

折疊式電動中耕機之研發

林連雄¹ 郭泰均¹ 張允瓊^{2*}

¹宜蘭大學生物機電系 ²宜蘭大學園藝系

摘 要

本研究目的為研製一部機體輕量且手把可折疊以方便收納之「折疊式電動中耕機」。所研製之電動中耕機總重 45 kg，以直流無刷馬達做動力，23.1V-60Ah 磷酸鋰鐵電池提供電源，附裝中耕除草刀具。以作業刀具運轉做為驅動機體前進；動力由離心式離合器傳至動力傳動軸，再經蝸桿蝸輪減速至耕耘部。所研製之電動中耕機田間作業性能如下：機械作業寬度 0.54 m、平均翻土作業深度 6.9 cm、機械行走平均速度 0.6 m/s、依土壤性質差異機械持續平均作業時間為 77 min，而平均連續作業面積約 1,855 m²。使用普羅尼制動測功計，量測之耕耘軸輸出扭力值為 6 kg-m，依此估算之電動中耕機動力最高效率為 45%。比較汽油引擎及電動中耕機之每公頃田間作業能源成本及碳排放，所研製之電動中耕機，其能源成本為汽油引擎中耕機之 15.05%，而 CO₂ 排放量為汽油引擎中耕機之 31.15%，亦即所研製之電動中耕機相較於傳統汽油引擎中耕機，其節能減碳效果較佳，具環保優勢。

關鍵詞：中耕機、耕耘軸扭力、鋰鐵鹽電池、動力效率、節能減碳

*通訊作者。E-mail: changyc@niu.edu.tw

Development of a Foldable Electric Cultivator

Lian-Hsiung Lin¹ Tai-Chun Kuo¹ Yung-Chiung Chang^{2*}

1. Department of Biomechatronic Engineering, National Ilan University
2. Department of Horticulture, National Ilan University

Abstract

The objective of this study was to develop a foldable electric cultivator, which was equipped with a light framework and foldable operating handles for convenient storage. The developed foldable electric cultivator was driven by a DC brushless motor which was charged by a 23.1 V-60 Ah LiFePO₄ battery. The rolling of the cultivation blades also provided the forward movements power for the cultivator. Power transferred through a centrifugal clutch to a transmission shaft, then speeded down by worms and transmitted to the weeding part. Results of the field performances of the cultivator were as follows, the working width, working depth, working speed and individual cruising range were 0.54 m, 6.9 cm, 0.6 m s⁻¹, and 70-90 min, respectively.

The cultivator weighted 45 kg, and could continually work 77 min along with the working area of 1855 m² when the batteries were fully charged. The torque and the electricity efficiency of the developed cultivator measured by the Prony Brake Dynamometer were 6 kg-m and 45%, respectively. The cultivator had a 15.05% lower energy cost than that of the traditional tiller. Besides, it showed a reduction of CO₂ emission of 31.15% compared to the traditional gasoline engine cultivator. The results indicate that the developed foldable electric cultivator performed better on energy saving and carbon reduction when compared to the gasoline engine cultivator.

Keywords: cultivator, cultivation shaft torque, LiFePO₄ battery, power efficiency, energy saving carbon reduction

*Corresponding author. E-mail: changyc@niu.edu.tw

前 言

在溫室的栽培經營管理上，中耕除草是維繫土壤透氣性及促進根部吸收養分的重要作業。農民一般使用以汽油引擎為動力之中耕機，其油氣燃燒過程易產生廢氣，且燃料與維護費用高。近年隨著環保意識抬頭，電動載具成為減碳重要工具，原來使用汽、柴油的載具，紛紛嘗試裝上馬達、電池，輔助或取代成為載具的動力來源。因為馬達沒有怠速限制，搭配適當的驅動器即可以便利地控制轉速與出力，故可簡化傳動方式，進而減少機構的摩擦損失。現今雖有電動噴霧機、電動升降機、電動搬運車等電動化農機，協助農民完成對作物施藥、採收、運送等管理，但是在作物整地作畦，則依舊使用人力、

或以汽油引擎為動力的農機進行翻土、開溝作業，因此在中耕管理的環節上，研發電動化的中耕機有其必要性。

中耕管理機有乘坐式及行走式兩類，在台灣主要生產行走式中耕管理機，較適合小型田園。目前常見之行走式中耕機類型可分為無輪、單輪及雙輪等三種。無輪中耕機大部份為汽油引擎，機身輕巧，搬運方便，適用小型農田；單輪中耕機使用6-10 hp汽油或柴油引擎，轉向較雙輪方便，適用中小型農田；雙輪中耕機使用6-13 hp之汽油或柴油引擎，與單輪型之差異在於鋤草部有一小輪支撐，適合較大面積之農田，工作效率最高(林，2005)。

Dewangan等(2005)量測並比較乘坐自走式曳引機與手操作自走式曳引機的噪音大小，發現噪音來源主要由引擎發出。以電動馬達取代引擎，除可降低噪音外，也可減少引擎廢氣的排放，對溫室內作業者的健康特別有益。以中耕機為例，使用引擎或馬達為動力源，需透過傳動機構將動力傳動至耕耘軸輸出，而傳動機構的選擇會影響其傳動效率，劉(2004)指出，對於蝸輪傳動而言，在相同減速比下，傳動效率會與輸入及輸出的相對滑動速度成正比。邱(2007)在蝸輪減速機效率之研究中指出，蝸輪減速機廣泛運用在農工機械中，其優點在於高減速比、體積小與重量輕，但缺點在傳動效率較低。鄭(2011)使用深循環鉛酸電池(48 V，50 Ah)與直流無刷馬達(3000 W)，將中耕除草機(美固128型，力有)，由汽油動力改裝為電池馬達動力，此電動中耕機帶有自走輪及兩段齒輪變速與耕耘部離合器，作業寬度60 cm，除草深度3 cm，機體重量216.5 kg，可將每公頃作業的二氧化碳排放量，由汽油引擎的38.81 kg降至12.65 kg。Haruo (2007) 因應日本人力老化及溫室操作考量，設計有線型電動小型中耕機；其主動力一為行走部，使用左右獨立控制的馬達(24 V，400 W)驅動車輪，其變速齒輪減速後扭力為25 kg-m，搭配兩座12 V-13 Ah電池串聯使用；另一主動力為耕耘部，使用輸出扭矩為0.14 kg-m的馬達(24 V，400 W)驅動耕耘刀具。

電動中耕機電池使用壽命方面，研究指出鋰鐵與鋰錳電池之體積能量密度與重量能量密度較鉛酸電池優異，且鋰鐵電池循環壽命較鋰錳電池為長，安全性亦較高(Tie and Tan, 2013)。Omar等(2014)研究顯示，高溫除加速鋰鐵電池老化外，亦加速電池可用容量衰退；即使如此，於鋰鐵電池容量衰退至80%前，其充放電循環次數仍優於鉛酸電池。Wang等(2014) 研究中指出，鋰鐵電池放電特性呈現非線性，其於初放電及用電將結束之際電壓皆快速下降，而用電期間則呈現相對平緩之壓降區，此放電特性即使於不同之

放電速率下亦存在。

由於中耕機為栽培上重要之作業機具，而傳統之汽柴油引擎皆存在耗能、碳排放及噪音等問題，且傳統中耕機體普遍笨重，除不適用於溫網室作業外亦不易搬運，因此本研究目的為研製一新型以電池和馬達取代引擎、機體輕量化且操作手把可供折疊以方便收納之「折疊式電動中耕機」，並對其實用操作性能進行田間測試及分析，且具體分析電動中耕機於減碳效率之實質效益。

材料與方法

一、電動中耕機設計

(一) 機體設計

本折疊式電動中耕機各部位規劃配置如圖1所示。所設計之折疊式電動中耕機(以下簡稱本機)為無輪式，於耕耘部作業刀具運轉翻土同時產生前進動力。操作者控制左右偏擺幅度決定機體方向，並以阻力棒入土深度控制前進速度。

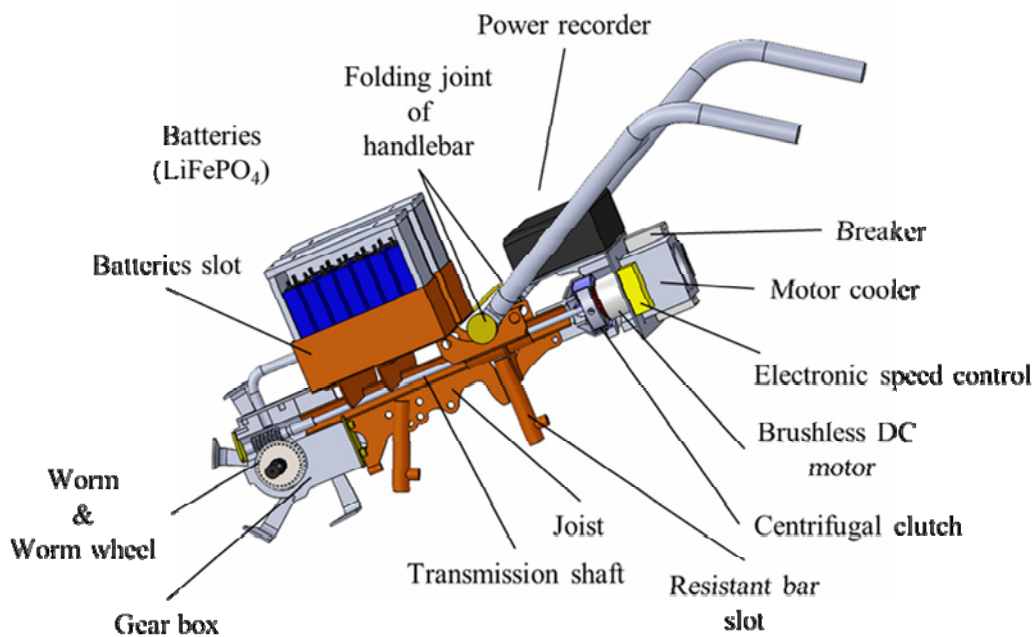


圖1 折疊式電動中耕機主要機件配置圖。

Fig. 1 The framework illustration of the foldable electric cultivator.

機身龍骨為中空骨幹，內置傳動軸傳遞動力並連結阻力棒及耕耘部；機身上則放置電池座和固定折疊機構的關節座。動力模組置於機身龍骨，其中包含馬達、傳動軸、離合器與蝸輪蝸桿減速機構。電路保護使用無熔絲開關(75 A)避免馬達過載；為防止馬達過熱，使用風扇散熱。本機還包括自行研製的電量記錄器以感測與記錄電池電流與電壓

變化，並以電子變速器控制馬達轉速。為提昇翻土效率及操作便利性，機體重心設計較低，位於耕耘軸附近。

(二)動力傳動設計

本機以外轉子式無刷馬達(C6364, RCBLOG)取代引擎做為動力源，其優點為體積小(長度64 mm，直徑63 mm)、重量輕(0.63 kg)且馬力足(1500 W)，且能量密度高。此無刷馬達使用直流電源，須配合電子換相器與控制器使用。考量電流安全係數與散熱因素，選用最大持續電流可承載200 A之電子變速器作為電子換相器，用以調控馬達轉速。

圖 2 所顯示之動力傳動機構中，當馬達轉速夠快時，馬達動力可經由離合器傳送至傳動軸。若馬達由靜止啟動或翻土作業遇到石頭硬物時，此時馬達轉速較慢，因離合器作用，馬達動力將無法傳送至傳動軸。因此藉由離合器，可使傳動軸維持一定轉速，並保護馬達，避免過載。

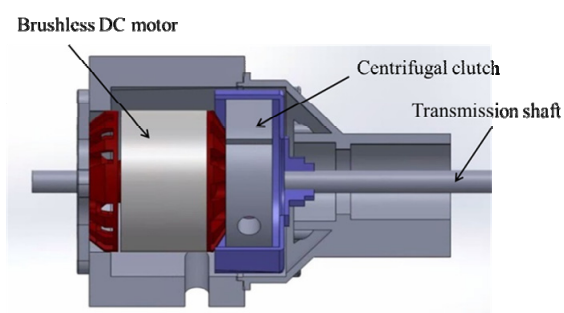


圖2 動力傳動機
Fig. 2 The power transfer mechanism.

馬達動力藉由離合器經傳動軸傳遞至蝸輪蝸桿減速機構(圖3)，由蝸桿旋轉推動蝸輪，直接一段完成1:40的減速，再由蝸輪中心連結的耕耘軸，驅動刀具作業。

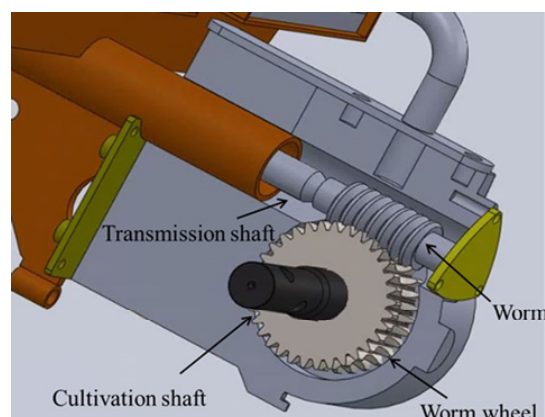


圖 3 蝸輪蝸桿減速機構。
Fig. 3 Worm wheel deceleration mechanism.

(三)手把折疊機構

圖4A為折疊手把示意圖，圖4B顯示折疊手把之關節分解細節。折疊手把機構位於龍骨靠近動力模組端，藉關節座固定後向使用者方向延伸。將固定螺帽穿過基座中空管，藉由固定螺帽鎖緊，使基座中空管左右兩端各兩個直徑4.3 cm的平面傘齒輪相互咬合，此時手把即固定。欲調整手把位置，僅需放鬆固定螺帽，手把可調整角度約300°，依照使用者身型調整手把高度，再鎖緊固定螺帽即可。

表 1 顯示所研製電動中耕機之外觀、動力與變速規格。可彎折的關節使手把可收折，收折前機體尺寸為長 90 cm、寬 60 cm 及高 80 cm；折疊後機體長寬度不變，高度降至 35 cm。機體總重約 45 kg，其中車體重約 27 kg，可拆卸電池重約 18 kg。所研製之電動

中耕機以作業刀具運轉，做為機體前進的驅動。動力傳動方式，由離心式離合器至動力傳動軸經蝸輪蝸桿減速至耕耘部，耕耘部轉速約 105 rpm。

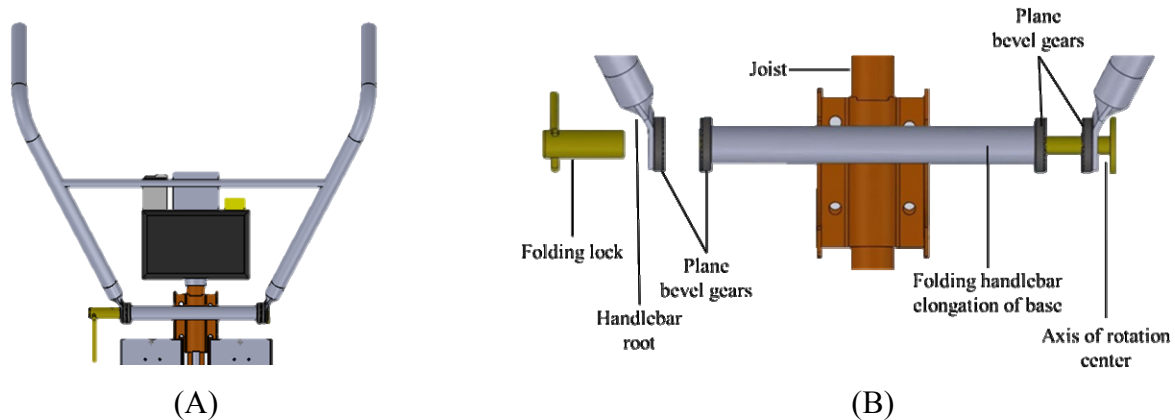


圖 4 折疊手把結構圖(A) 折疊手把位置 (B) 折疊手把關節分解圖。

Fig. 4 Arrangement drawing of folding handles. (A) Positions of the foldable handle; (B) The decomposition diagram of the foldable handle.

表1 折疊式電動中耕機規格表

Table 1 The specifications of the foldable electric cultivator

	Item	Specification
Size	Before folded (L × W × H, cm)	90×60×80
	After folded (L × W × H, cm)	90×60×35
Weight	Total (kg)	45
	Framework (kg)	20
	Battery (kg)	18
	Blade (kg)	7
Power	Power (W)	1500
	Voltage (V)	23.1
	Battery power (Ah)	60
Transmission	Tilling speed (rpm)	105

二、電動中耕機扭力與動力效率測試

為評估所研製電動中耕機之田間作業效能，機具經設計組裝後，應用元凱機械公司自製之普羅尼制動測功計，量測機具之耕耘軸扭力，計算耕耘軸功率與動力效率等功能表現。並以傳統汽油動力模組換裝 3.5 PS 汽油引擎(Y08 型，元凱)，進行對照試驗，以評估電動中耕機所設計之動力源與變速器對田間翻土作業之效能。

普羅尼制動測功計(如圖 5)之作用原理如下述，以扭矩轉換機構將旋轉的力換為直

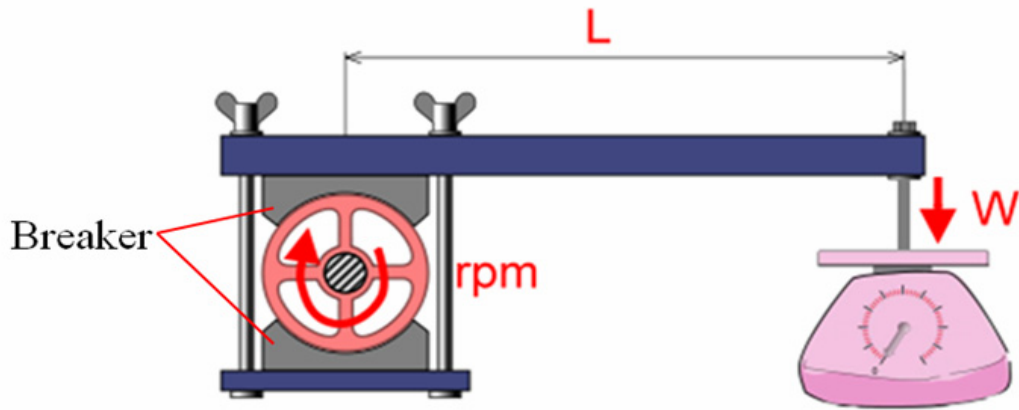


圖 5 普羅尼測功計作用原理。

Fig. 5 The Prony brake and operate principle.

線方向的力，藉由槓桿，將煞車的反作用力，調整為磅秤的接受方向，磅秤讀值 W ，乘上測功計力臂長 L ，可將中耕機耕耘軸扭力值量化。耕耘軸功率的量測過程，將普羅尼制動測功計與電動中耕機耕耘軸連接，使用剎車器施加負載抵抗輸出軸旋轉的力，耕耘部輸出軸使剎車器藉力臂壓動磅秤，紀錄耕耘部輸出軸的轉速值(N)，以及耕耘軸輸出扭力壓動磅秤的值(W)，數值經式 1(陳，2010)計算，即可得耕耘軸之可輸出功率。

$$P_0 = \frac{2\pi \times N \times L \times W}{75 \times 60} \times 735.5 \quad (\text{式 1})$$

公式中：

P_0 ：耕耘軸功率(W)

N ：耕耘軸輸出轉速(rpm)

L ：普羅尼制動測功計力臂長度(m)

W ：普羅尼制動測功計磅秤值(kg)

電動中耕機由電池的化學能轉電能，電能透過馬達轉為機械能，能量在型態上的轉換一定會有所損失。馬達輸出的轉速太高扭力太低，需再藉由蝸輪蝸桿減速成耕耘軸最終所需的轉速與扭力值。而動力由馬達傳遞至耕耘部的過程所造成的動力損耗除上馬達消耗功率即為動力效率。藉由式 2 配合電量紀錄器記錄到的負載電壓(V)與馬達所消耗掉的電流(I)，得到馬達消耗功率。電動中耕機動力效率的計算方法如式 3 所示，輸出的動力為耕耘軸功率(P_0)，除以馬達消耗功率(P_1)，即可得到電動中耕機的動力效率(η)。

$$P_1 = V \times I \quad (\text{式 2})$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \times 100\% \quad (\text{式 3})$$

公式中：

η ：動力效率(%)

P_1 ：馬達消耗功率(W)

V ：電池電壓(V)

I ：馬達消耗電流(A)

三、田間性能測試

依經濟部中央標準局訂定之國家標準(CNS, CNS3470-B7047) 動力中耕管理機田間作業性能測定方法及基準(TS23)進行田間試驗，測試項目包括作業速度、作業深度、作業寬度、作業精度及單次連續作業時間等項目。田間試驗於宜蘭大學園藝系之實習農場進行，農場土壤質地為含砂粒63%、砂粒27%及黏粒10%之砂質壤土，土壤孔隙度58-63%，土壤比重2.63。

四、燃料成本與減碳效益估算

使用磷酸鋰鐵電池為所研製之電動中耕機之電力源，其單座電池單元電壓為3.3 V、電量20 Ah，本機體電池組設計以7串3並聯共21座電池，可供給總電壓23.1 V及總電量60 Ah之電力，電池組重18 kg。磷酸鋰鐵電池與所研製之電動中耕機僅需一電源接頭即可安裝或拆卸電池充電，磷酸鋰鐵電池充電方式，以市電(交流110 V，60 Hz)連接直流電源供應器(12 V，70 A)，將直流電源送至電池充電器(UnA9 plus，UNRC)進行充電。充電器可設定充電截止電壓及充電最大電流(8 A)，並可查看電池充電電量。試驗期間以電量計(PCM2022B，PowerPro)記錄電池組用電量，單次充電時間約3小時，單次充電耗電量約為2.25千瓦小時(度)。

CO₂排放量參考經濟部能源局所公布之104年電力排放係數估算，其104年統計資料為使用1度電排放0.528公斤的CO₂。電價成本以台電公司103年公告平均電價，每度NT 2.853計算之。

結果與討論

一、電動中耕機扭力測試與傳動效率分析

圖 6 顯示所研製之電動中耕機與汽油引擎之扭力及耕耘軸功率測試結果。汽油引擎中耕機使用功率為 2574 W (3.5 PS)的汽油引擎，中耕機耕耘軸可輸出約 7.2 kg-m 之最大扭矩及 636 W 之耕耘軸功率。而所研製之電動中耕機，其馬達額定消耗功率為 1500 W，實際以電量計紀錄器記錄之馬達最大消耗功率則為 1575 W，耕耘軸可輸出功率 583 W，

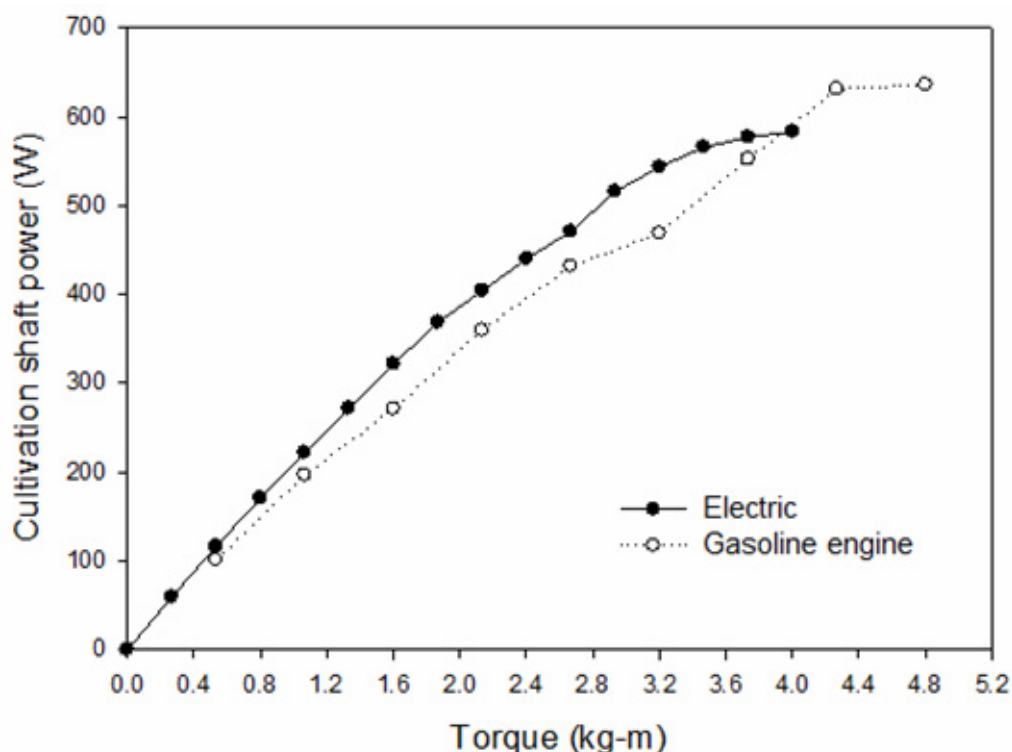


圖 6 折疊式電動中耕機與汽油引擎中耕機之耕耘軸扭力與功率之變化。
 Fig. 6 The variances of the torque and power of cultivation shaft of the foldable electric and gasoline engine cultivators.

供應扭力約 6 kg-m。上述結果顯示，所研製電動中耕機之可輸出扭力較小，約為汽油引擎的 83.3%；然因馬達轉速較高，使變速後耕耘部之輸出轉速亦較高，在電動中耕機可以供應的扭力範圍內，比較輸出相同扭力下，耕耘軸輸出的功率高於汽油引擎。若以可輸出之最大耕耘軸功率比較，電動中耕機在扭力 6kg-m 下之輸出最大功率 583W 較汽油引擎在扭力 7.2kg-m 下之輸出功率 636W 低，約為汽油引擎的 91.7%。

當負載增加，馬達消耗更高功率以增加動力抵抗負載，耕耘軸功率亦因負載增加而上升。圖 7 顯示馬達消耗功率、耕耘軸功率與動力效率間之關係。結果顯示，當馬達消耗功率自 325.2 W 增加至 1575 W 時，耕耘軸功率亦由 59.7 W 增加至最高之 582.9 W。當耕耘軸扭力低於 2.8 kg-m 的負載下，耕耘軸輸出功率較馬達消耗功率具較明顯之增加趨勢，且於耕耘軸扭力 2.8 kg-m 時，動力效率最高，此時馬達消耗 825.5 W 可使耕耘軸輸出 368.3 W，動力效率約為 45%。測試結果顯示，所研製之電動中耕機可輸出最大 6 kg-m 之穩定扭力，然若耕耘軸扭力增加至 4 kg-m 以上，因耕耘軸轉速明顯下降的結果，將導致耕耘軸功率上升趨緩，動力效率下降。

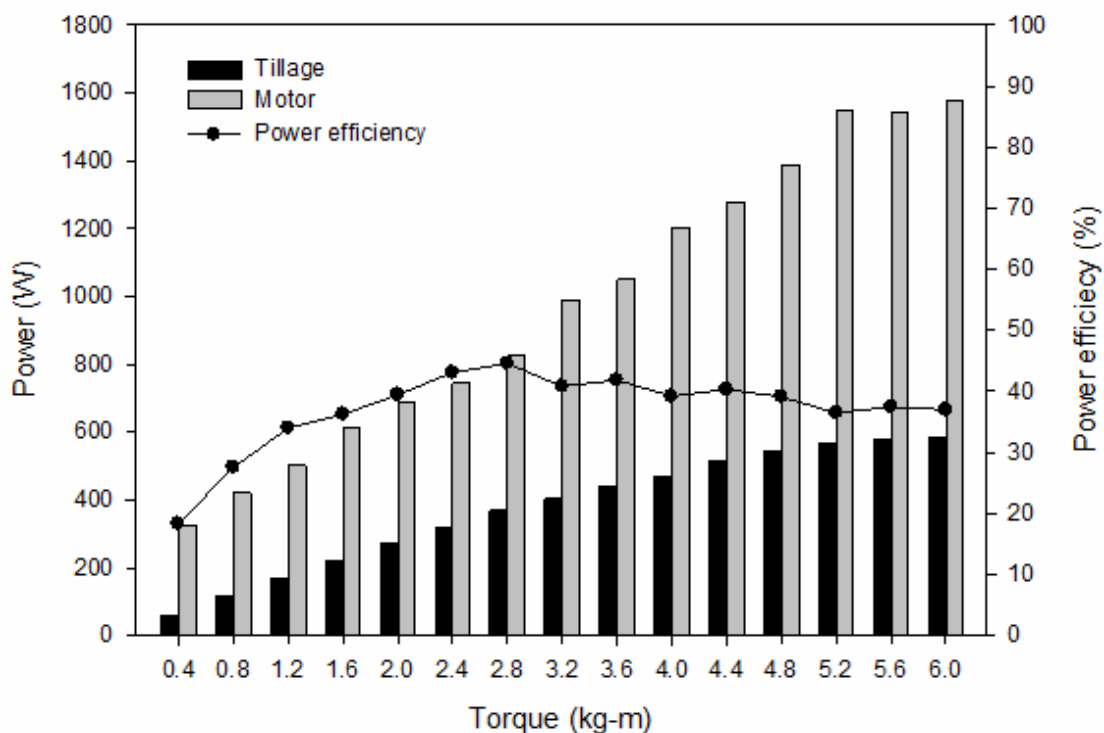


圖 7 折疊式電動中耕機馬達與耕耘軸輸出功率及動力效率關係。
 Fig. 7 The relationship of the power of cultivation shaft and power efficiency of the foldable electric cultivator.

二、電動中耕機田間性能測試結果

依經濟部中央標準局訂定之國家標準，中耕機之標準作業速度應高於0.5 m/s，作業平均轉彎時間應低於7.0 s，中耕翻土深度應高於6 cm及鋤草深度應高於2 cm。本研究所研製之電動中耕機田間性能測試共進行6次，結果如圖8所示。所研製電動中耕機之直線作業平均速度為0.6 m/s，轉彎平均時間 5.6 s，中耕翻土平均深度6.9 cm，鋤草平均深度4.5 cm。亦即所研製之之電動中耕機田間性能測試結果均符合國家標準。

圖9為電動中耕機田間翻土試驗之電量需求變化圖，平均消耗電流為50.02 A，標準差6.03 A。馬達平均輸出功率983.48 W，標準差147.52 W。馬達累積消耗電量為58.61 Ah。可觀察到中耕機在田間工作時，所承受的負載變動極大。

記錄磷酸鋰鐵電池放電過程電壓變化如圖10所示，電池在放電過程I中電壓由22.38 V緩慢下降至18.46 V，此放電過程消耗總電量86%，電壓下降3.92 V，操作時間60 min，電壓下降速率為0.065 V/min。當電池持續放電時，電池電壓由18.46 V快速下降至13.71 V，此放電過程II之殘餘電量約14%，電壓下降4.75 V，操作時間10 min，電壓下降速率為0.475 V/min。比較兩階段放電過程，鋰鐵電池放電時，其電壓變化小，這有利於維持

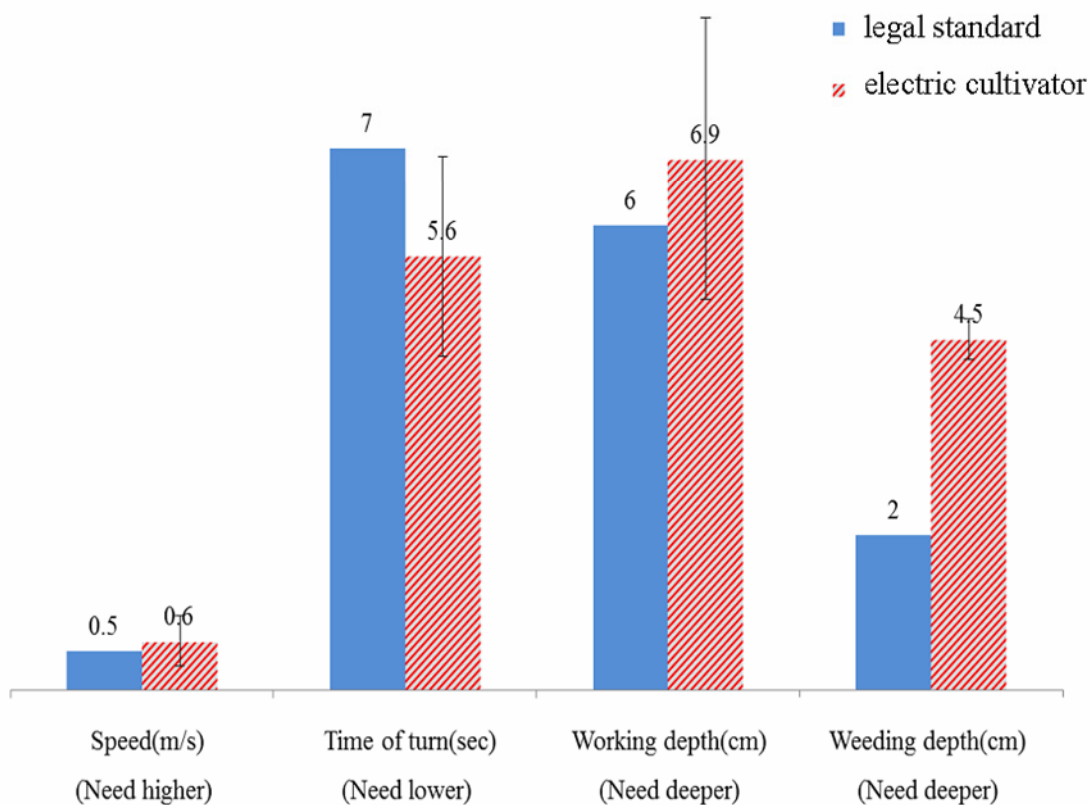


圖8 折疊式電動中耕機田間性能測試。
Fig. 8 The field performance of the foldable electric cultivator.

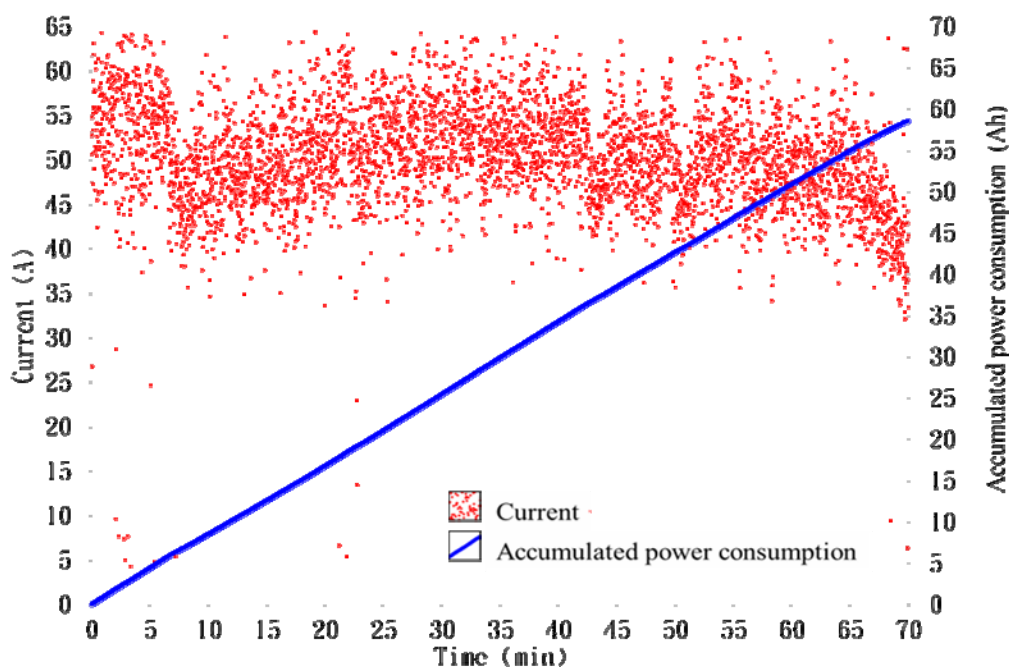


圖9 折疊式電動中耕機田間實驗之消耗電流與累計消耗電量變化。
Fig. 9 Variances of current and accumulated power consumption on motor of the foldable electric cultivator in field test.

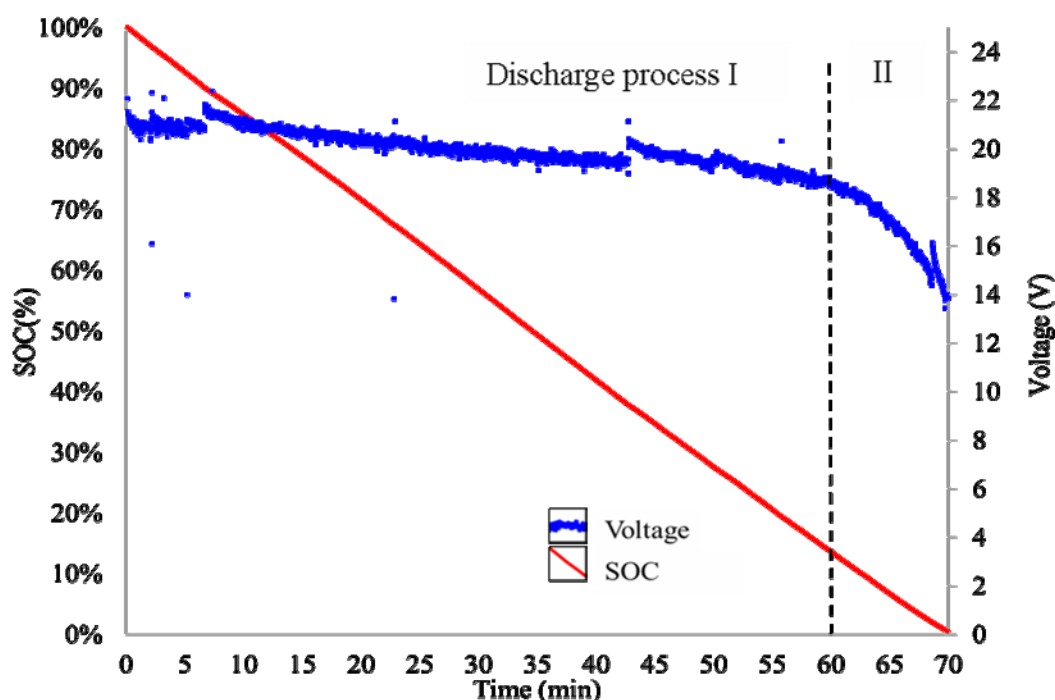


圖10 電量消耗與鋰鐵電池電壓之關係。

Fig. 10 The relationship between the power consumption and the voltage change of the LiFePO4 battery.

電動中耕機的作業能力。而突然開始驟降的電池電壓，影響馬達輸出功率，降低中耕機作業能力，表示電池電量即將耗盡，使用者需準備更換電池或將電池充電。

以普羅尼制動測功計施加固定負載於中耕機耕耘軸，分析中耕機耕耘軸在不同扭力下，馬達電量需求與持續作業時間之關係，如表2所示。當耕耘軸輸出扭力增加時，馬達消耗電流與輸出功率隨之增加，電池持續作業時間則減少。除輸出扭力3.8 kg-m，因所需消耗電流較大，累計消耗電量略小外，輸出扭力2.4-3.2 kg-m之累計消耗電量相當約59 Ah。

表 2 測功計實驗不同的固定負載下之耗電與持續作業時間

Table 2 The current, power, power consumption and working time while fixed loading at Prony Brake Dynamometer experiment

Loading (kg-m)	Current (A)	Power (W)	Power consumption (Ah)	Working time (min)
2.4	33.5 ± 7.8	714 ± 179	59.4	106.4
2.8	39.4 ± 5.9	808 ± 128	59.7	90.95
3.2	48.7 ± 5.5	990 ± 127	59.1	72.8
3.8	53.1 ± 10.6	1090 ± 229	55.0	60.25

田間作業時，耕耘軸輸出扭力與作業深度成正比，圖11顯示作業深度對持續作業時間與累積作業面積的影響，因作業深度愈深，中耕機耕耘軸輸出扭力愈大，持續作業時

間則減少，因此累積的作業面積則相對減少。

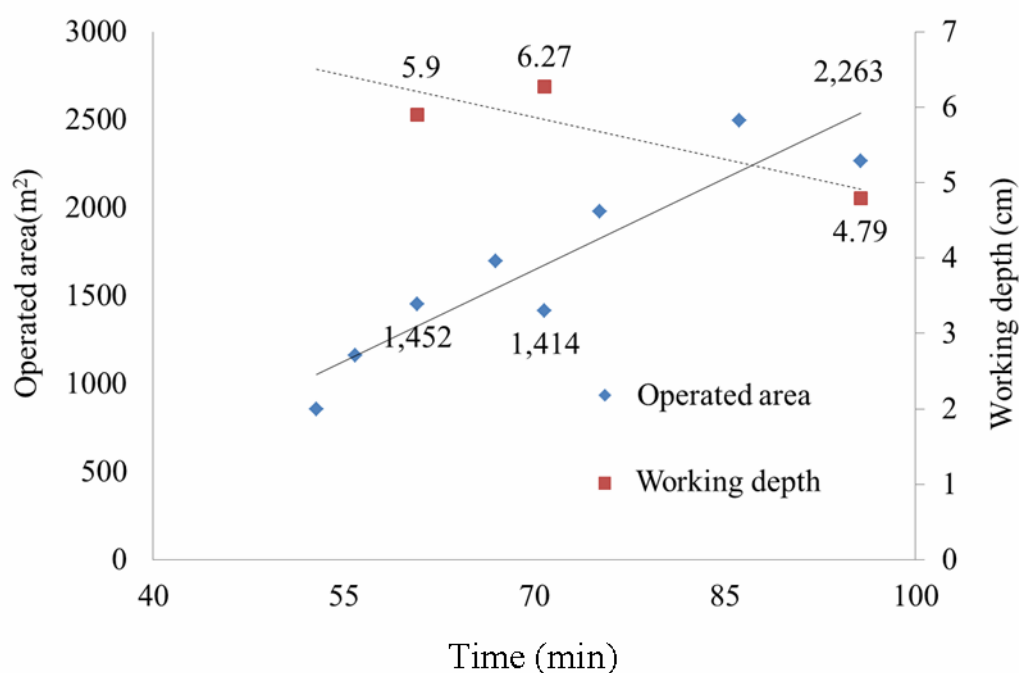


圖11 折疊式電動中耕機持續作業時間對累積作業面積與作業深度關係。
Fig. 11 The relationship between continuous working time and working depth of the foldable electric cultivator.

三、燃料成本分析與減碳效益評估

比較所研製之電動中耕機與汽油引擎中耕機之單位面積作業時間、燃料成本及CO₂排放量，結果如表3所示。將規格23.1 V、60 Ah之電池組充到飽滿狀態，平均需電力2.25度，經換算電池充電需電費新台幣6.64元，CO₂排放量1.188 kg。以此中耕機使用開墾刀於壤土田區中作業，充滿電之電動中耕機可於田間每行長50 m，共約68.7行之田間進行

表 3 折疊式電動中耕機與汽油引擎中耕機之作業成本與 CO₂ 排放量差異

Table 3 The differences between the electric cultivator and gasoline engine cultivator on energy consumption costs and CO₂ emissions

	Electric cultivator	Gasoline engine cultivator	Energy costs ratio (%)	CO ₂ emission ratio (%)
Energy costs (NT/ha)	34.66 ^x	230.37 ^y	15.05	---
Energy costs (NT/hr)	4.99	22.99	21.71	---
CO ₂ emission (kg/ha)	6.42 ^z	20.61 ^w	---	31.15
CO ₂ emission (kg/hr)	0.92	2.06	---	44.67

^x 每度電電價以 2.853 元計算(台灣電力公司，103 年歷年平均電價)

^y 每公升汽油油價以 25.26 元計算(經濟部能源局，104 年平均油價)

^z 每度電約排放 0.528kg 的 CO₂(工研院，104 年電力排放係數)

^w 每公升汽油 CO₂ 排放係數 2.26 kg(行政院環境保護署，105 年溫室氣體排放係數)

翻土作業77 min，以電動中耕機之平均作業寬度0.54 m計算，即每次充電可作業面積為1,855 m²。據此，所研製之電動中耕機田間作業1公頃需充電5.4次，每公頃電費成本為新台幣34.66元，而每公頃作業之CO₂排放量為6.42 kg。另外，所研製電動中耕機之平均作業速度為0.6 m/s，其每小時平均作業面積約1,166.4 m²，因此每公頃作業面積需時8.57 hr，又其每小時耗電量1.75度，因此其每小時之電費成本為新台幣4.99元，每小時之CO₂排放量為0.92 kg。

汽油引擎中耕機每次加滿油量為1.2 L，依經濟部能源局公告之燃料排放係數計算，CO₂排放量約2.71 kg。而單次滿油量之汽油引擎中耕機之田間作業面積約1,312 m²(每行長50 m，耕耘寬度0.54 m，共約81行)，因此田間作業1公頃，共需加油7.6次，耗油量共9.12 L，每公頃作業之CO₂排放量約為20.61 kg。以104年95無鉛汽油每公升平均價格新台幣25.26元計算，汽油中耕機田間作業每公頃之燃油成本為新台幣230.37元。而供試之汽油引擎中耕機平均作業速度0.6 m/s，作業寬度0.54 m，汽油引擎中耕機每小時平均油耗0.91 L，因此每小時燃油成本為新台幣22.99元，每小時之CO₂排放量為2.06 kg。由上述結果比較兩種中耕機之田間作業能源成本差異。結果顯示，所研製之電動中耕機之能源成本僅為汽油引擎中耕機之15.05%，且CO₂排放量僅為汽油引擎中耕機之31.15%，亦即電動中耕機於節能效率上表現優勢，並且大幅降低中耕作業之碳排放量，對降低空污更具實效。

結 論

本研究所研製之「折疊式電動中耕機」，機體輕量化且手把可收折，大幅提升機具之操作便利性。本機以直流無刷馬達為動力，磷酸鋰鐵電池為供電源，裝設中耕刀具，並以作業刀具運轉，驅動機體前進。動力傳動方式，由離心式離合器至動力傳動軸經蝸輪蝸桿減速至耕耘部，耕耘部扭力為6 kg-m，卸下電池後本機重量約27 kg。機體田間作業性能為中耕寬度達54 cm，中耕翻土平均深度6.9 cm，除草深度約4.5 cm，直線作業平均速度為0.6 m/s，轉彎平均時間5.6 s，符合國家標準。本機最佳動力效率為45%。電池充到飽滿狀態需3小時，平均作業時間77 min。比較每公頃田間作業面積下，電動中耕機能源成本僅為汽油引擎中耕機之15.05%，且CO₂排放量僅為汽油引中耕機之31.15%，能源使用成本與節能減碳均具有經濟與環保效益。

誌 謝

本研究承農委會農糧署經費補助(103農科-8.2.1-糧-Z1(4))，謹此致謝。

參考文獻

- 林永順。2005。農作篇(一)。台灣農家要覽(增修訂三版)，373-380。農學社。
- 邱活泉。2007。蝸輪減速機效率之研究。農業機械學刊16: 39-46。
- 陳貽倫。2010。農業動力。pp.435-440。南山堂出版社。台北。
- 鄭允誠。2011。台灣中小型農機耗能調查及中耕除草機電動化評估與研製。國立嘉義大學生物機電工程學系碩士論文。
- 劉舸。2004。圓柱蝸桿斜齒輪傳動的理論分析及試驗研究。重慶大學機械工程學院碩士論文。
- Dewangan K. N., G. V. P. Kumar, and V. K. Tewari. 2005. Noise characteristics of tractors and health effect on farmers. *Applied Acoustics* 66: 1049-1062.
- Haruo S. 2007. Development of an electric powered tiller for house gardening. *J. Asian Electric Vehicles* 5: 961-966.
- Omar N., M. A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. V. den Bossche, and T. Coosemans. 2014. Lithium iron phosphate based battery-Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy* 113: 1575-1585.
- Tie, S. F., and C. W. Tan. 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 82-102.
- Wang, T., C. Zhang., and Z. Chen. 2014. A method for joint estimation of state-of-charge and available energy of LiFePO₄ batteries. *Applied Energy* 135: 81-87.

105 年 9 月 1 日投稿
105 年 11 月 29 日接受