

電動農機技術——基本結構與核心

作物環境科 副研究員 吳有恒 分機 343

電動農機的定義

目前國際間對電動農機尚未形成統一的定義，但普遍認知可概括為：以電能取代傳統燃油，作為動力來源，驅動各類農業生產所需之機械設備。其核心驅動系統主要由電動馬達、電池模組，以及電源管理與控制系統構成。相較於傳統燃油農機，電動農機不僅能有效降低碳排放，亦具備智慧化應用與永續發展的潛力，因此，逐漸成為各國農業政策與技術發展的重要方向。

電動農機的特性

電動農機以電能作為核心驅動，展現出多層面的應用優勢。首先，電動馬達的能量轉換效率極高，超過85%，並可透過驅動控制技術（如向量控制與扭矩即時回饋）及適切的傳動設計，將高速運轉轉化為低速且高扭矩的輸出，以滿足農業生產中高負載與長時間作業的需求。此一特性不僅有助於提升農機運行的穩定性，也增強其在精細化操作上的適應能力。其次，相較於傳統燃油機具，電動農機在運轉過程中噪音與震動均顯著降低，且不產生直接碳排放，能有效改善田間作業環境，並減少對操作人員、畜禽及作物的影響。再者，電動驅動系統結構相對簡單，零件數量較少，使其在可靠度與維護上具優勢，具有較低的故障率與維護需求，運行壽命較長。此外，電動農機極易與智慧感測器及數位控制技術結合，可支援精準農業的多元應用，包括能源管理、數據回傳以及遠端監控等。此類智慧化功能不僅能提升

農業生產效率，亦有助於建立以數據為基礎的決策支援系統。

電動農機的涵蓋範圍

電動農機的涵蓋範圍一般著重在田間作業的處理，包含多功能主機型（如電動曳引機、電動管理作業機），可透過附掛具完成耕耘、施肥、噴藥、收穫等多項工作；專用機型（如電動搬運車、電動播種機、電動移植機、電動插秧機、電動收穫機、電動噴霧機/車、電動施肥機/車），針對特定作物或作業流程設計；及基本機型（電動中耕機、電動割草機），主要取代人工操作。美國農業與生物工程師學會（American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE）對於電動農機的分類則強調其來源與驅動模式的差異，分為純電動農機（Battery Electric Vehicle, BEV）、混合動力農機（Hybrid Electric Vehicle, HEV）、燃料電池農機（Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV）等。

電動農機的基本結構與核心技術

（一）馬達

電動農機是以馬達驅動行走機構與作業系統，不同類型的馬達有不同的應用特性。幾種常用於電動農機的馬達及其特性如下：

直流無刷馬達（Brushless Direct Current, BLDC）：其結構簡單、效率高且維護需求低，可提供良好的速度控制與瞬時啟動扭矩，常被應用於中小功率的農機具

上，如割草機、噴霧機或電動搬運車。尤其具備低噪音與長壽命特點，特別適合於設施內作業。

永磁同步馬達 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)：具備高效率、高功率密度與優異的扭矩控制性能，可在長時間作業中維持良好的能效與續航表現，適合用於移植機或收穫機等需要穩定扭矩的設備，其缺點則在於成本較高。

交流感應馬達 (Alternating Current Induction Motor, ACIM)：此類馬達技術成熟，具耐用、成本低廉與溫度適應性強等優點，適合用於液壓泵、抽水機或風扇等長時間運轉的輔助系統。然而，其效率與功率密度低於PMSM，在主驅動應用上較少。

步進馬達 (Stepper Motor)：主要優勢在於高定位精度與控制簡單，適合用於低速、小功率的精準控制系統，例如播種控制器、施肥量控制閥等自動化模組。在電動農機中，它通常不作為主驅動用，而用於精準作業的細部控制。

(二) 電池技術

在電動農機的發展中，鋰離子電池是目前最核心的能源技術。相較於傳統鉛酸電池，它具備能量密度高、重量輕、充電效率佳以及循環壽命長等優勢，因此能夠支援農機長時間、大功率的作業需求。一般的農田作業環境往往伴隨高溫、粉塵、濕氣與持續震動，鋰離子電池系統在設計上必須兼顧耐用性與安全性，這也是農機與一般電動車用電池設計的最大差異之一。

目前常見的鋰離子電池有三元鋰電池 (Nickel Cobalt Manganese Lithium-ion

Battery/ Nickel Cobalt Aluminum Lithium-ion Battery, NCM/NCA)、磷酸鐵鋰電池 (Lithium Iron Phosphate Battery, LFP)、錳酸鋰 (Lithium Manganese Oxide Battery, LMO) 與鈦酸鋰 (Lithium Titanate Battery, LTO) 電池，其中三元鋰電池 (NCM/NCA) 因能量密度高，適合應用於大型或長續航需求的電動曳引機與收穫機。它可以在有限的空間內提供更長的作業時間；不過其材料成本較高，且對熱管理與電池管理系統 (Battery Management System, BMS) 的要求嚴格，一旦控制不佳，可能導致熱失控的風險。

磷酸鐵鋰電池 (LFP) 常見於中小型電動農機，它的優勢在於熱穩定性佳、不易燃燒爆炸，循環壽命可達3,000次以上，特別適合長時間與高頻率的農業應用；缺點則是能量密度較低，導致同樣重量下可儲存的電量少於其他鋰離子電池。

除了主流的LFP與三元鋰電池外，LMO和LTO也應用在部分農機或小型設備。LMO成本較低，但循環壽命短；LTO則有超長壽命與快充能力，但能量密度過低，導致其體積與重量過大，限制了實際的應用。近年來，鈉離子電池也開始被視為電動農機可能的下一步選擇，因其材料來源豐富、成本較低，且在低溫環境下表現較佳，特別適合寒冷地區農業使用。

在系統設計方面，小型農機多採用48V或72V電池系統，中型電動曳引機則多為300–400V，而大型或燃料電池混合型機具需要600–700V。電池容量範圍則從2–10 kWh的小型移植或搬運機，到超過100 kWh

的大型電動曳引機不等。為確保穩定輸出與延長壽命，多數系統會配置風冷或液冷的熱管理設計。

此外，使用電動農機必須考慮電池的充電方式。快充技術可利用午休或短暫停工時補足電力，例如部分歐洲電動曳引機已支援DC (Direct Current) 快充，可提供足夠的功率匹配予大電池充電。在換電模式上，本場正進行相關試驗，透過模組化電池快速更換，解決連續長工時的作業問題；同時本場更建立「電動農機綠能充電示範站」，可結合太陽能板及風能，建構農業能源自給的綠能充電作業模式。

(三) 電控與智慧感測系統

在電動農機中，電控系統主要負責動力分配、能源管理與安全監控。電動馬達的驅動通常需要逆變器 (Inverter) 與馬達控制器 (Motor Controller)，逆變器可控制電源DC轉AC，並可依照負載變化自動調整馬達轉速，提高效率並降低耗能，以實現精準的扭矩與速度控制。另一方面，BMS則是核心之一，負責電池的充放電監測、溫度控制、單體電壓平衡與故障診斷，確保農機在高負荷與惡劣環境下仍能安全運作。此外，電控單元 (Electronic Control Unit, ECU) 還可統合液壓驅動及附掛機具的能源需求，並進行能源的優化分配，以降低耗電並延長續航力。

智慧感測系統是支撐智慧農業發展的核心基礎。在電動農機本體上，通常搭載多元感測元件以滿足不同作業需求。例如，位置感測器 (Global Positioning System/ Real-Time Kinematic, GPS/RTK) 可用於自

動導航與直線行駛控制，而慣性量測單元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 則能在坡地或顛簸環境下提供姿態修正，確保行駛穩定性與精準性。在作業負載監測方面，力矩與壓力感測器可即時偵測附掛機具的受力狀態，協助調整能量輸出，避免因過載而導致的效率下降或設備損壞。環境感測技術則涵蓋超音波、雷達、光達 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 及攝影機等，可用於障礙物偵測、作物行列辨識與自動轉向控制，進一步提升農機自動化作業的安全性與可靠度。

在作物管理方面，智慧感測還包括光學與多光譜感測器，可量測葉面指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、作物生長勢與病蟲害情況，讓電動農機在作業過程中可即時蒐集作物資訊，並傳送至農場管理平台。這些資料再透過物聯網 (Internet of Things, IoT) 上傳至雲端，與農業管理系統 (Farm Management System, FMS) 結合，形成數據驅動的智慧決策系統。

此外，大型電動曳引機已導入了輔助駕駛系統。如人員近接感測、緊急自動剎車、智能駕駛顯示等，可確保駕駛者的使用安全。部分高階機種更具備「人機共駕」 (圖1) 模式，可在需要時由人工介入，或完全交由自動駕駛系統接管。

整體而言，電控與智慧感測系統讓電動農機不僅是「動力電動化」，更進一步走向「智慧平台」。透過精準的能源管理、自動導航與數據化感測，電動農機可實現更高效率、更低能源消耗與更安全的作業模式，



▲圖 1. 具無人駕駛功能之全電動 (BEV) 智慧曳引機 Monarch MK-V。

並為未來的「無人農場」奠定基礎。

結語

電動農機的發展，代表著農業機械由傳統燃油動力邁向電動化與智慧化的新階段。透過高效率馬達、先進電池技術以及精密的電控與感測系統，電動農機不僅能有效降低能源消耗與碳排放，亦能提升農事作業的穩定性與精細化操作水準。其結構簡化所

帶來的維護優勢，加上智慧感測與數據驅動決策的應用，將使其成為推動精準農業與永續發展的重要工具。隨著國際間對農業淨零排放與數位轉型的迫切需求，電動農機將持續在設計、能源管理與智慧平台整合方面深化應用，未來更有望透過「人機共駕」與無人化農場的實現，成為新世代農業革新的核心力量。