

電動中耕機之設計製作與功能測試

劉錦霖、林連雄

國立宜蘭大學生物機電工程學系

摘要

本研究開發電動化之有輪式中耕機，考量到實際田間運作環境及提升機體續航時間之目的，在電動中耕機的三電系統，電池使用能量密度較高的鋰三元電池組(50.4 V，120 Ah)作為能量源，電控系統使用 CAN bus (控制器區域網路)對馬達驅動器做監控。電機系統使用效率較高的直流無刷馬達，分成行走部(1 kW，3000 rpm)與耕耘部(2 kW，3000 rpm)，馬達並搭配減速機分別使用行星齒輪與斜齒輪(15:1)將轉速降到 150~200 rpm。以普羅尼制動測功計量測動力軸輸出之扭矩，並量測電池輸入電流，計算出行走部及耕耘部輸出扭矩可達 8.14 及 10.36 kg-m，能源轉換效率最高可達 69.5%及 73.6%。比較行走部及耕耘部結果，行走部馬達在同瓦數下能得到較大的扭矩，但轉速較低所以轉換效率較差，須提升減速比來得較高的轉換效率。

關鍵詞：電動中耕機、效率、鋰電池電量管理、節能減碳。

緒論

在全球淨零減碳意識高漲的現在，根據國家溫室氣體排放清冊報告，我國農業部門在 2021 年占總溫室氣體排放量約 1.09%，目前我國也以 2040 年完成農業部門淨零排放為目標，以「減量」、「增匯」、「循環」及「綠趨勢」為四大主軸。因應農業淨零排放政策，鼓勵農民採用增匯及減碳等功效之耕作機械。

張(2016)考察與台灣農業環境相似的日本之新型農機策略，分別以電力化、機器人和安全為研究方向，而小型電動農機具有震動減少，另設安全裝置等優勢。從林等人(2023)研究得知，燃燒 1L 汽油及柴油其碳排約等於 4.98 及 5.07 kWh，換而言之，只要電動農機在與內燃機 1L 燃料作業條件相同下，使用電量小於上述值，代表電動農機具有減碳效益。Scolaro et al. (2021) 對農用機械的電氣化進行了回顧，儲能系統(ESS)可以使用電池或超級電容組成。鋰電池具高能量密度和功率密度；超級電容用於平衡高變化的瞬時功率需求。馬達類型分為表面黏貼永磁馬達(SPM)、內嵌式永磁馬達(IPM)和感應馬達(IM)，通常 SPM 和 IPM 的永磁同步馬達具有較高的功率密度，前者主要用於中低速的場景，後者則用於需要寬範圍速度的場景。Zhang et al. (2023)提出了一種考慮行駛速度和打滑的主動扭矩控制方法，應用於電動曳引機。在此控制方法下，曳引機的打滑、牽引能源效率和馬達能耗均達到最佳狀態。

參考陳(2016)設計之手持式電動中耕機使用 1300 W 直流無刷馬達，整機重約 45 kg，最高扭矩為 7.4 kg-m，平均作業時間 103 min。如以此性能為基準向上提升，增加中耕機的耕耘馬力及續航時間，勢必就需要增加電池容量，機體重量就不適合以手持來操作了，需要加上行走部馬達來協助運行，固本研究將以電動有輪式中耕機為開發方向。使用動力效率較高的行星齒輪與斜齒輪作為減速機構，而作為能量源的鋰三元電池雖有能量密度較高之特性，但安全性較差，須對電池做電量管理，避免電池過充與過放。

材料與方法

一、三電控制系統

(一) 電池

電池使用鋰離子電池芯(INR21700-50E，三星)，以十四串六並聯組成一顆電池組，四顆電池組做並聯使用，總共額定電壓為 50.4 V，電量 120 Ah，總重 26.8 kg。電池組使用之保護板具有藍芽功能，可透過手機 APP 監看電池狀況及設定保護參數。

(二) 電控

使用單晶片(stm32f103c8t6)作為主要控制器，並通過 CAN bus 網路控制兩個馬達驅動器，行走部(BVP-F130CP，創盟)及耕耘部(BVP-F190CP，創盟)馬達驅動器則負責對馬達的運轉監控及保護裝置。

(三) 電機

行走部使用 48 V，1000 W 的直流無刷馬達(EVM6N1K030A，創盟)，額定轉速為 3000 rpm，額定扭矩為 3.4 N-m，為了讓減速機與地面保持足夠距離，輪子使用較大的 420×50 mm(直徑×輪寬)的實心胎，根據 Zhang et al. (2023)文中驅動力預估方程式，推算輪子滾動阻力約為 80 N，需 16.8 N-m 扭矩，馬達減速比需 5 倍以上，故減速機使用 15:1 的行星式減速機。耕耘部使用 48 V，2000 W 的直流無刷馬達(BLN7N2K030A，創盟)，額定轉速為 3000 rpm，額定扭矩為 6.8 N-m，減速機使用 5:1 的行星式減速機加上 3:1 的斜齒輪，總計 15:1 的減速比做減速。



圖 1、電池組及監控 APP



圖 2、耕耘部馬達與減速機構

二、動力測試

(一) 測功計

使用普羅尼制動測功計在馬達運轉時，操作制動機上的煞緊裝置，使動力軸的動力經摩擦來令的壓力桿傳送到磅秤上，磅秤值 $W(\text{kg})$ ，乘上力臂長，即為輸出扭力 T 。透過公式(1)帶入扭力 $T(\text{kg}\cdot\text{m})$ 、轉速 $N(\text{rpm})$ 就可得到輸出軸的運轉功率 $P_e(\text{W})$ 。

$$P_e = 9.81 \times 2\pi TN \quad (1)$$

輸入部分使用電壓探棒(TPP0101, Tektronix)和電流探棒(A622, Tektronix)，透過示波器(5444D, pico)採集數據並上傳到電腦裡儲存。電動中耕機的能源轉換效率如公式(2)， V 為馬達輸入電壓、 I 為馬達輸入電流和 P_e 輸出軸的運轉功率。

$$\text{能源轉換效率} = \frac{P_e}{V \times I} \% \quad (2)$$

(二) 實驗設計與方法

實驗組設定為中耕機常見的行走速度 2 km/h 、 5 km/h 兩組，中耕機車輪轉速分別為 25.3 、 63.1 rpm ；耕耘軸轉速則為 130 、 150 rpm 。調整扭矩每 $0.74 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 紀錄一次，紀錄值為連續 10 秒之平均輸入功率及磅秤值(kg)。

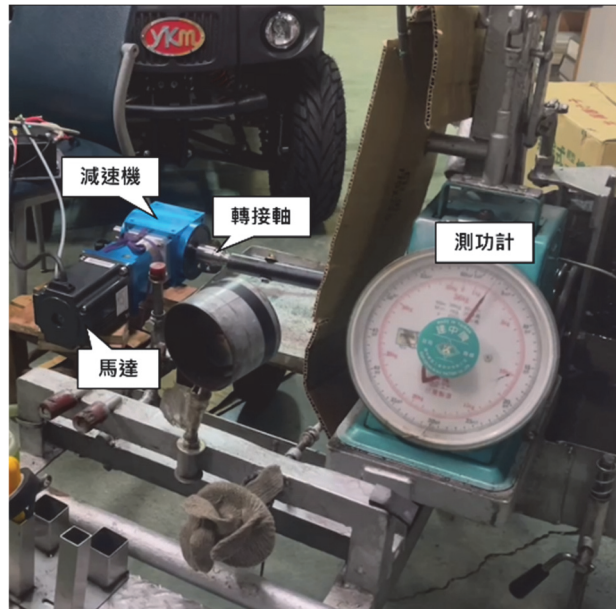


圖 3、行走部使用普羅尼制動測功計進行測試

結果與討論

一、電動中耕機規格

圖 4 為本研究設計之電動中耕機，其規格如表 1 所示，可以根據使用狀況增減電池組數量，最大負載下作業時間為 2 小時。中耕機作業寬度為 55 cm，行進速度 0.32~15 km/h，透過調整地輪高度改變作業深度。機體除馬達驅動器內之保護功能外，還備有低電量保護及過載保護功能。



圖 4、電動中耕機

表 1、電動中耕機規格表

項目	規格
機身總重	110 (kg)
機身尺寸 (長×寬×高)	160×58×90 手把收下：115×58×72 (cm)
變速機構	30:1 行星齒輪與斜齒輪組
動力形式	直流無刷馬達
動力功率	耕耘部：2000 W 行走部：1000 W
使用能源	50.4 V，120 Ah 鋰離子電池組

二、控制功能

馬達可設定最大轉速及最大扭矩，並透過 CAN bus 及時修改馬達狀態及運轉速度；鋰電池搭配的保護板可透過手機 APP 監控電池的電量、溫度、健康度等狀態。操作中耕機時，透過控制台上之旋鈕可調整行走部及耕耘部之轉速，並使用手把上之開關控制耕刀及車輪之運轉。

三、動力測試結果

(一) 行走部動力測試

行走動力測試結果，如圖 5 所示，2 km/h 實驗最佳能源轉換效率為輸出扭矩 2.96 kg-m 時的 61%，5 km/h 實驗最佳效率為輸出扭矩 4.44 kg-m 時的 69.5%，5 km/h 時平均效率都比 2 km/h 時高，且 2 km/h 實驗輸出扭矩超過 5.18 kg-m 後其效率明顯下跌。

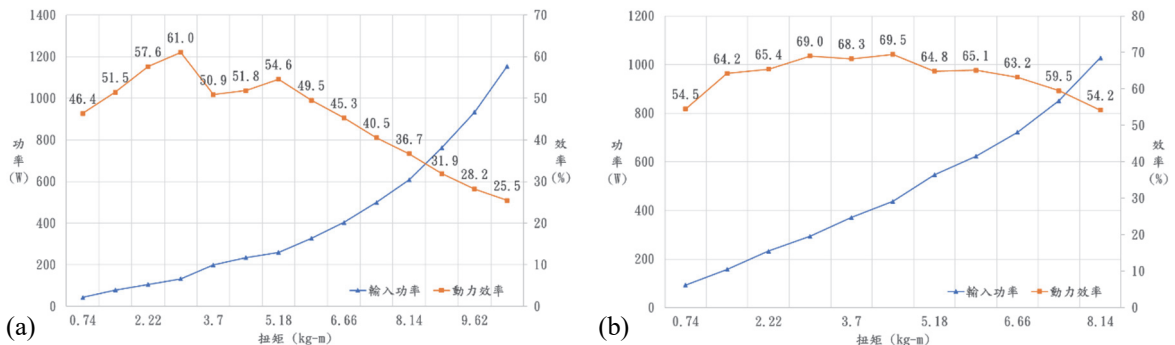


圖 5、行走速度(a)2 km/h、(b)5 km/h 於不同負載之輸入功率及能源轉換效率

(二) 耕耘部動力測試

耕耘部動力測試結果，如圖 6 所示，130 rpm 實驗最佳能源轉換效率為輸出扭矩 8.88 kg-m 時的 69.3%，150 rpm 實驗最佳效率為輸出扭矩 9.62 kg-m 時的 73.6%，150 rpm 時平均效率都比 130 rpm 時高，在兩種轉速下都是負載越大效率越好。

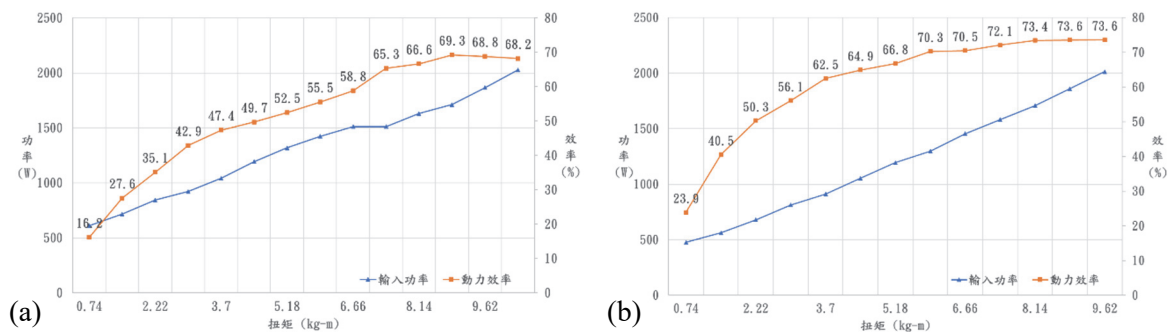


圖 6、耕耘軸轉速(a)130 rpm、(b)150 rpm 於不同負載之輸入功率及能源轉換效率

結 論

本研究設計之電動有輪式中耕機，在裝滿電池的時，機體重量約 110 kg，最大負載下作業時間約為 2 小時。動力測試時，行走部在 2 km/h 時可以看出能源轉換效率非常差，5 km/h 時轉換效率才較符合預期。此時馬達轉速為 1000 rpm，推測馬達要在更高轉速下，才會有較好的轉換效率，當前的減速機減速比不夠。而在耕耘部一樣可以看出在較高的轉速下能源轉換效率較高，雖然在同樣的負載下，輸入功率較行走部高，但因為轉速較高，所以實際的轉換效率是較好的。

在設計中耕機時，為了避免馬達減速機與地面過近，使用了輪徑較大的車輪，造成了需求轉速較一般中耕機低，行走部之能源轉換效率表現不佳，未來須將行走部的減速比提高，讓馬達運作在效率較高的轉速中(2000~3500 rpm)。耕耘部雖然也可透過提高減速比來得到更好的效率，但考量到如需更換為培土刀進行開溝作業，最大轉速將會不足，且當前轉速下的效率尚在可接受範圍，故無需更換需求。

未來預計會將能源源更換為中油之可換電池組，可將電池加入到 CAN bus 網路中，無須透過手機 APP 即可與電池通訊，能將電量、剩餘運行時間等資訊顯示在中耕機面板上，以及提升安全機制的及時性。

誌 謝

承蒙行政院農業部農業科技計畫(113 農科-12.2.2-科-01)補助本研究，使研究順利遂行，並感謝盧昱淇、高宜良同學協助，特此誌謝。

參考文獻

1. E. Scolaro, M. Beligoj, M. P. Estevez, L. Alberti, M. Renzi and M. Mattetti. 2021. Electrification of Agricultural Machinery: A Review. IEEE Access 9: 164520-164541.
2. S. L. Zhang, C. K. Wen, R. Wen, Z. H. Luo, B. Xie, Z. X. Zhu and Z. J. Chen. 2023. A Joint Control Method Considering Travel Speed And Slip For Reducing Energy Consumption of Rear Wheel Independent Drive Electric Tractor In Ploughing. Energy. 263:126008.
3. 林建志、邱相文、施富邦。2023。電動農機減碳能力初探－以農地搬運車為例。技術服務 34(4): 23-27。
4. 陳昭廷。2016。電動化中耕機開發及節能控制之研究。碩士論文，宜蘭：國立宜蘭大學生物機電工程學系。
5. 張光華。2016。至日本生研中心研習新型農機研發方向及策略。國際農業科技新知 71: 3-7。

