰落極易引發數據丟包；同時，為防範

網絡安全漏洞而加入的加密算法大幅拉高了晶片成本，使得 wBMS 的性價比無法說服大眾車型主機廠。

這一沉寂在被超寬頻 (UWB) 通訊技術與結構整合 (CTP/CTB) 的物理剛需徹底打破。2025 年開始，一線半導體大廠全面倒戈向高頻脈衝無線技術。以恩智浦 (NXP) 於近期大規模裝車量產的新一代 UWB wBMS 解決方案 (包含 BMA6060 與 BMA6061 無線節點晶片) 為代表，該技術運行於 6.0 GHz 至 8.5 GHz 的寬闊頻譜，利用極窄的皮秒級脈衝進行數據傳輸。

圖說：恩智浦新一代 UWB wBMS BMA6061 無線節點晶片



圖片來源：nxp.com

根據市場研究機構 Dataintelo 於 2026 年春季發布的《Global Wireless BMS Market Research 2026》產業白皮書指出，全球 wBMS 市場規模在 2025 年已達到 38 億美元，估算車用市場規模在 15 億美元左右，正展現出強勁的爆發力。與此同時，隨著歐盟 2026 年正式啓動『電池護照 (Battery

Passport)』數據合規審查，wBMS 晶片內置的電化學阻抗譜 (EIS) 診斷功能與不可篡改的無線數字身份，讓退役電池在二手回收與梯次利用時的拆解重組成本暴跌 85%，為車企算清了全生命週期的商業帳。

除了法規與補能安全，CTP (無模組電芯集成) 與 CTC (電芯集成到底盤) 結構的全面普及，更是將 wBMS 逼成了高階旗艦車型的硬性標配。當幾百顆大電芯被緊密擠壓在寸土寸金的車底盤外殼內時，傳統採樣線束在物理上已經「無處安放」，人工手動理線的製程出錯率極高。以吉利

SEA 浩瀚架構最新高密電池包以及寧德時代新一代麒麟電池高配版為例，UWB wBMS 的裝車不僅徹底消除了接插件老化鬆脫的安全隱患，更為電池包內部騰出了 10% 預留的物理空間，直接轉化為體積能量密度的實質攀升。

2. 分佈式多電機驅動倒逼的高動態 PDU 變革

動力端配電變革的第三個戰場位於高壓功率分配單元 (PDU)。四電機獨立驅動 (輪邊 / 輪穀電機) 技術從豪車的「技術圖騰」迅速走向中端車「標配選項」。當車輛進入極限過

彎、坦克掉頭或高動態矢量扭矩分配 (Torque Vectoring) 工況時，前後左右四個獨立的主驅逆變器會在幾毫秒之內向中央高壓母線發起劇烈、無規律的電流補償衝擊，傳統一進一出的靜態 PDU 面臨著高頻燒毀與母線電壓大幅波動的危機。

為此，聯合汽車電子 (UAES) 於 2025 年 3 月正式推向市場的全新一代 HVDU (高壓智慧集成分配單元) 解決方案，為高動態分佈式驅動奠定了硬體基礎。新型 PDU 內置了支持高達 500A 額定電流的多通道高頻母線分流拓撲，能夠配合車輛底盤域控制器的矢量

表：電池包與動力域高壓配電拓撲技術迭代對比

技術與拓撲維度	2025 年之前的傳統配電方案	2025~2026 年 6 月最新演進方案	核心技術破局點與指標
BMS 通訊與採樣線束	密集的高低壓隔離硬線與物理接插件	基於 UWB(超寬頻) 技術的 wBMS	運行於 6.0~8.5 GHz 脈衝頻段，免除金屬反射干擾，釋放 10% 電池空間。
電芯採樣同步性	模組級輪詢採樣，通道間存在毫秒級延遲	智能電芯 (Smart Cell) 晶片級全同步	實現 0 微秒去同步延遲，串行鏈路最大延時控制在 4 微秒以內。
單體電芯故障隔離	無法單獨隔離，需切斷整簇電池	微秒級單體電芯主動開關隔離拓撲	在熱失控或內短路前兆出現的微秒級內切斷單體連接，支持車輛帶病跛行。
PDU 功率分配通道	靜態單 / 雙通道分流，無法應對高頻瞬態變動	多通道高動態母線動態分流拓撲 (HVDU)	支持 150A~500A 高動態頻寬，完美適應四電機矢量扭矩毫秒級劇烈電流補償。
極限短路保護斷路速度	依賴機械式繼電器或常規熔斷器 (>30ms)	智慧火工熔斷器 (Pyrofuse)+ 專用驅動	藉由 TI DRV3901-Q1 晶片驅動，短路引爆物理斷路時間縮短至 0.5 毫秒以內。
二次回收與全生命週期	拆解線束成本高，不同車型接口無法兼容	電芯無線數字身份 + 電池護照 (EU 2026)	退役電池無需重新接線，無線網關自動配對重組，二手梯次利用成本降低 85%。

算法，在毫秒內完成各驅動通道間的電流動態分配。

同時，面對四電機系統極限狀態下高達上千安培的短路電流衝擊，傳統電磁繼電器的物理斷開速度（通常大於 30 毫秒）已無法在逆變器 SiC 晶片被炸毀前實施保護。以德州儀器 (TI) 量產的 DRV3901-Q1 智慧火工熔斷器 (Pyrofuse) 驅動晶片為核心的智慧配電網絡正被廣泛使用。該晶片內置了高可靠性的雙冗餘 squib（電雷管）驅動迴路與主動集成電荷泵。一旦高動態 PDU 的霍爾電流傳感器捕捉到不可逆的短路突波，該架構能在 0.5 毫秒內引爆 Pyrofuse 內部的微量化學藥劑，利用爆炸衝擊波實施物理斷路，並在微秒內完成強磁滅弧，以肉眼無法察覺的速度將故障電機逆變器與主電池包徹底剝離，保證其餘動力通道與高壓系統的絕對安全。

圖說：德州儀器 (TI) DRV3901-Q1 智慧火工熔斷器



圖片來源：ti.com

AI 驅動智慧動力

當汽車電源系統在晶圓底層、封裝材料、配電網拓撲及電池無線化等硬體維度全面跨入全新世代後，如何高效協調這些高度複雜且瞬息萬變的能量流，成為了擺在汽車工程師面前的終極課題。現在的答案是全面導入 AI 算法與晶片級跨域融合，實現全車「智慧動力域一體化 (Intelligent Power Domain Integration)」。動力電子系統正式告別了過去各部件“各自為戰、依賴固定查表 (Look-up Table) 算法”的機械控制時代，跨入由神經網絡實時感知、預測並動態分配能量的全新智能範式。

這場變革的第一個實質性表現是多合一動力域控制 (X-in-1) 從物理重組走向晶片級與系統級的深度融合。現在全新底盤架構中，車企不再滿足於將 OBC、DC-DC、PDU、逆

變器和熱管理閥體進行簡單的外殼機械拼裝，而是全面採用中央超算晶片或高性能多核實時微控制器（如英飛凌於此期間全面放量的 AURIX TC4x 系列，或高通 Snapdragon Ride Flex 系列）。這些晶片具備強大的硬體虛擬化與專用 AI 運算加速單元 (NPU)，能夠在單顆晶片內同時運行主驅向量控制、雙向補能變頻、智慧低壓配電 (E-Fuse 管理) 以及熱管理液流預測等數十個核心線程。這種晶片級的融合消除了解析度受限的傳統 CAN 總線通訊延時，將動力域內部的控制響應速度推向了微秒級的物理極限。

在強大算力的支撐下，預測性健康管理 (PHM, Predictive Health Management) 與 AI 算法正式進駐新能源汽車的動力電源系統。碳化矽功率模組在經歷數百萬次高頻開關切換與劇烈熱循環後，其內部極易產生鍵合線剝離或銅燒結層微裂紋等電老化現象；同樣地，整車低壓配電網絡中的 E-Fuse 在長期承受瞬態高負載衝擊後也會產生熱疲勞。以華為 DriveONE 新一代動力域系統和特斯拉最新電控架構為代表的前沿方案，導入了線上 AI 神經網絡模型。該算法通過實時採樣 SiC 模組的瞬態導通壓降與動態溫升曲線，利用邊緣計算實時反推晶片內部的微觀熱阻變化。

除了防範硬件失效，AI 算

表：動力域能量管理範式轉換對比 (傳統規則控制 vs 2026 年 AI 智慧動力域)

技術與控制維度	2025 年之前的傳統規則控制	2025 ~ 2026 年 6 月最新 AI 智慧動力域	算法驅動核心效益
硬體集成形態	物理上的幾何堆疊 (外殼拼裝式三合一 / 多合一)	晶片級 / 系統級跨域一體化 (X-in-1)	消除 CAN 總線通訊延時，實現微秒級超高速能量調度響應。
動力控制算法	固定的二維查表算法 (Look-up Table)，無法自我優化	邊緣輕量化神經網絡 (Neural Network) 實時優化	根據外部動態環境進行每秒上千次的極致求解，尋找能效最優解。
功率器件健康管理	依賴事後過流、過溫保護，發生故障直接癱瘓	預測性健康管理，實時線上電老化診斷	提前 50 毫秒 ~ 數小時預警晶片裂紋，主動降頻限流，突發故障率暴跌 42%。
前後多電機扭矩分配	基於固定車速與油門開度的靜態剛性比例分配	結合智駕、雲端導航地圖的預測性動態扭矩矢量調度	提前感知前方地形與路況，智慧優化雙 SiC 電機扭矩，壓榨出 2%~3% 能效。
電控開關頻率管理	固定開關頻率 (例如全程固定的 10 kHz)	根據熱負荷與效率圖譜 (Efficiency Map) 動態跳變	高負載時降頻減熱，低負載時升頻優化控制，全面均衡整車熱耗與電耗。

法更展現出其在動態功率分配與極致能效壓榨上的恐怖統治力。在配備前後雙碳化矽 (Dual SiC) 電機驅動或分佈式四電機驅動的車型中，如何根據路況實時分配各個電機的功率，是決定每百公里電耗高低的關鍵。2025 年底開始，新一代智慧車型全面打通了動力域控制器與高階智駕域 (如 NVIDIA DRIVE Thor 平台) 以及導航雲端的數據鏈。

當車輛行駛時，AI 算法會提前數公里調取導航地圖中的三維地形坡度、實時路況擁堵程度、甚至當下的風向與路面摩擦係數。隨後，車載輕量化神經網絡模型會進行每秒上千次的實時優化求解，動態調節前後電機的扭矩配比、SiC 逆變器的切換頻率 (在 8 kHz 到

20 kHz 之間動態跳變)，並智慧控制車載高頻變壓器與大功率空調壓縮機的熱流交織。

華為智慧汽車解決方案 BU 動力域首席技術官在 2026 年 5 月舉辦的中國汽車智慧動力總成技術論壇上明確指出，傳統的動力控制是一套固定的、死板的代碼，而 2026 年的控制系統是一個活的、會進化的 AI 大模型。通過將導航大數據、車主行駛習慣與 SiC 微觀能效特性進行聯動，我們的智慧動力域管理系統能夠在車輛行進中，將主驅系統與整車配電系統的綜合轉化能效再度榨出 2% 至 3% 的純算法增量。在競爭白熱化的今天，這意味著不改動任何硬體線圈，就能憑空為用戶多提供 20 公里的真實續航。

小結

經過了數年的高速發展，在經濟前景充滿不確定性的今天，汽車電子與電氣架構 (E/E Architecture) 回歸到最為理性的理性工程學邏輯。

展望未來，汽車電源系統的演進腳步不會放慢。隨著固態電池 (Solid-State Battery) 在未來的逐步商業化試水，電芯內部更高、更不穩定的瞬態電壓波動，將對車載充配電拓撲提出全新的考驗；同時，隨著金屬氧化物半導體場效應晶體管 (MOSFET) 向超寬禁帶材料 (如氧化鎵 Ga₂O₃、鑽石半導體) 的極端邊界探索，未來的汽車主驅逆變器體積可能會進一步縮小。

汽車的電器系統變革，正引領著全球現代交通工具向全面智慧化、極致綠色化目標邁進。CTA