

高負載無人機電源管理監測技術

Real-time Monitoring Technology for Power Consumption of the UAV System

葉信典^{1*}、陳正大²、梁家銘³、陳冠樺⁴、崔虎軒⁴

¹ 工研院機械所 控制核心技術組 無人機系統技術部 工程師

² 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合技術部 副工程師

³ 工研院機械所 控制核心技術組 機電控制整合技術部 助理工程師

⁴ 中華科技大學 航空電子系 研究生

摘要：本文針對大型六軸多旋翼無人機系統在電推槳模組配置進行說明，並介紹整機功耗監測系統架構與實測數據，透過此狀態監測模組可在調機測試時協助分析起飛、懸停、側傾抗風、巡航等情況下，整機最大、最小與平均功耗，藉由整機重量與平均功耗計算出旋翼無人機力效比，透過力效比可計算出準確的續航時間，而旋翼無人機搭配不同種類電池，其放電特性也會影響到飛控參數調整，預期本監測技術可輔助提升調機後的系統穩定性。

Abstract : This article describes configuration of the electric propeller module for a large six-axis multi-rotor UAV system, and introduces the overall power consumption monitoring system architecture and measured data. This status monitoring module can assist in the analysis of take-off and suspension during the adjustment test. The maximum, minimum, and average power consumption of the whole machine under the conditions of stop, rollover, wind resistance, and cruise will be shown. The power efficiency ratio of the rotor UAV is calculated by the weight and average power consumption of the whole machine, and the accurate endurance can be calculated through the power efficiency ratio. However, the discharge characteristics of the drone with different types of batteries will also affect the adjustment of the flight control parameters. It is expected that this monitoring technology can assist in improving the system stability after the adjustment.

關鍵詞：無人機、監測、耗電量

Keywords : Unmanned Aerial Vehicle, UAV, Monitor, Power consumption

前言

無人飛行載具，簡稱無人機，於過去的十年間快速的發展，也造就不少經濟上的貢獻。無人機根據本身的飛行結構可以將其分類為使用固定翼、旋轉翼或混和固定翼以及旋轉翼構型做為主要的動力來源。以目前的發展來看，軍事所使用的無人機大多為固定翼設計，而商用及娛樂用的無人機則是以直升機型以及四至六支螺旋槳的多旋翼無人機設計為主。

目前台灣大多將無人機與空拍機混為一談，起因為在一般消費型無人機機種的應用中，透過多旋翼無人機進行空拍以及藝術創作為大宗，其次的應用則是透過無人機進行探勘與偵測。自從去年三月三十一日起，隨著台灣無人機管理專法的啟動，以往對於法規尚未限制的消費型無人機飛行區域僅可在受限制的區域進行飛行，透過此次專法的啟動，也間接的讓無人機產業大步的向商業服務邁進，讓台灣無人機市場邁入嶄新的一步。而在各國法規及新興商業模式下，成長最為

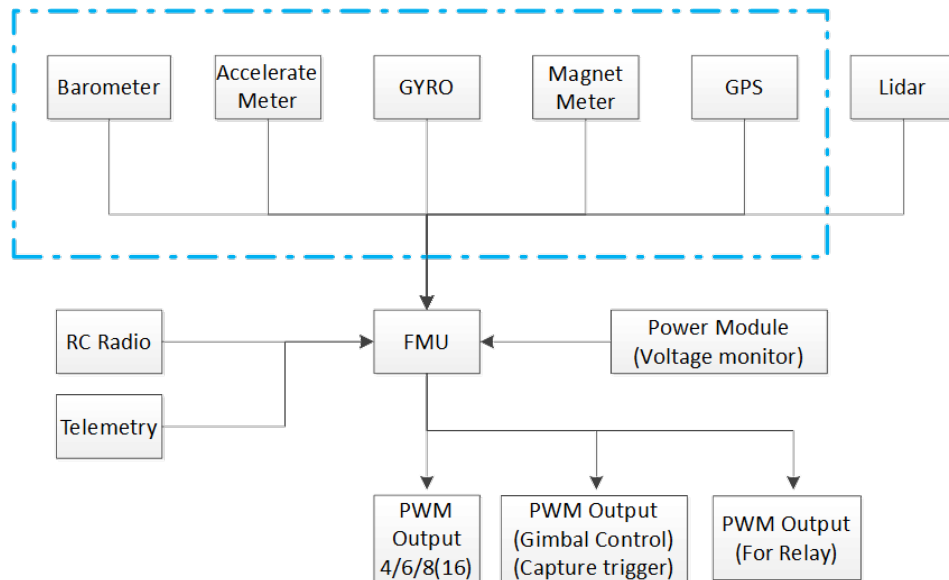


圖 1 飛行控制器架構圖

顯著的商業應用領域包含農業植保業務、空拍影片、無人機展演等，未來在無人機遞送服務將會是帶動交通與倉儲物流的發展變革，另外基礎設施也開始採用無人機執行空中巡檢，以強化設施/設備的日常運作及安全管理工作。

大型多旋翼無人機設計要點

無人機由機架、飛行控制器、電子調速器、馬達、槳葉、遙控器、電池所組成。若需要進行自動飛行（路徑規劃），尚需要定位系統以及地面導控站（也可以使用手機或是平板代替，直接透過手機應用程式進行任務規劃）。多旋翼無人機在小型或是超大型的基本硬體架構都相同，但除了遙控器以及飛行控制器，其主要的硬體規格，在大小型多旋翼無人機上有著顯著的差異，比如在馬達上就有航拍、物流、植保、載人等等的不同級距，所以需要花上大量的研究及實驗測試才能開發出一架大型的無人機。

無人機的核心技術集中在機架系統、動力系統和飛行控制器系統，由這三個系統可以知道無人機系統可以達到的飛行高度、航程距離、航時、航速、載重等技術資料。飛行控制器方面，採用的是開放性的 Pixhawk [1] 硬體架構，Pixhawk [1]

是同時間可以適用於固定翼、多旋翼和直升機，船舶、車輛以及一切其他可移動的機器人架構。Pixhawk [1] 採用了 ST 先進的處理器，同時可以選擇搭載 NuttX/Chibios [2][3] 實時作業系統。

Pixhawk 硬體主要特徵如下：

- 1) 使用 32 bit STM32F427 Cortex-M4F® core with FPU, 256 KB RAM
- 2) 具有 32 bit STM32F103 failsafe co-processor
- 3) 14 路 PWM / Servo 輸出
- 4) 具有冗餘電源設計，可透過兩組電源輸入確保飛控供電正常
- 5) 飛行控制器架構包含 9 軸傳感器以及氣壓計

無人機飛行控制器的架構如圖 1 所示：

在動力系統方面，需要先了解整體無人機所需要的載重與續航時間，以利進行馬達與槳葉最佳化的配比以及電池種類選用，首先透過整機動力需求分析將馬達及槳葉進行不同配對，再由槳葉拉力台測試，以同樣馬達不同尺寸槳葉比較或是不同規格馬達同樣尺寸槳葉去進行比較分析，最後得到最佳化組合數據，圖 2 為在選用同樣馬達不同尺寸槳葉時，實際拉載後所能提供數計分析之資料，圖 3 為在選用同樣馬達不同尺寸槳葉時，實際拉載後所能提供數計分析之資料。

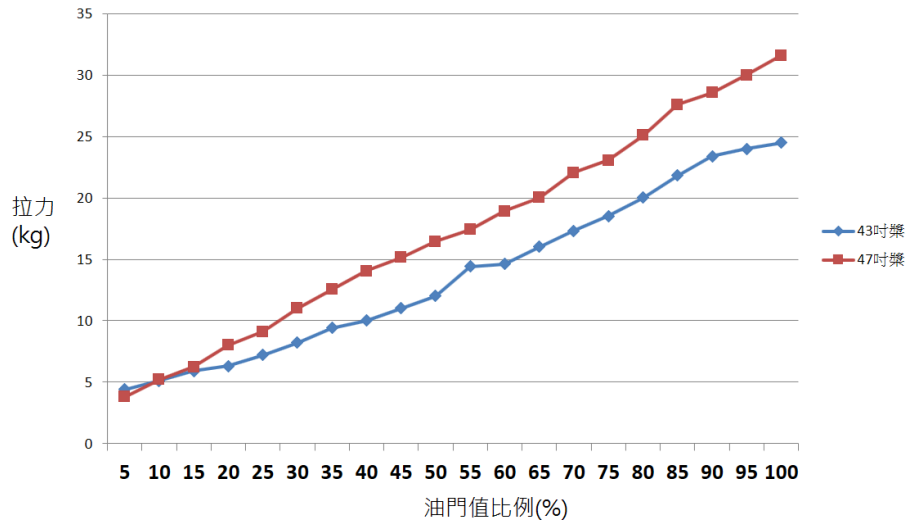


圖 2 馬達與槳葉拉力測台實驗數據

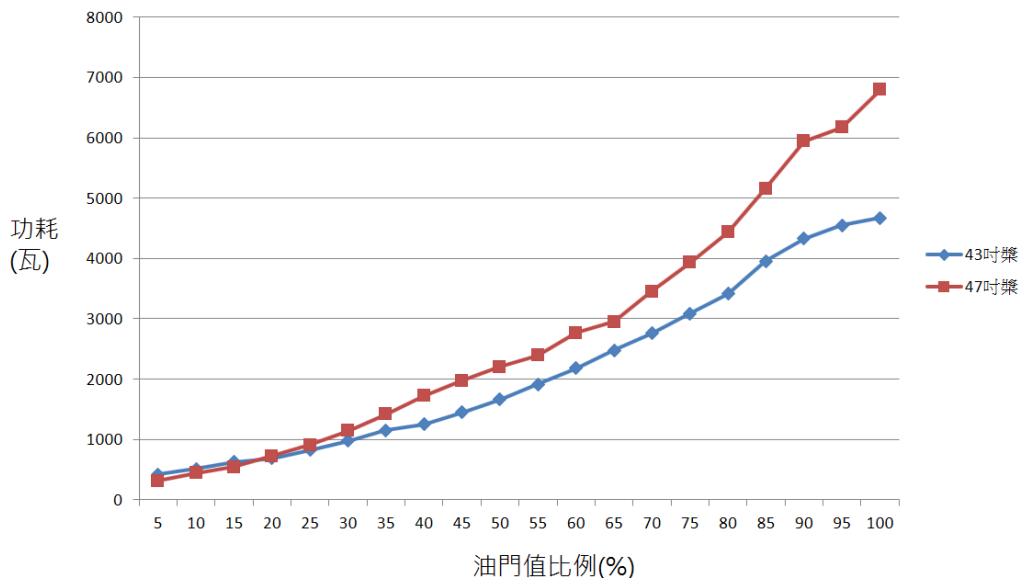


圖 3 馬達與槳葉拉力測台實驗數據

根據圖 2 與圖 3 可以看出馬達與槳葉的搭配上，分別在拉力及功耗的增加有不同的趨勢，透過數據比較分析，在得知無人機總起飛重量與多旋翼設計槳葉分佈，可以得知預計每組馬達在懸停時所需的拉力值為多少，採用不同的槳葉是否有較佳的功耗數據。當六旋翼無人機的總起飛重量在 102 kg 時，平均至各個馬達拉力為 17 kg，搭配 43 吋槳葉時的功耗約為 2,800 W，而採用 47 吋槳葉時的功耗約為 2,200 W，一航而言，電推槳油門

值落在 50~60 % 對於無人機是較佳的控制區域，綜合上述在拉力功耗、油門值數據考量下，本案例無人機槳葉以搭配 47 吋槳較佳。

常見的無人機電池分別為 18650 Li-ion、21700、Li-ion、鋰聚 Li-po，鋰電池在放電過程中電壓值並不是按比例乘時間變化的直線，而是曲線關係。電池的電壓越高就可以驅動更強的馬達轉動，不同的電芯個別在放電倍率、容量、電壓降、溫升都不同，依照整機動力需求分析在飛

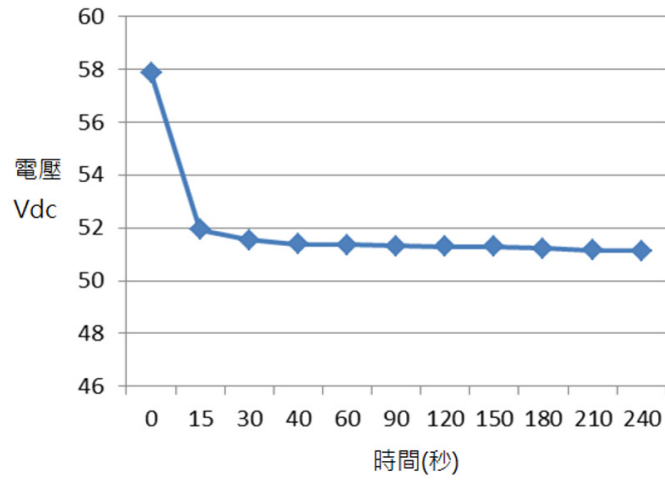


圖 4 Type A 18650 電芯抽載實驗數據

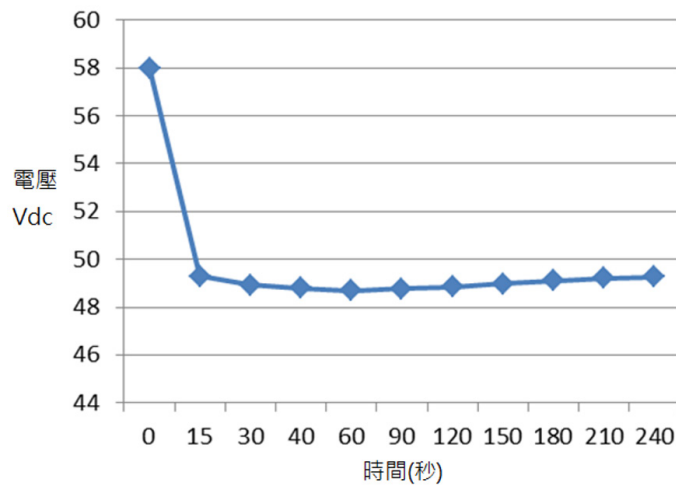


圖 5 Type B 18650 電芯抽載實驗數據

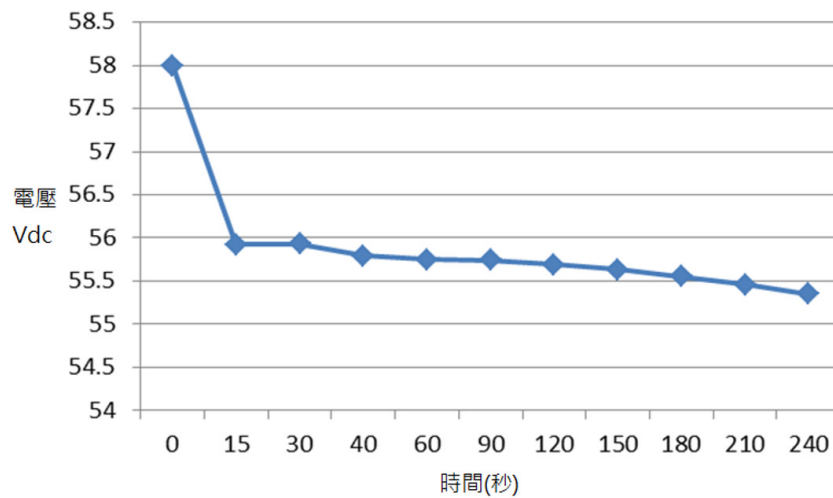


圖 6 鋰聚 Li-po 抽載實驗數據

行過程的需求去做電池組合搭配。此外，選用 Li-ion、鋰聚 Li-po 電池的不同在無人機瞬間動力輸出與電力供應會影響到飛行姿態響應，故需要進行最佳化組合。例如圖 4 與圖 5 為兩款同為 49ah 但不同電芯的 18650 Li-ion 分別抽載 80 A 情況下的放電曲線，由曲線資料顯示 Type A 電壓降幅小於 Type B，以此資訊採用 Type B 會比 Type A 較佳。圖 6 為鋰聚 Li-po 放電曲線圖，實際抽載後所能提供數據分析之資料：

根據圖 4 與圖 6 與可以看出使用 Li-ion、鋰聚 Li-po 電池在無人機飛行時，兩款電池在放電特性上的不同，無人機因馬達規格 KV 值對應到的電壓值會影響到輸出轉速，使用 Li-ion 與鋰聚 Li-po 當電壓降不同時，分別也會影響到無人機操控性。

在大尺寸多旋翼上，為了提升負載能力設計多組馬達及槳葉級數，連帶的也增加了電力供應需求，導致電池組數或容量增加，電池電芯的挑選搭配需要面對能量密度與放電率等問題，這些設計的動作皆會讓整機的重量增加，因此在設計階段就必須進行重量與推力、功耗等分析以達到需求應用的平衡點，有機會不破壞整機的槳葉推進輸出效率水準。所以增加一倍的載重，冗餘設計 (redundant design) 上無法單純的僅換馬達及槳葉規格。因此設計上會透過馬達槳葉拉力及功耗，電池能量密度、放電率、放電曲線分析來進行機架、馬達、槳葉及可載重重量的整體考量，設計出一款載重、續航力符合需求的無人機。

實驗與分析

無人機的機架根據需求製作不同適用的尺寸，不同的需求會影響槳葉的尺寸及電機的體積、重量。當升力需求較大，便會需要使用更大尺寸的槳葉，以及多軸多槳設計，當改變槳葉的尺寸以及馬達數量，機架尺寸便會隨著改變。一般設計旋翼無人機機身結構時，因考量整體重量，通常會採用輕物料製造為主，以減輕無人機的總起飛重量。而不同的機身構型以及抗風設計會造成無人機馬達槳葉組在動力輸出的衰減，動力與電池並不是按比例變化的直線，而是一條曲線關係，所以雖然先將馬達與槳葉透過拉力台進行測試，但實際飛行還需考量機身構型上的力效衰減，另外在起飛、懸停、側傾抗風、巡航等不同情況下以及飛行高度也都會影響整機功耗。上述馬達搭配槳葉或是不同種類電池在拉力測台實驗數據都是透過無人機運轉電量狀態監測在實驗上做數據紀錄，而在實際整機測試也是透過無人機運轉電量狀態監測來分析上述所產生的差異。

無人機的運轉電量狀態監測方面採用的是同 Pixhawk [1] 局部硬體架構，以及 ST 先進的處理器，同時搭載無人機 Mavlink2.0 [8] 通訊協定。無人機運轉電量狀態監測架構如圖 7 所示：

無人機運轉電量狀態監測硬體主要特徵如下：

- 1) 32 bit STM32F407 Cortex-M4F® core with FPU, 256 KB RAM
- 2) 8 Channel 16 位元電壓電流訊號擷取

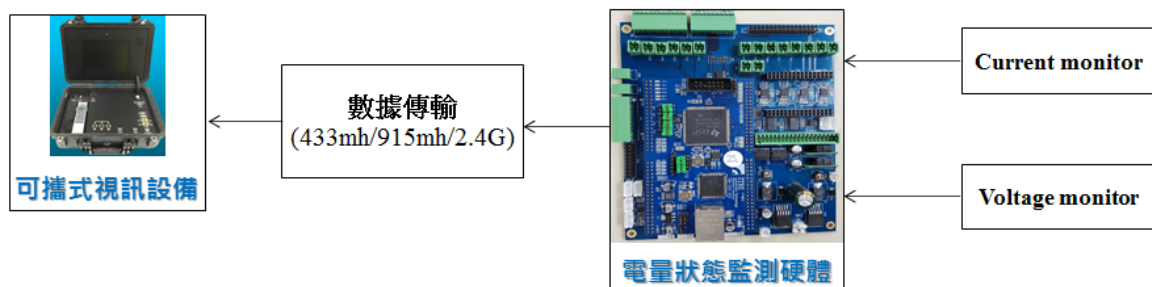


圖 7 無人機運轉電量狀態監測架構



圖 8 MagneLab split-core current transformer 實體圖

- 3) 14 Channel 12 位元電壓電流訊號擷取
- 4) 數據傳輸 (433 mh/915 mh/2.4G)
- 5) 資料取樣時間 50 ms

無人機的運轉電量狀態監測非常仰賴周遭的電壓與電流感測器回饋正確的數值，由於大型無人機使用的功耗高，回饋訊號容易被干擾，在電流量測上選用霍爾電流感測器，其具有較佳的線性度且抗干擾能力強，可以滿足無人機在功耗監測的需求，霍爾電流感測器以開口式結構為主，方便安裝於無人機上，本篇在實驗上我們選用

MagneLab split-core current transformer，此款霍爾電流感測器有自鎖扣緊結構，安裝上只要扣緊導體就能進行電氣佈線。圖 8 為 MagneLab split-core current transformer 實體圖。

MagneLab split-core current transformer 主要特徵如下：

- 1) Rated input up to 500 Amp DC
- 2) Accuracy at 1% at rated current
- 3) Off set voltage ± 20 mV max
- 4) Noise level less than 10mVp-p
- 5) di/dt response 3u sec (Typ.) at full scale

下列藉由無人機的運轉電量狀態監測模組來監測實驗時在起飛、懸停、側傾抗風、巡航等不同情況下的運轉電量狀態，根據圖 9 為起飛時的數據分析，透過飛控參數設定調整，可在 Loiter Mode(懸停模式) 下起飛，讓起飛時的油門推升值趨於平順緩慢，降低急拉升速率使功耗瞬間消耗較大。

根據圖 10 為懸停起飛後的數據分析，可觀察無人機在 Loiter Mode(懸停模式) 下，由側風對於整機馬達功耗的輸出影響，透過飛控參數設定調整，以及觀察飛行時在無側風情況下飛控對應到 PWM(Pulse-width modulation) 命令輸出每軸數值是否平均，有側風影響下飛控對應到 PWM(Pulse-

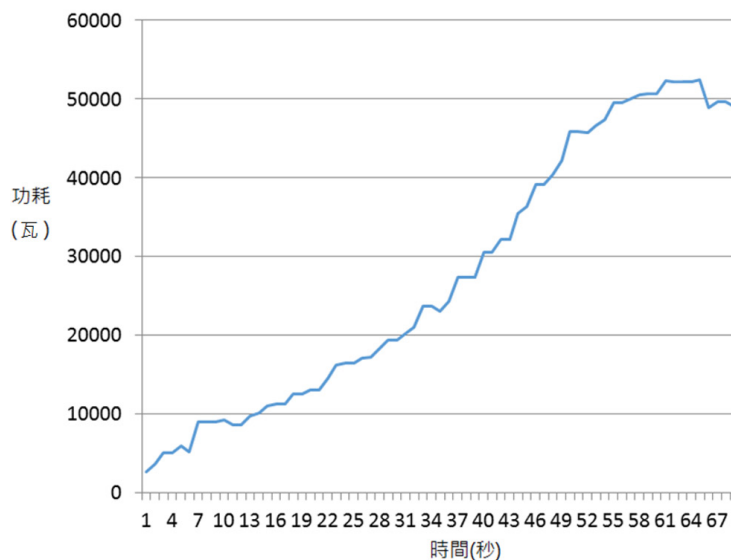


圖 9 起飛功耗實驗數據

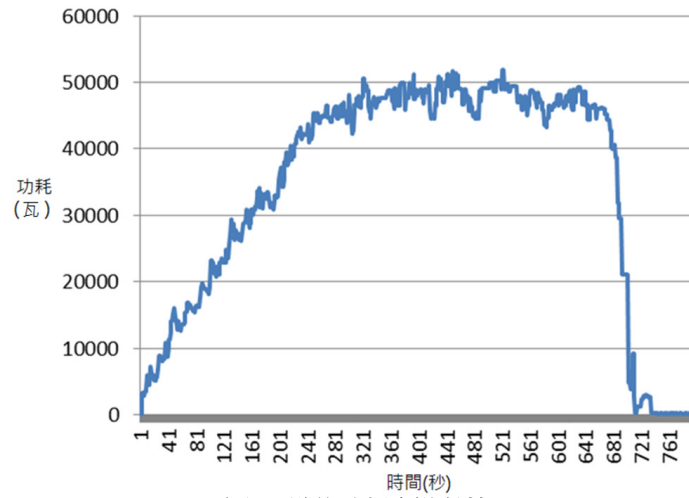


圖 10 懸停功耗實驗數據

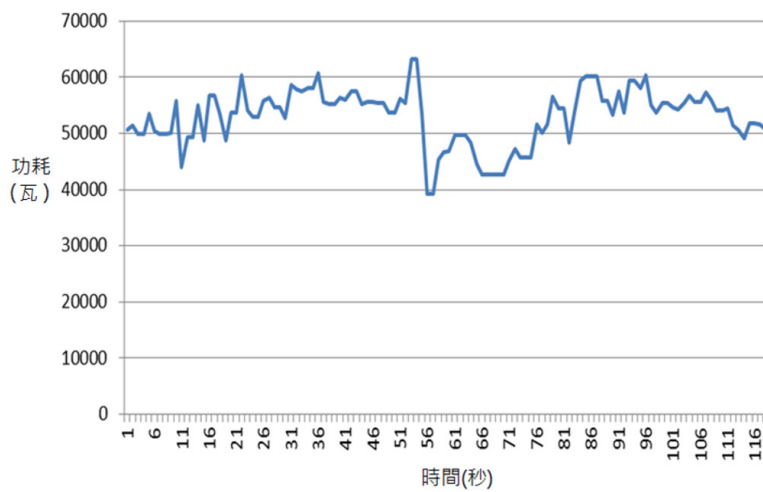


圖 11 抗風懸停功耗實驗數據

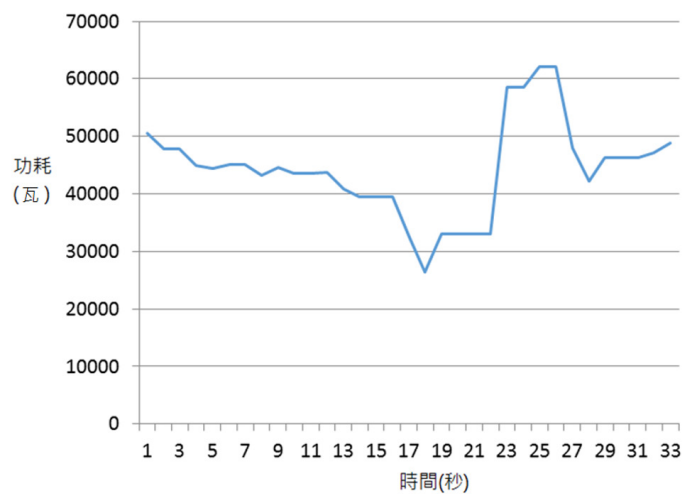


圖 12 瞬間抗風懸停功耗實驗數據

width modulation) 命令輸出每軸數值與功耗的數據分析。

根據圖 11 為無人機懸停時抗風的數據分析，圖 12 可觀察無人機在瞬間抗風時最大輸出功耗 63 kw 以及遇到上升氣流時功耗降低至 27 kw，透過上述分析數據進行飛控參數設定調整，反覆測試可得到最佳補償參數與分析無人機動態響應。

透過運轉電量狀態監測可以在無人機調機測試時分析在起飛、懸停、側傾抗風、巡航等情況下的最大、最小與平均功耗，由整機重量與平均功耗計算出力效比，進而計算出更準確的續航時間以及針對所搭配的電池放電特性去做飛控 PID (Proportional-Integral and Derivative Control) 參數調整、電壓增益參數補償等，可以由此運轉電量狀態監測技術輔助提升整機在調機時的穩定性。

在電池管理上也能透過電量狀態監測，針對電池抽載時間與抽載後電壓降等數據進行數據建檔，透過每次的紀錄資訊做比對分析，能得知電池衰減情況，也能在各別電池抽載輸出異常、電壓降異常、溫升異常時，傳送警示訊息至地面站，達到電池智慧安全管理。

我們可以進一步將飛控資訊與運轉電量狀態監測數據進行統合，運轉電量狀態監測技術不僅能輔助提升整機在調機時的穩定性，最重要的還能提升無人機的飛行安全性，透過功耗監測以及飛控姿態訊息，判斷天候狀況對於飛行安全影響以及各別無人機馬達功耗是否異常，並傳送警示訊息至地面站，依照團隊無人機定義的飛行安全準則 SOP，無人機將進行自動返航與降落，可達到飛行自動預警功能，而在未來發展需求下，自動預警並不能完全滿足無人機計畫需求，我們將發展出能自動預警以及智慧安全管理，前期我們根據運轉電量狀態監測模組將數據回傳至地面站上，Mission Planner [9] 地面站與 Python script [10] 進行無人機任務規劃管理，已完成大型無人機自動預警以及智慧安全管理前期功能驗證，後續與下一期無人機基礎設施維運計畫會持續朝這個方向精進。

結論

高負載型的無人機在未來的商業活動中日趨重要，無人機遞送服務將會是帶動交通與倉儲物流的發展變革，另外關鍵基礎設施也開始採用無人機執行空中巡檢，以強化設施 / 設備的日常運作及安全管理工作，無論是物流遞送、載人運送等應用都是指日可待。大型商用無人機在未來的發展除了要更加有效率的動力系統外，更加穩固的機身、更安全的飛行控制器系統、演算法，以及導入更加安全的遠端加密系統，都是目前研究的目標，所以在無人機調機測試時，透過運轉電量狀態監測技術來分析功耗、響應等數據能對於上述有很大的幫助。

誌謝

感謝工業技術研究院「長航時複合翼無人機創新關鍵技術」(K301AR3C10) 對本研究的支持，特此致謝。

參考文獻

- [1] <https://pixhawk.org/>
- [2] <https://ardupilot.org/>
- [3] <https://www.dronecode.org/>
- [4] <https://zh.wikipedia.org/wiki/無人航空載具>
- [5] 台灣無人機應用發展現況與趨勢，熊治民，https://ieknet.iek.org.tw/iek rpt/rpt_more.aspx?actiontype=rpt&indu_idno=1&domain=52&rpt_idno=28868469
- [6] ME'scopeVES, VES-4000 Basic Modal Analysis, 2013.
- [7] ISO 7626-5, "Experimental determination of mechanical mobility – Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure", First edition 1994.
- [8] <https://mavlink.io/en/>
- [9] <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>
- [10] <https://ardupilot.org/planner/docs/using-python-scripts-in-mission-planner.html>