

# 遙控無人機系統特點剖析

黃元宏

為明確遙控無人機的管理方式，交通部及民航局借鑒美國、歐盟、日本等國家立法經驗與國際民航組織規範，考量國內環境與利害關係人意見後，融合公共安全、社會秩序、飛航安全並兼顧產業發展，以「民用航空法」遙控無人機專章對遙控無人機之註冊、檢驗、人員測驗、操作限制、飛航活動申請及保險等事項均有規範與相應罰責，於109年3月31日起實施。自此，民航界迎來一班重量不等、型式各異而且數量眾多的新朋友 - 遙控無人機系統 (Remotely Piloted Aircraft System)。本文以民航局「無人機學科測驗指南」的民航通告為基礎，從技術視角介紹遙控無人機系統的硬體組件，並與載人航空器系統進行對比。

## 無人機構造與分級

依民用航空法規的定義，「遙控無人機系統」係指遙控無人機(機體)、遙控設備(遙控器或地面導控站)、通訊及控制信號鏈路以及其他附屬裝置組合而成的完整系統，在民間多以「無人機」概括稱之。無人機包括無人飛機、無人直昇機、無人多旋翼機三種主要構造，亦有結合無人飛機與直昇機、多旋翼而成的複合式無人機，如eVTOL無人機等。

無人機的重量範圍很廣，小到數十公克

的「黑黃蜂」特戰無人直昇機，大到與波音737相仿的MQ-4「全球鷹」無人偵察機。「最大起飛重量」一直是民航管理的重要劃分依據，無人機自然也不例外，從小到大分別為：250公克以上的無人機飛行前要註冊、2公斤以上無人機操作時需要考操作證、25公斤以上的中型無人機要檢驗裝置與設備的安全性，150公斤以上的無人機就被稱作是大型無人機，此時可能無人機上面沒有駕駛員，但酬載卻是活生生的旅客(乘員)。

## 無人機硬體組成

雖然不同構造的無人機從硬體規格到使用目的都有顯著的差別，但無人機基本上由機體(架)、動力系統(電池或燃料)、馬達、螺旋槳(飛機)/旋翼(直昇機與多旋翼)、無線通訊系統與飛行控制系統、導航系統等部分所組成，系統與各組件間需要相互協調，才能成為穩定的飛行平台，為了進行不同的任務，平台上會搭載各種不同的功能酬載，諸如：相機、熱像儀、農藥、貨物甚至乘員等。無人機硬體包括電池、電動馬達、電子調速器、螺旋槳/旋翼、接收發射機、慣性量測單元、姿態及航向參考系統、電子羅盤等。

## 電池

大多數中、小型的無人機因槳葉/旋翼

尺寸較小，大多數使用鋰電池作為動力來源，少部分使用內燃機。目前鋰電池最大的技術瓶頸仍在於電池能量密度僅有燃油的1/40，而且燃料燒完了飛機重量會變輕，電用完了還得帶著空電池飛到目的地，對飛行時間10幾小時的民航機，實在不划算。有人航空器使用的電瓶由早期的鉛酸電瓶至鎳鎘電瓶，再發展到最新的鋰離子電瓶，鋰電池在民航使用之初也發生過APU電瓶超溫的意外事件，該型機被民航主管機關停飛長達10週之久。

#### ● 電壓與電池單元

電池芯數的串連數 S(series) 決定電池電壓值 V(伏特) 數，舉例來說 3S 的鋰電池就代表該電池由 3 片電池芯組成，一個典型鋰電池芯的額定電壓為 3.7V(滿電電壓為 4.2V)，故 3S 的電壓為  $3 \times 3.7 \text{ V} = 11.1\text{V}$ 。

#### ● 容量

電池容量為所有電池芯數並聯後電量的總和，其單位為 mAh(毫安培小時)，如 1000mAh 即表示以 1000 毫安培電流要充電 1 小時才能充飽。大容量的鋰電池雖然可以提供較多的電力，但重量較重，也常會遇到散熱不良等問題。無人機技術手冊均要求在規定的溫度下使用鋰電池，並依維護手冊的保養程序進行充放電。

#### ● 放電倍率

電池放電倍率以 C 數代表，1C 就即代表電池的電量耗盡需要 1 小時，100C 則代表 1 小時  $\times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒} / 100 = 36 \text{ 秒}$  就能把電池電量耗盡，通常標示在電池規格上的 C 數，代表電池最大瞬間電流輸出的能力，而不代表能持續性高 C 數放電。過大

的放電率所造成的高電流與高熱量易導致電芯或電線燒毀。充放電循環次數超過規定次數時，電池效能將大幅衰減。

#### 電動馬達

無人機使用的電動馬達分為有刷與無刷馬達二種，以無刷馬達較為普遍。使用時要注意馬達規格與螺旋槳及電子調速器的搭配是否合於規格，啟動前應檢查外觀檢查是否軸心偏移，馬達內強磁是否吸附異物，接線是否鬆脫，手動嘗試轉動是否有異音或阻滯感等。檢查馬達前切記先卸除螺旋槳／旋翼，以避免危險。

#### ● KV 值

KV 值是代表馬達在無負載情況下，供應每一伏特 (1V) 電壓時每分鐘的轉數，亦可視為馬達轉數值。高 KV 代表低電壓能提供較高轉速，通常用在小型或輕型無人機上可靈活反應操作指令；反之低 KV 值代表需要較高電壓推動，其扭力也越大，適合搭配螺距較高的葉片達到載重的目的。

#### ● 標準電壓與最大電壓

標準電壓為馬達一般工作的額定電壓值，而最大電壓為馬達能承受之最大電壓值，以電壓值 V 為單位，若超過最大電壓容易造成馬達超轉、過載、高溫，甚至燒毀。這兩個數據通常標示在馬達規格書中，以搭配合適之電子調速器與電池，避免危險。例如電子調速器標示工作電壓為 1-4S，即表示最高工作電壓不可超過  $16.8\text{V}(4.2 \text{ V} \times 4 = 16.8)$ 。

#### ● 最大電流

最大電流為馬達能承受之最大電流值，以

安培值 A 為單位，馬達轉速越快，所需電流值越大，若超過最大電流時容易造成馬達過載、高溫，甚至線圈燒毀。通常會標示在馬達規格書。需搭配合適之電子調速器與電池，避免危險。

### 電子調速器

- 電子調速器是由積體電路組成，用來控制電動馬達轉速的裝置，又稱為電子變速器或簡稱電變。電子調速器早期使用類比電路，近年來均已改為數位式控制，能更有效的控制馬達轉速，使無人機能依據指令快速調整動力輸出。電子調速器是較為敏感的電子裝置，應注意在良好環境下存放。

- 電子調速器規格

電子調速器的重要規格是電壓容許值 V 與電流容許值 A，其中電壓值與電源端（電池）相關，電流值則與使用元件規格有關，並與電動馬達規格匹配。為了避免電子調速器故障，通常會對設計的工作電流增加 50% 的冗餘量，避免飛行時因瞬時大電流造成過熱或燒毀。

- PWM 調變控制

電子調速器接收來自飛控系統的 PWM (pulse-width modulation, 脈波寬度調變) 訊號，再將指令轉換成 3 相交流電輸出以控制無刷馬達的轉速，控制方式較為簡單。與有人航空器相比，飛機或直昇機上的自動駕駛儀或線傳飛控系統採用電液伺服致動器，因同時要控制電氣與液壓兩種不同物理量，作動上複雜許多，系統設計時也容易產生回路振蕩等穩定性問題。

### 螺旋槳/旋翼

無人飛機上將動力轉換為推力的裝置稱為螺旋槳，無人直昇機/多旋翼機上的「螺旋槳」因為同時可提供升力，故稱為旋翼。

- 標示方式

螺旋槳/旋翼規格，通常會以四碼數字表示型號，標注於葉片正面內緣處。前兩碼代表螺旋槳葉片的直徑（長度），後兩碼則為螺距規格，單位均為英寸。例如：型號 9455 的槳，代表葉片直徑 9.4 英寸，螺距 5.5 英寸。

- 旋翼槳葉數量與效率

根據無人機的載重與飛行性能要求，槳葉數量會有所不同。槳葉數量與空氣動力效率有關，槳葉愈多彼此間距離愈近，空氣動力的干擾愈大而降低空氣動力效率，但可以從動力來源（電動馬達或發動機）中汲取較多的能量。整體而言，槳葉數越少，轉速愈大而空氣動力效率越大；槳葉數越多飛行越穩定，且能承載較大的重量。此特性與螺旋槳飛機相似，以二次大戰時期的英國噴火式戰鬥機為例，隨著 Merlin 發動機功率逐漸增大，槳葉也由 3 槳至 4 槳而至 5 槳，故發動機功率越大，就會採用葉數更多的螺旋槳來與之匹配。

### 接收發射機

無人機系統裡的接收機，通常是指能與地面控制站遙控系統連線，接收上行鏈路的控制信號，接收機使用遙控協議需與地面控制站搭配對頻。發射機通常指影像圖傳系統，將酬載影像使用下行鏈路傳回地面接收站。

### ● 使用頻段

無人機接收 / 發射訊號有多種頻段可以使用，包括 Wi-Fi、3G/4G/5G 行動通訊、ISM 工業頻段等等，主流的數位遙控頻率有 2.4Ghz、5.8Ghz，影像圖傳頻率則為 5.8Ghz。

### ● 訊號延遲或鏈路失效

發射功率與天線靈敏度與指向性亦影響飛行距離及訊號延遲等問題。操作時如遇到上、下行鏈路或影像鏈路失效，都要立即執行緊急處置程序，避免發生事故。

### 慣性量測單元(IMU)

慣性量測單元 (IMU, Inertial Measurement Unit) 包括三軸陀螺儀、三向加速計與三軸磁力計等慣性傳感器，利用機體不同軸向的加速度與旋轉角速度，配合飛控系統解算出無人機俯仰、滾轉與偏航等姿態訊號。IMU 可以晶片型式整合於飛控系統板或單獨封裝。

### 姿態及航向參考系統(AHRS)

姿態和航向參考系統 ( AHRS, Attitude and Heading Reference System ) 由 IMU 的微機電式慣性傳感器與再加上三個軸向的磁力計及處理數據的微控制器組合封裝而成，以濾波方式融合不同來源的感測數據，提供姿態與航向資訊。有人航空器在機械過渡至電子的時代，航電上也使用過 AHRS 這個名詞，只是採用的是機械類比式元件。

### 慣性導航系統 (INS) 與組合導航

慣性導航系統是一種自主式 (self-contained) 的導航系統，使用前先進行初始對準，再由系統中的陀螺儀與加速計經過積分運算來測量運動體的慣性位置變化。雖然

3C 產品上提供姿態功能的裝置有時也被稱為慣性導航系統，實際上具備足夠航行精度的自主式慣性導航系統因感測器價格昂貴，通常僅安裝在軍機、越洋的民航客機及特殊用途的無人機上。消費型無人機上的微機電式慣性量測元件經過二次積分後的累積誤差過大，無法用來計算無人機位置，普遍的作法是將衛星導航 (GNSS) 與慣性導航資料相互融合，稱為「組合導航」。

### 電子羅盤

由三軸磁力計與溫度 / 姿態等補償元件及微控制器組合成單一裝置稱為電子羅盤，可提供精準的航向資訊，通常獨立安裝在適當位置或安裝多個備援，以防護無人機飛行時的電磁干擾。

### 無人直昇機與多旋翼機特點

無人多旋翼機與無人直昇機都是採用旋翼作為升力與推力的來源。二個旋翼以下者稱為直昇機，三個旋翼以上者稱為多旋翼，兩者操作特性類似。無人直昇機因變距結構較為複雜，通常需要尾旋翼作為扭力平衡。值得注意的是，無人直昇機很少採用有人直昇機複雜多變的關節式旋翼頭，而是以平衡桿或角速率陀螺回授來達成平衡；無人多旋翼機外型毫無空氣動力可言，先天不穩定而必需仰賴飛控系統不停調整才得以持續飛行。以下對無人多旋翼機的重要組件與飛行模式進行說明。

### 飛控系統

飛控系統是無人多旋翼機的控制中樞。20 年前的飛控系統以工業電腦為架構，故也稱為飛控電腦。近 10 年多採用體積小、重量輕、成本低的嵌入式系統，由一片或數

片電路板封裝而成者稱為飛控板。飛控系統整合 IMU (飛行姿態感知)、磁力計 (航向感知)、氣壓高度計 (高度計算) 與選配的 GNSS 模組及核心的控制電路所組成, 可提供不同的飛行模式及緊急時自動返航、懸停等功能並保持穩定的飛行姿態, 並提供無人機執行任務工作時所需的伺服或動力控制訊號輸出。

### 衛星導航系統

衛星導航系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 是覆蓋全球的自主地利空間定位的衛星系統, 可運用小巧的電子接收器獲得它的位置資訊 (經度、緯度和高度), 並且經由衛星廣播沿著視線方向傳送的時間訊號精確到 10 米的範圍內。接收機計算的精確時間、位置、橢球高 (GNSS 高度) 以及對地移動速度, 以作為無人機飛行的參考資訊。目前全球性的衛星導航系統, 有美國的全球定位系統 (GPS)、俄羅斯的格洛納斯系統 (GLONASS) 和中國大陸的北斗衛星導航系統 (BDS) 及歐盟的伽利略定位系統 (GALILEO)。使用時可同時接收 2 個以上的衛星系統信號, 定位更為精確、可靠。民用衛星系統信號微弱且容易受到遮蔽或干擾, 無人機使用時宜避開強波設施或大樓林立及大面積玻璃帷幕等區域, 以免影響接收效果。

### 環境避障

無人多旋翼機因可懸停飛行與快速變換姿態, 常裝有不同的避障裝置以防止與建築物或障礙物接近或碰掉, 如主動式的超音波、雷達、紅外線、飛時測距以及被動式的光流、影像等。不同避障裝置的工作原理均有其優、缺點, 開啟前應詳閱原廠使用說明並瞭解其功能限制, 且不可完全依賴其避障

能力, 以保障操作安全。

### 操作模式

無人多旋翼機的飛控系統通常可提供數種不同的飛行模式以配合實務應用。此處說明控無人機術科測驗時可能使用到的模式。

#### ● 手動模式

不借助任何飛控輔助與穩定功能, 完全交由操作人自由操控無人機之三軸滾動與與行進方向的操控方式, 此時無人機沒有任何定位 / 定高 / 定向 / 自動恢復水平飛行等功能。

#### ● 姿態模式

不借助任何定位單元, 如衛星定位或視覺定位等等之飛行模式, 但仍依靠陀螺儀穩定機身水平與氣壓高度計維持飛行高度, 此時無人機水平位置無法鎖定。

#### ● 定位模式

使用衛星導航系統 (GNSS)、即時動態定位 (RTK)、後處理動態定位 (PPK)、視覺定位等多種輔助系統, 使無人機得以穩定於定點停懸、鎖定航向飛行、與自動導航之飛行模式。定位模式下, 無人機具有最大穩定與安全性。

#### ● 任務模式

規劃航線並上傳至無人機飛控系統, 使其按照指示航點飛行。任務模式涵蓋了定位模式, 並採用非自主飛行方式執行任務, 期間均為自動飛行, 操作人不須介入操控。例如, 農田噴灑, 智能航點飛行等。在這個模式下雖然無人飛機處於自主狀態, 但需要由操作人對其持續監控並在必要時隨時接手控制。

## 無人飛機的特點

固定翼的無人飛機和使用旋翼的無人直昇機和無人多旋翼機的飛行原理完全不同，無人飛機依靠機翼前進的速度產生升力，起飛和降落需要跑道或發射 / 回收系統，旋翼機則不需要透過持續向前的運動產生升力，簡單的場地就可以起降。從機械的角度來講，固定機翼的效率遠比複雜的旋翼變距或轉速改變機構為高，故與無人直昇機與無人多旋翼機相比，無人飛機可以於較長的時間以更快的速度飛行。無人飛機動力來源除了無刷電動馬達外，中、大型無人飛機也常使用往復式或渦輪噴射或渦輪螺旋槳發動機，以達到大推力與長航程的性能要求，此時往往會以發動機附件的方式配置發電機，提供酬載及伺服舵機長時間工作所需電力。

基於操作特點，特別介紹無人飛機上的兩種特殊組件－伺服舵機與空速計，並對飛控系統的不同模式作簡要說明。

### 伺服舵機(Servo)

無人飛機是利用伺服舵機擺動操縱面來達到所想要的飛行姿態，伺服舵機亦為噴灑、投擲、收放起落架等作動機構，亦可用於旋翼機旋翼之變距。

#### ● 伺服作動

伺服舵機的運作原理比前述無刷電動馬達簡單：飛控系統輸出指令訊號給伺服舵機，舵機上的擺臂移動到所指定位置；擺臂通過連桿與操縱面連接在一起，進而控制操縱面的擺動。

#### ● 誤差反饋

電位計與連桿機構相連可提供操縱面實際

位置，與飛控系統所輸出的指定位置相比較後，將誤差反饋進行補償調整直至誤差為零。伺服舵機只有在飛控系統進行操縱面位置調整時才會作動，其他時間舵機都是保持靜止狀態，此點與無人直昇機或多旋翼機上，必需不停轉動以提供旋翼動力的電動馬達不同。

### 空速計

空速管（又稱皮托管）經由測量前方開口的總壓與周圍開口的靜壓來計算出飛行器相對於空氣的速度也就是「指示空速」。對慢速的小型無人飛機而言，空速計並非絕對必要，然而它提供的「指示空速」比 GNSS 提供的「地速」，更能反應飛機當下的空氣動力特性。在有風的環境或起飛降落的低速階段，空速計可使飛控系統計算出較精準的操作響應。

### 操作模式

無人飛機的飛控系統能提供多種飛行模式，不同的飛控產品對類似功能的飛行模式或許有不一樣的稱呼，也可能將幾個模式結合在一起運用。無人直昇機 / 多旋翼機的飛控系統也可能提供類似的模式。

#### ● 手動模式

這種模式由操作人直接控制伺服舵機的輸出，飛行控制系統不介入操控迴路。當飛機的感測器如姿態訊號等發生故障時，手動模式可以用於安全返航。

#### ● 穩定模式(自穩模式)

和手動模式一樣，操作人可直接控制伺服舵機的輸出，放掉遙桿後飛機會自動平飛，此在自穩模式下，俯仰與滾轉會受到一些安全限制。

### ● 線傳飛控模式 (FBW)

此名稱來自軍用機與民航客機完全以電腦控制飛行操作的模式。模式分為 FBW A 與 FBW B 兩種，操作人不直接控制伺服舵機的輸出，而是利用控制桿下達俯仰與滾轉的指令，由飛控系統決定舵機的操作量與後續修正，並有最大俯仰與滾轉角度的限制。FBW A 必須手動控制油門且無法自動保持高度，FBW B 可以利用油門控制目標空速並保持目前高度。

### ● 定高模式 (Alt Hold)

在除了 FBW B 的先前幾個模式中，儘管飛行姿態很平穩，飛行高度仍然會因為氣流擾動等原因而有忽高忽低的情況。這個模式允許操作人設定一個高度目標值讓飛機保持在該高度飛行。

### ● 航向鎖定模式

類似於 FBW B 加上固定航向的效果，飛機會保持某特定的航向飛行，有時也被稱為巡航模式。遠距離 FPV 常配合觀察員所提供的周圍環境資訊作為狀況警覺，利用此模式指向某個目標飛行。

### ● 任務模式

與多旋翼機任務模式相同，可依遙控設備事先設定的航點飛行，高階的機種甚至可以作到自動起降。此模式下雖然飛機處於自主飛行狀態，依據民航法規，操作人此時必需持續監控，遇到緊急情況時才能即時接手處置。

## 結語

遙控無人機早期僅限於國防軍事用途，執行危險或性質單調的 3D(Danger, Dirty, and

Dull) 任務，今年 3 月起開打的烏俄戰爭，更突顯了軍用無人機在未來戰場中不可忽視的地位，以及民用無人機如何在戰爭中將生活條件與戰鬥條件一致。目前消費型無人機的價格約在台幣數千至數萬元間，一般民眾均可輕易購取。但隨著無人機使用人口增加，自然造成管理上的種種問題，特別是機場四周不合法的遙控無人機活動，不但嚴重危害飛航安全，機場運作中斷也影響了運輸效率與大眾權益，這也是目前民航業界對遙控無人機最普遍的認知。

為了使讀者對新興的無人機技術能有多一層的認識，本文依次檢視遙控無人機基本概念、遙控無人直昇機與多旋翼機及遙控無人飛機的硬體技術與使用特性。可以想見，未來無人機將不止侷限於空拍、農噴、監視等用途，而將橫跨至貨運、客運等傳統有人航空器的業務範圍，雖然路途上仍有許多的險阻，但或許哪一天，公司裏會突然多出一個「無人機事業處」的新部門。✈