



逢甲大學學生報告 ePaper

結合混合儲能策略及能源管理系統實現無人機續航時間提
升

Enhancing Drone Endurance by Integrating Hybrid Energy Storage Strategies and an Energy Management System

作者：蔡家杰

系級：電機四甲

學號：D1055261

開課老師：徐士賢教授

課程名稱：專題研究(二)

開課系所：電機工程學系

開課學年：113 學年度 第一學期



中文摘要

無人機的應用範圍十分廣泛，包括地理與建築探勘、科學研究、能源探索、農林業與娛樂等領域，近年來更是擴展到緊急搜救與軍事用途等。其中，無人機的續航力扮演了其使用的價值及其延伸應用性的關鍵角色。一般而言，提升無人機之續航時間的方法有兩種，第一是透過減輕機身重量來達到；第二則為增加無人機的電池蓄電量，以增長航行時間。本研究擬以**超級電容(Supercapacitor, SC)**及**鋰離子電池(Lithium-ion battery)**組成**混合能源系統(Hybrid Energy System, HES)**，利用各自的充放電特性達到優化無人機之電池容量提升續航時間。藉由**能源管理系統(Energy Management System, EMS)**監控鋰離子電池與超級電容的電量資訊做為決策條件，並以**微控制器(Microcontroller Unit, MCU)**控制混合能源系統中鋰離子電池與超級電容之輸出功率占比，利用最佳調適放電策略，充分利用鋰離子電池電能以提升無人機之滯空時間。

關鍵字：放電策略、混合能源系統、能源管理系統、超級電容



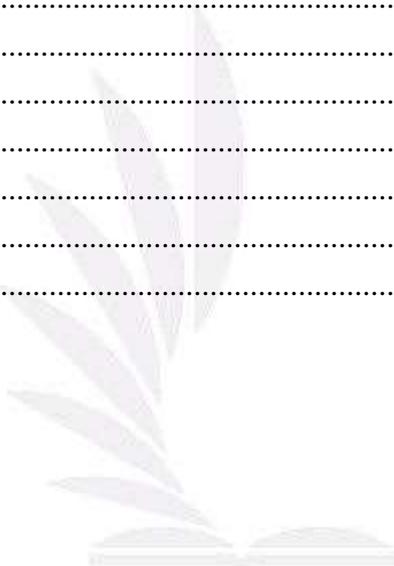
Abstract

The application range of drones is extremely broad, covering fields such as geographic and architectural surveying, scientific research, energy exploration, agriculture and forestry, and entertainment. In recent years, it has further expanded to include emergency search and rescue operations as well as military uses. Among these, the endurance of drones plays a critical role in determining their value and extended applicability. Generally, there are two approaches to enhancing drone flight time: the first is by reducing the weight of the drone, and the second is by increasing the energy storage capacity of its battery. This project proposes a hybrid energy system (HES) composed of a supercapacitor (SC) and a lithium-ion battery, leveraging their respective charge and discharge characteristics to optimize the battery capacity and extend the drone's flight time. By employing an energy management system (EMS) to monitor the energy levels of the lithium-ion battery and the supercapacitor, these data serve as the basis for decision-making. A microcontroller unit (MCU) is utilized to regulate the power output distribution between the lithium-ion battery and the supercapacitor within the hybrid energy system. Through an optimal adaptive discharge strategy, the energy from the lithium-ion battery can be fully utilized, thereby improving the drone's flight endurance.

Keyword : Discharge Strategy, Energy Management System (EMS), Hybrid Energy System (HES), Supercapacitor (SC)

目 次

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
目 次.....	3
緒 論.....	4
一、研究動機.....	4
二、研究目標.....	5
文獻探討與理論基礎.....	7
一、混合能源系統設計.....	7
二、直流/直流轉換器.....	8
三、能源管理系統.....	9
系統架構.....	11
一、硬體架構.....	11
二、軟體架構.....	11
實驗架構.....	13
一、實驗設置.....	13
二、實驗方法.....	14
研究成果.....	15
參考文獻.....	17



緒 論

一、研究動機

無人機作為現代化載具的代表之一，在用途上通常分為軍用及民用，其應用範圍更包括各式探勘、能源、農業、娛樂等各種領域。因此，無人機的商業市場在近年大幅增長，根據 Drone Industry Insight 研究顯示[1]，全球無人機市場價值將在 2030 年達到 546 億美元。一般商用無人機的平均續航時間大約在 30 分鐘至 60 分鐘之間，在頻繁的使用下時常需要一直充電，故增加電力續航必然成為各企業應當解決的關鍵技術問題。常見的無人機以鋰離子電池作為主要動力來源，增加無人機之電力續航方法可透過減輕其機身重量或增加無人機蓄電量；但減輕機身重量耗費大量成本，而增加蓄電量又會導致無人機負載增加，兩者在成本及效益上皆有優缺點。因此若是能將現有無人機的鋰離子電池放電效率最佳化，將能以較少量成本有效提升無人機之電力續航。

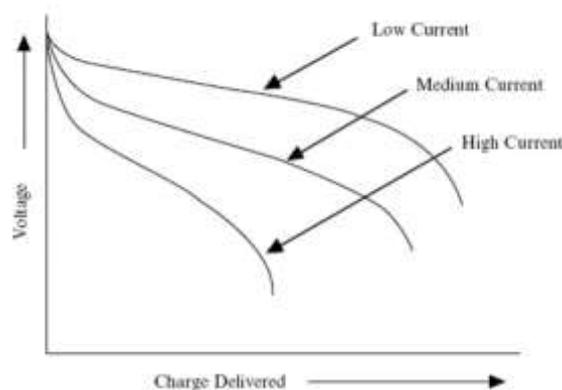


圖 1 鋰離子電池放電電流與電壓關係圖[2]

為了提升無人機之鋰離子電池放電效率，首先需要了解鋰離子電池放電曲線，如上圖 1 所示，由於鋰離子電池的高能量密度特性，在高功率輸出時鋰離子電池的輸出電流較高，使得耗電量大幅升高，且輸出電壓將會大幅降低，因而減少電能利用率。因此，本研究將使用超級電容來解決此問題，藉由其高功率密度特性，在高功率的輸出下比鋰離子電池更有效率，並能減緩鋰離子電池的電壓降，提升鋰電池電能利用率，兩者比較如表 2.1。本研究擬設計包含鋰離子電池及超級電容之混合能源系統以及能源管理系統，結合鋰離子電池和超級電容的優點，透過最佳放電調適策略，在不同輸出狀態下調整兩者之輸出功率占比，使其最大程度優化混合能源系統之放電效率，藉此提升無人機之電力續航。

表 1 超級電容與鋰離子電池之特性比較表[3]

Characteristic	Supercapacitor	Lithium Battery
Temp	-40~85°C	-20~45°C
Cycle Life	>1,000,000	10,000
Power Density	10,000W/kg	100~3000W/kg
Energy Density	1~10Wh/L	250~650Wh/L
Efficiency	>98%	90~95%

二、研究目標

本研究旨在提升無人機之鋰離子電池的電能供應效率，當鋰離子電池在較大輸出功率時因大電流產生的溫度上升[4]以及濃差極化現象[2]造成輸出電壓急速下降，導致電能無法完全使用，如何適時降低鋰離子電池在無人機運行時的輸出負擔，減緩電壓降提升鋰離子電池利用率將為本研究的主要目標。目前常見應用於鋰離子電池電路中，有效降低鋰離子電池充放電特性缺點的方法為利用超級電容加上直流/直流轉換器與鋰離子電池串並聯之 HES，以超級電容快充、快放、低內阻及高功率密度之特性分擔鋰離子電池在大電流輸出需求下的負擔並減緩電壓降。常見的 HES 有被動式、半主動式、全主動式等類型，其中半主動式之電力續航效果相較被動式有更好的增益，適合用於提升小型無人機的電力續航，且成本及體積相較於全主動式又更為低廉且精巧，容易用於無人機的電力續航上。而 HES 中，直流/直流轉換器多以雙向升降壓直流/直流轉換器(Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter)為主，其目的將在於改變鋰離子電池與超級電容之端電壓，進而分配兩者的輸出功率，提升鋰電池電能利用率。此外，在無人機運行期間隨著工作模式不同將會有變動的輸出功率，如起飛、降落、加速飛行都會導致輸出功率攀升。因此，本研究為了最大提升無人機之電力續航，使用 EMS 即時監測鋰離子電池之輸出電壓及輸出電流作為判斷條件。透過 MCU 切換 HES 中超級電容與鋰離子電池輸出電能，利用超級電容協助放電以減少鋰離子電池的電壓降，提高電池壽命並增加鋰離子電池之使用時間。將以上問題透過軟體程式與硬體電路方式實現本研究。研究完成所預設之工作目標如下：

1. HES 供電狀態量測與 HMI 介面：透過 EMS 量測並計算鋰離子電池與超級電容即時之輸出電壓及輸出電流做為電能控制決策參數，並同步於人機介面 (Human Machine Interface, HMI) 以圖表顯示。

2. HES 製作：透過雙向升降壓直流/直流轉換器連接超級電容與鋰離子電池，實現可由 MCU 進行電路切換的 HES。

3. EMS 與 HES 控制：撰寫 EMS 軟體程式與製作硬體電路，將量測所得之 HES 輸出相關數值作為控制判斷依據，透過程式運算與擬定之控制策略改變鋰離子電池與超級電容之輸出配比，達到提升鋰電池電能利用率。



文獻探討與理論基礎

一、混合能源系統設計

鋰離子電池與超級電容做結合的混合能源系統(HES)主要可以分成三種，被動式混合能源系統(Passive HES)、半主動式混合能源系統(Semi-Active HES)和全主動式混合能源系統(Full Active HES) [5]。其中被動式混合能源系統直接將鋰離子電池與超級電容並聯至負載端如下圖 2 所示，是三者當中最簡單、成本最低廉的方法，能有效抑制瞬態電流、提高峰值功率並減少內部損耗，但由於超級電容的利用效率不佳，對於鋰離子電池的使用時間並無特別提升。半主動式混合能源系統可分為超級電容半主動式混合能源系統(Supercapacitor Semi-Active HES)如下圖 3 所示，以及電池半主動式混合能源系統(Battery Semi-Active HES)如下圖 4 所示。超級電容半主動式混合能源系統以直流/直流轉換器將超級電容與負載端連接，可提升超級電容之使用效率並穩定負載端之電壓，由於鋰離子電池直接連接至負載端，因此也能達到穩定電壓的效果。鋰離子電池半主動式混合能源系統以直流/直流轉換器將鋰離子電池與負載端連接，在高功率輸出時，由超級電容直接放電可以保護鋰離子電池不受高電流影響，卻在負載端造成劇烈電壓波動，影響無人機的運作[6]。全主動式混合能源系統如下圖 5 所示，鋰離子電池與超級電容皆有直流/直流轉換器與負載端連接，鋰離子電池與超級電容都能各別獨立控制，因此可以最佳化控制鋰離子電池與超級電容的放電，但其體積最大、成本最高且系統複雜。鑒於以上四種混合儲能電路優劣，本研究採用超級電容半主動式混合能源系統，得以較低成本提升無人機之電力續航。

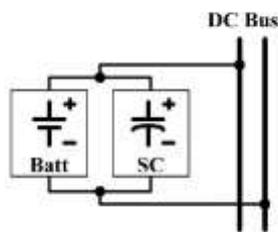


圖 2 被動式混合能源系統[5]

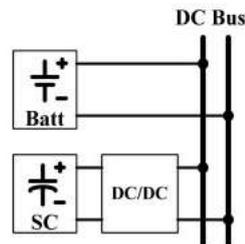


圖 3 超級電容半主動式[5]

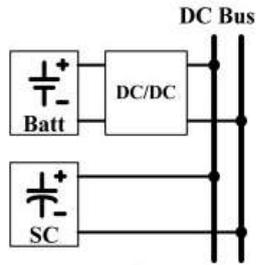


圖 4 鋰離子電池半主動式[5]

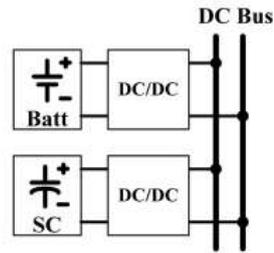


圖 5 全主動式混合能源系統[5]

二、直流/直流轉換器

直流/直流轉換器是常見用於電子儀器以及設備中的裝置，其目的為接收直流輸入電壓並產生數值不同的直流輸出電壓。在混合能源系統中更是廣泛利用直流/直流轉換器控制鋰離子電池或超級電容之端電壓，以調整輸出功率配比及輸出電流大小，進而提升能源使用效率。以下將整理較為常見的三種直流/直流轉換器。[7]

1. 降壓轉換器(Buck Converter)：

Buck Converter 的主要功能為直流降壓，其電路如下圖 6 所示。當電晶體導通時，輸入電壓 V_{in} 通過電感使得電感電流 I_L 上升。當電晶體不導通時，電感電流將流經二極體迴路。

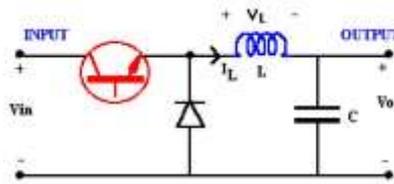


圖 6 Buck Converter 電路圖[7]

定義責任週期(Duty Cycle) D

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

得到輸入電壓與輸出電壓之關係式

$$V_o = D \times V_{in}$$

由於 D 介於 $0 \sim 1$ 之間，故可得 Buck Converter 的電壓增益必小於 1，其功能為降壓。

2. 升壓轉換器(Boost Converter)：

Boost Converter 的主要功能為直流升壓，其電路如下圖 7 所示。當電晶體導通時，電感兩端電壓相同 $V_L = V_{in}$ 。當電晶體不導通時， $V_L = V_{in} - V_o$ 。假設電感電流不會為零，即連續狀態。

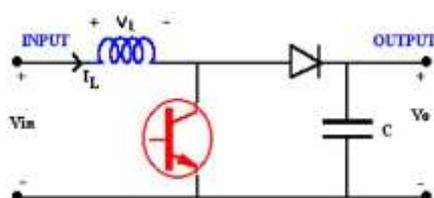


圖 7 Boost Converter 電路圖[7]

整理後得其電壓增益

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

由於 D 介於 0~1 之間，故可得 Boost Converter 的電壓增益必大於 1，其功能為升壓。

3. 升降壓轉換器(Buck-Boost Converter)：

Buck-Boost Converter 的主要功能為直流升降壓，其電路如圖 8 所示。當電晶體導通時，電感兩端電壓相同 $V_L=V_{in}$ 。當電晶體不導通時， $V_L=V_o$ 。假設電感電流不會為零，即連續狀態。

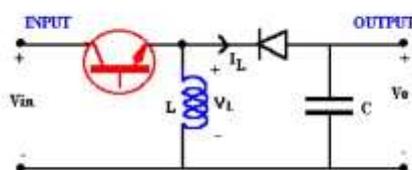


圖 8 Buck-Boost Converter 電路圖[7]

整理後得其電壓增益

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1-D}$$

由於 D 介於 0~1 之間，故可得 Buck-Boost Converter 的輸出電壓可大於輸入電壓，也可小於輸入電壓，其功能為升降壓。

三、能源管理系統

能源管理系統其主要目的在於監控電池狀態、確保電路安全、保護電池延長使用壽命與發揮電池效能最大化。完整的 EMS 結構通常由三個 IC 組成：數位/類比前端(Analog Front End, AFE)、MCU 以及電量計(Fuel Gauge)，如下圖 9 所示。

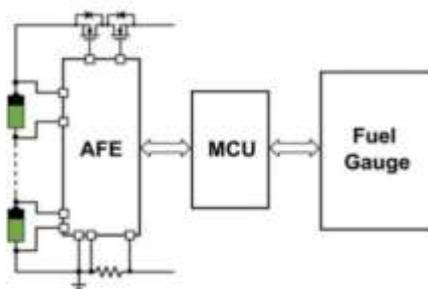


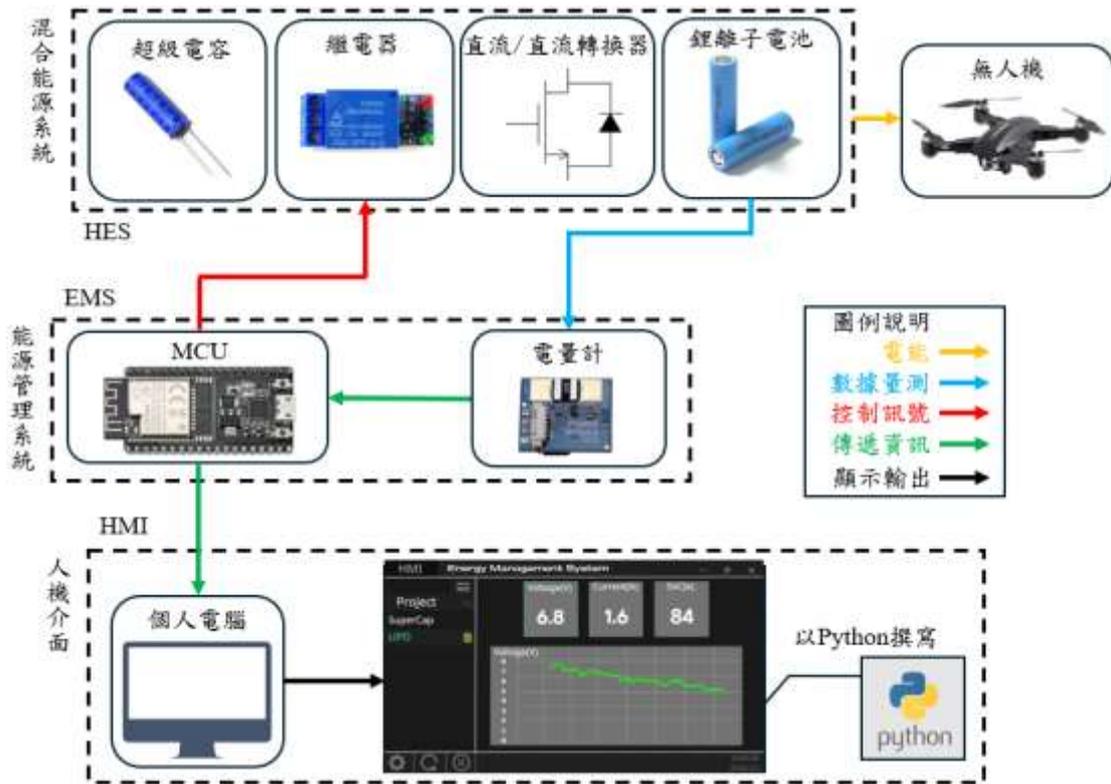
圖 9 EMS 架構示意圖

其中，AFE 主要用來讀取電池的電壓、電流和溫度資訊，並傳輸給 MCU 及電量計。電量計 IC 從 AFE 取得資料後，利用電池模型及進階演算法來估計 SoC、SoH 及放電深度(Depth of Discharge, DoD) [8]。AFE 在測量電壓及電流時，透過電流分流電阻以及數位類比轉換器(Analog-to-digital converter, ADC)量測，而該分流電阻應具備低電阻值以及低功耗，能夠在不影響到電路的條件下準確量測到電壓、電流值，也可以使用特殊的印刷電路板布局，在雙端子電流分流電阻上達到凱爾文接法(Kelvin Connection)，也可以利用四端子電流分流電阻進行量測。

系統架構

一、硬體架構

本系統硬體架構如下圖 10 所示，使用 ESP32 作為 MCU，並以 C 語言進行撰寫。能源管理系統中的電量計將利用 Power module v1.0 晶片，可快速且準確的量測計算出鋰離子電池的輸出電壓及輸出電流。MCU 接收數據與計算後對 HES 電路中的繼電器進行控制，調整 HES 的電路方向以決定鋰離子電池及超級電容的輸出配比。同時個人電腦將接收 MCU 傳送的資訊，進而將各項電池數據顯示於 HMI 上，以利使用者觀察。



二、軟體架構

本裝置軟體架構如下圖 11 所示，從無人機開始運行後，EMS 中 AFE 及電量計晶片即時量測計算得出鋰離子電池之輸出電壓及輸出電流等電池參數。並將資訊傳遞至 MCU 及個人電腦中，顯示於 HMI 並判斷鋰離子電池之輸出情形。本研究區分兩種情境進行控制，若電池電壓低於設定值亦即低電量狀態，或是輸出電流超過設定大小，如急加速或重載的瞬間的大功率輸出情境。當這兩種狀況

條件達其一時，則透過 MCU 以輸出控制訊號至混合能源系統中的繼電器以調整電路流向，提高超級電容端電壓協助鋰離子電池輸出電流，從而減緩鋰離子電池之電壓驟降，充分利用鋰離子電池之電能，延長無人機之電力續航力。

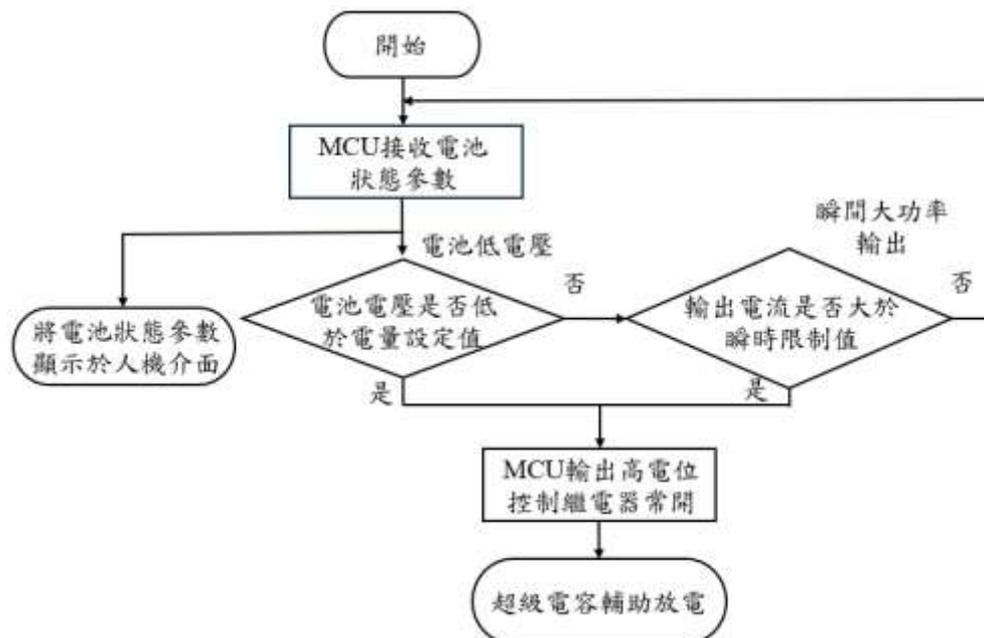


圖 11 本研究軟體工作流程圖

實驗架構

一、實驗設置

本研究中提及 HES 架構中之超級電容、繼電器、直流/直流升降壓轉換器與鋰離子電池以及 MCU 於實驗過程中透過盤面進行連接，如下圖 12 所示。此外，將實驗盤面透過電子負載進行動態功率模式放電以模擬無人機使用情境。如下圖 13 所示。

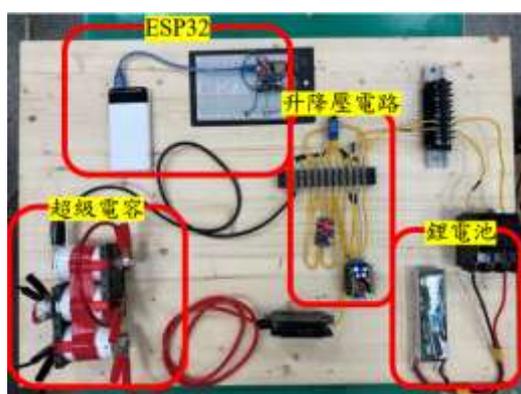


圖 12、實驗盤面



圖 13、實驗盤面連接電子負載

為驗證本研究所提出之系統得以有效延長鋰離子電池之放電時間以及放電量，實驗使用市售常見 Panasonic NCR18650B 鋰離子電池以及無人機配置之格氏電池進行放電，兩種電池規格如下表 2 所示。此外，因 Panasonic NCR18650B 鋰離子電池單顆充電電壓為 4.2V，遠低於無人機實際工作電壓，故本研究透過串連三顆 Panasonic NCR18650B 將電池組電壓提升至 12.6V 進行實驗。同時，考慮到電池過放將影響電池健康度，使後續實驗難以進行，故將 18650 電池組以及格氏電池於實驗中之截止電壓分別設定為 7.75V 以及 9.9V。

表 2 實驗用兩種鋰離子電池規格表

類別	Panasonic NCR18650B	格氏 ace-5300mAh-45C
額定電壓	3.6V	11.1V
充電電壓	4.2V	12.6V
截止電壓	2.5V	9.6V
額定容量	3100mAh	5300mAh
重量	45.5g	375g

二、實驗方法

本實驗透過設定電子負載進行動態放電模擬無人機實際使用情況，如下圖 14 所示，電子負載將於 30W 以及 50W 間進行切換放電，以模擬無人機使用時的突加速情況。作為對比，實驗使用三種不同之放電策略進行實驗如下表 3，並比較其放電時間以及放電量。其中，超級電容組之滿電壓為 9V，低於格氏電池設定之截止電壓，故格氏電池不進行直接並聯放電。

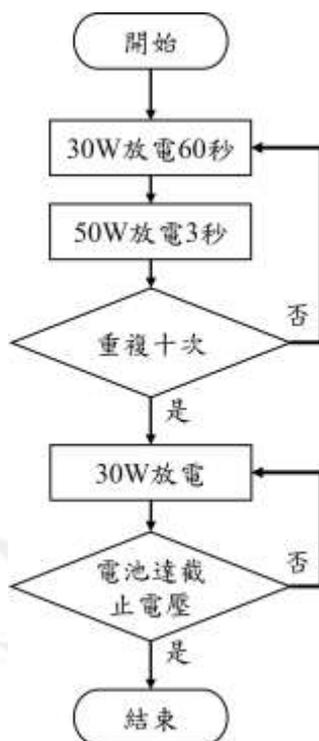


圖 14、電子負載放電流程圖

表 3 實驗用三種放電策略

類別	方法
直接放電	將鋰電池與負載直接進行連接
直接並聯	將超級電容與鋰電池直接進行並聯後連接負載
策略執行	將本研究提出之系統與負載進行連接

研究成果

本研究以超級電容及鋰離子電池組成混合能源系統，透過主動切換電路妥善利用混合能源系統中元件各自的充放電特性達到優化無人機之電池放電量以提升續航時間。系統運作期間，透過能源管理系統監控鋰離子電池的電量資訊做為決策條件，並以微控制器切換混合能源系統之電路模式，藉由超級電容於設定條件下輔助鋰離子電池輸出電能，降低鋰離子電池在大功率輸出需求下的負擔，充分利用鋰離子電池電能以提升無人機之滯空時間。同時透過人機介面將能源管理系統所收取資訊同步以圖表方式於個人電腦中顯示如下圖 15 所示，方便使用者進行管理。

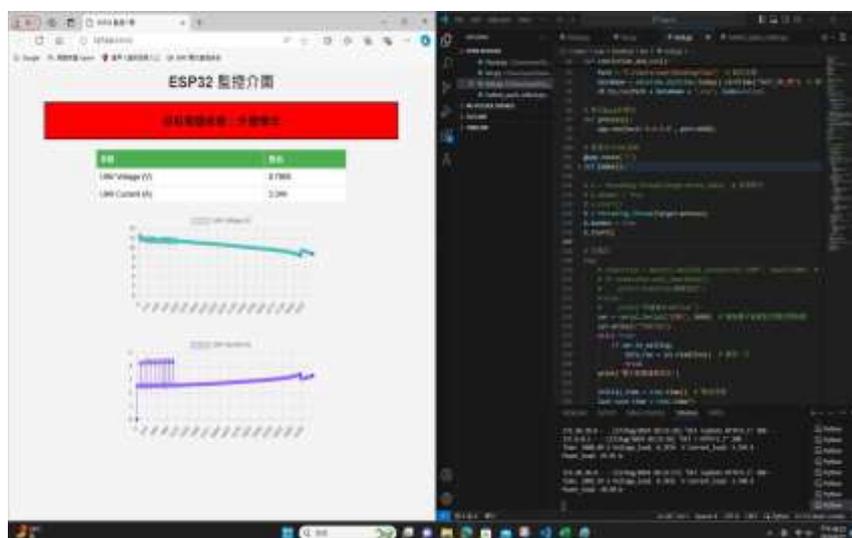


圖 15 人機介面

表 4 實驗數據表

電池類型	Panasonic NCR18650B			格氏電池	
	直接放電	直接並聯	策略執行	直接放電	策略執行
放電時間(s)	3868.1	3928.9	4013.6	7214.8	7450.7
放電量(mAh)	3072.3	3124.2	3225.1	5190.7	5373.5

將無人機所使用格氏電池透過設定電子負載以相同程序放電，同時收取鋰離子電池直接放電、超級電容直接並聯以及加上本研究所提策略與系統放電數據如上表 4 所示，經計算後得 Panasonic NCR18650B 鋰離子電池於策略執行時總放電時間相對直接放電延長 145.5 秒(3.76%)、總放電能量增加 185.2mAh(4.97%)，相較於超級電容直接並聯相對直接放電所帶來的延時 60.8 秒(1.57%)、增能 51.9mAh(1.67%)來得更佳，也直接驗證了本研究所提出策略之可行性，格氏電池

於策略執行總放電時間相對直接放電延長 235.9 秒(3.27%)、總放電能量增加 182.8mAh(3.52%)，比較如下圖 16 所示。最終本研究將實驗盤面之系統整合至 PCB 上，並進行模組化的包裝如下圖 17。

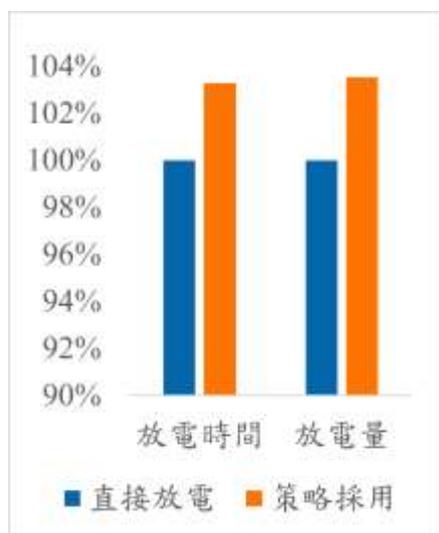


圖 16 結果比較



圖 17 本研究 HES 成品

本研究亦可透過調整軟體程式參數，應用於各種鋰電池設備，增加鋰電池放電量的同時也能避免鋰電池供給過大電流而影響電池壽命。使用者亦可透過人機介面監測鋰電池放電狀態，維護電路安全性。在未來材料方面的先進發展中，倘若能夠出現能量密度更高的超級電容元件，屆時本研究所提之系統亦能大幅減輕載具所承負重、系統體積等等之缺憾。

參考文獻

- [1]. “Drone Market Report 2023-2030 - A Fast-growing Industry-Droneii,” Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://droneii.com/product/drone-market-report>
- [2]. B. Sahal, P. Quach, and K. Goebel, “Exploring the Model Design Space for Battery Health Management,” Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2011.
- [3]. K. M. Kang, Y. S. Ko, Y. S. Lee, J. Yi, and C. Y. Won, “The Operation Method of Hybrid Power Supply System Combining Lithium Polymer Battery and Supercapacitor for Industrial Drones,” *Energies*, vol. 16, no. 22, 2023.
- [4]. T. Dong, P. Peng, Y. Wang, W. J. Cao, Y. D. Zheng, B. Lei, F. M. Jiang, “Simulation on lithium ion battery discharge process with large current,” *CIESC Journal*, vol. 71, no. 8, pp. 3710-3721, 2020.
- [5]. W. Jing, C. H. Lai, S. H. W. Wong, and M. L. D. Wong, “Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids : a review,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 461-469, 2017.
- [6]. Q. Zhang and G. Li, “Experimental Study on a Semi-Active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 1014-1021, 2020.
- [7]. 周以軒, “低功率儲能系統之回授式升壓型轉換器設計與實現”, 國立交通大學電機與控制工程學系, 碩士論文, 民國九十八年
- [8]. B. Tarhan, O. Yetik, and T. H. Karakoc, “Hybrid battery management system design for electric aircraft” *Energy*, vol. 234, no. 121227, 2021.