

小型電動曳引機之行走與液壓系統設計 與測試

洪滕週、顏炳郎

國立臺灣大學生物機電工程學系

摘 要

農業上大多以柴油曳引機為主。然而，若能將曳引機電動化，不僅可降低碳排放，亦能使操作者的工作環境更加安靜。因此，本研究將傳統燃油小型曳引機電動化，行走系統配備 72 V, 7.5Kw BLDC 主馬達及 72 V 驅動器。液壓系統的油泵馬達則根據曳引機液壓迴路的壓力需求、流量需求進行選型。考量耕耘與抬升作業需在瞬間提供高達 110 kgf/cm²的壓力，同時維持穩定的輸出流量，並具備良好的效率曲線，以降低能耗與發熱，確保長時間作業的穩定性。在馬達性能測試中，針對該曳引機於低速一檔至高速二檔下的轉速、電壓與電流進行量測；續航力方面，推估可連續作業約一小時。

關鍵詞：曳引機、農機電動化、BLDC 馬達、三點懸掛系統。

緒 論

近年來，全球碳排放量持續攀升，對氣候變遷的影響愈發嚴重。根據 2024 年全球碳計畫 (Global Carbon Project) 資料，全球化石燃料二氧化碳(CO₂)排放量預估將達 374 億噸，較 2023 年增加 0.8%^[1]。在臺灣的農業領域中，傳統柴油引擎仍為農業機具的主要動力來源，其運行過程會排放大量二氧化碳，成為農業碳排放的重要來源之一。統計顯示，全臺農業機械每年碳排放量約 917,150 公噸 CO₂(tCO₂/y)^[2]，約占全國總碳排放量的 30%，顯示農業機械的減碳潛力相當可觀。為達成 2050 淨零碳排目標，政府與民間企業已逐步推動農業載具電動化。相較於傳統柴油引擎，電動農機具具備零排放、低噪音、低廢熱與低震動等優勢，能有效降低農業生產過程中的碳足跡，並減輕對環境的衝擊。此外，低噪音特性有助於降低運行時的噪音污染，提升農民工作環境品質與周邊居民的生活品質。然而，目前臺灣在電動農機領域的普及率與認知程度仍偏低。農業機械從早期的牛隻與人力作業，發展至現今普遍使用的柴油引擎曳引機，雖然大幅減輕了農民工作負擔並提升生產效率，但柴油引擎在燃燒過程中會排放懸浮微粒與其他有害氣體，不僅造成空氣污染，也影響農村環境與居民健康。因此，推動電動曳引機的發展，不僅可減少碳排放，亦可改善操作環境與農業永續發展。

材料與方法

本研究旨在開發並評估一款以電動化為動力核心的曳引機，透過系統性設計與實地測試，驗證其在農田耕作中的性能與可行性。研究方法包括整車設計、系統選型、裝配與實驗測試三個主要階段。整車設計以現有 Kamco Teratrak 4W 為基礎，重新配置動力系統、油路系統與水路系統，以適應電動化所需的空間與性能要求。在系統選型方面，針對主馬達與減速機、油泵馬達與齒輪幫浦，以及水冷系統的構成元件，分別依據作業需求、性能參數與耐用性進行篩選與配置。完成裝配後，透過實地耕作測試與實驗室量測，獲取包括馬達輸出特性、液壓系統壓力等數據，以作為性能評估與後續優化的依據。

一、動力系統

電動曳引機之主馬達，用於曳引機的前進後退，以及驅動後方 Power Take-Off(PTO)進行翻耕、鬆土、築畦、播種等作業。根據農業機械動力需求文獻，一台額定功率約 10 kW 的曳引機，在進行耕地作業時，PTO 所需的輸出扭矩通常落在 100–250 Nm 的範圍內^{[3][4]}，視土壤性質、耕深與作業速度而異。本研究的馬達與減速機選型即依據此扭矩需求進行設計與驗證，確保能在不同耕作條件下維持穩定的動力輸出。本研究所開發之電動化曳引機，動力系統由主馬達與減速機構成。主馬達的部分使用國內電機大廠碩陽電機開發製作之無刷直流馬達，額定電壓 72VDC，額定功率 7.5kW，額定轉矩 18N-m(183.5kg-cm)，額定轉速 4000RPM±5%，搭配高效率驅動器以確保穩定輸出。馬達輸出軸經減速機傳遞至車輪及 PTO，藉由選用減速比提升輸出扭矩，以滿足耕耘及牽引作業之需求。

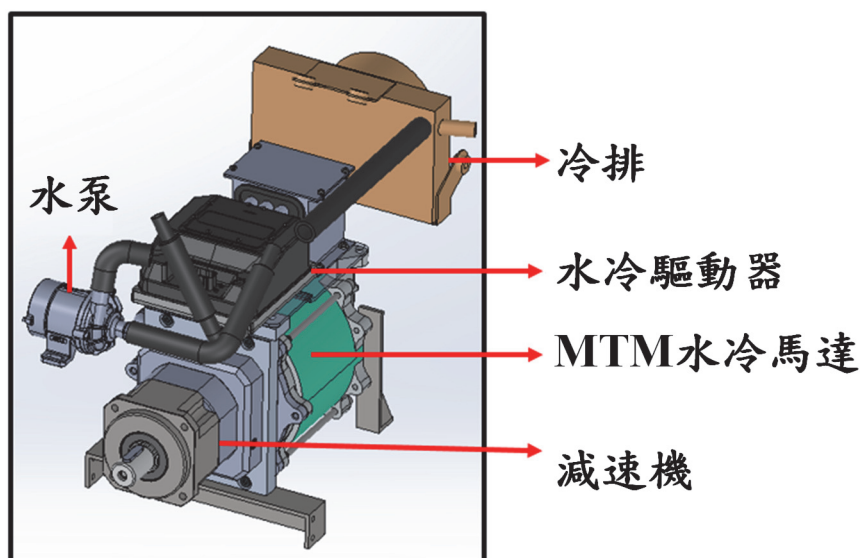


圖 1、主動力模組

二、油泵系統

本研究的油路系統負責轉向與後三點懸掛抬升機構的液壓供應，其中，三點懸掛依據 ISO 730:2009^[5]「農業拖拉機三點懸掛連接規範」設計，以確保符合國際農機具連接標準。系統設計依據自由體圖分析後方三點懸掛抬升，來算出需要最大的抬升壓力，進行選型與校核，確保各組件在高負載條件下仍具足夠的安全裕度與耐用性，且驗證三點懸掛抬升機構能夠抬升的最大重量。整體功能與配置如下：

必備作動功能：後三點抬升/下降，提供足夠推力與行程速度，滿足農具抬升及放下需求，採用齒輪泵浦搭配方向控制閥與油缸驅動。轉向：確保在怠速及滿載下均有優先流量供應，採用轉向單元與轉向油缸，並配置優先閥保證轉向穩定性。

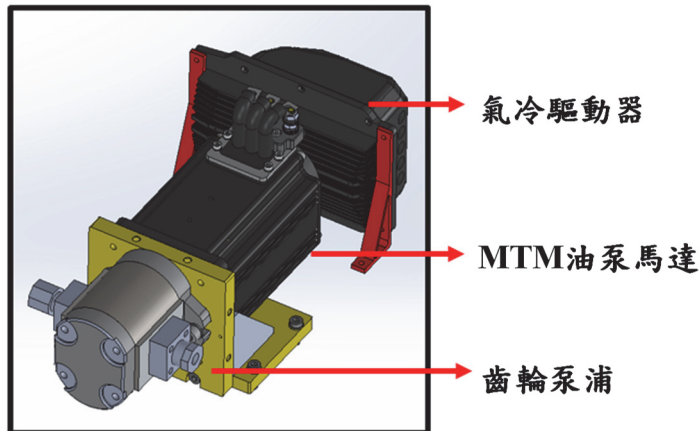


圖 2、油泵模組

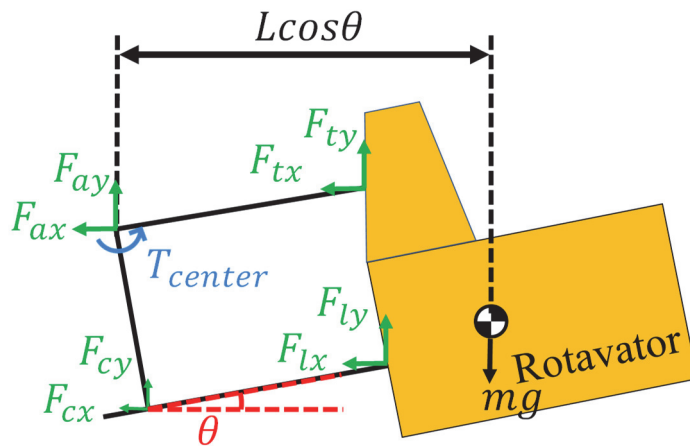


圖 3、三點懸掛自由體圖

$$T_{center} = F_{pump} \cdot L_{cylinder} \cdot \cos \theta \geq mg \cdot L \cdot \cos \theta \quad (1)$$

三、水泵系統

為確保主馬達與驅動器在長時間高負載運行下維持穩定溫度，本研究採用閉式循環水冷系統。冷卻水流路設計如下：

主水箱 → 水泵 → 驅動器 → 主馬達 → 副水箱 → 主水箱

在系統運行時，冷卻水由主水箱經水泵加壓後，首先流經驅動器，吸收其運行過程產生的熱量，隨後再進入主馬達冷卻腔，進一步帶走馬達運行時產生的較高熱量。之所以先經過驅動器再進入主馬達，是基於熱管理的考量：主馬達的運行溫度通常高於驅動器，若冷卻水先流經主馬達，水溫將顯著升高，導致驅動器的冷卻效果下降。透過此流路設計，可確保驅動器與主馬達均維持在安全工作溫度範圍內，提升系統整體的穩定性與耐用性。

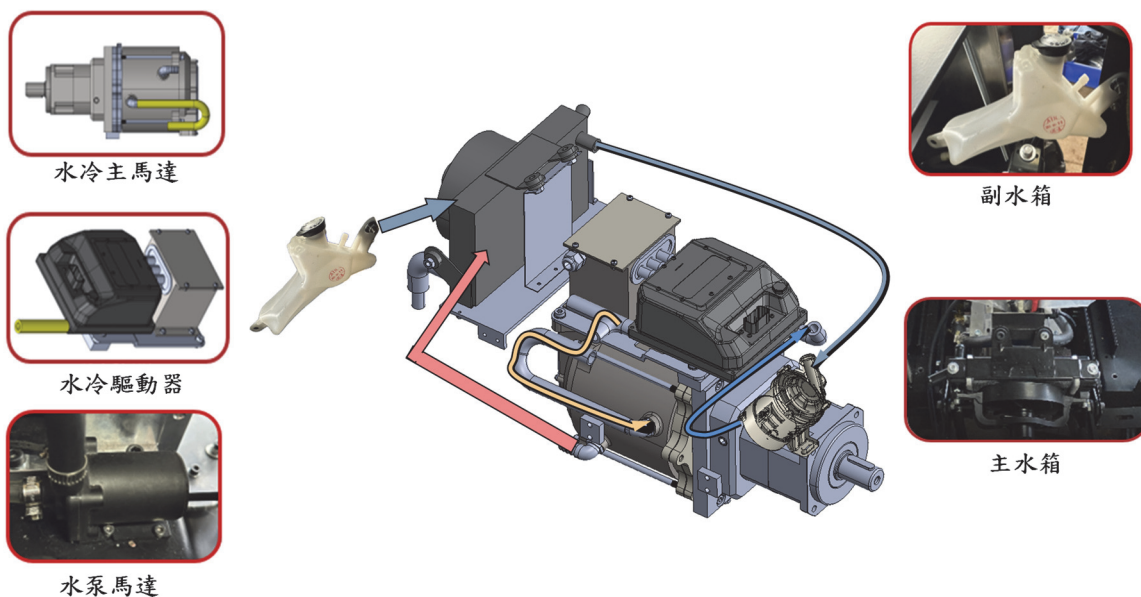


圖 4、水路模組

實驗結果與討論

表 1、曳引機規格表

機身	全長	(cm)	251.5	
	全寬	(cm)	91.5	
	全高	(cm)	181.5	
	重量(含電動機及耕刀)	(kg)	700	
	耕具重量	耕耘刀	(kg)	195
		標稱作業寬度	(cm)	125
耕耘軸減速比			2.35	
電動機	廠牌型式		碩陽	
	使用電壓	(V)	72	
	額定功率/轉速	(kW/rpm)	7.5/2400	
	減速比		3	
電池	廠牌型式		悟村	
	容量(Ah)		165	
	電壓/數量/連接方式		36/2/串聯	
	充電方式及時間		原廠充電器直接充電/約 18hr	
傳動裝置	傳動軸方式	電動機至傳動第一軸	減速機傳動	
		傳動第一軸至車軸	經萬向接頭與齒輪箱	
		傳動第一軸至耕耘軸	經萬向接頭與齒輪箱	
	變速方式		齒輪傳動變速	
	離合器型式	主離合器	乾式單片離合器	
		耕耘離合器	齒輪傳動變速	
	變速段數	主機	前進 4 段，後退 2 段	
		耕耘部	2 段	
行走裝置	轉向離合器構造		乾式多片轉向離合器	
	輪胎規格	(in)	前 10 後 16	
	各檔之行進速度	(km/h)	低速一檔	1
			低速二檔	4
			高速一檔	2
高速二檔			6	
其他	安全措施(裝置)		緊急按鈕	

測試地點位於國立臺灣大學生物資源暨農學院附設農業試驗場-安康分場

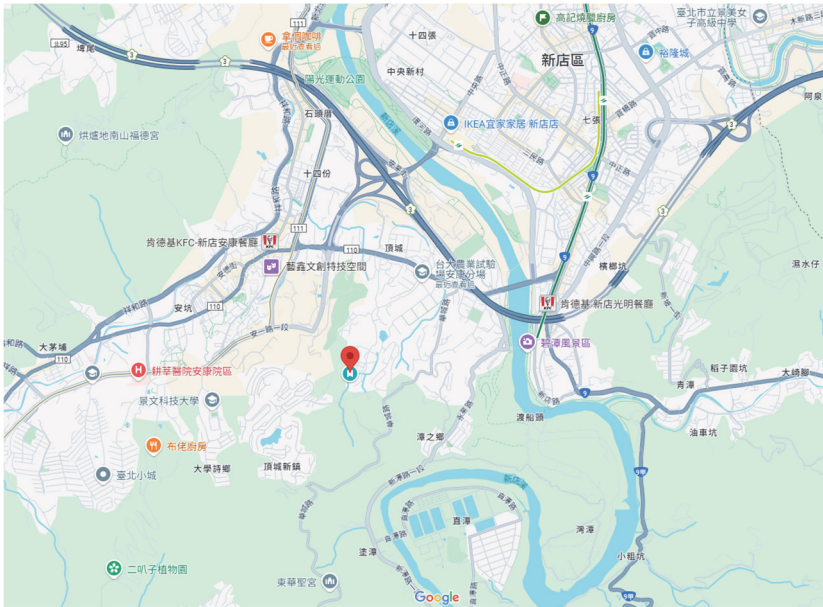


圖 5、測試地點台大農業試驗場安康分場

連接 PTO 的是 DELEKS 的 DFM-125 旋轉犁，本研究也將使用此犁刀進行實驗。



圖 6、DFM-125 旋轉犁

一、耕耘測試

測試項目為低速檔(烏龜)一、二檔，高速檔(兔子)一、二檔，以及耕耘刀 540 rpm 與 1000 rpm。



圖 7、測試環境



圖 8、測試環境



圖 9、低速檔(烏龜)一檔，耕耘刀 540 rpm
耕土結果



圖 10、低速檔(烏龜)一檔，耕耘刀 1000 rpm
耕土結果



圖 11、低速檔(烏龜)二檔，耕耘刀 540 rpm
耕土結果

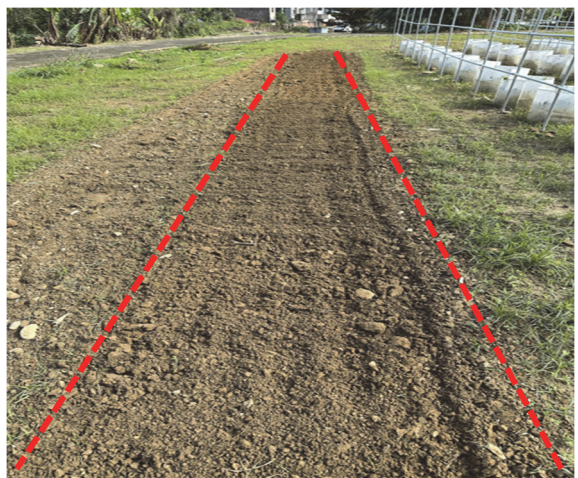


圖 12、低速檔(烏龜)二檔，耕耘刀 1000 rpm
耕土結果

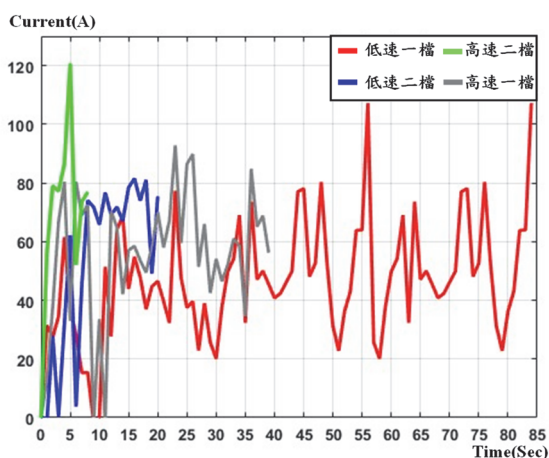


圖 13、各檔位在 PTO 540 rpm 主馬達電流

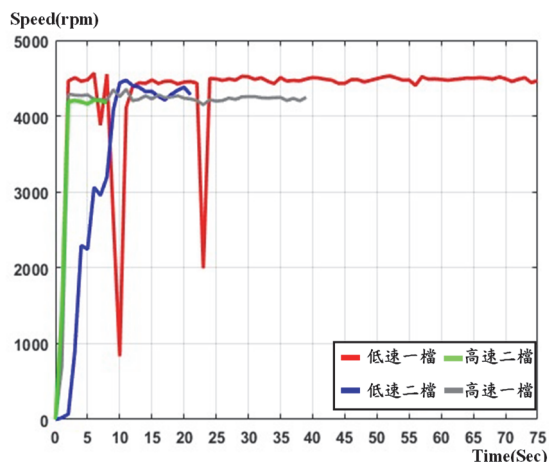


圖 14、各檔位在 PTO 540 rpm 主馬達轉速

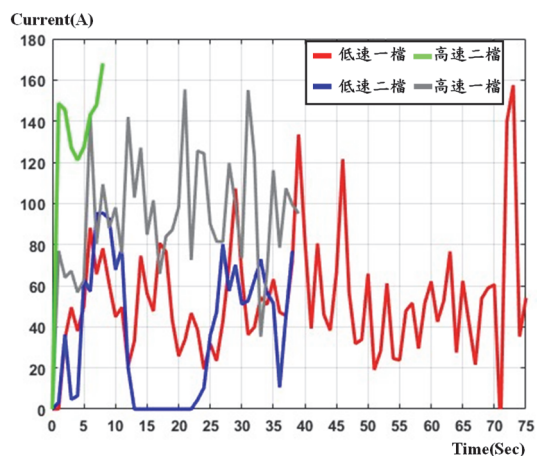


圖 15、各檔位在 PTO 1000 rpm 主馬達電流

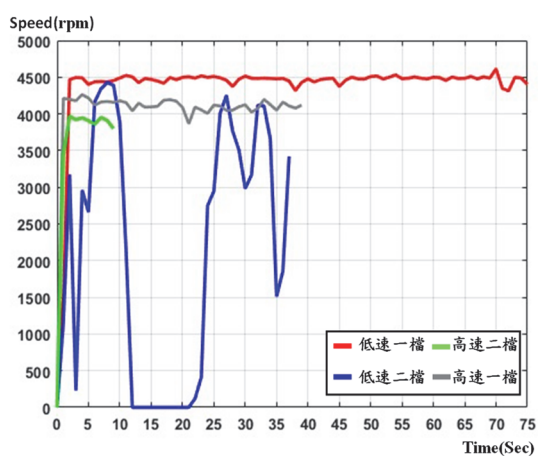


圖 16、各檔位在 PTO 1000 rpm 主馬達轉速

在 PTO 540 rpm 下，耕耘深度與翻土效果較淺，翻起之土塊較粗，殘餘植被仍部分留存於表面(圖 9、11)。在 PTO 1000 rpm 下，耕耘深度與細碎度顯著提升，土壤翻鬆均勻，殘根覆蓋情況大幅減少(圖 10、12)。電流與轉速表現在低速檔配合 PTO 540 rpm 時，主馬達電流相對較低且波動小，但轉速維持穩定，顯示負載輕、能耗低。在 PTO 1000 rpm 下，主馬達電流有明顯升高，顯示負載加重，但轉速仍能迅速回復並保持穩定。

二、上坡測試

利用 iPhone 水平儀功能量測現場坡度大部分為傾斜 9 度，最高有到 15 度，總長度 52 公尺。



圖 17、上坡測試環境

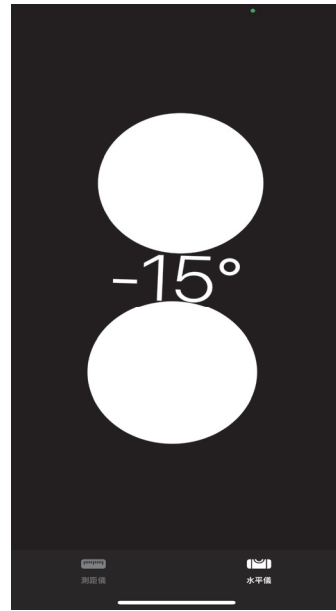


圖 18、最大傾斜角度

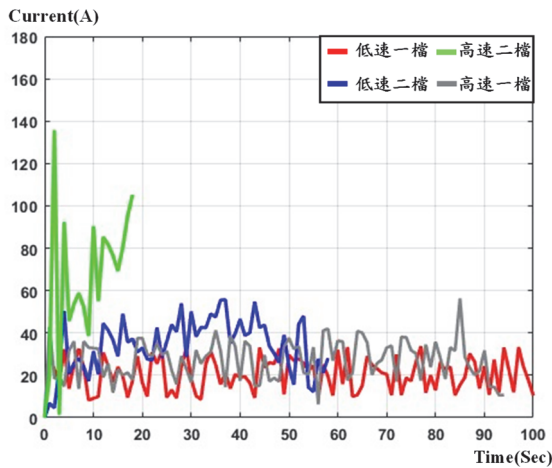


圖 19、各檔位上坡主馬達電流

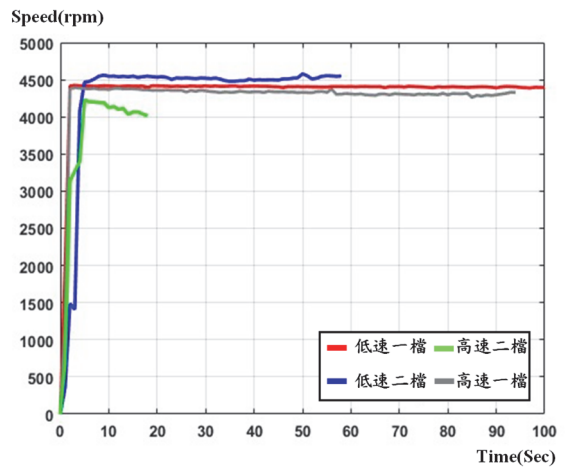


圖 20、各檔位上坡主馬達轉速

本次上坡測試路段量測之坡度約為 15° (約 27%)，高於農路設計規範所訂定之最大縱坡度^[6] (三級農路上限為 17%)。可以由數據得出車輛在此極端坡度條件下各檔位均能順利完成上坡，但主馬達電流呈現明顯差異。低檔位時電流峰值最高，代表輸出扭矩較大以克服坡度阻力；高檔位時電流較平穩，顯示動力需求相對減輕，但對起步與低速區段的負荷增加。本測試結果代表車輛在實際農路規範範圍內，將能更輕鬆且穩定地應對各級農路環境，確保在一般農路作業條件下具備充足的動力餘裕。

三、轉彎測試

表 2、各檔位迴轉時間表

檔位	時間(s)	最大轉彎半徑(m)
低速一檔	25.0	2.32
低速二檔	9.7	2.4
高速一檔	15.8	2.32
高速二檔	9.0	2.42

本次轉彎測試結果顯示，無論在低速或高速檔位下，車輛最大轉彎半徑皆維持在約 2.3–2.4 m，顯示轉向機構具備穩定一致的操控性能。不同檔位雖對迴轉完成時間有所影響(高速檔迴轉時間較短，低速檔則較長)，但對最小迴轉半徑之影響不大，說明車輛在各檔位下皆能保持良好的轉向靈活性。

三、三點懸掛抬升測試

本研究針對曳引機後三點懸掛系統進行抬升性能測試，並連接 DELEKS DFM-125 旋耕犁作為作業具。在試驗過程中逐次增加配重，以模擬不同負載情境，並於每次抬升操作中同步量測液壓系統壓力與驅動電機電流。

流程如下：配重安裝 → 分流閥控制 → 液壓缸推動 → 三點懸掛抬升



圖 21、旋耕犁 & 配重塊

表 3、三點懸掛抬升測試結果

負載重量	油泵馬達輸出最大電流(A)	抬升
195	7.9	成功
213	26.1	成功
231	29	成功
246	36.3	成功
260	35.1	成功
275	32.9	成功
284	42.5	成功
325	24.1	失敗

在 195 ~ 306 kg 的負載範圍內，液壓系統皆能成功完成抬升，對應最大輸出電流約 7.9 ~ 42.5 A。當負載達 325 kg 時，系統雖輸出 24.1 A 電流，但已無法完成抬升，顯示超出液壓與結構設計之極限。

結 論

在抬升測試中，本曳引機的三點懸掛系統展現穩定輸出，最大抬升壓力與電流呈現線性增長。此表現符合 ISO 730:2009 對三點懸掛後方 24 英吋位置之規範^[5]。這一表現與市場上常見的小型曳引機相近。例如，Yanmar SA223 官方規格^[7]指出其三點懸掛於下吊桿端點後方 24 英吋位置具備約 660 lb(約 300 kg)的抬升能力，也與本研究所測得的最大抬升能力相符。耕耘作業中，於 PTO 540 rpm 下能有效完成淺耕，耗能較低；在 PTO 1000 rpm 下，雖耗能較高，但能提供最佳的碎土效果。且實驗數據顯示，主馬達電流在不同負載下雖有變動，但轉速能迅速回復並保持穩定，顯示電動系統具備良好之負載調適能力。測試過程中未出現明顯過載或失速情況，驗證電控與驅動設計之可靠性。於坡地作業模擬中，本曳引機在上坡狀態下仍能維持穩定輸出，未出現明顯過載或失速情況，驗證電控與驅動設計於變動工況下之可靠性。

相較傳統柴油曳引機，電動曳引機具備零排放、低噪音、維護簡易等優勢，特別適合於溫室、果園及小規模農田使用。隨著電池能量密度提升與快速充電技術成熟，電動曳引機未來有望進一步擴展至中大型田間作業。本曳引機雖屬原型機階段，但已展現穩定的抬升性能與可因應不同 PTO 需求的耕耘能力。研究結果驗證電動曳引機在小規模農業環境具備可行性，未來若能針對續航力、模組化電池、更高功率液壓系統進行優化，將能更全面取代傳統燃油曳引機。

誌 謝

本研究能順利完成，首先要感謝農業部的計畫經費支持(計畫編號 113 農科-12.2.2-科-01(1))，以及碩陽電機大力幫助，行政院農業部桃園區農業改良場的協助與資源提供。

參考文獻

1. Latest report: fossil fuel CO2 emissions reach record high again in 2024.
<https://cosmosmagazine.com/earth/climate/latest-report-fossil-fuel-co2-emissions-reach-record-high-again-in-2024/>
2. 農業知識入口網。2023。電動農機減碳能力初探—以農地搬運車為例。取自農業知識入口網: <https://kmweb.moa.gov.tw/knowledgebase.php?id=423311>
3. Kim, J. H., Kim, K. U., & Wu, Y. G. (2000). Analysis of transmission load of agricultural tractors. *Journal of Terramechanics*, 37(3), 113-125.
4. Ueka, Y., Yamashita, J., Sato, K., & Doi, Y. (2013). Study on the development of the electric tractor: Specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor. *Engineering in Agriculture, Environment and Food (EAEF)*, 6(4), 160-164.
5. ISO. Agricultural wheeled tractors — Rear-mounted three-point linkage — Categories 1, 2, 3, 4, and 4N (ISO 730:2009). Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
6. 行政院農業委員會，〈農路設計規範〉，行政院公報資訊網，2011年8月26日。
<https://gazette.nat.gov.tw/egFront/detail.do?metaid=18107>
7. Yanmar. (2022). SA223/325/425 tractor – Product specifications. Yanmar Co., Ltd.
https://www.yanmar.com/global/agri/tractor/us_sa223_325_425/